

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

ADRIK OLIVEIRA MACIEL

**LÓGICA *FUZZY* APLICADA À ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE FUNDAÇÕES
POR ESTACA HÉLICE CONTÍNUA**

MACAPÁ-AP

Fevereiro / 2019

ADRIK OLIVEIRA MACIEL

**LÓGICA FUZZY APLICADA À ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE FUNDAÇÕES
POR ESTACA HÉLICE CONTÍNUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Amapá.

Orientador: prof. Me. Fábio Araújo Pereira

Co-orientador: prof. Dr. Fernando Saboya
Albuquerque Jr.

Macapá

2019

ADRIK OLIVEIRA MACIEL

**LÓGICA FUZZY APLICADA À ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE FUNDAÇÕES
POR ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Amapá.

Orientador: Prof. Me. Fábio Araújo Pereira.

Coorientador: prof. Dr. Fernando Saboya Albuquerque Jr.

Aprovado em ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Fábio Araújo Pereira – Orientador
Universidade Federal do Amapá – UNIFAP

Prof. Dr. Fernando Saboya Albuquerque Jr. – Coorientador
Universidade Federal do Norte Fluminense - UENF

Prof. Esp. Luis Henrique Rambo
Universidade Federal do Amapá – UNIFAP

Prof. Me. Adenilson Costa de Oliveira
Universidade Federal do Amapá – UNIFAP

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Eliane Oliveira e Arim Maciel, pelo amor, carinho, apoio e principalmente por acreditarem que eu fosse capaz de chegar até aqui. Muito obrigado por tudo!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e pela oportunidade de estar aqui crescendo e melhorando a cada dia como ser humano.

Agradeço aos meus pais, Eliane Oliveira e Arim Maciel, por terem cuidado tão bem de mim todos esses anos, e por nunca terem deixado nada importante faltar durante a minha criação.

Agradeço ao docente orientador prof. Fábio Pereira pelo apoio e paciência durante as orientações deste trabalho.

Agradeço ao docente coorientador prof. Fernando Saboya pelo apoio e pela colaboração na execução deste trabalho.

Agradeço aos profissionais que se dispuseram a responder o questionário on-line e contribuir para a elaboração deste trabalho.

Agradeço à Prefeitura do Campus Marco Zero do Equador e à North Com Engenharia por terem gentilmente cedido os dados acerca das provas de carga estática das estacas do Hospital Universitário da UNIFAP.

Agradeço aos docentes do curso de Engenharia Civil da UNIFAP, pela dedicação e esforço para transmitir seus conhecimentos aos alunos.

Agradeço aos colegas Daianne de Almeida, Fábio Lopes e Jennifer Pinheiro, membros do grupo Relâmpago, pelo companheirismo durante o curso e por terem conseguido aturar minha chatice nos infindáveis trabalhos em grupo ao longo desses cinco anos...

Agradeço a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para que este trabalho fosse finalizado.

RESUMO

A segurança é um dos aspectos mais importantes para as fundações, elementos cuja função é a transmissão ao solo das solicitações atuantes na superestrutura das edificações. Atualmente, são utilizados fatores de segurança globais e parciais previstos em norma, além de estudos de confiabilidade probabilísticos para realizar a verificação da segurança das fundações. Este último, mais eficaz, do que os fatores de segurança para verificar a segurança, é função da variação dos valores de resistências e solicitações atuantes na estrutura, está diretamente relacionado à probabilidade de ruína das fundações, aspecto fundamental a ser considerado na elaboração de projetos. Para o caso das estacas hélice contínua, amplamente executadas no Brasil e no mundo, entretanto, sabe-se que fatores relacionados ao processo executivo, como a pressão de injeção de concreto e a velocidade de perfuração do trado, podem influenciar na capacidade de carga, no desempenho, na qualidade, e, por conseguinte, na segurança e confiabilidade das estacas. Considerando esse fato, propôs-se neste trabalho a elaboração de um sistema baseado em Lógica *Fuzzy* cuja finalidade é a obtenção de uma variável que possa quantificar a confiabilidade de fundações do tipo estaca hélice contínua considerando dados de projeto e de execução. O sistema utiliza conceitos da Lógica *Fuzzy*, ciência do século XX considerada evolução da lógica clássica e que tem como principal característica a utilização de informações vagas, imprecisas ou subjetivas para a modelagem de problemas. Para a obtenção de informações de natureza qualitativa relacionadas às estacas, foi elaborado um questionário on-line a profissionais da área da Geotecnia, e que serviu de auxílio para a elaboração do sistema. O sistema *Fuzzy* elaborado neste trabalho possui como dados de entrada valores relacionados a parâmetros de projeto e execução das estacas hélice contínua, e como dados de saída o valor da variável de confiabilidade *Fuzzy*, numericamente similar ao índice de confiabilidade probabilístico. Houve a necessidade de divisão do sistema *Fuzzy* em duas partes. A primeira, denominada “Etapa 01”, é um sistema *Fuzzy* que obtém valores de parâmetros resultantes a partir da inserção dos valores dos parâmetros iniciais, que são os dados de projeto e execução das estacas. A segunda, denominada “Etapa 02 - principal”, é um sistema *Fuzzy* que obtém a variável de confiabilidade *Fuzzy* a partir dos parâmetros resultantes obtidos da Etapa 01. Para verificar os resultados do sistema, foram analisados três casos distintos baseados no projeto das estacas do Hospital Universitário da Universidade Federal do Amapá. Em seguida, foi mostrado o comportamento da confiabilidade por meio de gráficos para o caso mais desfavorável analisado e quais parâmetros podem ser modificados para a melhoria da

confiabilidade *Fuzzy*. Além disso, foi realizado o estudo de confiabilidade probabilístico das estacas do Hospital Universitário para comparação com os valores obtidos pelo sistema *Fuzzy*. Concluiu-se que o sistema *Fuzzy* apresentou resultados satisfatórios para os casos analisados, embora haja aspectos a serem aprimorados para que o mesmo possa ser utilizado de forma confiável.

Palavras-chave: confiabilidade de fundações, estacas hélice contínua, Lógica *Fuzzy*, sistema *Fuzzy*, confiabilidade *Fuzzy*.

ABSTRACT

Safety is one of the most important aspects for foundations, elements whose function is the transmission to soil of the requests acting on the superstructure of the buildings. Currently, global and partial safety factors are included in the standard, as well as probabilistic reliability studies to verify the safety of foundations. The latter, more efficient than safety factors to verify safety, is a function of the variation of resistance values and demands acting on the structure, and is directly related to the probability of ruin of foundations, an important aspect to be considered in the elaboration of projects. For the case of Continuous Flight Auger piles, currently performed in Brazil and around the world, however, it is known that factors related to the executive process, such as the concrete injection pressure and the drilling speed of the work, can influence the load capacity, on performance, on quality, and therefore on the safety and reliability of piles. Considering this fact, it was proposed in this work the elaboration of a *Fuzzy* system whose purpose is to obtain a variable that can quantify the reliability of continuous flight auger piles considering design and execution data. The *Fuzzy* system uses concepts of *Fuzzy* Logic, 20th century science considered evolution of classical logic and whose main characteristic is the use of vague, imprecise or subjective information for modeling problems. In order to obtain information of this nature related to the piles, an online questionnaire was developed for professionals in the area of Geotechnics, and that served as an aid to the elaboration of the system. The *Fuzzy* system developed in this work has as input data values related to design and execution parameters of the continuous flight auger piles, and as output data the value of the *Fuzzy* reliability variable, numerically equal to the probabilistic reliability index, to facilitate the comparison between these values. There was a need to divide the *Fuzzy* system into two parts. The first, called "previous system", is a *Fuzzy* system that obtains values of parameters resulting from the insertion of values of the initial parameters, which are the design and execution data of the piles. The second, called "main system", is a *Fuzzy* system that obtains the *Fuzzy* reliability variable from the resulting parameters obtained from the previous system. To verify the results of the system, three distinct cases were analyzed based on the Continuous Flight Auger piles project of the University Hospital of the Federal University of Amapá. Then, it was shown the behavior of the graphs for the most unfavorable case analyzed and how these values can be changed for the improvement of the value of the *Fuzzy* reliability variable. In addition, the probabilistic reliability study of the piles of the University Hospital is carried out for comparison with the values obtained by the *Fuzzy* system. It was concluded that

the *Fuzzy* system presented satisfactory results for the analyzed cases, although there are aspects to be improved so that it can be used reliably.

Keywords: reliability of foundations, Continuous Flight Auger Piles, *Fuzzy* Logic, *Fuzzy* system, *Fuzzy* reliability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ruptura de diversas formulações teóricas.....	35
Figura 2 Maquinário para execução de estacas hélice contínua.....	38
Figura 3 Localização dos sensores de monitoramento da estaca hélice contínua no maquinário	39
Figura 4 Exemplo de relatório de monitoramento de uma estaca hélice contínua.....	40
Figura 5 Fases de execução de uma estaca hélice contínua	41
Figura 6 Posicionamento da armadura de uma fundação por estaca hélice contínua	42
Figura 7 Etapas de elaboração de um sistema Fuzzy	50
Figura 8 Estratégia de raciocínio Fuzzy de Mamdani para duas regras	52
Figura 9 Esquema da etapa 01	55
Figura 10 Esquema da etapa 02 - principal	56
Figura 11 Ambiente do programa MATLAB® para Lógica Fuzzy.....	59
Figura 12 Hospital Universitário da UNIFAP em fase de construção	84
Figura 13 Relatório de sondagem do furo 29/34 do local da obra	85
Figura 14 Janela de regras do sistema Fuzzy	91
Figura 15 Janelas de regras com os valores dos parâmetros do primeiro caso	94
Figura 16 Janelas de regras com os valores dos parâmetros do segundo caso.....	97
Figura 17 Janelas de regras com os valores dos parâmetros do terceiro caso.....	100
Figura 18 Janela de regras Fuzzy para o segundo caso com parâmetros alterados.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Coeficientes K e α para diferentes tipos de solo.....	31
Tabela 2 Valores dos fatores de ajuste $F1$ e $F2$ por tipo de estaca	31
Tabela 3 Valores característicos do solo, C	33
Tabela 4 Valores do fator α em função do tipo de estaca e do tipo de solo	33
Tabela 5 Valores do fator β em função do tipo de estaca e do tipo de solo	34
Tabela 6 Valores de β em função da probabilidade de falha p_f para distribuição normal	46
Tabela 7 Parâmetros de projeto de estacas hélice contínua escolhidos para o sistema Fuzzy	57
Tabela 8 Parâmetros de execução de estacas hélice contínua escolhidos para o sistema Fuzzy	57
Tabela 9 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Diâmetro"	61
Tabela 10 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Comprimento"	62
Tabela 11 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Quantidade de métodos de determinação da capacidade de carga"	63
Tabela 12 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Experiência do projetista"	63
Tabela 13 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Método de determinação da capacidade de carga".....	64
Tabela 14 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Resistência do solo" ...	65
Tabela 15 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Torque"	65
Tabela 16 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Velocidade de perfuração do trado"	66
Tabela 17 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Pressão de injeção de concreto"	67
Tabela 18 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Superconsumo de concreto"	67
Tabela 19 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Velocidade de extração do trado"	68
Tabela 20 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Experiência do executor"	69
Tabela 21 Parâmetros iniciais e parâmetros resultantes do sistema Fuzzy	70
Tabela 22 Respostas do questionário para os parâmetros resultantes de CONC	71

Tabela 23 Base de regras do parâmetro "GEO"	72
Tabela 24 Base de regras do parâmetro "MCC"	73
Tabela 25 Base de regras do parâmetro "CSO"	73
Tabela 26 Base de regras do parâmetro "EXP"	74
Tabela 27 Base de regras do parâmetro "MOV"	75
Tabela 28 Base de regras do parâmetro "CONC"	76
Tabela 29 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "GEO"	77
Tabela 30 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "MCC"	78
Tabela 31 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "CSO"	79
Tabela 32 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "EXP"	79
Tabela 33 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "MOV"	80
Tabela 34 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "CONC"	81
Tabela 35 Exemplos da base de regras da etapa 02 do sistema Fuzzy	81
Tabela 36 Fuzzificação dos valores de β para determinação dos pontos dos conjuntos Fuzzy da variável de saída	83
Tabela 37 Coordenadas dos pontos das funções de pertinência dos termos linguísticos da variável de saída "Conf.Fuzzy"	84
Tabela 38 Número de provas de carga estática realizadas na obra do HU, por diâmetro de estaca	86
Tabela 39 Dados das estacas ensaiadas de diâmetro $\phi 300$ mm	87
Tabela 40 Dados estatísticos das estacas de $\phi 300$ mm	87
Tabela 41 Valores dos parâmetros iniciais e resultantes - primeiro caso	93
Tabela 42 Valores dos parâmetros iniciais e resultantes - segundo caso	96
Tabela 43 Valores dos parâmetros iniciais e resultantes - terceiro caso	99
Tabela 44 Siglas dos parâmetros iniciais	101
Tabela 45 Comparação entre os valores de índice de confiabilidade probabilístico e da variável de confiabilidade Fuzzy	107

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Curvas de densidade de probabilidade de solicitação e resistência.....	44
Gráfico 2 Curva de margem de segurança.....	44
Gráfico 3 Funções de pertinência da variável linguística "peso"	48
Gráfico 4 União de conjuntos Fuzzy	49
Gráfico 5 Interseção de conjuntos Fuzzy.....	50
Gráfico 6 Complemento de conjunto Fuzzy	50
Gráfico 7 Método do centro de gravidade	53
Gráfico 8 Conjuntos Fuzzy da variável linguística "Diâmetro"	61
Gráfico 9 Conjuntos Fuzzy da variável linguística "Comprimento"	62
Gráfico 10 Conjuntos Fuzzy da variável linguística "Quantidade de métodos de determinação da capacidade de carga"	62
Gráfico 11 Conjuntos Fuzzy da variável linguística "Experiência do projetista"	63
Gráfico 12 Conjuntos Fuzzy da variável linguística "Método de determinação da capacidade de carga"	64
Gráfico 13 Conjuntos Fuzzy da variável linguística "Resistência do solo"	64
Gráfico 14 Conjuntos Fuzzy da variável linguística "Torque"	65
Gráfico 15 Conjuntos Fuzzy da variável linguística "Velocidade de perfuração do trado"	66
Gráfico 16 Conjuntos Fuzzy da variável linguística "Pressão de injeção de concreto"	66
Gráfico 17 Conjuntos Fuzzy da variável linguística "Superconsumo de concreto"	67
Gráfico 18 Conjuntos Fuzzy da variável linguística "Velocidade de extração do trado"	68
Gráfico 19 Conjuntos Fuzzy da variável linguística "Experiência do executor"	68
Gráfico 20 Conjuntos Fuzzy da variável linguística de saída "GEO"	77
Gráfico 21 Conjuntos Fuzzy da variável linguística de saída "MCC"	78
Gráfico 22 Conjuntos Fuzzy da variável linguística de saída "CSO"	78
Gráfico 23 Conjuntos Fuzzy da variável linguística de saída "EXP"	79
Gráfico 24 Conjuntos Fuzzy da variável linguística de saída "MOV"	80
Gráfico 25 Conjuntos Fuzzy da variável linguística de saída "CONC"	80
Gráfico 26 Conjuntos Fuzzy da variável de saída "Conf.Fuzzy"	83
Gráfico 27 Curvas normais de solicitações e resistências das estacas estudadas	88
Gráfico 28 Variável "Conf.Fuzzy" em função dos parâmetros GEO e MCC	89
Gráfico 29 Variável "Conf.Fuzzy" em relação ao parâmetro EXP	90

Gráfico 30 Parâmetro GEO em função de DIAM e COMP.....	101
Gráfico 31 Parâmetro MCC em função de QMCC e MDCC.....	102
Gráfico 32 Parâmetro EXP em função de EXPP e EXPE.....	102
Gráfico 33 Parâmetro CSO em função de RSO.....	103
Gráfico 34 Parâmetro MOV em função de TORQ e VPTR.....	103
Gráfico 35 Parâmetro MOV em função de VPTR e VETR.....	104
Gráfico 36 Parâmetro GEO em função de TORQ e VETR.....	104
Gráfico 37 Parâmetro CONC em função de PCON e SCON.....	105

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIÇÕES

α	Coeficiente que leva em consideração o tipo de solo – método Décourt-Quaresma
β	Coeficiente que leva em consideração o tipo de solo – método Décourt-Quaresma; índice de confiabilidade probabilístico
ΔL	Espessura de camada de solo adjacente ao fuste
$\varphi(\beta)$	Função de distribuição gaussiana de probabilidade para a variável β
σ_z	Desvio padrão da função margem de segurança
v_R	Coeficiente de variação da curva de resistências
v_S	Coeficiente de variação da curva de solicitações
A	Área da ponta da estaca
ABMS	Associação Brasileira de Mecânica dos Solos
C	Coeficiente tabelado que depende do tipo de solo
cm	Centímetro
CPT	Cone Penetration Test
D	Diâmetro da estaca
F_{PC}	Fator de relevância do parâmetro “pressão de injeção de concreto”
F_S	Fator de segurança global
F_{SC}	Fator de relevância do parâmetro “sobreconsumo de concreto”
HU	Hospital Universitário
L	Espessura de camada de solo adjacente ao fuste
m	Metro (unidade SI)
N_{SPT}	Índice de resistência à penetração

$N_{SPT,L}$	Valor médio de N_{SPT} para uma camada de solo ao longo do fuste da estaca
$N_{SPT,P}$	Valor de N_{SPT} para a cota da ponta da estaca
p_f	Probabilidade de falha ou de ruína
r_L	Tensão por atrito lateral na estaca
r_P	Tensão na ponta da estaca
R	Capacidade de carga; resistência
R_L	Capacidade de carga proveniente de atrito lateral
R_P	Capacidade de carga proveniente da ponta
S	Solicitação
$S_{méd}$	Valor da média das solicitações
SPT	Standard Penetration Test
VCF	Variável de Confiabilidade <i>Fuzzy</i>
U	Perímetro da estaca
$UNIFAP$	Universidade Federal do Amapá
Z	Margem de segurança
$Z_{méd}$	Margem de segurança média

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	29
Equação 2	29
Equação 3	29
Equação 4	30
Equação 5	32
Equação 6	32
Equação 7	32
Equação 8	33
Equação 9	35
Equação 10	35
Equação 11	36
Equação 12	44
Equação 13	45
Equação 14	45
Equação 15	45
Equação 16	49
Equação 17	49
Equação 18	49
Equação 19	71
Equação 20	71

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	20
1.1 OBJETIVOS.....	22
1.1.1 Objetivo geral	22
1.1.2 Objetivos específicos	22
1.2 JUSTIFICATIVA	23
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 CAPACIDADE DE CARGA	25
2.1.1 Provas de carga	25
2.1.2 Métodos semi-empíricos.....	28
2.1.3 Métodos baseados na Mecânica dos Solos	34
2.2 ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA	36
2.3 CONFIABILIDADE DE FUNDAÇÕES	42
2.4 LÓGICA <i>FUZZY</i>	46
3. METODOLOGIA.....	54
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	54
3.2 ESCOLHA DE PARÂMETROS DE PROJETO E EXECUÇÃO DE ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA	56
3.3 IMPLEMENTAÇÃO DE QUESTIONÁRIO ON-LINE	57
3.4 ELABORAÇÃO DA ETAPA 01	59
3.4.1 Fuzzificação	59
3.4.2 Base de regras <i>Fuzzy</i>	69
3.4.3 Inferência <i>Fuzzy</i>	76
3.4.4 Defuzzificação	76
3.4.5 Variáveis de saída da etapa 01	76

3.5 ETAPA 02 - PRINCIPAL	81
3.6 ESTUDO DE CONFIABILIDADE DAS ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA DO HU DA UNIFAP.....	84
3.6.1 O Hospital Universitário da UNIFAP.....	84
3.6.2 Estudo de confiabilidade das estacas do Hospital Universitário	86
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS DO SISTEMA <i>FUZZY</i>	88
4.1 RESULTADOS DO SISTEMA <i>FUZZY</i>	88
3.7.2 PRIMEIRO CASO: SITUAÇÃO REAL DA OBRA DO HOSPITAL UNIVERSITÁRIO	91
3.7.3 SEGUNDO CASO: SITUAÇÃO HIPOTÉTICA DESFAVORÁVEL DO PROJETO	94
3.7.4 TERCEIRO CASO: SITUAÇÃO HIPOTÉTICA FAVORÁVEL DO PROJETO..	98
5. CONCLUSÃO.....	109
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
APÊNCICE A – Questionário aplicado aos engenheiros da ABMS.....	116
APÊNCICE B – Respostas obtidas do questionário on-line	122
APÊNCICE C – Base de regras do Sistema <i>Fuzzy</i>	128
APÊNCICE D – Gráficos das curvas carga versus recalque das estacas do HU ensaiadas à prova de carga estática, diâmetro $\phi 300$ mm	153
APÊNCICE E – Cálculo do índice de confiabilidade probabilístico β	156
APÊNCICE F – Dois casos de projeto adicionais.....	158

1. INTRODUÇÃO

Na engenharia civil uma das principais preocupações dos projetistas é a garantia de segurança das estruturas durante a vida útil da edificação. No ramo da engenharia de fundações isto não é exceção, principalmente devido ao fato de que os elementos de fundação possuem a função de transmitir ao terreno todas as solicitações atuantes na superestrutura, desempenhando, portanto, um papel imprescindível no sistema estrutural.

As estruturas são dimensionadas ao Estado Limite Último para que não atinjam a ruptura em hipótese alguma, pois, caso isso ocorra, pode haver o comprometimento de parte ou de toda a edificação, podendo acarretar sérios prejuízos econômicos e sociais. Os elementos de fundação também possuem a necessidade de verificação quanto à ruptura, entretanto estes possuem a característica peculiar de serem formados por elementos de naturezas distintas: elemento estrutural e maciço de terreno em seu entorno.

O solo é um elemento que requer bastante atenção durante todas as etapas do processo de execução de uma fundação por ser heterogêneo, possuir características muito distintas de uma região para outra e na maioria das situações não ser possível alterar suas propriedades. Dessa forma, engenheiros deverão projetar, dimensionar e executar as fundações considerando principalmente as características ditadas pelo solo da região.

Na verificação quanto à ruptura são utilizados fatores de segurança globais e/ou fatores de segurança parciais previstos nas normativas brasileiras, de forma a garantir uma margem de segurança entre o valor estimado de carga para o qual haverá ruptura e a carga imposta em projeto, denominada admissível. Apesar de ser um procedimento de projeto amplamente empregado na engenharia, este não representa a maneira mais adequada de análise em virtude de não levar em consideração a variabilidade de valores que podem ser obtidos pelas resistências e solicitações das fundações.

É neste cenário que surge o conceito do estudo de confiabilidade e probabilidade de ruína das fundações, mais completo na verificação da segurança, por considerar a distribuição probabilística dos valores de resistências e solicitações de um elemento de fundação em face da variabilidade geotécnica. Além dos aspectos pertinentes ao caráter do terreno, é importante considerar os aspectos relativos ao projeto e à execução das fundações, tendo em vista que o

negligenciamento a um ou mais parâmetros de projeto e execução pode ocasionar erros que podem comprometer significativamente a segurança de um elemento de fundação. Para que isso não ocorra, projetistas e executores tomam decisões para garantir o melhor resultado possível considerando fatores técnicos, econômicos e de segurança.

As decisões tomadas pelos engenheiros projetistas e executores possuem caráter objetivo e subjetivo. Os aspectos objetivos estão relacionados aos parâmetros físicos dos solos, fundações e carregamentos e os subjetivos à experiência profissional com o tipo de fundação, experiência com os solos regionais, à metodologia executiva, conhecimento técnico, entre outros fatores. Essas decisões, aliadas às informações do solo obtidas a partir de relatórios de sondagem e provas de carga, se complementam para obter o desempenho e a segurança desejada da fundação acabada, de forma que um aspecto sem a presença do outro pode levar a resultados não tão satisfatórios quanto a sua utilização em conjunto.

As experiências e escolhas dos especialistas são, entretanto, de difícil quantificação e modelagem por métodos convencionais devido à dificuldade de análise e tratamento de dados com características imprecisas, pessoais e oriundas do raciocínio humano. Por isso, busca-se realizar o estudo de informações desta natureza por meio da Lógica *Fuzzy*, ciência recente do final do século XX que se trata de uma evolução da lógica clássica aristotélica para o estudo de informações vagas, imprecisas ou subjetivas as quais a lógica clássica não é capaz de tratar adequadamente. Informações dessa natureza são os dados de entrada dos sistemas *Fuzzy*, os quais retornam como dados de saída informações mais simples de serem utilizadas para a resolução dos problemas.

Este trabalho objetiva a obtenção de uma variável que possa quantificar a confiabilidade de fundações por estacas hélice contínua a partir de dados relacionados ao projeto e à execução deste tipo de fundação, por meio de um sistema *Fuzzy*, elaborado no programa MATLAB®. Com o sistema *Fuzzy* serão analisados três casos distintos de projeto das estacas hélice contínua do Hospital Universitário da Universidade Federal do Amapá, sendo um real e dois hipotéticos. Em seguida, foi mostrado o comportamento dos gráficos gerados pelo programa para o caso mais desfavorável analisado e como os valores de projeto e execução podem ser alterados para melhorar do valor da variável de confiabilidade *Fuzzy*.

As estacas hélice contínua foram escolhidas para esta análise por serem um tipo de fundação profunda amplamente empregada no Brasil devido às vantagens de produtividade,

não emissão de ruídos e vibrações e possibilidade de utilização em praticamente todos os tipos de terrenos. Além disso, todo o seu processo executivo é monitorado, o que permite a obtenção de dados relevantes relacionados à sua execução.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Obtenção de uma variável que possa quantificar a confiabilidade de fundações por estacas hélice contínua a partir de dados relacionados ao projeto e à execução deste tipo de fundação por meio de sistema baseado em Lógica *Fuzzy* e posterior verificação do desempenho do programa a partir de casos de projeto, bem como comparação com o índice de confiabilidade probabilístico das fundações por estacas hélice contínua do Hospital Universitário da Universidade Federal do Amapá.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica acerca da capacidade de carga de elementos de fundação, confiabilidade de fundações, estacas hélice contínua e Lógica *Fuzzy*;
- Aplicação de questionário on-line direcionado a especialistas da área de fundações para coleta de dados com vistas a elaboração de sistema *Fuzzy*;
- Elaboração de sistema *Fuzzy* no programa MATLAB® para obtenção de variável de confiabilidade *Fuzzy* a partir de parâmetros de projeto e execução de estacas hélice contínua;
- Realização de estudo de confiabilidade e probabilidade de ruína das fundações por estacas hélice contínua do Hospital Universitário da Universidade Federal do Amapá;
- Verificação do funcionamento do sistema *Fuzzy* a partir de três casos de projeto de estacas hélice contínua, sendo um deles o caso real do projeto das estacas do HU da UNIFAP e dois hipotéticos;

- Discussão e análise dos resultados obtidos dos casos analisados, e posterior comparação com o resultado do estudo de confiabilidade das estacas hélice contínua do Hospital Universitário.

1.2 JUSTIFICATIVA

Este trabalho se justifica sobretudo pela importância de estudos relacionados à confiabilidade na verificação da segurança de fundações e de abordagens diferenciadas sobre o assunto. Além disso, é importante que sejam realizados estudos sobre fatores subjetivos que influenciam na qualidade, no desempenho e na confiabilidade das estacas. Busca-se ainda ampliar a pouca bibliografia existente acerca do assunto no estado do Amapá.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em seis capítulos e seis apêndices. O primeiro capítulo é composto por introdução, objetivo geral, objetivos específicos, justificativa e estrutura do trabalho.

No segundo capítulo é realizada revisão bibliográfica acerca da capacidade de carga, dos estudos de confiabilidade das fundações, das estacas hélice contínua e da Lógica *Fuzzy*. Cada um dos itens é dividido em subitens. No item “capacidade de carga” são abordadas as principais formas de obtenção de estimativa da capacidade de carga de fundações: prova de carga estática, prova de carga dinâmica, métodos semi-empíricos e métodos teóricos. O item referente às estacas hélice contínua aborda as principais características deste tipo de fundação e seu processo executivo. O item “confiabilidade de fundações” aborda sobre os estudos de confiabilidade e probabilidade de ruína de fundações. No item “Lógica *Fuzzy*” é feita uma breve introdução acerca da história da Lógica *Fuzzy*, suas principais características e as etapas do processo de elaboração de um sistema *Fuzzy*.

No terceiro capítulo são descritas as etapas de elaboração do sistema *Fuzzy* considerando variáveis de projeto e de execução de estacas hélice contínua: fuzzificação dos

dados de entrada, elaboração da base de regras *Fuzzy*, método de inferência dos dados *Fuzzy* e defuzzificação. Ainda neste capítulo são expostos os resultados do estudo de confiabilidade e probabilidade de ruína das estacas hélice contínua do Hospital Universitário da UNIFAP.

O quarto capítulo mostra os resultados obtidos do sistema *Fuzzy* para casos de projeto de estacas hélice contínua. Uma breve discussão é feita, abordando as relações encontradas no sistema *Fuzzy* e os dados obtidos a partir do estudo de confiabilidade das estacas hélice contínua do Hospital Universitário da UNIFAP.

No quinto capítulo está a conclusão do trabalho e as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho constam no sexto capítulo.

O apêndice A é composto pelo questionário on-line aplicado aos especialistas na área de fundações. O apêndice B contém as respostas obtidas do questionário. O apêndice C contém a base de 729 (setecentas e vinte e nove) regras *Fuzzy* implementadas na etapa 02 do sistema *Fuzzy*. Por fim, o apêndice D mostra os gráficos das curvas carga versus recalque das estacas hélice contínua do HU ensaiadas por prova de carga estática, utilizadas no estudo de confiabilidade. No apêndice E consta o cálculo do índice de confiabilidade probabilístico β para as estacas de 300 mm do projeto do HU. No apêndice F constam dois casos hipotéticos adicionais de projeto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CAPACIDADE DE CARGA

Os elementos de fundação, de modo geral, são projetados considerando as características do solo no qual será realizado seu assentamento, bem como as solicitações atuantes sobre eles durante a vida útil da edificação. Devido à geometria das estacas, diante da aplicação de tais solicitações, ocorrem mobilizações na ponta e por atrito lateral no fuste da estaca de modo a resistir à ação das solicitações impostas. Os projetos de fundações são realizados de forma a não permitir que os elementos de fundação atinjam estados limites últimos e de serviço, os quais podem comprometer a segurança de usuários ou inviabilizar o uso das edificações. Quando é atingido um estado limite último, diz-se que o elemento de fundação excedeu sua capacidade resistente perante a solicitação imposta, ou seja, atingiu sua capacidade de carga.

Cintra e Aoki (2010) definem capacidade de carga (também denominada capacidade de suporte, carga última ou carga de ruptura em outras literaturas) de um elemento de fundação por estacas como o valor de máxima tensão resistente para o qual o sistema solo-fundação se apresenta na iminência de ruptura. Essa ruptura, ainda segundo os autores, não deve ser confundida com o despedaçamento ou a ruptura da estaca, pois não está associada à resistência à compressão do elemento estrutural da fundação. Quando um sistema solo-estaca alcança a capacidade de carga, ocorrem recalques significativos de modo a deslocar a estaca incessantemente para baixo.

Dada a importância do conhecimento da capacidade de carga das estacas para a realização do projeto de fundação, muitas pesquisas foram desenvolvidas ao longo dos anos com vistas a obter valores confiáveis para a capacidade de carga, por diferentes métodos. Dentre os principais utilizados atualmente pelos projetistas pode-se destacar as provas de carga estáticas e dinâmicas, os métodos semi-empíricos e os métodos teóricos. Cada um possui características peculiares que irão influenciar na escolha do projetista por um ou mais métodos.

2.1.1 Provas de carga

Existem as provas de carga estática e as de carga dinâmica. Para Alledi e Polido (2008) a prova de carga estática é o método mais confiável para a determinação da capacidade de carga de uma fundação, pois reproduz com fidelidade as condições de trabalho de uma estaca (VELLOSO apud ALLEDI e POLIDO, 2008). Por essa razão, é amplamente utilizada como referencial para aferição dos resultados obtidos para a capacidade de carga obtida por métodos semi-empíricos.

A execução do ensaio de prova de carga estática é regulamentada pela NBR 12131:2006: Estacas - prova de carga estática, a qual prescreve a aparelhagem necessária à realização do ensaio, bem como a preparação, a execução e a expressão dos resultados obtidos. Esse ensaio consiste na aplicação de tensões de compressão axial (entretanto existem ensaios de tração ou de carga transversal) à estaca teste por meio de macacos hidráulicos e aferição dos valores de recalque obtidos. Para garantir o apoio do macaco hidráulico durante o carregamento, é montado um sistema de reação que geralmente é formado por estacas de apoio localizadas próximo à estaca teste (Hachich et al., 1998).

O carregamento aplicado sobre a estaca teste pode ser lento, rápido, misto ou cíclico (ABNT, 2006). O mais empregado é o lento, que consiste na aplicação da carga em dez estágios, cada um responsável pelo incremento do valor de um décimo do valor da carga previsto (geralmente duas vezes a carga admissível da estaca). A cada estágio aplicado são aferidos os deslocamentos verticais sofridos pela estaca teste, procedendo-se ao início do próximo estágio apenas quando os recalques provenientes da carga do estágio atual se estabilizarem, ou seja, no momento em que se tornam desprezíveis ou nulos (Hachich et al., 1998). O ensaio perdura até que seja atingido o décimo estágio de carregamento caso não haja ruptura em estágios anteriores. Após doze horas de estabilização dos recalques resultantes do último estágio de carregamento, a NBR 12131:2006 recomenda que se proceda ao descarregamento em pelo menos quatro estágios, devendo cada um durar ao menos quinze minutos.

Do ensaio de prova de carga estática se obtém o comportamento carga versus recalque da estaca teste, que permite verificar a carga limite para a qual o sistema solo-estaca é capaz de suportar as tensões aplicadas sem que haja ruptura, ou seja, a capacidade de carga do sistema solo-estaca. É comum que as estacas ensaiadas não atinjam a ruptura mesmo após o décimo estágio de carregamento. Quando isso ocorre, projetistas recorrem a métodos desenvolvidos para se estimar a capacidade de carga com base na extrapolação da curva carga versus recalque. Entre os principais estudos desenvolvidos pode-se destacar os de Van der Veen, de Chin-Kondner e o de Décourt.

Hachich et al. (1998) relatam que, embora as provas de carga estática forneçam informações fieis acerca do comportamento de estacas, o ensaio apresenta inconvenientes de tempo e de custo. Por isso, alguns projetistas optam pela alternativa do ensaio de carregamento dinâmico. Esse ensaio, inicialmente empregado apenas para estacas cravadas e atualmente utilizado para todos os tipos de estacas (OLIVEIRA, 2015), consiste na aplicação de golpes de impacto que causam sobretudo tensões de compressão axial no topo da estaca.

Os esforços dinâmicos são aplicados a partir de um martelo de queda livre sobre o eixo longitudinal da estaca, os quais geram ondas de carregamento que tendem a percorrer todo o seu comprimento. Segundo Hachich et al (1998), durante a execução do ensaio, o monitoramento é feito a partir de transdutores de deformação e acelerômetros acoplados ao fuste da estaca, responsáveis pela medição da força e da velocidade verificadas, respectivamente. As prescrições referentes ao processo de execução, equipamentos necessários, controle, entre outros, estão previstos na norma brasileira NBR 13208:2007: Estacas – ensaio de carregamento dinâmico.

Os dados são transferidos para um programa responsável pela realização de cálculos e tratamento dos dados. Existem vários atualmente, entretanto o mais conhecido e utilizado, sobretudo no Brasil, é o PDA^{®1}, o qual efetua os cálculos a partir do método CASE^{®2}. Apesar de a finalidade principal do ensaio de carregamento dinâmico ser estimar a capacidade de carga da estaca ensaiada, Andraos (2009) relata que o ensaio apresenta outros dados relevantes, tais como: possível ocorrência de danos estruturais no fuste, tensões máximas de compressão e tração no momento de aplicação dos golpes, dentre outras informações. Esses dados adicionais constituem boa fonte de análise com vistas à verificação da qualidade e segurança das fundações pelos projetistas.

Conforme afirma Andraos (2009), o ensaio de carregamento dinâmico prevê a necessidade de sistema de cravação quando se tratar de estacas moldadas *in loco*. Quando o ensaio é realizado em estacas cravadas, já se dispõe do maquinário de cravação da própria estaca para a realização da prova de carga.

Devido ao fato de ser um ensaio que dispõe de menor tempo e custo para sua realização em comparação à prova de carga estática, o ensaio de carregamento dinâmico é considerado o ensaio mais difundido em se tratando de fundações profundas (ANDRAOS, 2009). Hachich et

¹ Pile Drive Analyzer (Hachich et al., 1998).

² Case Western Reserve Institute (Hachich et al., 1998).

al. (1998) relata que o ensaio de carregamento dinâmico apresenta correlações satisfatórias com a prova de carga estática, apresentando até 20% de variação entre si. Tal é a confiança nos resultados obtidos pelo ensaio de carregamento dinâmico, a NBR 6122:2010 especifica que as provas de carga estática podem ser substituídas por ensaios de carregamento dinâmico na razão 1:5.

2.1.2 Métodos semi-empíricos

Em razão de as fórmulas teóricas serem consideradas pouco confiáveis quando se trata de fundações por estacas, muitos projetistas optam por estimar a capacidade de carga do sistema solo-estaca por métodos semi-empíricos (CINTRA e AOKI, 2010). Conforme relata Magalhães (2005), diversas pesquisas foram realizadas buscando correlacionar equações a partir de métodos diretos ou práticos através de ajustes estatísticos. Essas equações obtêm a capacidade de carga de um elemento de fundação através de correlações de ensaios *in situ* como o SPT³, o CPT⁴, o SPT-T, entre outros.

Os diversos métodos semi-empíricos desenvolvidos no Brasil e no mundo consideram diferentes tipos de estacas e o solo da região onde os ensaios foram realizados; o método brasileiro de Cabral desenvolvido em 1996, por exemplo, é exclusivo para estacas do tipo raiz (AGUIAR, ARAÚJO e MONTEIRO, 2017); outros, como o método de Aoki-Velloso, são aplicáveis apenas às estacas estudadas, como a Franki, pré-moldadas, escavadas com lama bentonítica (MAGALHÃES, 2005). Quanto às regiões de estudo, pode-se citar o caso do método italiano de Viggiani elaborado em 1993, desenvolvido a partir de um banco de provas de carga da região de Nápoles, na Itália. Os métodos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma foram desenvolvidos a partir de ensaios realizados em solo brasileiro. Logo, deve-se atentar às particularidades da região onde foram executados os ensaios quando da sua utilização para estimar capacidades de carga.

As fundações profundas, segundo a NBR 6122:2010, são caracterizadas como elementos de fundação que transmitem as cargas ao terreno adjacente pela base, pela área lateral ou pelas duas simultaneamente. Praticamente a totalidade dos métodos semi-empíricos

³ Standard Penetration Test (ABNT, 2001)

⁴ Cone Penetration Test (Hachich et al. 1998).

deduzem suas fórmulas a partir deste conceito, considerando a capacidade de carga de um elemento de fundação como a soma das cargas de ponta e lateral, com base na definição das estacas dada pela NBR 6122:2010. Os fatores variáveis nas equações são geralmente coeficientes relacionados ao tipo de solo, ao tipo de estaca, e de ajustes de correlação entre os diferentes ensaios *in situ*, quando for o caso.

A seguir são abordados dois métodos semi-empíricos bastante utilizados na engenharia geotécnica brasileira, os métodos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma.

Método de Aoki-Velloso (1975)

Desenvolvido pelos professores Nelson Aoki e Dirceu Velloso e publicado em 1975 no V Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (HACHICH et al., 1998), o método semi-empírico de Aoki-Velloso inicialmente utilizou correlações a partir de valores do ensaio de penetração de cone. Segundo Cintra e Aoki (2010), devido ao fato de o SPT ser o ensaio de verificação mais utilizado no Brasil, posteriormente esse método foi adaptado para utilizar correlações do SPT.

Pelo método, conforme descrito por Cintra e Aoki (2010), a capacidade de carga R de uma estaca de diâmetro D e perímetro U é expressa como a soma das resistências provenientes da ponta (R_p) e do atrito lateral (R_L):

$$R = R_p + R_L \quad (1)$$

A parcela de resistência proveniente do atrito lateral é dada por:

$$R_L = U \sum (\Delta L \cdot r_L) \quad (2)$$

Em que ΔL e r_L são a espessura das diferentes camadas de solo ao longo do fuste da estaca e a tensão por atrito lateral mobilizada pela carga aplicada no topo da estaca para cada camada de solo, respectivamente. A parcela de resistência mobilizada pela ponta é:

$$R_p = A r_p \quad (3)$$

Sendo A a área da ponta da estaca e r_p a tensão mobilizada pela ponta, respectivamente. Os valores de r_L e r_p são substituídos pelas respectivas correlações encontradas a partir do ensaio SPT, resultando na fórmula final para estimativa da capacidade de carga abaixo:

$$R = \frac{K N_{SPT,P}}{F_1} A + \frac{U}{F_2} \sum \alpha K N_{SPT,L} \Delta L \quad (4)$$

Onde:

- $N_{SPT,P}$ e $N_{SPT,L}$ são, respectivamente, o valor obtido no ensaio SPT para a cota da ponta da estaca e a média dos valores de N_{SPT} para o fuste da estaca, excluído nesse caso o N_{SPT} da cota da ponta;
- K e α são coeficientes tabelados que levam em consideração o tipo de solo;
- F_1 e F_2 são fatores de correção que levam em consideração o tipo de estaca e as diferenças de comportamento entre o cone do ensaio CPT e a estaca.

Os valores dos coeficientes K e α constam na tabela 1 e os fatores de correção F_1 e F_2 constam na tabela 2.

Tabela 1 Coeficientes K e α para diferentes tipos de solo

Tipo de solo	K (KPa)	α (%)
Areia	1000	1,4
Areia siltosa	800	2
Areia siltoargilosa	700	2,4
Areia argilosa	600	3
Areia siltoarenosa	500	2,8
Silte	400	3
Silte arenoso	550	2,2
Silte arenoargiloso	450	2,8
Silte argiloso	230	3,4
Silte argiloarenoso	250	3
Argila	200	6
Argila arenosa	350	2,4
Argila arenossiltosa	300	2,8
Argila siltosa	220	4
Argila siltoarenosa	330	3

Fonte: Cintra e Aoki (2010), adaptado pelo autor.

Tabela 2 Valores dos fatores de ajuste F1 e F2 por tipo de estaca

Tipo de estaca	F₁	F₂
Franki	2,5	2F ₁
Métalica	1,75	2F ₁
Pré-moldada	1 + D/0,8	2F ₁
Escavada	3,0	2F ₁
Raiz, Hélice Contínua e Ômega	2,0	2F ₁

Fonte: Cintra e Aoki (2010), adaptado pelo autor.

Hachich et al. (1998) relatam que o método apresenta o inconveniente de necessitar da minuciosa caracterização do solo para a sua utilização, nem sempre de fácil realização. Além disso, deve-se considerar as características da região do solo para o qual se deseja estimar a capacidade de carga. Por essa razão, literaturas recentes vêm trazendo novos valores para K e

α , considerando ensaios realizados em diferentes localidades (Cintra e Aoki, 2010). O aumento da quantidade de dados de pesquisa aumenta o campo de aplicação do método.

Método de Décourt-Quaresma (1978)

Elaborado pelos professores Luciano Décourt e Arthur Quaresma em 1978, esse método utiliza correlações do ensaio de penetração dinâmica (SPT) para obtenção da capacidade de carga. Inicialmente se assemelha ao método de Aoki-Velloso por utilizar a relação da capacidade de carga como sendo a soma das parcelas provenientes de adesão ou atrito lateral e de ponta, conforme apresentado por Cintra e Aoki (2010):

$$R = r_p A + r_L U L \quad (5)$$

Entretanto, posteriormente se observam diferenças entre os dois métodos, como na obtenção da resistência proveniente da ponta, r_p , obtida a partir da relação:

$$r_p = C N_{SPT,P} \quad (6)$$

Em que:

- C é um coeficiente tabelado que depende do tipo de solo (tabela 3);
- $N_{SPT,P}$ é a média entre os valores do N_{SPT} corresponde à ponta, o imediatamente anterior e o imediatamente posterior.

Além disso, o valor de r_L utilizado por Décourt e Quaresma não distingue tipos diferentes de solo (VELLOSO e LOPES, 2011). Os autores tabelaram diferentes valores para a resistência por atrito lateral e fizeram a seguinte aproximação:

$$r_L = 10 \left(\frac{N_{SPT,L}}{3} + 1 \right) \quad (7)$$

Em que $N_{SPT,L}$ é a média dos valores de N_{SPT} ao longo do fuste da estaca, desconsiderando os valores de N_{SPT} utilizados para o cálculo de $N_{SPT,P}$. Também é necessário respeitar o intervalo $3 \leq N_{SPT,L} \leq 50$. De acordo com Velloso e Lopes (2011), quando um valor de $N_{SPT,L}$ se encontrar fora do intervalo acima, o valor mais próximo dentro do intervalo deve ser considerado em substituição ao valor encontrado.

Por fim, coeficientes α e β são incluídos nas parcelas de atrito lateral e de ponta, respectivamente, para levar em consideração o tipo de solo e os tipos de estacas analisados pelo método (tabelas 4 e 5). A equação do método Décourt-Quaresma fica, então, da seguinte forma:

$$R = \alpha C N_{SPT,P} A + 10 \left(\frac{N_{SPT,L}}{3} + 1 \right) \beta U L \quad (8)$$

Tabela 3 Valores característicos do solo, C

Tipo de solo	C (kPa)
Argila	120
Silte argiloso	200
Silte arenoso	250
Areia	400

Fonte: Décourt e Quaresma (1978) apud Cintra e Aoki (2010).

Tabela 4 Valores do fator α em função do tipo de estaca e do tipo de solo

Tipo de solo	Tipo de estaca				
	Escavadas em geral	Escavada (bentonita)	Hélice Contínua	Raiz	Injetada sob altas pressões
Argilas	0,85	0,85	0,3*	0,85*	1,0*
Solos intermediários	0,6	0,6	0,3*	0,6*	1,0*
Areias	0,5	0,5	0,3*	0,5*	1,0*

* Valores apenas orientativos em razão do reduzido número de dados disponíveis.

Fonte: Décourt (1996) apud Cintra e Aoki (2010).

Tabela 5 Valores do fator β em função do tipo de estaca e do tipo de solo

Tipo de solo	Tipo de estaca				
	Escavadas em geral	Escavada (bentonita)	Hélice Contínua	Raiz	Injetada sob altas pressões
Argilas	0,85*	0,9*	1,0*	1,5*	3,0*
Solos intermediários	0,65*	0,75*	1,0*	1,5*	3,0*
Areias	0,5*	0,6*	1,0*	1,5*	3,0*

* Valores apenas orientativos em razão do reduzido número de dados disponíveis.

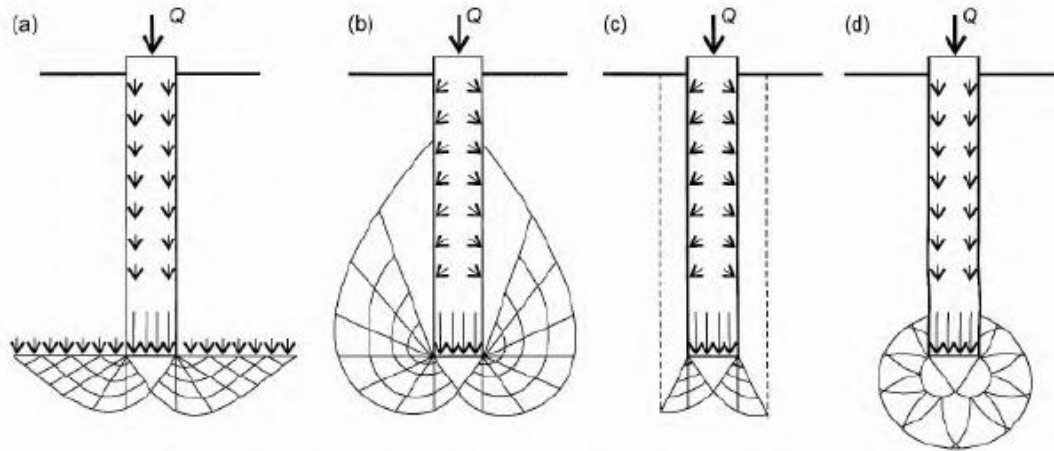
Fonte: Décourt (1996) apud Cintra e Aoki (2010).

2.1.3 Métodos baseados na Mecânica dos Solos

Diversos autores têm contribuído com formulações fundamentadas na mecânica dos solos para o cálculo da capacidade de carga de fundações desde o início do século passado (VELLOSO e LOPES, 2011). Esses métodos, também denominados racionais em algumas literaturas, consistem na obtenção da capacidade de carga a partir de equações que levam em consideração parâmetros obtidos a partir de análise laboratorial do solo local.

Para cada método baseado na mecânica dos solos, os autores propõem mecanismos de ruptura que buscam descrever o comportamento do elemento de fundação ao exceder a capacidade de carga. Na figura 1, são mostrados alguns mecanismos de ruptura propostos por diferentes autores. Existem equações para o cálculo da capacidade de carga por atrito lateral e para a carga de ponta separadamente, considerando a natureza do solo: se granulares ou arenosos.

Figura 1 Ruptura de diversas formulações teóricas



Fonte: Velloso e Lopes (2012).

Para a carga de ponta, utilizam-se frequentemente as equações propostas por Terzaghi ou Meyerhof, semelhantes às formulações teóricas para fundações superficiais (VELLOSO e LOPES, 2011). Por exemplo, pela formulação de Terzaghi, tem-se como capacidade de carga para fundações profundas a seguinte equação:

$$R_P = c S_c N_c + \gamma D S_q N_q + \frac{1}{2} \gamma B S_\gamma N_\gamma \quad (9)$$

Onde S_c , S_q e S_γ são coeficientes que levam em consideração a geometria da estaca; N_c , N_q e N_γ são fatores adimensionais de capacidade de carga obtidos em função do ângulo de atrito ϕ do solo; B é o diâmetro ou lado da estaca; D é a profundidade de assentamento da estaca; “ c ” é a coesão não drenada do solo e γ é o peso específico efetivo do solo (HACHICH et al., 1998).

Para a carga por atrito lateral, destaca-se a formulação geral para solos granulares (VELLOSO e LOPES, 2011):

$$R_L = K_s \sigma'_v \operatorname{tg} \delta \quad (10)$$

Em que K_s é o coeficiente de empuxo horizontal em relação ao fuste da estaca; σ'_v a tensão vertical efetiva na profundidade considerada e δ é o ângulo de atrito entre a estaca e o solo. Esses coeficientes são obtidos através de ensaios de laboratório através de amostras de solo coletado. Alguns são obtidos por meio de correlações com ensaios in situ, como é o caso da coesão não drenada “ c ” e do ângulo de atrito “ ϕ ”. Dentre os métodos teóricos para carga por

atrito lateral para solos argilosos, menciona-se o método com enfoque em tensões efetivas, representado por (VELLOSO e LOPES, 2011):

$$R_L = K \sigma'_{vo} \operatorname{tg} \delta \quad (11)$$

Sendo K um coeficiente que representa a razão entre a tensão horizontal e a tensão vertical inicial (referente ao processo de posicionamento da estaca no solo) e σ'_{vo} a tensão vertical efetiva inicial. Existem métodos teóricos para argilas rijas, moles e saturadas. Cabe a cada projetista avaliar o método mais adequado à situação verificada pelo solo onde ocorrerá a execução das estacas.

Os métodos de capacidade de carga baseados na mecânica dos solos são pouco utilizados por possuírem muitas limitações. Apesar das diversas contribuições feitas por pesquisadores, Cintra e Aoki (2010) relatam que ainda não existe um modelo físico e matemático razoavelmente eficaz e capaz de obter resultados confiáveis para a carga de ruptura devido ao complexo estado de tensões na ponta da estaca, o que resulta na pouca utilização prática de tais fórmulas.

Outras razões para a restrita utilização de métodos baseados na mecânica dos solos para calcular a capacidade de carga de fundações profundas estão na dificuldade – não raramente até na impossibilidade – de obtenção de parâmetros importantes, como a coesão não drenada em solos argilosos e o ângulo de atrito em solos arenosos. Além disso, conforme afirma Bowles (1996), a obtenção de dados utilizando métodos teóricos é cara e projetos cuja capacidade de carga é estimada a partir de ensaios *in situ* como SPT e CPT conseguem obter resultados satisfatórios, tornando os métodos baseados na mecânica dos solos pouco competitivos em detrimento dos métodos semi-empíricos e das provas de carga estática.

2.2 ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA

A utilização das estacas hélice contínua é recente, sobretudo no Brasil, tendo sua primeira execução em solo brasileiro ocorrido em 1987 a partir de máquinas adaptadas que permitiam torque de 35 kN.m, diâmetros de hélice de 275 mm, 350 mm e 425 mm e profundidades de até 15 metros (ANTUNES et al., 1997). Na década seguinte, a execução de estacas hélice contínua no Brasil se intensificou devido à chegada de máquinas próprias para

execução desse tipo de estaca oriundas da Europa, principalmente da Itália. Isso possibilitou a execução de estacas com até 1000 mm de diâmetro e profundidades de até 24 m (HACHICH et al., 1998).

A estaca hélice contínua se caracteriza pela penetração do solo por meio de uma haste de perfuração composta de hélice espiral, a qual envolve um tubo responsável pela concretagem da estaca simultânea à retirada da hélice do furo (ABNT, 2010). Devido ao seu processo de execução, caracteriza-se como uma estaca moldada *in loco*. Apresenta diversas vantagens em relação a outros tipos de estacas dessa modalidade, o que tem resultado na preferência de projetistas por esse tipo de estaca em obras de fundações profundas. A produtividade média, de 100 a 400 metros de estacas por dia, é possível com apenas uma equipe de trabalho (HACHICH, et al., 1998).

Esse tipo de estaca tem sido muito utilizado em meios urbanos por não produzir em seu processo executivo ruídos e vibrações similares àqueles provenientes de instrumentos à percussão. A possibilidade de ser utilizada em praticamente todos os tipos de solos e o fato de não produzir resíduo na forma de lama bentonítica também são vantagens que contribuem para tornar as estacas hélice contínua uma solução competitiva para fundações.

Além de possuir essas vantagens, o diferencial das estacas hélice contínua em relação aos outros tipos de estacas moldadas *in loco* está na possibilidade de monitoramento de todas as etapas do seu processo executivo (BROWN et al, 2007 apud HORTEGAL, 2016). Esse monitoramento permite, sobretudo, maior controle de qualidade e importante auxílio na garantia da continuidade do fuste e do diâmetro da estaca.

Conforme afirma Hachich et al. (1998), o maquinário empregado para a execução de estacas hélice contínua consiste em uma torre metálica, de altura equivalente à profundidade das estacas a serem executadas; guindaste de esteira, o qual se acopla a torre metálica e onde se situa a cabine de controle; mesa rotativa de torque compatível com o diâmetro e a profundidade da estaca; e um guincho, utilizado para realizar os arrancamentos necessários. A figura 2 mostra um equipamento para execução de estacas hélice contínua. A maior parte dos monitoramentos de processos executivos são feitos a partir do Taracord CE®, equipamento de origem francesa utilizado em praticamente a totalidade das execuções de estacas hélice contínua no Brasil (ANTUNES et al., 1997).

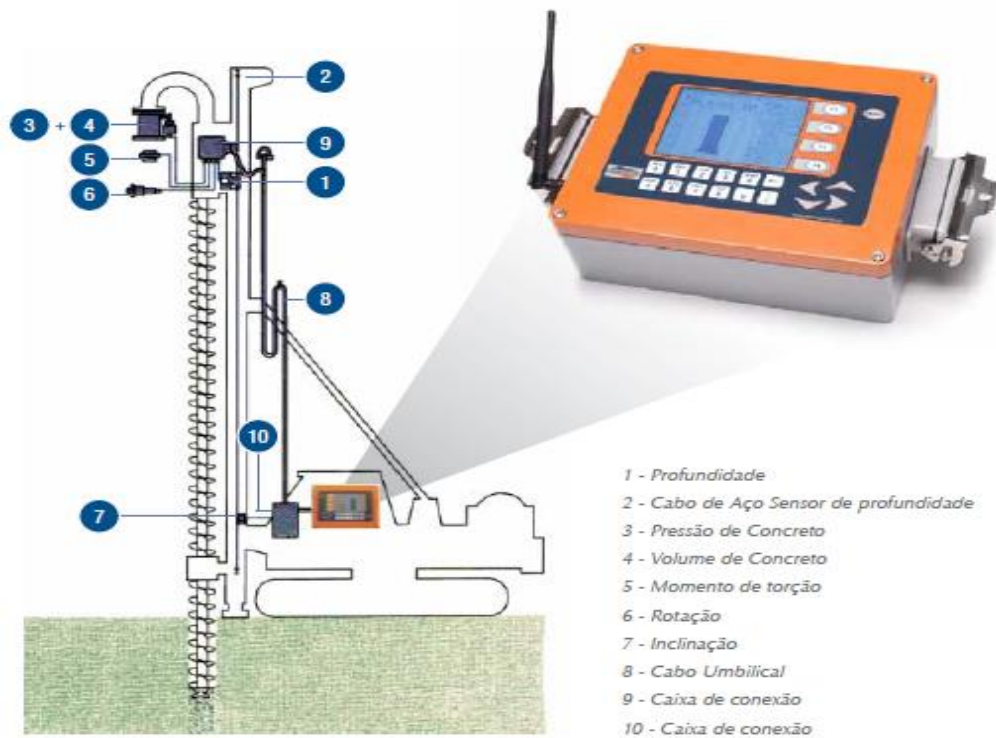
Figura 2 Maquinário para execução de estacas hélice contínua



Fonte: ROCHA & ABREU, 2013

O Taracord CE® é composto por um computador alimentado por bateria que mostra ao operador da perfuratriz informações em tempo real acerca de diversos parâmetros que influenciam no desempenho desse tipo de fundação, tais como o torque da mesa rotativa, a velocidade de extração, a pressão de injeção, a profundidade do trado, o sobreconsumo de concreto, dentre outros. Essas informações são obtidas a partir de sensores acoplados a diferentes posições do equipamento. Os sensores de profundidade e de velocidade de rotação, por exemplo, estão posicionados na extremidade superior do trado, enquanto os sensores de pressão e volume se localizam no topo do maquinário. A figura 3 mostra a localização desses e dos outros sensores no maquinário.

Figura 3 Localização dos sensores de monitoramento da estaca hélice contínua no maquinário

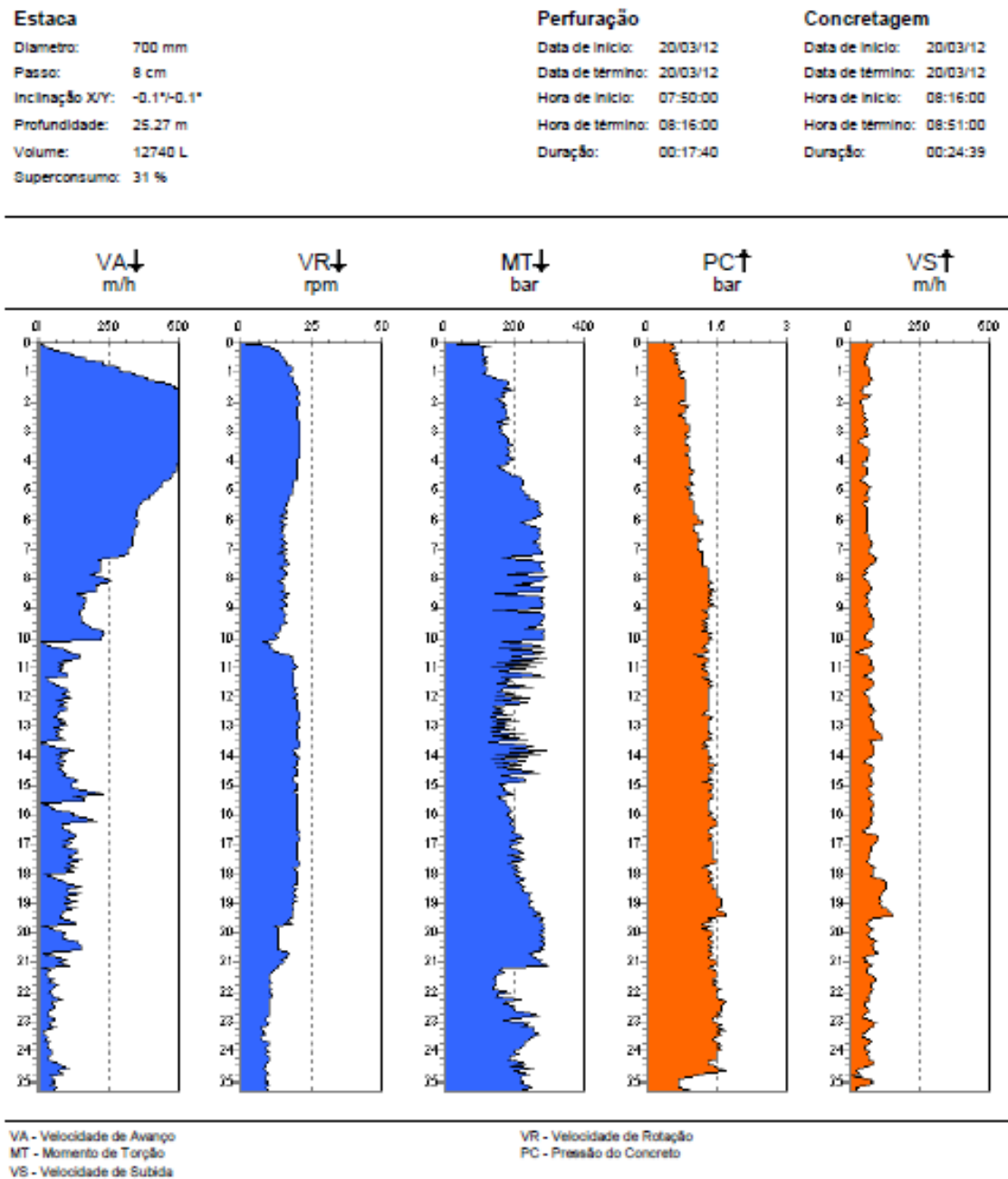


Fonte: GEOFIX Fundações.

Os dados obtidos pelos sensores de monitoramento podem ser transferidos para um computador PC, onde, por meio de um software, é gerado um relatório com o detalhamento das informações obtidas durante a execução da estaca, como se observa na figura 4. Além dos dados referentes aos parâmetros de execução traçados ao longo do perfil da estaca, o relatório também exibe o número do contrato, o número da estaca, horas de início e término da perfuração, horas de início e término da concretagem, entre outros dados pertinentes.

Segundo Antunes et al (1997), as fases de execução de estacas hélice contínua consistem na perfuração, concretagem simultânea à retirada da haste de perfuração e posicionamento da armadura, conforme esquema mostrado na figura 5. Na primeira fase, a haste de perfuração penetra o solo a partir da rotação da hélice espiral. Uma tampa metálica encaixada na extremidade inferior do tubo central impede que solo ou água penetrem no tubo durante o processo de penetração. A haste de perfuração não é retirada até que seja atingida a cota prevista de projeto, quando então se inicia o processo de concretagem da estaca.

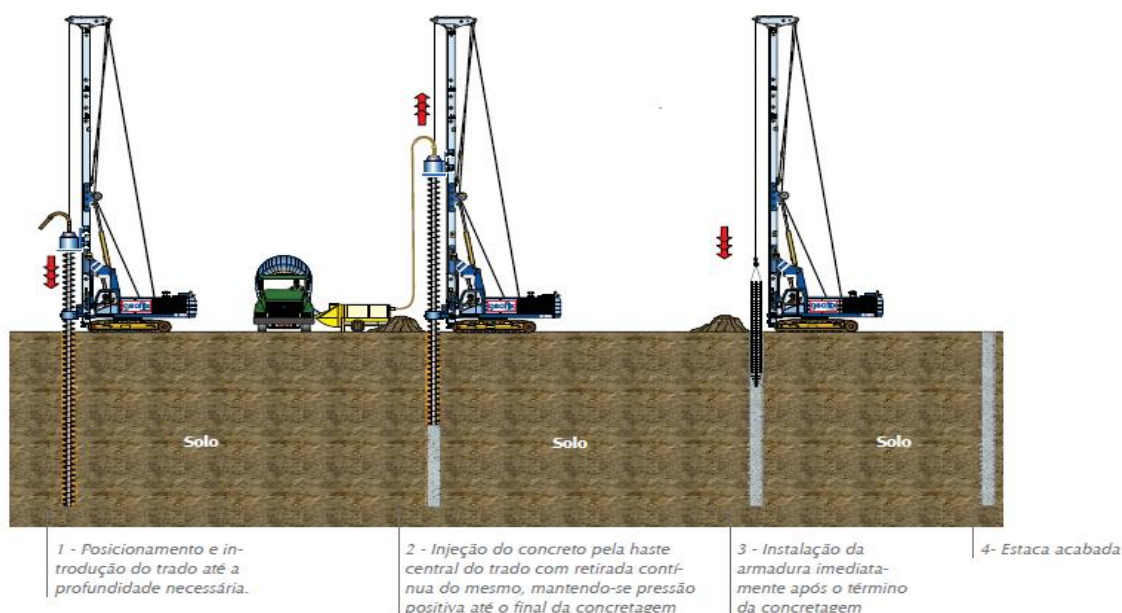
Figura 4 Exemplo de relatório de monitoramento de uma estaca hélice contínua



Fonte: GEOFIX Fundações.

O concreto bombeado através do tubo central exerce pressão sobre a tampa metálica situada em sua extremidade, causando sua expulsão e permitindo que o concreto preencha o furo enquanto o trado é lentamente retirado, sem girar. Conforme afirma Hortegal (2016), é necessário que haja monitoramento constante da extração do trado durante todo o processo de concretagem, bem como controle da pressão e do volume do concreto desde a fase de perfuração. Essa medida visa a garantia da continuidade do fuste da estaca.

Figura 5 Fases de execução de uma estaca hélice contínua



Fonte: GEOFIX Fundações

O sobreconsumo de concreto (razão entre o volume de concreto injetado e o da perfuração) é garantido sobretudo pela velocidade de extração do trado, parâmetro controlado com auxílio do monitoramento pelo operador do maquinário. A concretagem, executada sempre sob pressão positiva (da ordem de 0,5 a 1,0 kgf/cm²) é essencial para garantir a não descompressão do solo durante o processo de extração da hélice espiral e a uniformidade do fuste da estaca. Sabe-se que os parâmetros de execução tais como o torque, a pressão de injeção do concreto, o sobreconsumo e as velocidades de perfuração e extração do trado estão diretamente relacionadas ao desempenho e à qualidade e integridade do fuste da estaca.

Imediatamente após o término da concretagem, procede-se ao posicionamento da armadura na estaca. As armaduras para estacas hélice contínua possuem forma de gaiola, com estribos espirais e extremidade inferior em forma de funil para evitar a deformação durante a introdução no concreto (HACHICH et al., 1998). A introdução ocorre normalmente por ação da gravidade, entretanto é frequente que seja auxiliada por vibradores ou pilões de pequena carga, para estacas de maiores comprimentos. Por fim, espaçadores tipo pastilha garantem o cobrimento posicionando a armadura no centro da estaca (ANTUNES et al., 1997). A figura 6 mostra o posicionamento da armadura de uma fundação por estacas tipo hélice contínua.

Apesar de a estaca hélice contínua possuir diversas vantagens construtivas, Hachich et al (1998) relatam que há inconvenientes na utilização dessa solução, como a necessidade de superfície plana para a movimentação do maquinário e indispensabilidade da central de

concreto próxima ao local de execução, devido à alta produtividade. Somado a isso, os projetistas devem considerar um número mínimo de estacas a serem executadas para que os custos sejam compatíveis com a contratação do maquinário necessário à realização dos trabalhos. Entretanto, as adversidades relacionadas a esse tipo de fundação são facilmente compensadas com as qualidades obtidas no uso das estacas hélice contínua.

Figura 6 Posicionamento da armadura de uma fundação por estaca hélice contínua



Fonte: ROCHA & ABREU, 2013.

2.3 CONFIABILIDADE DE FUNDAÇÕES

Nos projetos de estruturas em geral, e, sobretudo nos de fundações, os engenheiros devem projetar os elementos de fundação para que eles nunca sejam submetidos à capacidade de carga calculada, seja obtida por provas de carga, formulações baseadas na mecânica dos solos ou semi-empíricas. Isso porque, ultrapassada a capacidade de carga, determinado elemento de fundação pode falhar, levando a edificação à ruína. A capacidade de carga obtida

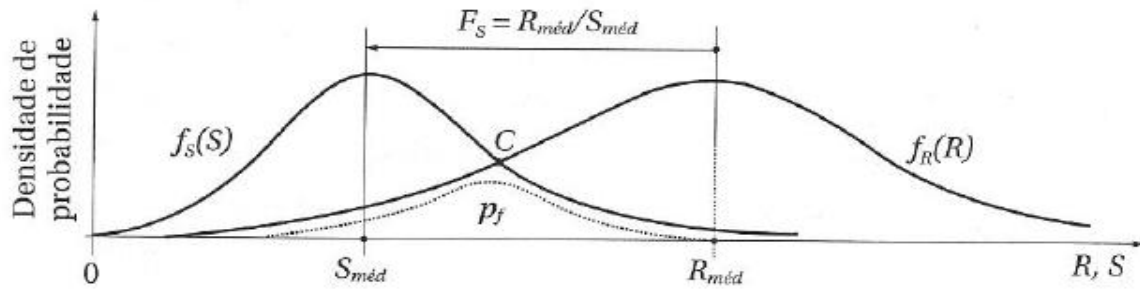
pelos métodos supracitados não é um valor exato; é apenas uma estimativa, um valor aproximado que depende de diversas variáveis do sistema solo-fundação, tais como as características do solo e suas camadas (quase sempre nunca completamente conhecidas), características dos materiais componentes da fundação, forma de execução, dentre outras.

Dada a incerteza relacionada ao conhecimento do valor real da capacidade de carga e a fim de possibilitar a segurança, é de praxe que em projetos de fundações os projetistas utilizem fatores de segurança com o objetivo de garantir uma margem entre a capacidade de carga real (cujo valor é desconhecido, apenas estimado) e a carga máxima de projeto a qual a fundação será submetida, denominada carga admissível. Normalmente, obtém-se a carga admissível em função do fator de segurança previamente estipulado e da capacidade de carga calculada (AOKI, 2005).

A NBR 6122:2010 prescreve a necessidade de utilização de fatores de segurança nas fundações, estabelecendo que os mesmos podem ser globais ou parciais, estes últimos obtidos do método de valores de projeto. Cintra e Aoki (2010) relatam que é tradição na engenharia geotécnica brasileira utilizar o conceito de fator de segurança global, entretanto nenhum dos dois métodos é suficiente para analisar a segurança de uma fundação de forma precisa e adequada por não considerarem a variabilidade de valores de resistências e solicitações os quais as fundações são submetidas.

A partir disso, surgiram os estudos de confiabilidade, que se baseiam na verificação probabilística de ruína das fundações a partir da variação de valores para as solicitações e resistências em uma fundação. Segundo Aoki (2005), a probabilidade de ruína se verifica quando, em uma distribuição estatística das resistências R e solicitações S de uma fundação, há ocorrência de valores de solicitação S superiores a valores de resistência R , não satisfazendo a condição de segurança $S < R$. Logo, a probabilidade de ruína pode ser escrita como $P(S > R)$. A probabilidade de sucesso ou sobrevivência da fundação é o complemento da probabilidade de ruína, ou seja, $1 - P(S > R)$.

Graficamente, a probabilidade de ruína p_f é a região localizada na superposição dos gráficos das funções de S e R , representadas por curvas normais, abaixo da curva de resistência à esquerda do ponto C e abaixo da curva de solicitação à direita deste ponto (Cintra e Aoki, 2010), conforme mostrado no gráfico 1. É possível perceber que, a probabilidade de ruína é sempre presente, independentemente da distância entre as curvas.

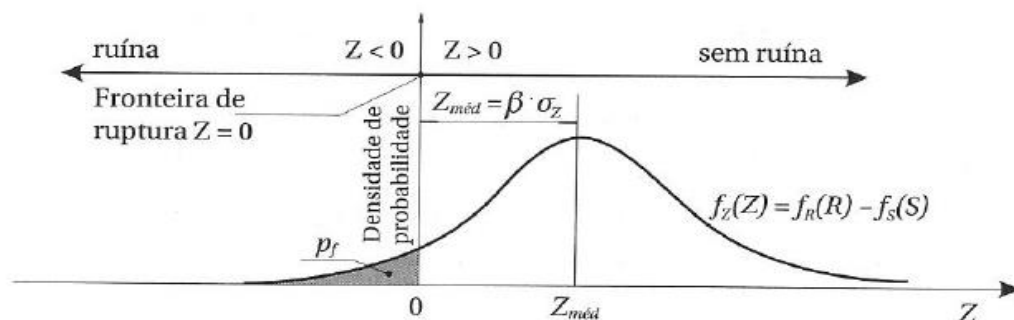
Gráfico 1 Curvas de densidade de probabilidade de solitação e resistência

Fonte: Cintra e Aoki, 2010.

Aoki (2005) mostra que, apesar de fatores de segurança globais tabelados não serem suficientes para garantir a segurança da fundação por não levarem em consideração o risco de falha sempre presente, há correlação destes com a probabilidade de ruína de uma fundação. A partir da aceitação de um determinado valor considerado aceitável de probabilidade de ruína, é possível obter um valor de fator de segurança global. A partir do gráfico 1 percebe-se que o fator de segurança global F_S , cujo valor é igual à razão entre os valores médios das distribuições de R e S , aumenta à medida que as curvas se afastam, o que resulta em diminuição da área referente à superposição das curvas (probabilidade de ruína). Logo, conclui-se que quanto maior a probabilidade de falha, menor o fator de segurança global e vice-versa.

A diferença entre as curvas de solitações e de resistências resulta na curva denominada margem de segurança Z (gráfico 2), para a qual valores negativos e positivos representam a ruína e o sucesso da fundação, respectivamente (CINTRA e AOKI, 2010). O valor médio $Z_{méd}$ se correlaciona com o fator de segurança global a partir da seguinte equação:

$$Z_{méd} = S_{méd}(F_S - 1) \quad (12)$$

Gráfico 2 Curva de margem de segurança

Fonte: Cintra e Aoki, 2010.

A função margem de segurança Z pode ser escrita em termos do índice de confiabilidade β , o qual representa Z em unidades de seu desvio padrão σ_Z :

$$\beta = \frac{Z_{méd}}{\sigma_Z} \quad (13)$$

A partir da relação acima, conclui-se que quanto maior a variabilidade dos valores de Z expresso por σ_Z , menor será o índice de confiabilidade β , o que representa maior probabilidade de ruína da fundação. Igualando-se as equações 12 e 13 obtém-se a equação 14, onde se encontra a correlação entre o índice de confiabilidade β e o fator de segurança global F_S , mostrando que essas variáveis são dependentes entre si. A relação inversa, mostrando β em função de F_S , é de fácil obtenção.

$$F_S = \frac{1 + \beta \sqrt{v_S^2 + v_R^2 - \beta^2 v_S^2 v_R^2}}{1 - \beta^2 v_R^2} \quad (14)$$

Percebe-se que β e F_S são ambos dependentes dos coeficientes de variação das curvas S e R , v_S e v_R . A coerência da relação encontrada é verificada ao se analisar que, quanto menor a variação dos valores encontrados para solicitações e resistências (valores baixos de σ_S e σ_R), menor será a variação da curva de margem de segurança, que resulta em maior probabilidade de ruína e consequentes menores índice de confiabilidade e maiores fatores de segurança globais.

Por fim, a relação entre a probabilidade de ruína p_f e o índice de confiabilidade β é (ANG e TANG, 1984 apud CINTRA e AOKI, 2010):

$$p_f = 1 - \phi(\beta) \quad (15)$$

Sendo $\phi(\beta)$ a representação da distribuição gaussiana de probabilidade. Aoki (2005) apresenta a relação entre diversos valores de probabilidade de ruína e os respectivos índices de confiabilidade, conforme mostrado na tabela 6.

Tabela 6 Valores de β em função da probabilidade de falha p_f para distribuição normal

Probabilidade de ruína (p_f)	Índice de confiabilidade (β)
1/2	0,000
1/5	0,842
1/10	1,282
1/20	1,645
1/100	2,326
1/1000	3,090
1/5000	3,540
1/10 000	3,719
1/50 000	4,107
1/100 000	4,265

Fonte: Aoki, 2005 (adaptado pelo autor).

Cintra e Aoki (2010) relatam que alguns autores consideram probabilidade de falha plausível para fundações os valores na ordem de 1/100 a 1/100.000; outros consideram pertinentes valores de 1/100 a 1/1000 e até mesmo 1/1000 a 1/10.000. Como ainda não existe normatização no Brasil acerca da probabilidade de ruína mínima e máxima admissível para os diferentes tipos de fundação, os autores recomendam que a escolha da probabilidade de ruína do projeto seja feita em conjunto com o proprietário da edificação, a partir dos cálculos da probabilidade de ruína implícita proveniente dos fatores de segurança.

2.4 LÓGICA FUZZY

A necessidade de estudo de sistemas com modelagem complexa que não podiam ser facilmente analisados a partir da lógica clássica e da teoria da probabilidade implicou o surgimento de uma nova teoria lógica no século XX, a qual utiliza conceitos vagos e imprecisos que melhor descreviam o caráter complexo destes sistemas. Esta lógica, denominada *Fuzzy* (palavra da língua inglesa traduzida comumente para vaga, imprecisa, difusa) é uma ferramenta que vem sendo bastante utilizada nas últimas décadas por especialistas nos campos de sistemas inteligentes, robótica, informática e de controle de processos.

A primeira publicação acerca do assunto foi feita pelo professor Lofti Asker Zadeh, da Universidade de Berkeley, Estados Unidos, em 1965. Em seu trabalho, Zadeh fez conceituações acerca da Lógica *Fuzzy*, das operações envolvendo Conjuntos *Fuzzy*, das funções de pertinência e das variáveis linguísticas, termos bastantes frequentes nesta área. Entretanto, é no Japão onde a Lógica *Fuzzy* mais tem se desenvolvido desde então, através de sistemas de controle de engenharia e de sistemas que utilizam inteligência artificial (COX, 1994).

A Lógica *Fuzzy* é notável por sua eficiência em ajustar expressões vagas, imprecisas ou subjetivas em informações que geram respostas adequadas à solução de determinados tipos de problemas de difícil modelagem e análise de comportamento, caso de muitos na natureza. Hortegal (2016) afirma que o principal conceito da Lógica *Fuzzy* é utilizar essas informações incertas criadas linguisticamente e expressas de forma qualitativa para a obtenção de dados quantificados que darão respostas úteis ao problema estudado.

A principal ilustração desse conceito está na definição dos graus de pertinência dos Conjuntos *Fuzzy*. Ao contrário da lógica clássica em que se admitem apenas os valores de pertinência “verdadeiro” (equivalente a 1) ou “falso” (equivalente a 0) de um elemento em relação a um determinado conjunto, na Lógica *Fuzzy* se considera o grau de pertinência com que tal elemento pertence a um conjunto, podendo assumir qualquer valor no intervalo $[0, 1]$ (RIGNEL, CHENCI e LUCAS, 2011). Ou seja, na Lógica *Fuzzy* os elementos podem pertencer totalmente, “parcialmente” ou não pertencer totalmente aos conjuntos *Fuzzy*.

Dessa forma, um elemento pode pertencer a mais de um conjunto na Lógica *Fuzzy*, tendo um grau de pertinência para cada conjunto. O grau de pertinência é representado no intervalo unitário. Quanto mais próximo o grau de pertinência é de 1, maior o pertencimento de tal elemento em relação ao conjunto analisado, ao passo que, quanto mais próximo de zero, menor a relação de pertinência. Relações de pertinência iguais a 1 e 0 representam pertinências total e inexistente, respectivamente (ZADEH, 1965). Conforme afirma Hortegal (2016), a Lógica *Fuzzy* representa a generalização da lógica clássica ao introduzir conceitos intermediários entre a verdade (um) e a falsidade (zero), e os graus de pertinência nada mais são que mensurações dos graus de verdade, algo que era incapaz de ser realizado com a lógica clássica aristotélica.

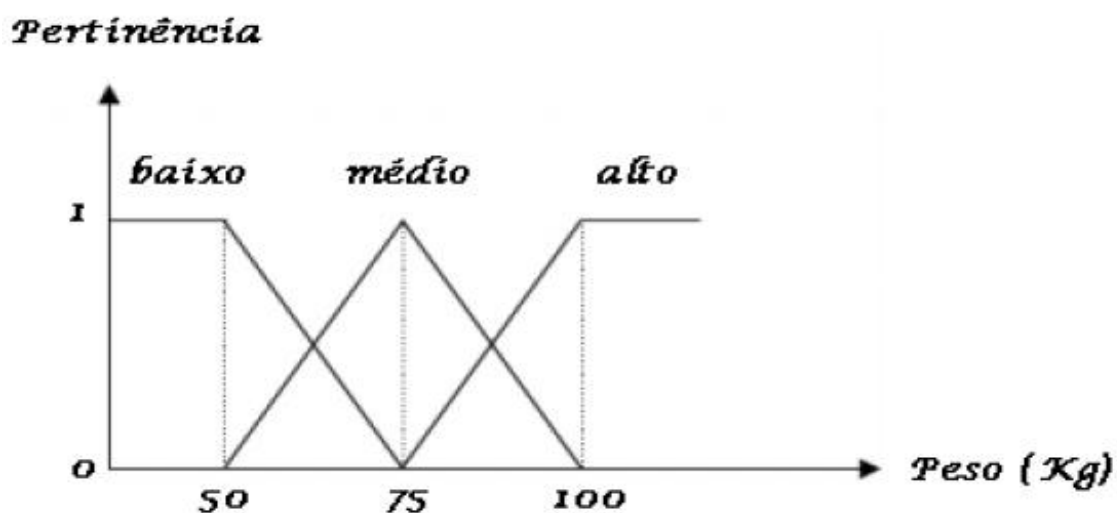
A correspondência de diferentes elementos e seus respectivos conjuntos *Fuzzy* pode ser representada graficamente por meio das funções de pertinência. Estas funções descrevem a relação entre um intervalo de valores pertencentes a conjuntos *Fuzzy* e sua correspondente pertinência no intervalo unitário. Estas funções podem possuir formas triangulares, trapezoidais

ou outras mais complexas, dependendo principalmente do tipo de modelagem que se deseja atribuir ao problema. A função de pertinência com formato triangular é a mais utilizada nos problemas envolvendo Lógica *Fuzzy*, por ser a mais simples e demandar menor esforço computacional (RAMOS, 2015).

Segundo Gomide e Gudwin (2014) as variáveis da Lógica *Fuzzy*, denominadas “linguísticas”, assumem valores qualitativos em um conjunto de termos linguísticos formado por palavras e frases. Por exemplo, podemos considerar o solo arenoso aferido por meio de um ensaio SPT como uma variável linguística. Esta variável poderá assumir valores linguísticos em função de suas características, como por exemplo “fofa”, “média”, “rija”, “dura”, entre outras. Cada uma dessas palavras empregadas para representar as características do solo arenoso é um termo linguístico atribuído à variável linguística “característica do solo arenoso”. Esta é uma das principais peculiaridades da Lógica *Fuzzy*: as variáveis assumem valores linguísticos (palavras, expressões) em substituição a valores numéricos.

Por exemplo, no gráfico 3 tem-se a representação *Fuzzy* da variável linguística “peso” de um indivíduo, representada pelos termos linguísticos {baixo, médio, alto}. Cada um desses termos é um conjunto *Fuzzy* definido por suas respectivas funções de pertinência, as quais associam a pertinência de valores da variável linguística “peso” aos conjuntos “baixo”, “médio” e “alto”.

Gráfico 3 Funções de pertinência da variável linguística "peso"



Fonte: COSTA, 2007 apud RIGNEL, CHENCI e LUCAS, 2011.

A partir da leitura do gráfico, percebe-se que pessoas com peso abaixo de 50 kg possuem pertinência total ao conjunto {baixo}, não pertencendo a qualquer outro. Da mesma forma, pessoas acima de 100 kg pertencem completamente ao conjunto {alto}. À medida que se

caminha no sentido positivo do eixo horizontal, percebe-se que os valores de peso aumentam e a pertinência destes valores em relação ao conjunto {baixo} se reduz gradativamente, aumentando a pertinência do conjunto {médio}, como a intuição indica.

Neste conjunto, valores de peso próximos de 75 kg possuem pertinência próxima de 1 e 0 nos outros. Gráficos como o apresentado podem ter sido obtidos por meio de uma pesquisa qualitativa com os habitantes de uma cidade, onde estes são indagados acerca de quais valores de peso consideram “baixo”, “médio” e “alto” para um indivíduo. A obtenção dos dados também pode ter sido obtida a partir do conhecimento de especialistas na área.

Zadeh (1965), em seu trabalho pioneiro sobre a Lógica *Fuzzy*, expõe que operações envolvendo conjuntos clássicos (crisp) tais como união, intersecção e complemento, bem como as propriedades comutativas e associativas, também se aplicam a conjuntos *Fuzzy*. Se considerarmos dois conjuntos *Fuzzy* A e B, são válidas as seguintes relações, que resultam em um conjunto *Fuzzy* C:

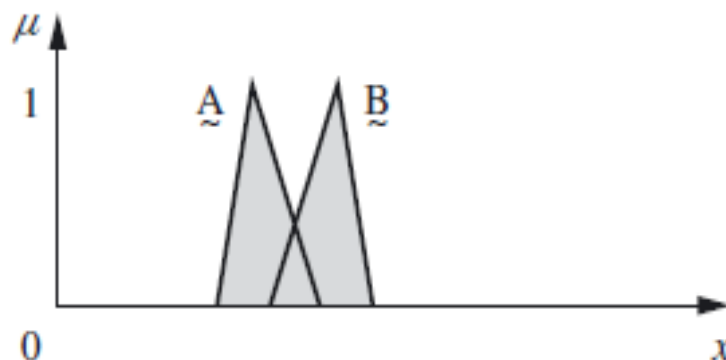
$$A \cup B = f_C(x) = MÁX[f_A(x); f_B(x)], x \in U \quad (16)$$

$$A \cap B = f_C(x) = MIN[f_A(x); f_B(x)], x \in U \quad (17)$$

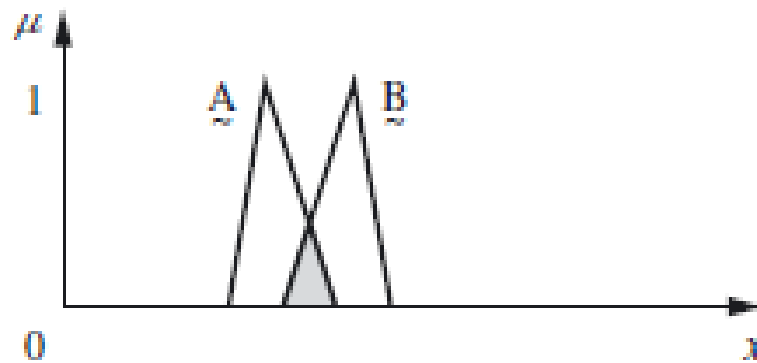
$$f'_A = 1 - A; f'_B = 1 - B; f'_C = 1 - C \quad (18)$$

Em que $f_A(x)$, $f_B(x)$ e $f_C(x)$ são as funções de pertinência dos conjuntos *Fuzzy* A, B e C, respectivamente, bem como f'_A , f'_B e f'_C são seus respectivos complementos e U é o conjunto que contém todos os valores de x pertencentes aos conjuntos. Graficamente, essas relações são representadas nos gráficos 4 a 6 para dois conjuntos *Fuzzy* A e B.

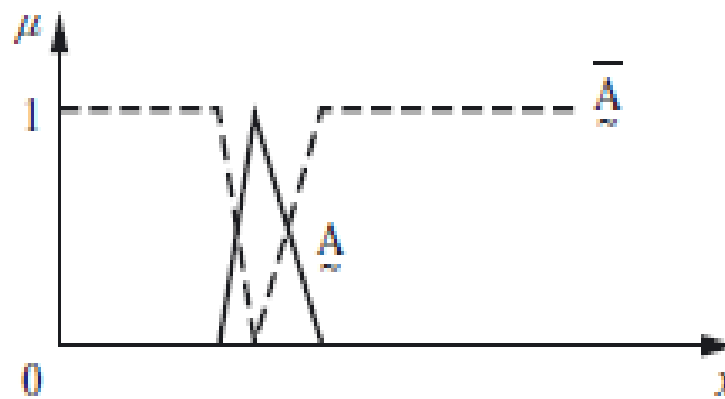
Gráfico 4 União de conjuntos *Fuzzy*



Fonte: Ross, 2010.

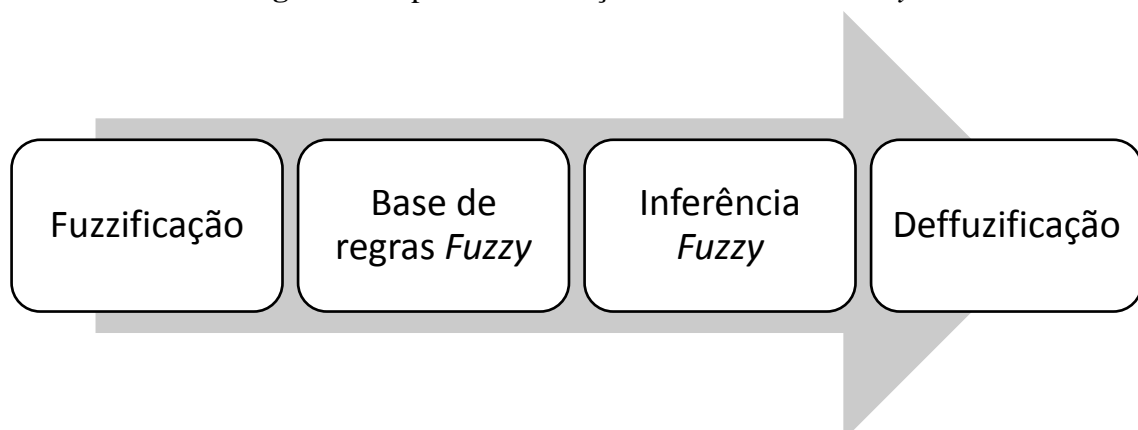
Gráfico 5 Interseção de conjuntos *Fuzzy*

Fonte: Ross, 2010.

Gráfico 6 Complemento de conjunto *Fuzzy*

Fonte: Ross, 2010.

Alguns problemas com características que não podem ser descritas adequadamente de forma determinista podem ser analisados como sistemas *Fuzzy*. Os sistemas *Fuzzy* funcionam como máquinas onde os valores de entrada são inseridos para que ao final sejam obtidos valores de saída que permitam melhor analisar o problema estudado. As etapas constituintes da elaboração de um Sistema *Fuzzy* estão representadas no diagrama da figura 7.

Figura 7 Etapas de elaboração de um sistema *Fuzzy*

Segundo Barros e Bassanezi (2006), as etapas constituintes de um sistema *Fuzzy* consistem, primeiramente, na fuzzificação, que equivale à modelagem dos dados de entrada do problema em conjuntos *Fuzzy* e seus respectivos domínios. Estes serão representados por suas variáveis linguísticas e funções de pertinência apropriadas, traçadas com base no conhecimento de especialistas, de forma a garantir dados condizentes ao final da análise.

Após a plotagem das funções de pertinência para todas as variáveis linguísticas estudadas, procede-se à segunda etapa, que consiste na elaboração de uma base de regras cuja função é relacionar os diferentes conjuntos *Fuzzy* modelados a um ou mais conjuntos *Fuzzy* que proverão os dados de saída do sistema. Barros e Bassanezi (2006) afirmam que cada regra *Fuzzy* pode ser descrita na forma “se ‘estado’, então ‘resposta’”. Os conjuntos *Fuzzy* são chamados de antecedentes quando integrarem o “estado” e consequentes quando integrarem a “resposta”.

As regras são comumente adotadas com base no conhecimento de especialistas. É importante frisar que podem haver uma ou várias entradas em um sistema *Fuzzy*, bem como uma ou várias saídas. Essas informações norteiam a elaboração das bases de regras, as quais poderão ter desde um a vários antecedentes e consequentes. Os termos de uma mesma regra são relacionados através de operadores lógicos. Os mais frequentemente empregados são os operadores “OU” e “E”, que representam as relações de união e interseção entre conjuntos, respectivamente.

Como exemplo, considera-se um problema em que há duas variáveis de entrada (VA1 e VA2) e uma variável de saída (VS). Às variáveis de entrada são atribuídos os termos linguísticos [{baixa}, {média}, {alta}] e [{pequena}, {média}, {grande}] e à variável de saída [{irrelevante}, {medianamente relevante}, {muito relevante}]. A base de regras deve considerar todos os valores possíveis de serem assumidos pelas variáveis de entrada, conforme a base de regras mostrada abaixo:

R1: se “VA1” é “baixa” e/ou “VA2” é “pequena”, então “VS” é “irrelevante”.

R2: se “VA1” é “baixa” e/ou “VA2” é “média”, então “VS” é “irrelevante”.

R3: se “VA1” é “baixa” e/ou “VA2” é “grande”, então “VS” é “medianamente relevante”.

⋮

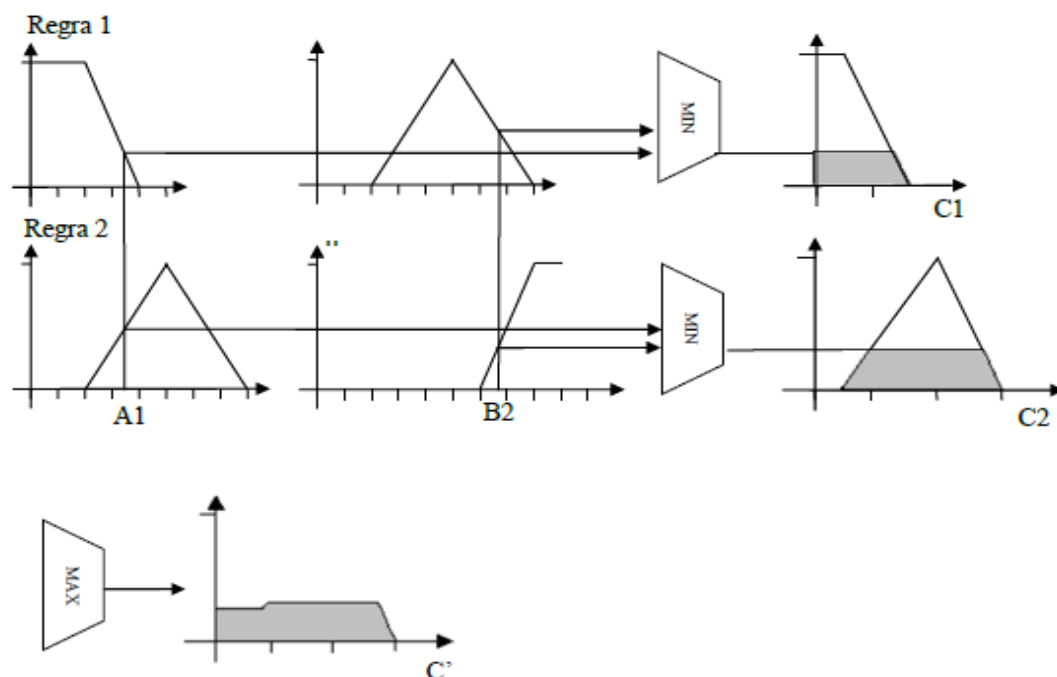
R8: se “VA1” é “alta” e/ou “VA2” é “média”, então “VS” é “relevante”.

R9: se “VA1” é “alta” e/ou “VA2” é “grande”, então “VS” é “relevante”.

As regras acima apresentadas comandarão a forma como os valores da variável de saída serão obtidos no sistema. Como há duas variáveis de saída e cada uma possui três termos linguísticos, foi necessário um total de nove regras para o sistema, considerando um “peso” igual de influência das variáveis de entrada para a obtenção da variável de saída. O termo linguístico da variável de saída em cada regra deve ser atribuído preferencialmente por especialistas do problema estudado.

Na terceira etapa, denominada inferência *Fuzzy*, é estabelecida a relação entre os conjuntos *Fuzzy* de entrada e de saída (RAMOS, 2015). O método de inferência mais utilizado em sistemas *Fuzzy* é o desenvolvido em 1975 por Ebrahim Mamdani, docente da universidade de Londres, por apresentar fácil implementação. Neste processo, as regras *Fuzzy* são agregadas para a obtenção dos conjuntos *Fuzzy* consequentes por meio de operadores MAX-MIN. Em caso de regras com muitos antecedentes relacionadas a partir do operador lógico “E”, considera-se o menor valor de pertinência entre os antecedentes, enquanto no operador lógico “OU” considera-se o maior valor. Na figura 8 são mostradas como exemplo duas regras com dois antecedentes relacionados através do operador lógico “E”, os quais resultam nos conjuntos *Fuzzy* consequentes posteriormente agregados.

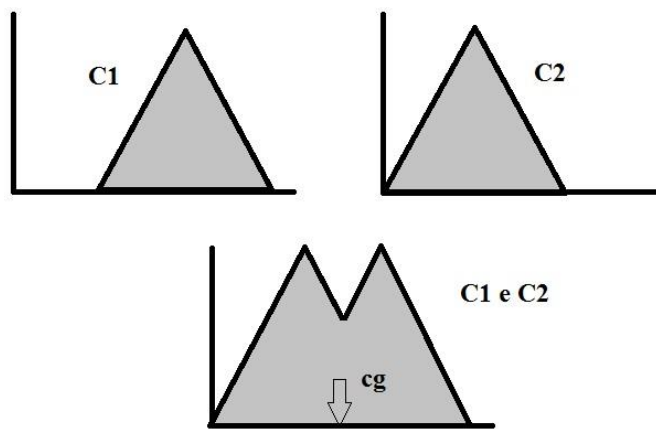
Figura 8 Estratégia de raciocínio *Fuzzy* de Mamdani para duas regras



Fonte: RAMOS, 2015.

Por fim, a última etapa consiste na defuzzificação, onde os valores fuzzificados são transformados em valores que possam ser analisados, geralmente valores numéricos (crisp). Na literatura atual existem diversos métodos de defuzzificação, destacando-se as técnicas do centroide e do centro dos máximos, sendo mais utilizada a primeira. Na técnica do centroide o valor preciso proveniente do conjunto *Fuzzy* consequente é obtido a partir do centro de gravidade da área formada por todos os conjuntos *Fuzzy* consequentes agregados. O gráfico 7 ilustra esse procedimento considerando dois conjuntos *Fuzzy* consequentes.

Gráfico 7 Método do centro de gravidade



Fonte: autor.

3. METODOLOGIA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos projetos de fundações sempre existem incertezas associadas a diversos parâmetros relativos ao solo e aos próprios elementos estruturais que compõem os elementos de fundação – no caso deste trabalho, as estacas –. Para garantir a segurança à ruptura do projeto e, sobretudo, a segurança dos usuários, os projetistas utilizam fatores de segurança no cálculo das resistências e solicitações atuantes nos elementos de fundação das edificações.

Esses fatores de segurança distanciam o valor da capacidade de carga real, cujo valor pode ser apenas estimado face aos diferentes aspectos que o influenciam, do valor admissível ou de cálculo que o elemento de fundação deverá suportar. Apesar de os fatores de segurança serem frequentemente eficazes para a garantia de segurança das fundações, o risco de ruptura dos elementos de fundação é sempre presente.

A razão disso se deve ao fato de que o valor da capacidade de carga real dos elementos de fundação é variável, podendo apresentar valores superiores ou inferiores à carga admissível estabelecida em projeto. Quando, dentre os diferentes valores que a capacidade de carga real pode assumir, tem-se um caso onde esta assume um valor inferior à carga admissível, tem-se um valor de solicitação maior do que o de uma resistência ($S > R$), implicando na ruína da fundação. A ruína é possível mesmo com a utilização de elevados fatores de segurança.

Com vistas a realizar uma verificação mais completa acerca da segurança das fundações, surgiram os estudos de confiabilidade, que consideram a variabilidade de valores assumidos pelas solicitações e resistências que podem atuar sobre os elementos de fundação. O estudo de confiabilidade é, portanto, uma maneira mais eficiente de analisar a segurança das fundações. Entretanto, atualmente os estudos de confiabilidade ainda não são de realização frequente entre os projetistas atuais, tendo em vista a praticidade de adoção de fatores de segurança tabelados presentes nas normas técnicas.

O estudo de confiabilidade obtém a variável índice de confiabilidade, relacionada matematicamente à probabilidade de ruína e a um fator de segurança implícito. Esse estudo utiliza métodos probabilísticos para chegar às variáveis em questão. Entretanto, sabe-se que na Geotecnia há muitas situações onde é necessária a tomada de decisão por parte dos profissionais responsáveis pela obra geotécnica. Essas decisões podem influenciar na confiabilidade e na segurança das fundações. As decisões tomadas baseiam-se em diversos aspectos subjetivos, os

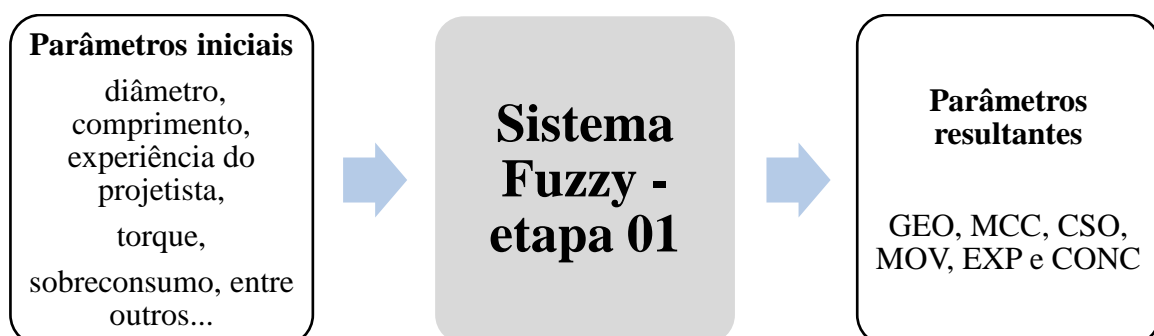
quais, apesar de serem relevantes para a confiabilidade e a segurança, são difíceis de serem modelados e considerados pelos métodos convencionais. Além disso, os parâmetros do processo executivo das estacas hélice contínua, como o torque da hélice, o sobreconsumo de concreto e a pressão de injeção, influenciam no resultado final do elemento de fundação, e, por conseguinte, na confiabilidade. Apesar disso, esses parâmetros não são considerados diretamente na confiabilidade probabilística.

Tendo em vista o acima exposto, este trabalho buscou obter uma variável de confiabilidade que pudesse considerar aspectos subjetivos do processo de projeto e execução de estacas hélice contínua. Tendo em vista que os dados analisados são de natureza subjetiva, pois dependem da decisão de projetistas e executores, utilizou-se a metodologia da Lógica *Fuzzy*, a partir da criação de um sistema baseado nessa lógica, adequado para receber como dados de entrada valores imprecisos ou vagos (caso das informações de entrada tratadas neste problema).

O sistema *Fuzzy* foi elaborado com o auxílio de um banco de dados baseado na opinião de especialistas na área acerca dos parâmetros de projeto e execução escolhidos, obtido a partir da aplicação de um questionário on-line a esses profissionais. Para simplificar a quantidade de regras necessária para o funcionamento do sistema *Fuzzy*, o mesmo foi dividido em duas partes: a primeira foi intitulada “etapa 01” e possui como dados de entrada valores de variáveis de projeto e execução das estacas hélice contínua (denominados parâmetros iniciais). A variável de saída é um valor de parâmetro resultante baseado no agrupamento de um ou mais parâmetros iniciais. A segunda parte, “etapa 02 – principal”, possui como dados de entrada os parâmetros resultantes da etapa 01 e como dado de saída a variável de confiabilidade desejada, intitulada neste trabalho como “variável de confiabilidade *Fuzzy*”.

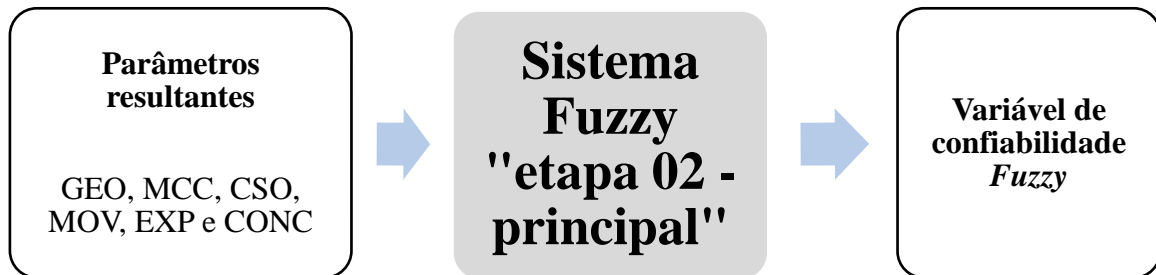
As figuras 9 e 10 mostram o esquema de funcionamento dos sistemas *Fuzzy* descritos.

Figura 9 Esquema da etapa 01



Fonte: autor

Figura 10 Esquema da etapa 02 - principal



Fonte: autor

Os resultados obtidos foram comparados aos encontrados no estudo de confiabilidade probabilístico das estacas hélice contínua do Hospital Universitário (HU) da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP). Para uma melhor compreensão, este trabalho será apresentado conforme os itens abaixo:

- Estabelecimento de parâmetros de projeto e execução de estacas hélice contínua;
- Implementação de questionário on-line;
- Elaboração da etapa 01, que consistiu nas subetapas abaixo:
 - Fuzzificação;
 - Elaboração da base de regras *Fuzzy* do sistema;
 - Aplicação das regras de inferência;
 - Defuzzificação.
- Elaboração da etapa 02 - principal;
- Estudo de confiabilidade das estacas hélice contínua do Hospital Universitário da UNIFAP;
- Verificação do funcionamento do sistema a partir da análise dos três casos de projeto de estacas hélice contínua.

3.2 ESCOLHA DE PARÂMETROS DE PROJETO E EXECUÇÃO DE ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA

Para a elaboração do sistema *Fuzzy*, foi necessário definir primeiramente quais seriam os dados de entrada. Estes dados devem ser parâmetros relacionados ao projeto e à execução de fundações por estacas hélice contínua. A variável de confiabilidade *Fuzzy* será função das

informações relacionadas aos parâmetros escolhidos. Nas tabelas 7 e 8 são mostrados os parâmetros escolhidos e suas respectivas unidades de medida. Auxiliaram na escolha dos parâmetros os trabalhos desenvolvidos por Ramos (2015) e Hortegal (2016). Estes parâmetros são as variáveis linguísticas dos conjuntos *Fuzzy* criados na etapa “fuzzificação” do sistema *Fuzzy*, descrita no item 3.4.1.

Tabela 7 Parâmetros de projeto de estacas hélice contínua escolhidos para o sistema *Fuzzy*

Parâmetros de projeto	Unidade
Comprimento da estaca	m
Diâmetro da estaca	mm
Espaçamento entre eixos de estacas	m
Experiência do projetista	ano
Método de determinação da capacidade de carga	-
Características mecânicas do solo	N _{SPT}

Fonte: autor

Tabela 8 Parâmetros de execução de estacas hélice contínua escolhidos para o sistema *Fuzzy*

Parâmetros de execução	Unidade
Torque da hélice de perfuração	kNm
Velocidade de perfuração do trado	m/h
Pressão de injeção de concreto	kN/m ²
Superconsumo de concreto	%
Velocidade de extração do trado	m/h
Experiência do executor	Ano

Fonte: autor

3.3 IMPLEMENTAÇÃO DE QUESTIONÁRIO ON-LINE

Com o objetivo de obter dados acerca da opinião de especialistas na área de fundações profundas acerca dos parâmetros previamente estabelecidos, foi elaborado um questionário (apêndice A) utilizando a ferramenta Formulários Google®. A implementação foi realizada no período de 28 de outubro de 2018 a 22 de dezembro de 2018. O link do questionário foi

disponibilizado no ambiente de acesso dos associados da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos (ABMS) e em grupos da rede social Facebook® relacionados à engenharia geotécnica.

O questionário é composto por 04 (quatro) seções formadas por 14 (quatorze) perguntas, sendo 10 (dez) do tipo múltipla escolha e/ou grade de múltipla escolha e 04 (quatro) questões discursivas. Na Seção I – perfil do participante – são feitas perguntas do tipo grade de múltipla escolha relativas à idade, aos tempos de formação e de experiência, à maior titulação, à região de atuação e à experiência em projeto e/ou execução de obras geotécnicas dos profissionais respondentes.

Na Seção II – atuação na área de fundações profundas – os respondentes preencheram questões de múltipla escolha relativas à experiência na utilização de diferentes métodos de estimativa da capacidade de carga de fundações profundas; frequência de realização de estudos de confiabilidade nas obras em que já participaram do projeto e/ou execução; e sobre a preferência na utilização de diferentes métodos de estimativa da capacidade de carga em conjunto.

Na Seção III – Parâmetros de projeto de estacas hélice contínua – os respondentes opinaram acerca da relevância da variabilidade dos parâmetros de projeto descritos na tabela 7 para a confiabilidade das fundações por estaca hélice contínua.

De maneira similar, na Seção IV – Parâmetros de execução de estacas hélice contínua - os respondentes opinaram acerca da relevância da variabilidade dos parâmetros de execução constantes na tabela 8 para a confiabilidade das fundações por estaca hélice contínua.

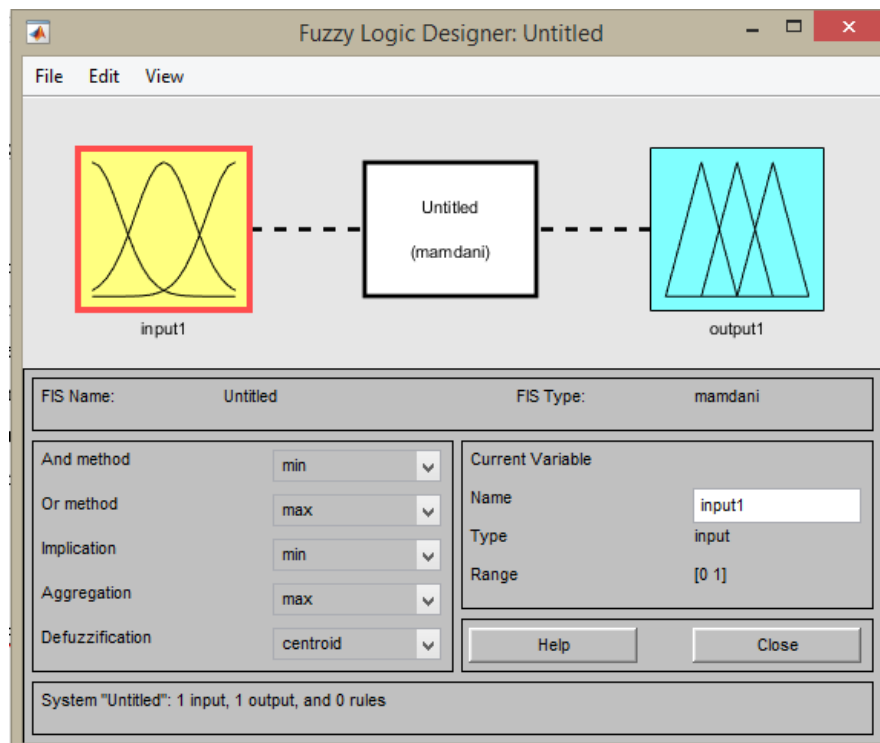
Na Seção V – Comentários, críticas e/ou sugestões – foi disponibilizado espaço aos respondentes para a realização de comentários, críticas e/ou sugestões ao questionário, à metodologia utilizada e ao tema da pesquisa.

O acesso aos dados obtidos no questionário on-line pôde ser feito pelo download de uma planilha eletrônica contendo os dados inseridos pelos respondentes. Entretanto, há que se ressaltar que a ferramenta Formulários Google® é capaz de gerar gráficos a partir das informações respondidas, não necessitando obrigatoriamente do download das respostas. No apêndice B constam as respostas obtidas do questionário on-line.

3.4 ELABORAÇÃO DA ETAPA 01

O sistema deste trabalho terá como dados de entrada as informações referentes aos parâmetros estabelecidos no item 3.2. O dado de saída será um valor de confiabilidade que é função das informações inseridas no sistema. Para elaborar o sistema *Fuzzy* foi utilizada a ferramenta *Fuzzy Logic Toolbox* do programa MATLAB®, por ser de fácil utilização e atender às necessidades do problema em questão. A figura 11 mostra a interface do programa voltado para a Lógica *Fuzzy*.

Figura 11 Ambiente do programa MATLAB® para Lógica *Fuzzy*



Fonte: MATLAB®.

3.4.1 Fuzzificação

A primeira etapa de elaboração do Sistema *Fuzzy* consistiu em transformar em conjuntos *Fuzzy* os dados referentes aos parâmetros selecionados no item 3.2. Cada parâmetro é uma variável linguística representada por seus respectivos três termos linguísticos, os quais, como conjuntos *Fuzzy*, foram graficamente representados por suas respectivas funções de pertinência. O gráfico resultante de cada parâmetro tem como eixo das abcissas valores de domínio que podem ser assumidos por esses parâmetros em um projeto.

Por exemplo, para o parâmetro “diâmetro”, foi escolhido o domínio [250, 1000], pois representa a faixa de valores que podem ser assumidos por essa variável, em milímetros. O eixo das ordenadas representa a pertinência destes valores em relação aos conjuntos *Fuzzy* dos termos linguísticos, por meio do intervalo [0, 1].

A função de pertinência adotada para os conjuntos *Fuzzy* foi a trapezoidal, por ser simples, exigir menor complexidade computacional e por possuir boa adequabilidade à metodologia adotada para elaborar os conjuntos *Fuzzy* e a determinação das regiões de sobreposição entre conjuntos adjacentes. Os termos linguísticos adotados para os parâmetros escolhidos neste trabalho estão descritos abaixo:

Diâmetro da estaca: pequeno, médio e grande;

Comprimento da estaca: pequeno, médio e grande;

Experiência do projetista: baixa, média e alta;

Método de determinação da capacidade de carga: teórico, semi-empírico e prova de carga;

Quantidade de métodos de determinação da capacidade de carga: pequena, média e grande;

Resistência do solo: baixa, média e alta;

Torque da hélice de perfuração: baixo, médio e alto;

Velocidade de perfuração do trado: baixa, média e alta;

Pressão de injeção de concreto: baixa, média e alta;

Superconsumo de concreto: baixo, médio e alto;

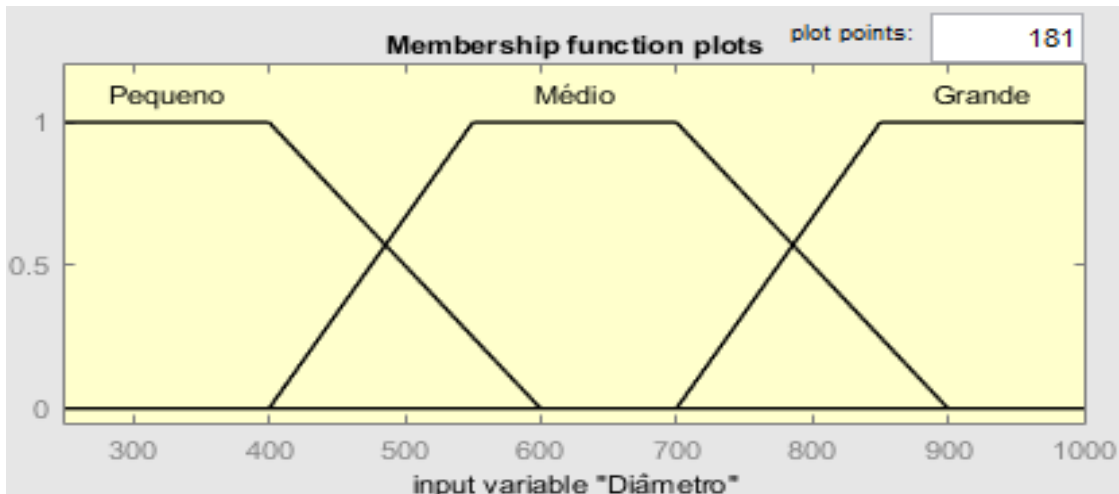
Velocidade de extração do trado: baixa, média e alta;

Experiência do executor: baixa, média e alta.

As funções de pertinência foram traçadas com base na literatura disponível sobre o tema. Os gráficos 8 a 19 mostram os conjuntos *Fuzzy* para todos os parâmetros de entrada estudados. O eixo horizontal representa os domínios de valores que podem ser assumidos pelos termos linguísticos dos parâmetros e o eixo vertical representa a pertinência dos elementos do eixo horizontal em relação aos conjuntos *Fuzzy*. A unidade do eixo horizontal de cada parâmetro

está de acordo com as apresentadas nas tabelas 7 e 8. Os pontos pertencentes às funções de pertinência dos termos linguísticos de cada variável linguística são mostrados nas tabelas 9 a 20. O domínio da variável “métodos de determinação da capacidade de carga” foi estipulado no intervalo $[0,10]$, pois representa uma nota a ser atribuída pelo usuário do sistema referente à qualidade dos métodos utilizados. Quanto melhor a qualidade, maior deverá ser a nota.

Gráfico 8 Conjuntos *Fuzzy* da variável linguística "Diâmetro"



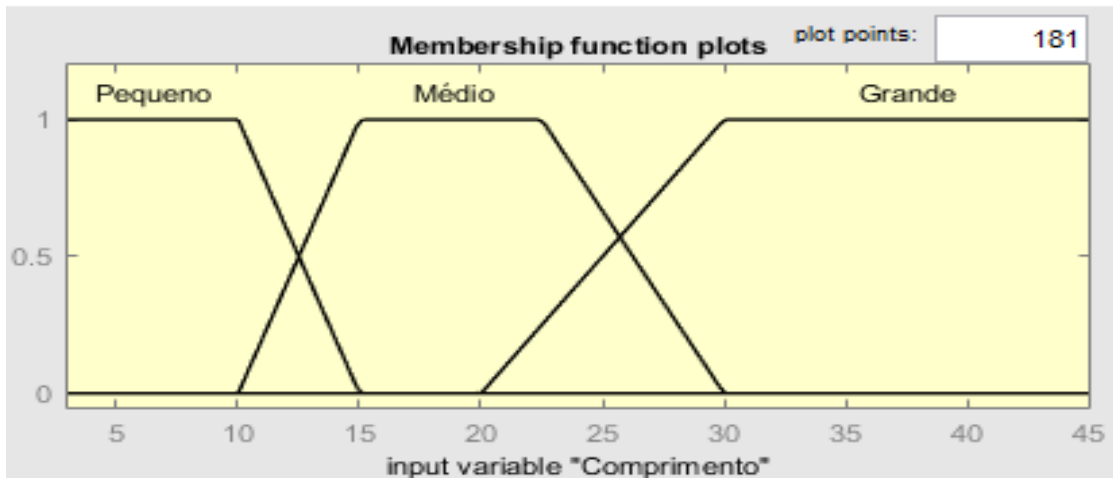
Fonte: autor.

Tabela 9 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Diâmetro"

Termo linguístico	Pontos					
	(250, 1)	(400, 1)	(600, 0)	(1000, 0)	-	-
Pequeno	(250, 1)	(400, 1)	(600, 0)	(1000, 0)	-	-
Médio	(250, 0)	(400, 0)	(550, 1)	(700, 1)	(900, 0)	(1000, 0)
Grande	(250, 0)	(700, 0)	(850, 1)	(1000, 1)	-	-

Fonte: autor.

Gráfico 9 Conjuntos *Fuzzy* da variável linguística "Comprimento"



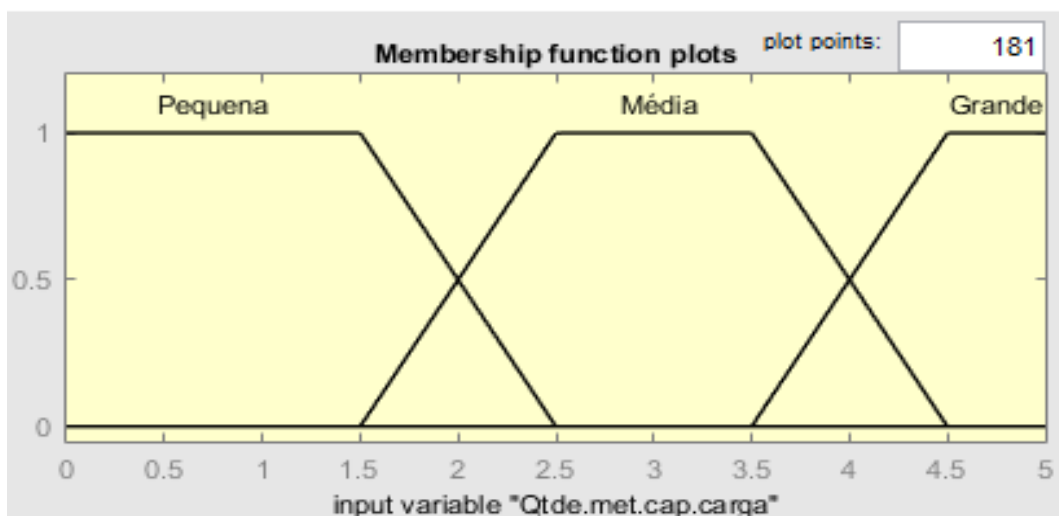
Fonte: autor.

Tabela 10 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Comprimento"

Termo linguístico	Pontos					
Pequeno	(3, 1)	(10, 1)	(15, 0)	(45, 0)	-	-
Médio	(3, 0)	(10, 0)	(15, 1)	(22.5, 1)	(30, 0)	(45, 0)
Grande	(3, 0)	(20, 0)	(30, 1)	(45, 1)	-	-

Fonte: autor.

Gráfico 10 Conjuntos *Fuzzy* da variável linguística "Quantidade de métodos de determinação da capacidade de carga"



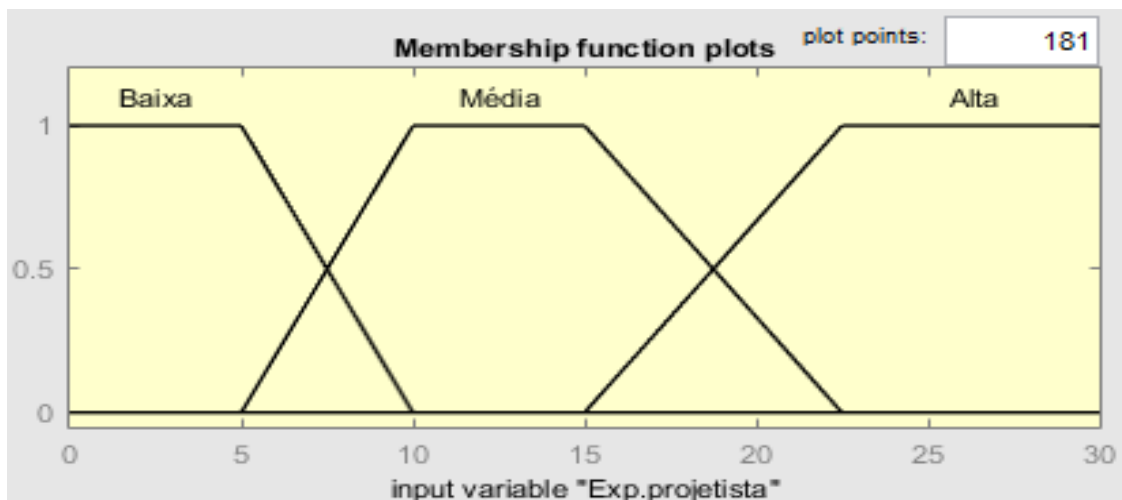
Fonte: autor.

Tabela 11 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Quantidade de métodos de determinação da capacidade de carga"

Termo linguístico	Pontos					
Pouca	(0, 1)	(1.5, 1)	(2.5, 0)	(5, 0)	-	-
Média	(0, 0)	(1.5, 0)	(2.5, 1)	(3.5, 1)	(4.5, 0)	(5, 0)
Grande	(0, 0)	(3.5, 0)	(4.5, 1)	(5, 1)	-	-

Fonte: autor.

Gráfico 11 Conjuntos Fuzzy da variável linguística "Experiência do projetista"



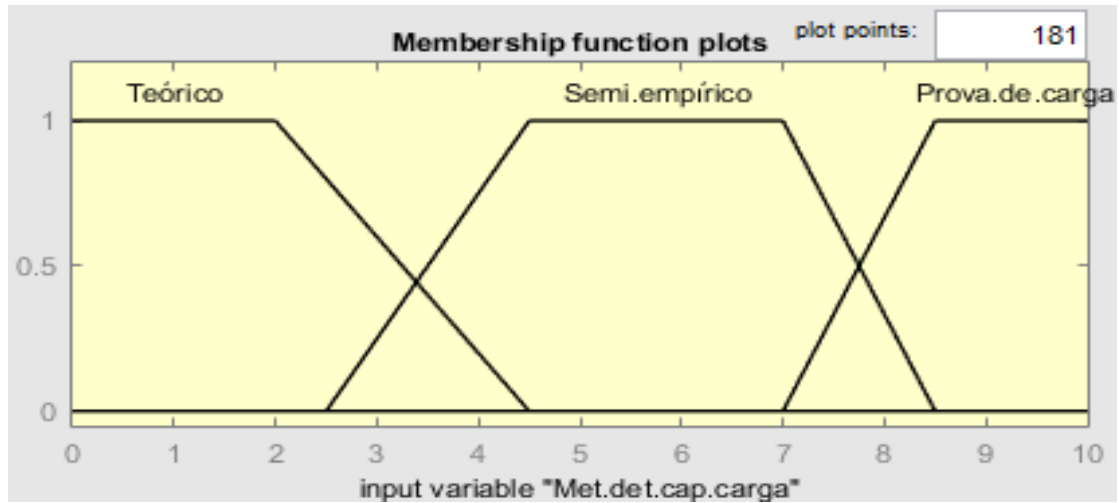
Fonte: autor.

Tabela 12 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Experiência do projetista"

Termo linguístico	Pontos					
Baixa	(0, 1)	(5, 1)	(10, 0)	(30, 0)	-	-
Média	(0, 0)	(5, 0)	(10, 1)	(15, 1)	(22.5, 0)	(30, 0)
Alta	(0, 0)	(15, 0)	(22.5, 1)	(30, 1)	-	-

Fonte: autor.

Gráfico 12 Conjuntos *Fuzzy* da variável linguística "Método de determinação da capacidade de carga"



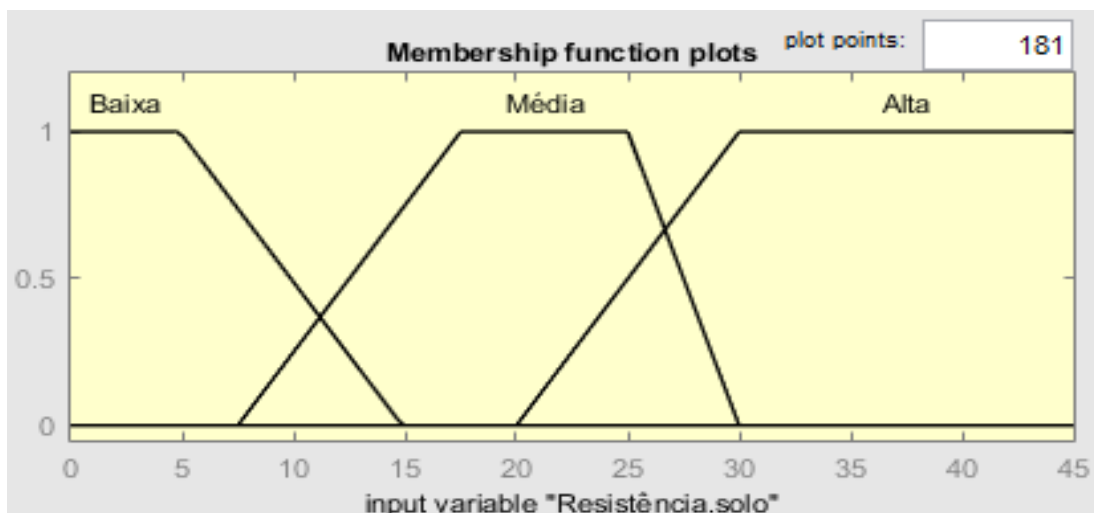
Fonte: autor.

Tabela 13 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Método de determinação da capacidade de carga"

Termo linguístico		Pontos				
		Teórico	(0, 1)	(2, 1)	(4.5, 0)	(10, 0)
Semi-empírico	(0, 0)	(2.5, 0)	(4.5, 1)	(7, 1)	(8.5, 0)	(10, 0)
Prova de carga	(0, 0)	(7, 0)	(8.5, 1)	(10, 1)	-	-

Fonte: autor.

Gráfico 13 Conjuntos *Fuzzy* da variável linguística "Resistência do solo"

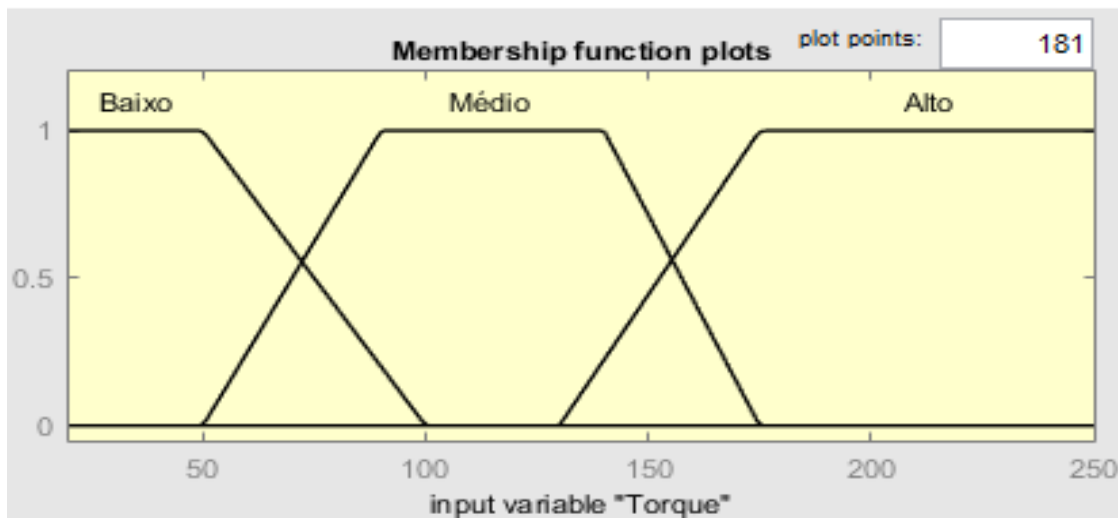


Fonte: autor.

Tabela 14 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Resistência do solo"

Termo linguístico	Pontos					
	Baixa	(0, 1)	(5, 1)	(15, 0)	(45, 0)	-
Média	(0, 0)	(7.5, 0)	(17.5, 1)	(25, 1)	(30, 0)	(45, 0)
Alta	(0, 0)	(20, 0)	(30, 1)	(45, 1)	-	-

Fonte: autor.

Gráfico 14 Conjuntos *Fuzzy* da variável linguística "Torque"

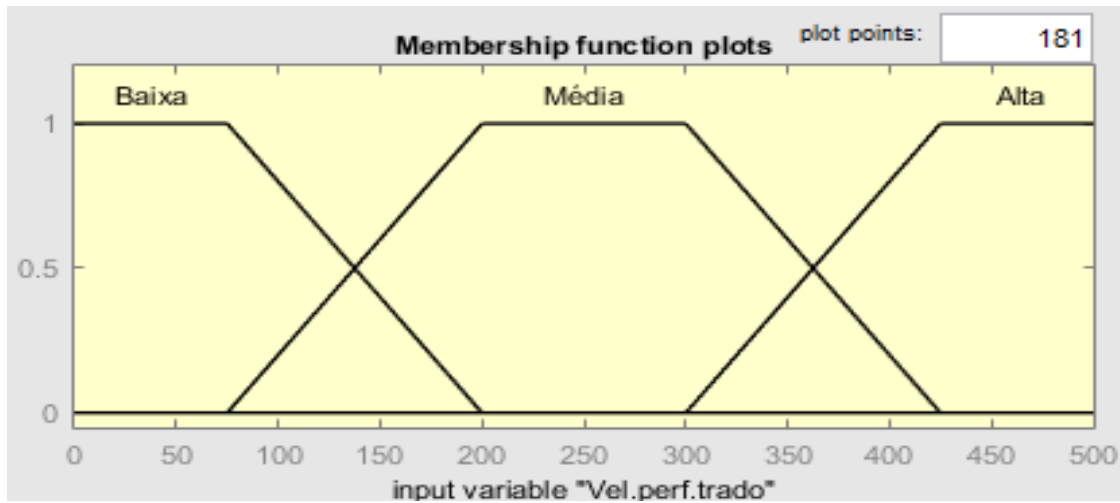
Fonte: autor.

Tabela 15 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Torque"

Termo linguístico	Pontos					
	Baixa	(0, 1)	(50, 1)	(100, 0)	(250, 0)	-
Média	(0, 0)	(50, 0)	(90, 1)	(140, 1)	(175, 0)	(250, 0)
Alta	(0, 0)	(130, 0)	(175, 1)	(250, 1)		

Fonte: autor.

Gráfico 15 Conjuntos *Fuzzy* da variável linguística "Velocidade de perfuração do trado"



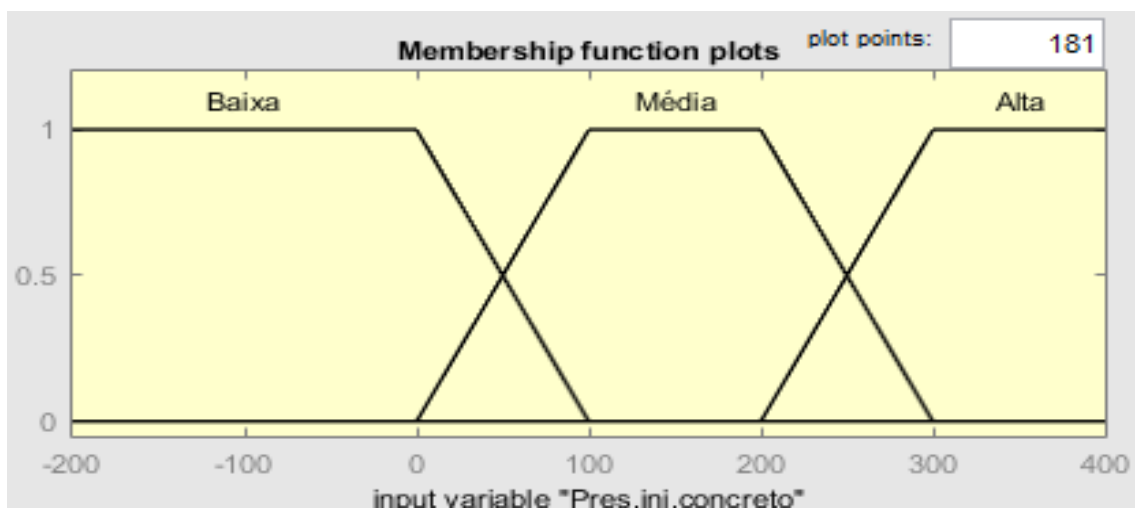
Fonte: autor.

Tabela 16 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Velocidade de perfuração do trado"

Termo linguístico	Pontos					
Baixa	(0, 1)	(75, 1)	(200, 0)	-	-	-
Média	(0, 0)	(75, 0)	(200, 1)	(300, 1)	(425, 0)	(500, 1)
Alta	(0, 0)	(300, 0)	(425, 1)	(500, 1)	-	-

Fonte: autor.

Gráfico 16 Conjuntos *Fuzzy* da variável linguística "Pressão de injeção de concreto"



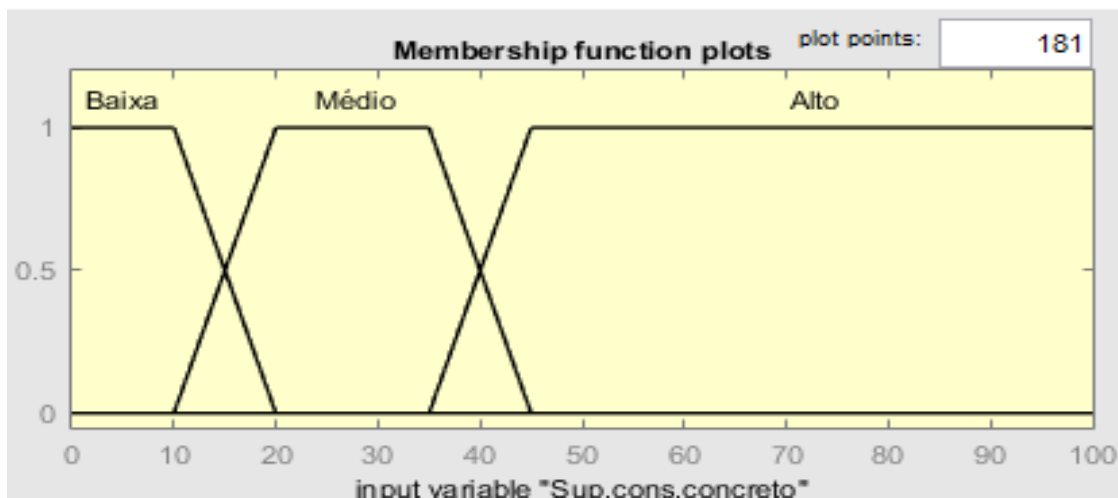
Fonte: autor.

Tabela 17 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Pressão de injeção de concreto"

Termo linguístico	Pontos					
Baixa	(-200, 1)	(0, 1)	(100, 0)	(400, 0)	-	-
Média	(-200, 0)	(0, 0)	(100, 1)	(200, 1)	(300, 0)	(400, 0)
Alta	(-200, 0)	(200, 0)	(300, 1)	(400, 1)	-	-

Fonte: autor.

Gráfico 17 Conjuntos *Fuzzy* da variável linguística "Superconsumo de concreto"



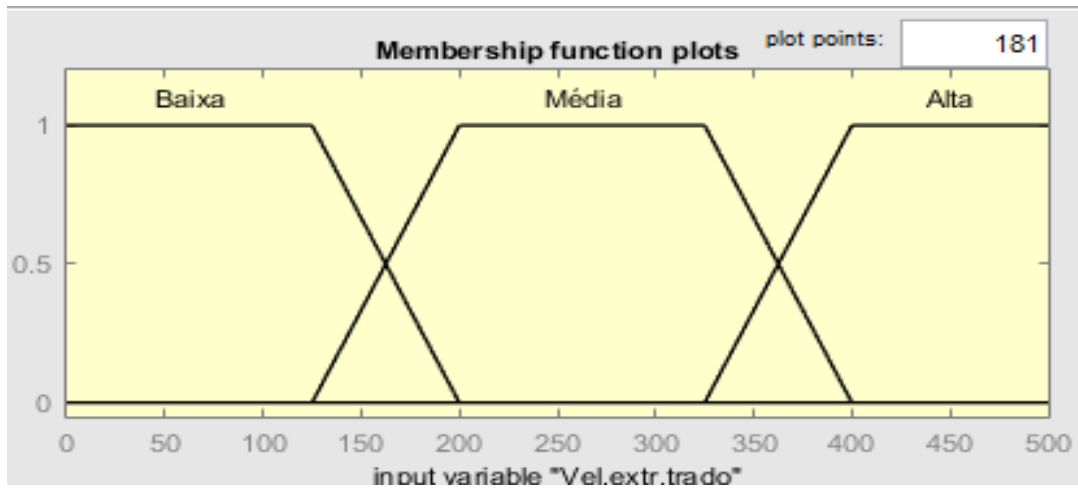
Fonte: autor.

Tabela 18 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Superconsumo de concreto"

Termo linguístico	Pontos					
Baixo	(0, 1)	(10, 1)	(20, 0)	(100, 0)	-	-
Médio	(0, 0)	(10, 0)	(20, 1)	(35, 1)	(45, 0)	(100, 0)
Alto	(0, 0)	(35, 0)	(45, 1)	(100, 1)	-	-

Fonte: autor.

Gráfico 18 Conjuntos *Fuzzy* da variável linguística "Velocidade de extração do trado"



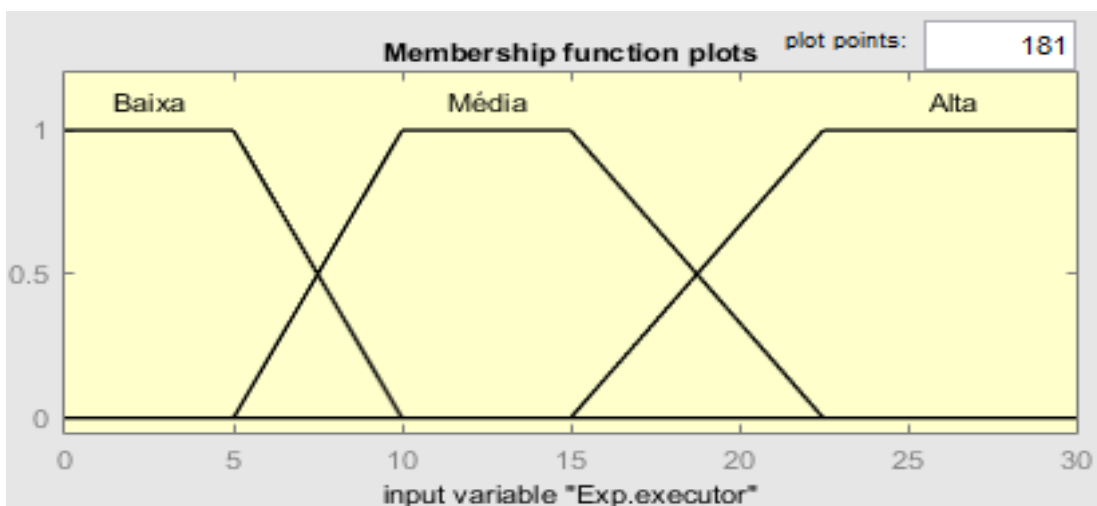
Fonte: autor.

Tabela 19 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Velocidade de extração do trado"

Termo linguístico	Pontos					
Insuficiente	(0, 1)	(125, 1)	(200, 0)	(500, 0)	-	-
Ideal	(0, 0)	(125, 0)	(200, 1)	(325, 1)	(400, 0)	(500, 0)
Elevada	(0, 0)	(325, 0)	(400, 1)	(500, 1)	-	-

Fonte: autor.

Gráfico 19 Conjuntos *Fuzzy* da variável linguística "Experiência do executor"



Fonte: autor.

Tabela 20 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "Experiência do executor"

Termo linguístico	Pontos					
Baixa	(0, 1)	(5, 1)	(10, 0)	(30, 0)	-	-
Média	(0, 0)	(5, 0)	(10, 1)	(15, 1)	(22.5, 1)	(30, 0)
Alta	(0, 0)	(15, 0)	(22.5, 1)	(30, 1)	-	-

Fonte: autor.

3.4.2 Base de regras *Fuzzy*

Considerando o número de parâmetros definidos para a elaboração do sistema (seis parâmetros de projeto e seis parâmetros de execução), a base de regras *Fuzzy* necessária para um único sistema *Fuzzy* totalizaria 531.441 ($12^3 = 531.441$) regras baseadas nas combinações entre os termos linguísticos de todos os parâmetros. Tendo em vista o número elevado de regras *Fuzzy* necessário para controlar o sistema, decidiu-se agrupar os parâmetros considerados semelhantes em parâmetros resultantes, os quais serão os verdadeiros dados de entrada do Sistema *Fuzzy*.

O agrupamento possibilitou a redução do número de parâmetros para 06 (seis) e o número de regras para 729 ($3^6 = 729$). A tabela 21 mostra os parâmetros resultantes em função de seus parâmetros iniciais, bem como a nomenclatura adotada para os parâmetros resultantes.

Tabela 21 Parâmetros iniciais e parâmetros resultantes do sistema *Fuzzy*

Parâmetro inicial	Parâmetro resultante	Nomenclatura
Diâmetro da estaca	Variável geométrica das estacas	GEO
Comprimento da estaca		
Método de determinação da capacidade de carga	Métodos de estimativa da capacidade de carga	MCC
Quantidade de métodos de determinação de capacidade de carga		
Resistência do solo	Resistência do solo	CSO
Experiência do projetista	Experiência na área de fundações	EXP
Experiência do executor		
Velocidade de perfuração do trado	Variável relacionada à movimentação do maquinário	MOV
Velocidade de extração do trado		
Torque da hélice de perfuração		
Pressão de injeção do concreto	Variável relacionada ao concreto	CONC
Superconsumo de concreto		

Fonte: autor.

Os valores assumidos pelos parâmetros resultantes devem ser obtidos a partir da etapa 01 que possui como variáveis linguísticas de entrada os parâmetros iniciais com seus respectivos três termos linguísticos, mostrados nos gráficos 8 a 19. As variáveis de saída são os parâmetros resultantes mostrados na tabela 21. Os termos linguísticos dos parâmetros resultantes são “baixo”, “médio” e “alto”.

Definidas as variáveis de entrada e saída da etapa 01, é necessário elaborar as regras que comandarão o sistema. Para isso, consideraram-se as respostas das seções III e IV do questionário, referentes aos parâmetros de projeto e execução. A partir das respostas, atribuíram-se pesos aos parâmetros iniciais que auxiliaram na obtenção das regras.

Como exemplo, mostra-se como foram obtidas as regras relacionadas ao parâmetro CONC. Os parâmetros iniciais de CONC, pressão de injeção de concreto e superconsumo de concreto, obtiveram as seguintes respostas em relação à relevância dos mesmos para a confiabilidade:

Tabela 22 Respostas do questionário para os parâmetros resultantes de CONC

Parâmetro	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta
Pressão de injeção de concreto (kN/m ²)	-	-	50,0%	41,7%	8,3%
Superconsumo de concreto (%)	-	-	58,3%	41,7%	-

Fonte: autor.

Considerando “Muito baixa” = 1, “Baixa” = 2, “Média” = 3, “Alta” = 4 e “Muito alta” = 5, foi obtido um “fator de relevância” relacionado aos parâmetros, através de média ponderada, como é mostrado nas expressões 19 e 20:

$$F_P = \frac{0 * 1 + 0 * 2 + 50,0 * 3 + 41,7 * 4 + 8,3 * 5}{100} = 3,58 \quad (19)$$

$$F_S = \frac{0 * 1 + 0 * 2 + 58,3 * 3 + 41,7 * 4 + 0 * 5}{100} = 3,42 \quad (20)$$

F_{PC} e F_{SC} são os fatores referentes aos parâmetros pressão de injeção de concreto e sobreconsumo de concreto, respectivamente. Esses fatores representam o peso de influência desses parâmetros para o valor de seu parâmetro resultante. O fator mostra que o parâmetro pressão de injeção terá um peso de influência maior nas regras.

Os parâmetros “Diâmetro da estaca” e “Comprimento da estaca” formaram o parâmetro resultante “GEO” por meio de 09 (nove) regras. Este parâmetro objetivou relacionar as características geométricas das estacas. A base de regras do parâmetro GEO é apresentada na tabela 23.

Tabela 23 Base de regras do parâmetro "GEO"

Nº	SE		ENTÃO
	Diâmetro	Comprimento	GEO
1	Pequeno	Pequeno	Baixa
2	Pequeno	Médio	Média
3	Pequeno	Grande	Média
4	Médio	Pequeno	Baixa
5	Médio	Médio	Média
6	Médio	Grande	Alta
7	Grande	Pequeno	Média
8	Grande	Médio	Alta
9	Grande	Grande	Alta

Fonte: autor.

Os parâmetros “Método de determinação da capacidade de carga” e “Quantidade de métodos de determinação da capacidade de carga” formaram o parâmetro resultante “MCC” por meio de 09 (nove) regras. Este parâmetro se refere à confiança proporcionada por diferentes métodos de determinação da capacidade de carga de fundações profundas e sua possível utilização em conjunto. Para este parâmetro estipulou-se que os métodos teóricos de estimativa da capacidade de carga são menos confiáveis do que os métodos semi-empíricos e estes, por sua vez, são menos confiáveis do que as provas de carga. A base de regras do parâmetro MCC é apresentada na tabela 24.

Tabela 24 Base de regras do parâmetro "MCC"

Nº	SE		ENTÃO
	Método de determinação da capacidade de carga	Quantidade de métodos de determinação da capacidade de carga	MCC
1	Teórico	Pequena	Baixa
2	Teórico	Média	Baixa
3	Teórico	Grande	Baixa
4	Semi-empírico	Pequena	Baixa
5	Semi-empírico	Média	Média
6	Semi-empírico	Grande	Alta
7	Prova de carga	Pequena	Média
8	Prova de carga	Média	Alta
9	Prova de carga	Grande	Alta

Fonte: autor.

O parâmetro “Resistência do solo” é o parâmetro resultante “CSO”. Como o parâmetro resultante foi obtido a partir de um único parâmetro inicial, os termos linguísticos e as funções de pertinência dos conjuntos *Fuzzy* dos parâmetros inicial e resultante são iguais nesse caso. Este parâmetro representa a influência da resistência do maciço de solo para a fundação, por meio do índice de penetração dinâmica (N_{SPT}). A base de regras desse parâmetro é mostrada na tabela 25.

Tabela 25 Base de regras do parâmetro "CSO"

	SE	ENTÃO
Nº	Resistência do solo	CSO
1	Baixa	Baixa
2	Média	Média
3	Alta	Alta

Fonte: autor.

Os parâmetros “Experiência do projetista” e “Experiência do executor” formaram o parâmetro resultante “EXP” por meio de 09 (nove) regras. Este parâmetro objetivou relacionar as experiências dos profissionais que atuam no projeto e na execução das estacas. A base de regras do parâmetro EXP é apresentada na tabela 26.

Tabela 26 Base de regras do parâmetro "EXP"

Nº	SE		ENTÃO
	Experiência projetista	Experiência executor	EXP
1	Baixa	Baixa	Baixa
2	Baixa	Média	Média
3	Baixa	Alta	Média
4	Média	Baixa	Baixa
5	Média	Média	Média
6	Média	Alta	Alta
7	Alta	Baixa	Média
8	Alta	Média	Alta
9	Alta	Alta	Alta

Fonte: autor.

Os parâmetros “Velocidade de perfuração do trado”, “Velocidade de extração do trado” e “Torque da hélice da perfuração” formaram o parâmetro resultante “MOV” por meio de 27 (vinte e sete) regras. Este parâmetro objetivou relacionar as variáveis referentes à movimentação e à rotação da hélice do maquinário. A base de regras do parâmetro MOV é apresentada na tabela 27.

Tabela 27 Base de regras do parâmetro "MOV"

Nº	SE			ENTÃO
	Torque	Velocidade de perfuração do trado	Velocidade de extração do trado	MOV
1	Baixo	Baixa	Baixa	Baixa
2	Baixo	Baixa	Média	Baixa
3	Baixo	Baixa	Alta	Baixa
4	Baixo	Média	Baixa	Baixa
5	Baixo	Média	Média	Alta
6	Baixo	Média	Alta	Média
7	Baixo	Alta	Baixa	Baixa
8	Baixo	Alta	Média	Média
9	Baixo	Alta	Alta	Média
10	Médio	Baixa	Baixa	Baixa
11	Médio	Baixa	Média	Alta
12	Médio	Baixa	Alta	Média
13	Médio	Média	Baixa	Alta
14	Médio	Média	Média	Alta
15	Médio	Média	Alta	Alta
16	Médio	Alta	Baixa	Média
17	Médio	Alta	Média	Alta
18	Médio	Alta	Alta	Média
19	Alto	Baixa	Baixa	Baixa
20	Alto	Baixa	Média	Média
21	Alto	Baixa	Alta	Média
22	Alto	Média	Baixa	Média
23	Alto	Média	Média	Alta
24	Alto	Média	Alta	Média
25	Alto	Alta	Baixa	Média
26	Alto	Alta	Média	Média
27	Alto	Alta	Alta	Média

Fonte: autor.

Os parâmetros “Pressão de injeção de concreto” e “Superconsumo de concreto” formaram o parâmetro resultante “CONC” por meio de 09 (nove) regras. Este parâmetro objetivou relacionar as variáveis relacionadas ao concreto do elemento estrutural da fundação. A base de regras do parâmetro CONC é apresentada na tabela 28.

Tabela 28 Base de regras do parâmetro "CONC"

Nº	SE		ENTÃO
	Pressão de injeção de concreto	Superconsumo de concreto	CONC
1	Baixa	Baixo	Baixa
2	Baixa	Médio	Média
3	Baixa	Alto	Baixa
4	Média	Baixo	Média
5	Média	Médio	Alta
6	Média	Alto	Alta
7	Alta	Baixo	Baixa
8	Alta	Médio	Média
9	Alta	Alto	Média

Fonte: autor.

3.4.3 Inferência *Fuzzy*

O programa possui como opção padrão o método de inferência Mamdani. Entretanto também se pode optar pelo método de inferência Sugeno. Neste trabalho será utilizado o método Mamdani, devido à simplicidade e praticidade.

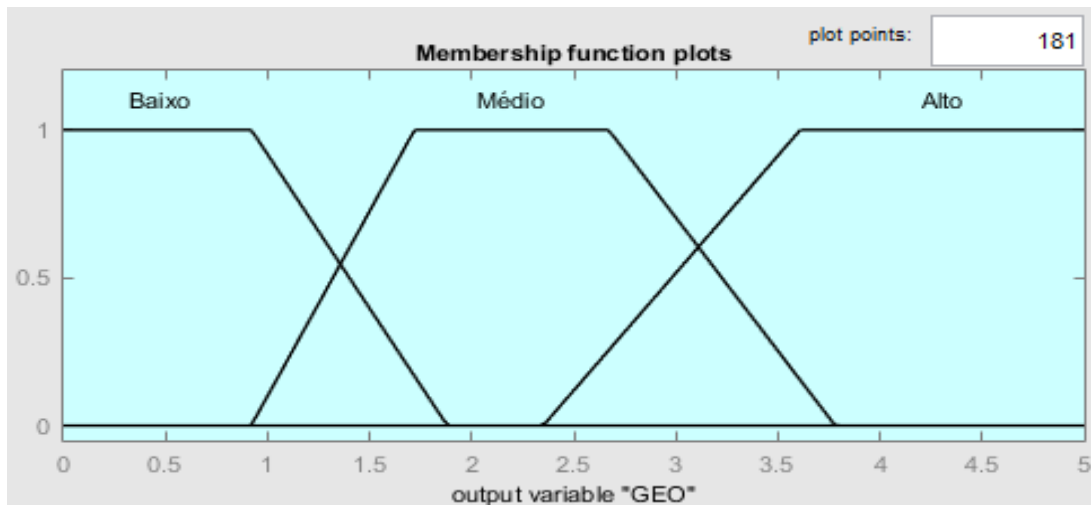
3.4.4 Defuzzificação

O MATLAB® permite ao usuário escolher entre diversos métodos de defuzzificação. Entre eles, estão disponíveis os métodos mais comuns, como o do centroide (centroid), o menor dos máximos (Smallest of Maximum - "SOM"), a média dos máximos (Middle of Maximum - "MOM") e o maior dos máximos (Largest of Maximum - "LOM"). Optou-se neste trabalho pelo método do centroide.

3.4.5 Variáveis de saída da etapa 01

Os conjuntos *Fuzzy* das variáveis de saída da etapa 01 do sistema *Fuzzy* foram obtidos a partir da combinação entre os conjuntos *Fuzzy* das variáveis de entrada. Todas as variáveis de saída da etapa 01, os parâmetros resultantes, possuem domínio no intervalo $[0, 5]$ para que a comparação com o índice probabilístico β seja facilitada. Os gráficos 20 a 25 mostram estes conjuntos, e os pontos que formam suas funções de pertinência são mostrados nas tabelas 29 a 34.

Gráfico 20 Conjuntos *Fuzzy* da variável linguística de saída "GEO"



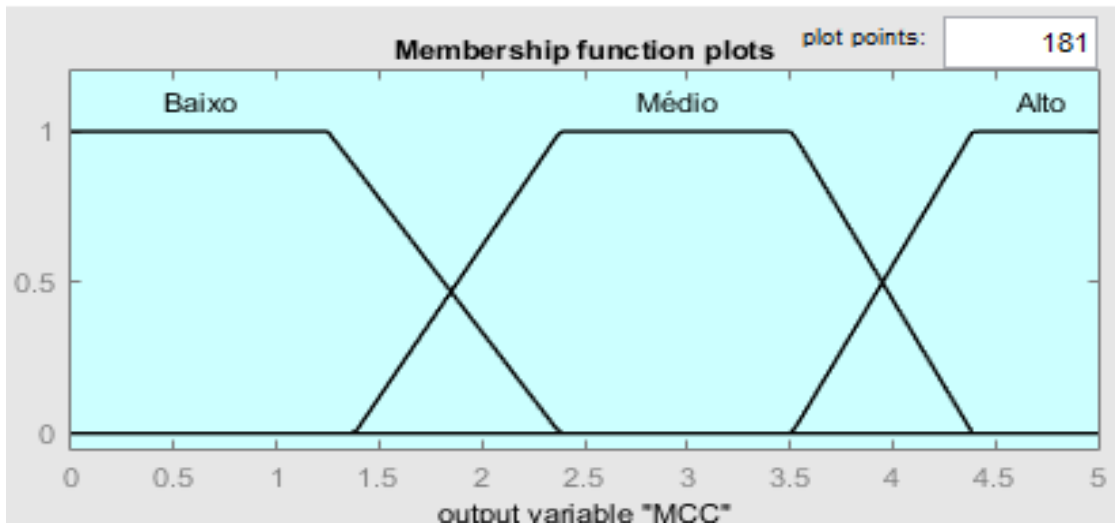
Fonte: autor.

Tabela 29 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "GEO"

Termo linguístico	Pontos					
Baixo	(0, 1)	(0.92, 1)	(1.88, 0)	(5, 0)	-	-
Médio	(0, 0)	(0.92, 0)	(1.72, 1)	(2.67, 1)	(3.78, 0)	(5, 0)
Alto	(0, 0)	(2.35, 0)	(3.61, 1)	(5, 1)	-	-

Fonte: autor.

Gráfico 21 Conjuntos *Fuzzy* da variável linguística de saída "MCC"



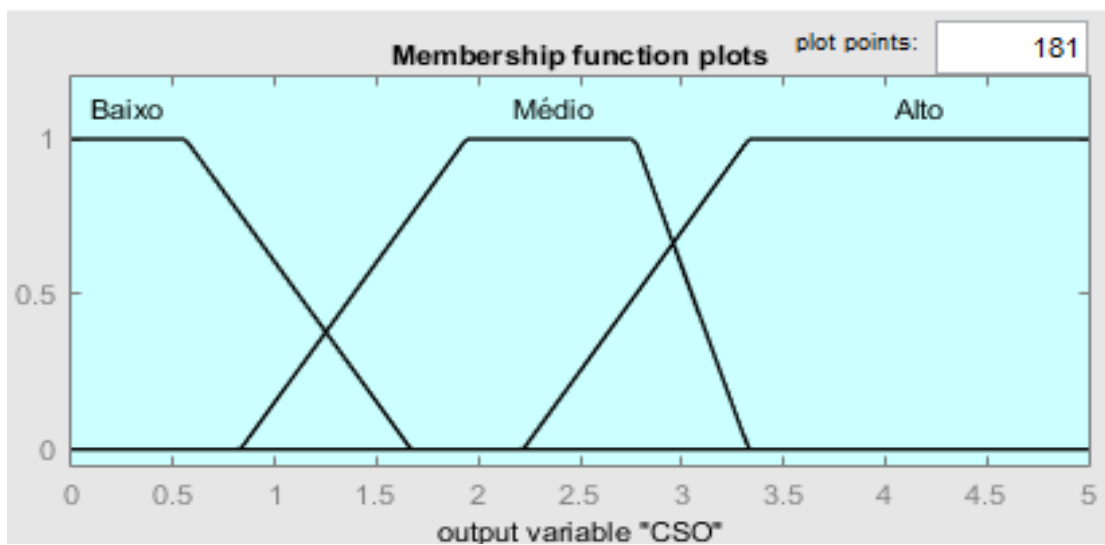
Fonte: autor.

Tabela 30 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "MCC"

Termo linguístico	Pontos					
Baixo	(0, 1)	(1.25, 1)	(2.38, 0)	(5, 0)	-	-
Médio	(0, 0)	(1.38, 0)	(2.38, 1)	(3.51, 1)	(4.39, 0)	(5, 0)
Alto	(0, 0)	(3.51, 0)	(4.39, 1)	(5, 1)	-	-

Fonte: autor.

Gráfico 22 Conjuntos *Fuzzy* da variável linguística de saída "CSO"

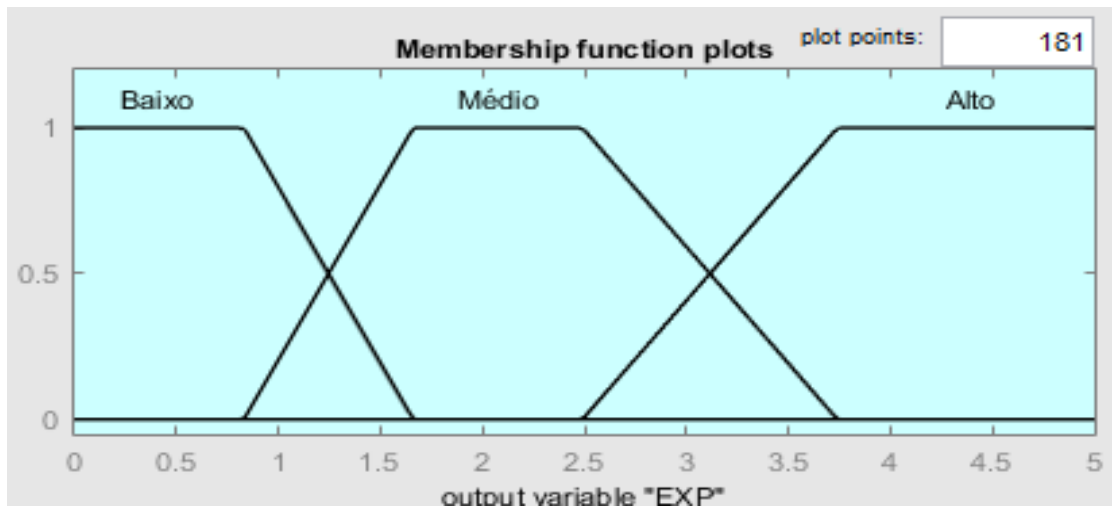


Fonte: autor.

Tabela 31 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "CSO"

Termo linguístico	Pontos					
Baixa	(0, 1)	(0,56, 1)	(1.67, 0)	(5, 0)	-	-
Média	(0, 0)	(0.83, 0)	(1.94, 1)	(2.77, 1)	(3.33, 0)	(5, 0)
Alta	(0, 0)	(2.22, 0)	(3.33, 1)	(5, 1)	-	-

Fonte: autor.

Gráfico 23 Conjuntos *Fuzzy* da variável linguística de saída "EXP"

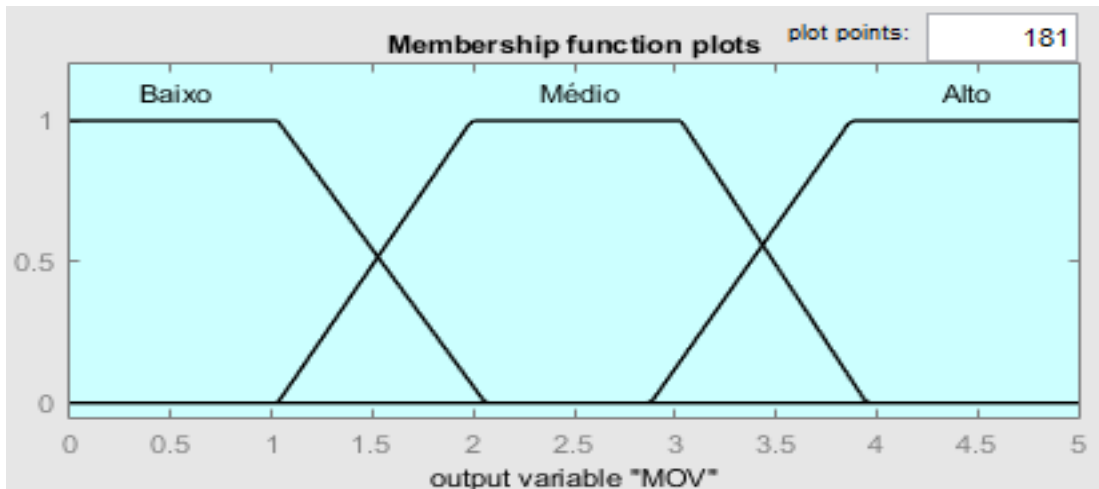
Fonte: autor.

Tabela 32 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "EXP"

Termo linguístico	Pontos					
Baixo	(0, 1)	(0.83, 1)	(1.66, 0)	(5, 0)	-	-
Médio	(0, 0)	(0.83, 0)	(1.66, 1)	(2.49, 1)	(3.74, 0)	(5, 0)
Alto	(0, 0)	(2.49, 0)	(3.74, 1)	(5, 1)	-	-

Fonte: autor.

Gráfico 24 Conjuntos *Fuzzy* da variável linguística de saída "MOV"



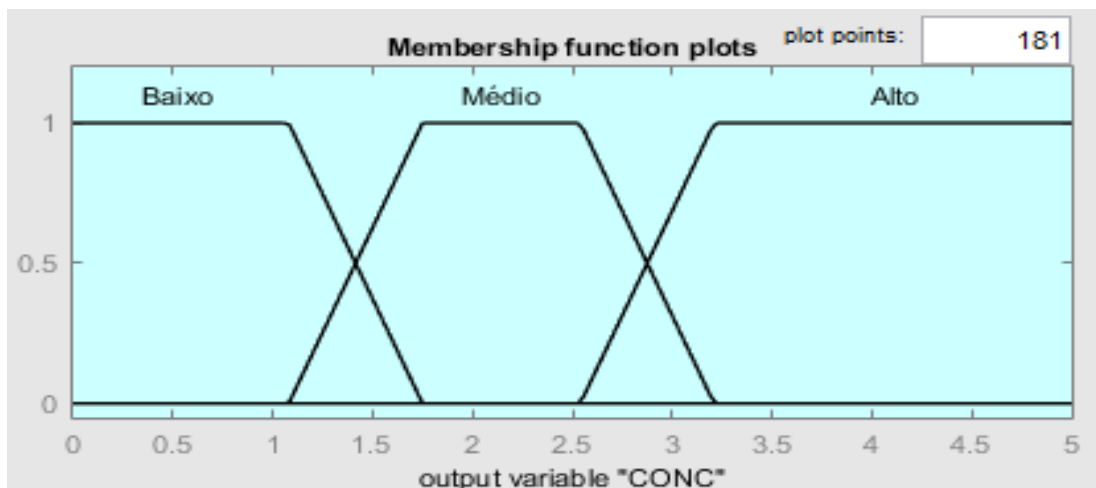
Fonte: autor.

Tabela 33 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "MOV"

Termo linguístico	Pontos					
Baixo	(0, 1)	(1.03, 1)	(2.06, 0)	(5, 0)	-	-
Médio	(0, 0)	(1.03, 0)	(1.99, 1)	(3.03, 0)	(3.95, 0)	(5, 0)
Alto	(0, 0)	(2.88, 0)	(3.87, 1)	(5, 1)	-	-

Fonte: autor.

Gráfico 25 Conjuntos *Fuzzy* da variável linguística de saída "CONC"



Fonte: autor.

Tabela 34 Pontos das funções de pertinência da variável linguística "CONC"

Termo linguístico	Pontos					
	Baixo	(0, 1)	(1.08, 1)	(1.75, 0)	(5, 0)	-
Médio	(0, 0)	(1.08, 0)	(1.75, 1)	(2.54, 1)	(3.21, 0)	(5, 0)
Alto	(0, 0)	(2.71, 0)	(4.79, 1)	(5, 1)	-	

Fonte: autor.

3.5 ETAPA 02 - PRINCIPAL

Após a elaboração da etapa 01, procedeu-se à elaboração da etapa 02 - principal. Como os dados de entrada deste sistema são os próprios dados de saída da etapa 01, a etapa de fuzzificação da “etapa 02 – principal” consistiu no simples preenchimento dos conjuntos *Fuzzy* já obtidos da etapa 01.

A base composta por 729 (setecentas e vinte e nove) regras utilizadas para operar a base de conhecimento do sistema consta no Apêndice C. Na tabela 35 foram apresentadas algumas regras retiradas da base de regras, para fins de exemplificação. Os parâmetros resultantes foram considerados com peso de relevância igual na determinação da variável de confiabilidade *Fuzzy*, “CONF.Fuzzy”.

Tabela 35 Exemplos da base de regras da etapa 02 do sistema *Fuzzy*

Nº	Entrada						Saída
	GEO	MCC	CMS	EXP	HEL	CONC	CONF.Fuzzy
8	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Média	Pouco confiável
82	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Não confiável
115	Baixa	Média	Média	Baixa	Alta	Baixa	Pouco confiável
124	Baixa	Média	Média	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
132	Baixa	Média	Média	Alta	Média	Alta	Medianamente confiável
162	Baixa	Média	Alta	Alta	Alta	Alta	Confiável
335	Média	Média	Baixa	Média	Baixa	Média	Pouco confiável
396	Média	Média	Alta	Média	Alta	Alta	Confiável
514	Alta	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Pouco confiável
565	Alta	Baixa	Alta	Alta	Alta	Baixa	Confiável

Fonte: autor.

Estipularam-se os valores do domínio da variável de saída e as interseções dos conjuntos formados pelos seus termos linguísticos relacionando-os com valores do índice de confiabilidade probabilístico β . Como β apresenta valores usuais no intervalo $[0, 5]$, adotou-se esse intervalo para o domínio da variável de saída do sistema *Fuzzy*. Os termos linguísticos adotados para a variável de saída foram “Não confiável”, “Pouco confiável”, “Medianamente confiável”, “Confiável” e “Muito confiável”.

Os pontos dos conjuntos *Fuzzy* foram determinados a partir de valores sugeridos para a probabilidade de ruína por diferentes autores. Segundo Cintra e Aoki (2010), ainda não existe consenso para a probabilidade de ruína adequada de projetos de fundação e, com isso, índices de confiabilidade β adequados. Conforme os autores relatam, na literatura há referências a probabilidades de ruína aceitáveis no intervalo de $1/1000$ a $1/100.000$; outros autores consideram ainda valores de $1/100$ a $1/1000$ como aceitáveis.

Tendo em vista a variação de valores considerados adequados para β , foram “fuzzificados” os valores presentes na tabela 6 para obter os pontos dos conjuntos *Fuzzy* referentes aos termos linguísticos “Não confiável”, “Pouco confiável”, “Medianamente confiável”, “Confiável” e “Muito confiável”. A tabela 36 mostra como se deu a atribuição dos valores de β aos conjuntos *Fuzzy* da variável de confiabilidade *Fuzzy*. As células em cinza indicam que os intervalos de β representados nas linhas pertencem aos conjuntos *Fuzzy* representados nas colunas. As células brancas indicam que os intervalos de β não pertencem a tais conjuntos.

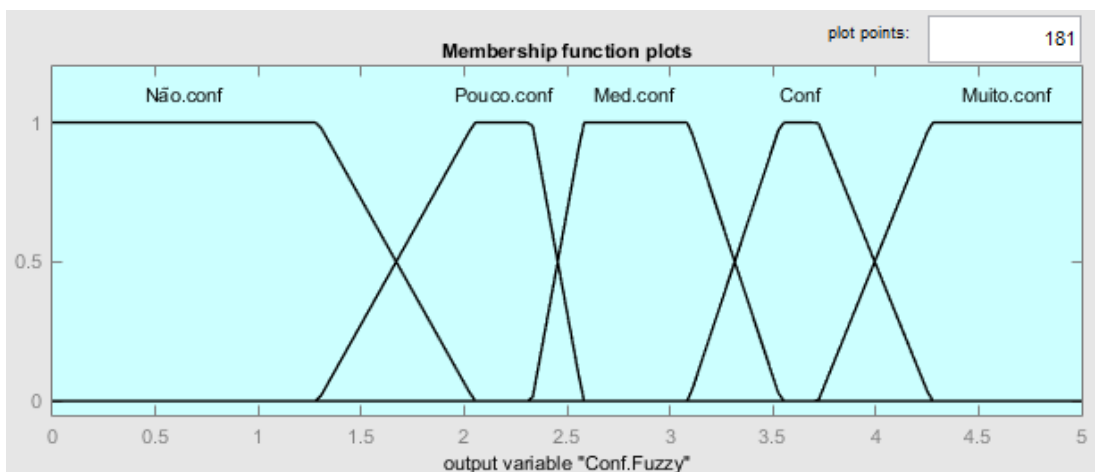
Tabela 36 Fuzzificação dos valores de β para determinação dos pontos dos conjuntos Fuzzy da variável de saída

β	β	Não confiável	Pouco confiável	Medianamente confiável	Confiável	Muito confiável
0	0					
1/10	1,29					
1/50	2,05					
1/100	2,33					
1/200	2,58					
1/1.000	3,09					
1/5000	3,54					
1/10.000	3,72					
1/100.000	4,27					
< 1/1.000.000	5,00					

Fonte: autor.

Ressalta-se que os valores do índice de confiabilidade β apenas foram utilizados como referência para estabelecer o domínio do gráfico e os limites dos conjuntos *Fuzzy* referentes aos termos linguísticos da variável de saída do sistema *Fuzzy* dessa pesquisa. O gráfico 26 mostra os conjuntos *Fuzzy* da variável de saída e a tabela 37 mostra os pontos das funções de pertinência dos respectivos conjuntos.

Gráfico 26 Conjuntos *Fuzzy* da variável de saída "Conf.Fuzzy"



Fonte: autor.

Tabela 37 Coordenadas dos pontos das funções de pertinência dos termos linguísticos da variável de saída “Conf.Fuzzy”

Termo linguístico	Pontos					
Não confiável	(0, 1)	(1.29, 1)	(2.05, 0)	(5, 0)	-	-
Pouco confiável	(0, 0)	(1.29, 0)	(2.05, 1)	(2.33, 1)	(2.58, 0)	(5, 0)
Medianamente confiável	(0, 0)	(2.33, 0)	(2.58, 1)	(3.09, 1)	(3.54, 0)	(5, 0)
Confiável	(0, 0)	(3.09, 0)	(3.54, 1)	(3.72, 1)	(4.27, 0)	(5, 0)
Muito confiável	(0, 0)	(3.72, 0)	(4.27, 1)	(5, 1)	-	-

Fonte: autor.

3.6 ESTUDO DE CONFIABILIDADE DAS ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA DO HU DA UNIFAP

3.6.1 O Hospital Universitário da UNIFAP

O Hospital Universitário (HU) da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) está atualmente em construção no Campus Marco Zero do Equador localizado em Macapá-AP e tem previsão de conclusão das obras para 2019 (figura 12). Visando suprir parte da demanda de saúde pública no estado, após concluído será o maior hospital do estado do Amapá (G1, 2018).

Figura 12 Hospital Universitário da UNIFAP em fase de construção

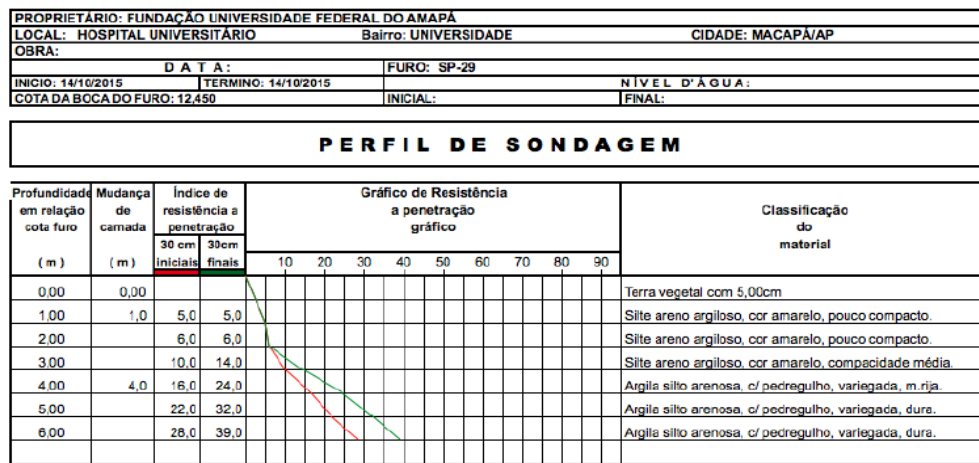


Foto: junho/2018. Fonte: G1, 2018.

O empreendimento é dividido em oito blocos nomeados de A a H, e o projeto geotécnico foi realizado em estacas hélice contínua, solução escolhida baseada nos resultados das sondagens geotécnicas pelo ensaio de penetração dinâmica (SPT). De acordo com o relatório geotécnico elaborado pela empresa que realizou o projeto, o empreendimento possui 438 pilares dispostos em 40.033 m² de área do prédio principal. A carga média dos pilares é de 1700 kN e as cargas mínimas e máximas são 180 kN e 5800 kN, respectivamente.

Devido à variação entre as cargas dos pilares, optou-se pela utilização de três diferentes diâmetros para as estacas, 300 mm, 400 mm e 500 mm. Os comprimentos das estacas para esses diâmetros foram, respectivamente, 9 m, 11 m e 12 m. A capacidade de carga das estacas foi calculada pelo método semi-empírico de Décourt-Quaresma e o coeficiente de segurança adotado foi de 2,5. O valor conservador para o coeficiente de segurança foi justificado devido à paralisação precoce da sondagem a cotas na faixa dos 6 m. O motivo, segundo relatório de sondagem, foi a elevada resistência à penetração do solo do local do ensaio. Na figura 13 é mostrado um dos relatórios de sondagem referentes aos ensaios de investigação do subsolo realizados no local da obra.

Figura 13 Relatório de sondagem do furo 29/34 do local da obra



Fonte: North Com Engenharia, 2016.

Além disso, as estacas foram calculadas como “flutuantes”, ou seja, a parcela de tensão que seria suportada pela ponta foi desconsiderada nos cálculos em face da ausência de informações relacionadas às camadas abaixo da cota de assentamento. O projeto geotécnico enfatiza que as premissas adotadas devem ser confirmadas por campanha de sondagem complementar a ser planejada pelo engenheiro projetista.

3.6.2 Estudo de confiabilidade das estacas do Hospital Universitário

Foram realizadas provas de carga estática considerando as prescrições previstas na NBR 12131:2006 (Provas de carga estática – método de ensaio) e o número de provas de carga estática a serem realizadas de acordo com a quantidade de estacas do projeto. As provas de carga foram feitas para cada diâmetro definido em projeto, conforme a tabela 38.

Tabela 38 Número de provas de carga estática realizadas na obra do HU, por diâmetro de estaca

Diâmetro	Número de estacas	Número de provas de carga estática realizadas
300 mm	773	7
400 mm	378	4
500 mm	350	4

Fonte: NORTH COM ENGENHARIA, 2016.

Com base nas informações contidas nos relatórios de prova de carga estática das estacas ensaiadas e no projeto geotécnico do empreendimento, foi realizado o estudo de confiabilidade das estacas de 300 mm de diâmetro, devido à quantidade significativa de estacas ensaiadas deste tipo. A partir dos valores de recalque alcançados durante os estágios de carregamento das provas de carga estática, foram traçadas as curvas carga versus recalque de cada estaca com o auxílio do programa Microsoft Excel 2016®. As curvas carga versus recalque das estacas constam no Apêndice D.

Os valores de resistência das estacas foram estimados por meio do método de Van der Veen constante em Cintra e Aoki (2010). Os valores das solicitações atuantes nos pilares das estacas ensaiadas foram obtidos do projeto geotécnico da obra. Além disso, todas as estacas ensaiadas fazem parte de blocos de coroamento compostos de quatro estacas. As principais informações necessárias à realização do estudo de confiabilidade constam na tabela 39.

Tabela 39 Dados das estacas ensaiadas de diâmetro $\phi 300$ mm

Estaca	Carga de ensaio (kN)	Cap. de carga (kN)	Solicitações (kN)	Nº estacas	Solicitações por estaca (kN)
P-06A	1030	1220	1760	4	440,00
P-07A	1030	1090	1839	4	459,75
P-17A	1030	1100	1639	4	409,75
P-20A	1030	1090	1759	4	439,75
P-21A	1030	1120	1800	4	450,00
P-25A	1030	1190	1882	4	470,50
PX8-G	1030	1250	1724	4	431,00

Fonte: autor.

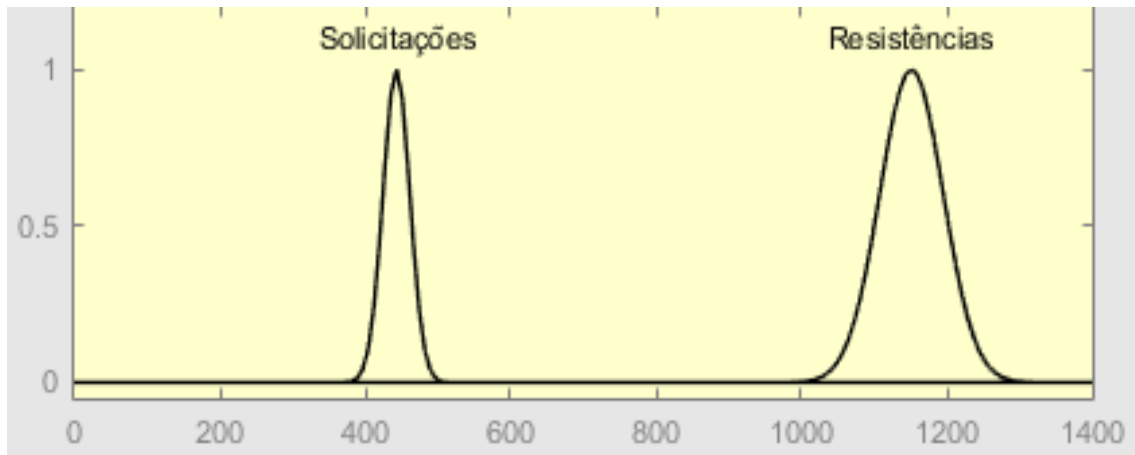
A partir das informações constantes na tabela 39, é possível determinar as resistências e solicitações médias, os desvios padrão, os coeficientes de variação, o índice de confiabilidade e a probabilidade de ruína das estacas de diâmetro $\phi 300$ mm do projeto, conforme é mostrado na tabela 40. No gráfico 27 são mostradas as curvas de solicitações e resistências com base nos valores obtidos, traçadas no *Fuzzy Logic Toolbox* do programa MATLAB®.

O valor do índice de confiabilidade foi obtido a partir da equação 13 e o cálculo pode ser consultado no Apêndice E.

Tabela 40 Dados estatísticos das estacas de $\phi 300$ mm

Dado	Valor	Unidade
R_{méd}	1151,43	kN
S_{méd}	442,96	kN
F_s	2,60	
σ_R	62,20	kN
σ_S	18,34	kN
v_R	0,054	
v_S	0,041	
Z_{méd}	708,46	kN
σ_Z	64,85	kN
v_Z	0,09	
B	10,92	
p_f	≈ 0	

Fonte: autor.

Gráfico 27 Curvas normais de solicitações e resistências das estacas estudadas

Fonte: autor.

Obteve-se um índice de confiabilidade β igual a 10,92, um valor elevado para o intervalo de valores usualmente obtido para β em projetos de fundação usuais. O valor elevado do índice de confiabilidade implicou baixa probabilidade de ruína p_f , com valor muito próximo de zero.

O valor elevado do índice de confiabilidade se justifica pelas premissas conservadoras adotadas no projeto, tais como a adoção de coeficiente de segurança igual a 2,5. Além disso, a pequena variação entre os valores obtidos para a capacidade de carga das estacas e a pequena variação dos valores de solicitações por estaca contribuiu para a redução dos parâmetros relacionados ao desvio padrão e aos coeficientes de variação. A redução destes parâmetros implica aumento no valor do índice de confiabilidade e, por conseguinte, na redução do valor de probabilidade de ruína.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS DO SISTEMA FUZZY

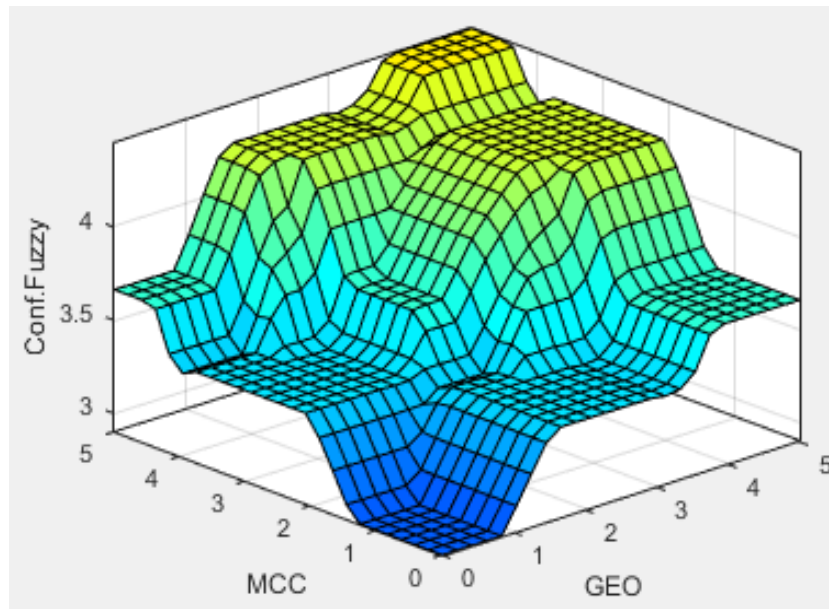
4.1 RESULTADOS DO SISTEMA FUZZY

Após a inserção das informações necessárias ao funcionamento do sistema *Fuzzy*, o MATLAB permite a visualização de gráficos que possibilitam verificar o comportamento das variáveis de saída em relação às respectivas variáveis de entrada do sistema. É possível verificar

gráficamente como a variável de saída se comporta em função de duas variáveis de entrada simultaneamente, mantidos constantes os valores das outras variáveis de entrada não analisadas.

Esses valores constantes podem ser alterados para que se possa analisar o gráfico para todos os valores possíveis de serem assumidos pelas variáveis de entrada. Como exemplo, pode-se observar o gráfico 28, que mostra o gráfico da variável de saída “Conf.Fuzzy” em função dos parâmetros resultantes GEO e MCC, considerando as variáveis de entrada EXP, CSO, MOV e CONC constantes e iguais a “3,34”, “3,88”, “2,38” e “3,94”, respectivamente. Os valores das variáveis constantes correspondem aos valores do primeiro caso analisado neste trabalho.

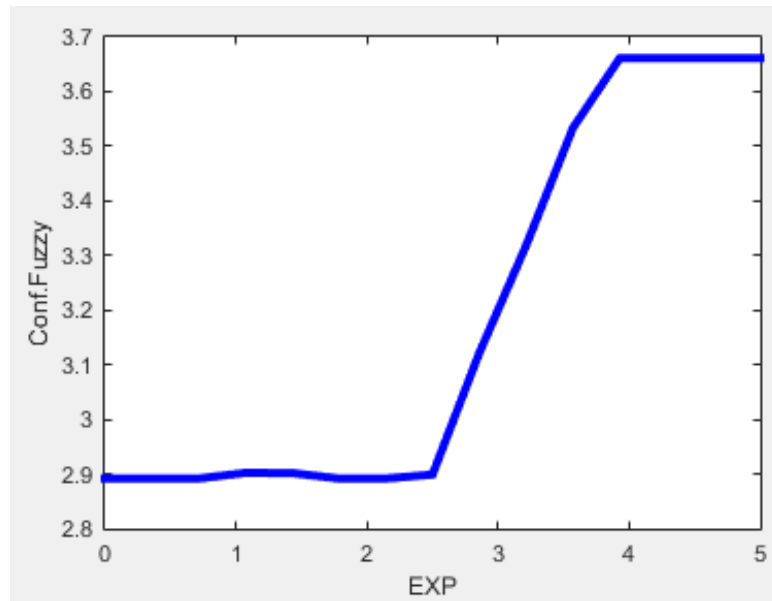
Gráfico 28 Variável "Conf.Fuzzy" em função dos parâmetros GEO e MCC



Fonte: autor.

Pode-se ainda analisar o comportamento da variável de saída em função da variação dos valores de apenas uma variável de entrada, separadamente, mantidas as outras constantes. Por exemplo, o gráfico 29 mostra a relação da variável “Conf.Fuzzy” em função da variável “EXP”, considerando as variáveis GEO, MCC, CSO, MOV e CONC constantes e iguais a “0,72”, “2,72”, “3,88”, “2,38” e “3,94”, respectivamente, referentes ao primeiro caso analisado neste trabalho.

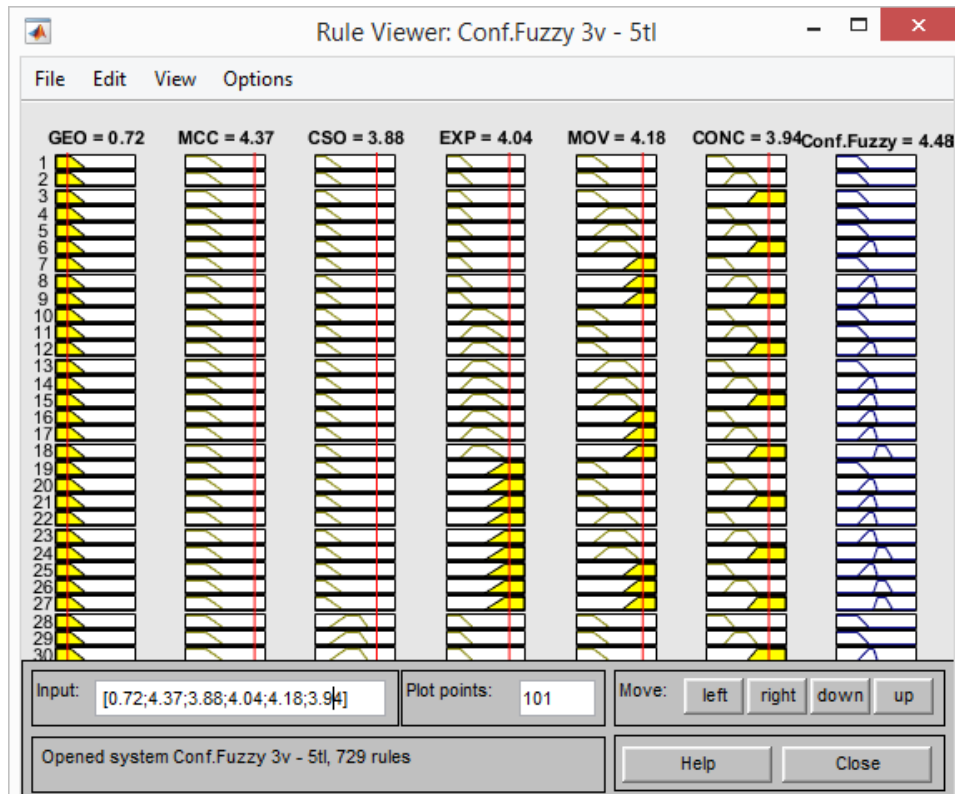
Gráfico 29 Variável “Conf.Fuzzy” em relação ao parâmetro EXP



Fonte: autor.

Além dos gráficos apresentados, pode-se, na janela de regras, atribuir valores às variáveis de entrada do sistema no campo “input” para se obter o correspondente valor da variável de saída. A figura 14 mostra como exemplo a janela de regras da etapa 02 do sistema *Fuzzy* com os valores dos parâmetros resultantes do terceiro caso analisado neste trabalho, retornando o valor para a variável de saída “Conf.Fuzzy”, à direita.

Figura 14 Janela de regras do sistema *Fuzzy*



Fonte: autor

O sistema *Fuzzy* elaborado neste trabalho foi analisado considerando três diferentes casos de projeto de estacas hélice contínua. Em cada caso, são verificados os valores retornados pelo sistema. Após, serão comparados os valores da variável de confiabilidade obtida do sistema *Fuzzy* com o respectivo índice de confiabilidade probabilístico β obtido pelos estudos de confiabilidade.

3.7.2 PRIMEIRO CASO: SITUAÇÃO REAL DA OBRA DO HOSPITAL UNIVERSITÁRIO

Nesta situação são considerados os parâmetros de projeto e execução tal como se apresentaram a partir das informações disponibilizadas sobre a obra. Com base nos valores desses parâmetros, será obtido um valor de variável de confiabilidade *Fuzzy*.

No projeto do HU foram utilizados três tipos de diâmetro para as estacas, 300 mm, 400 mm e 500 mm. Será atribuído o valor de 300 mm à variável “diâmetro”, devido à maior

quantidade de estacas desse diâmetro no projeto. Foram utilizados no projeto os valores 9 m, 11 m e 12 m para os comprimentos das estacas. Será considerado o valor de 9 m para a variável “comprimento” devido à maior parte das estacas ter sido executada com este comprimento.

A capacidade de carga das estacas foi estimada a partir das provas de carga estática realizadas, além do método semi-empírico de Décourt-Quaresma. Estas características representam nota “oito” para a variável “método de determinação da capacidade de carga” e “2” para “quantidade de métodos de determinação da capacidade de carga”.

Em relação à variável “resistência do solo”, foi atribuído o valor “34,11”. Este valor é o N_{SPT} médio de um dos relatórios de sondagem realizados no local da obra (figura 13). Como o procedimento de sondagem não obteve informações acerca das faixas próximas à ponta das estacas, considerou-se que o N_{SPT} das faixas de comprimento não contempladas no relatório são iguais a 48. Essa premissa foi adotada para a elaboração do projeto, segundo relatório disponibilizado pela empresa que realizou as sondagens.

Não há informações acerca das experiências do projetista e do executor responsáveis pelo empreendimento. Entretanto, estas serão estimadas, para fins deste trabalho, como sendo vinte anos.

Não foram disponibilizados dados referentes aos relatórios de execução das estacas, nos quais constam dados sobre os parâmetros “torque”, “velocidade de perfuração do trado”, “velocidade de extração do trado”, “pressão de injeção de concreto” e “superconsumo de concreto”. Entretanto, será considerado que a empresa executora realizou um bom controle do processo executivo e, portanto, os parâmetros de execução acima não obtiveram grandes variações de valores, favorecendo a qualidade da estaca. Desta forma, atribuíram-se para essas variáveis os valores médios “80” kNm, “250” m/h, “100” m/h, “150” kN/m² e “20” % para os parâmetros mencionados, respectivamente.

A partir dos valores dos parâmetros iniciais, obtiveram-se os valores dos parâmetros resultantes na etapa 01 do sistema *Fuzzy*, e, posteriormente, o valor da variável de confiabilidade *Fuzzy* na etapa 02. A tabela 41 abaixo apresenta os valores obtidos.

Tabela 41 Valores dos parâmetros iniciais e resultantes - primeiro caso

Parâmetro inicial	Valor	Parâmetro resultante	Valor
Diâmetro da estaca	300 mm	GEO	0,72
Comprimento da estaca	9 m		
Método de determinação da capacidade de carga	8,0	MCC	2,72
Quantidade de métodos de determinação de capacidade de carga	2		
Características do solo	34,11	CSO	3,88
Experiência do projetista	20 anos	EXP	3,34
Experiência do executor	20 anos		
Torque da hélice de perfuração	80 kN.m	MOV	2,38
Velocidade de perfuração do trado	200 m/h		
Velocidade de extração do trado	150 m/h		
Pressão de injeção do concreto	150 kN/m ²	CONC	3,94
Superconsumo de concreto	20%		
Variável de confiabilidade <i>Fuzzy</i>			3,39

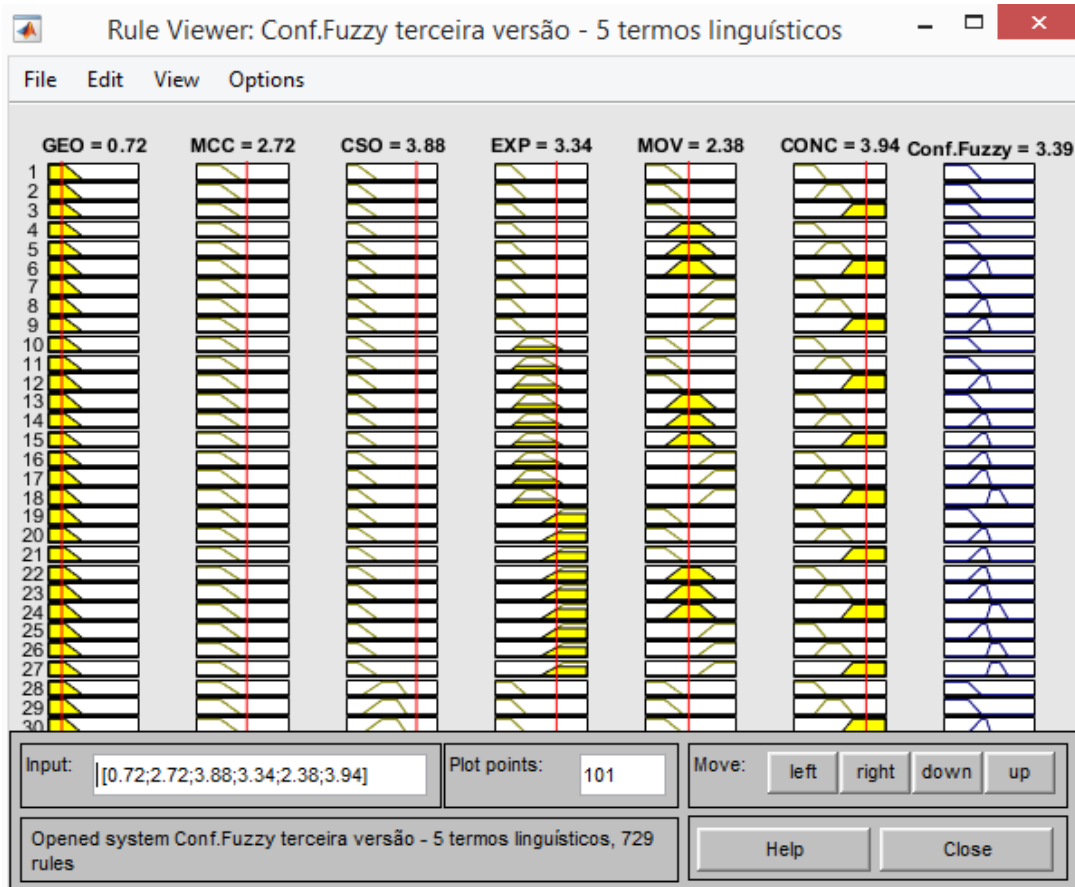
Fonte: autor.

Em razão dos valores das variáveis resultantes inseridas no sistema *Fuzzy*, a variável de confiabilidade *Fuzzy* obtida da etapa 02 foi de 3,39 (figura 15). Esse valor representa uma pertinência de 0,33 para o conjunto *Fuzzy* “medianamente confiável” e 0,67 para o conjunto *Fuzzy* “confiável”, conforme se pode observar no gráfico 26.

O valor considerado confiável se justifica pela predominância de valores aceitáveis para os parâmetros iniciais; o parâmetro GEO foi baixo pois os parâmetros “diâmetro” e “comprimento” foram baixos. Os valores numéricos desses parâmetros iniciais foram considerados pequenos no intervalo de domínios possível de diâmetros e comprimentos das estacas.

A realização de provas de carga estática contribuiu significativamente para os valores da variável MCC, bem como a utilização de mais de um método para estimar a capacidade de carga das estacas. Entretanto, há que se ressaltar que o valor de MCC não foi mais elevado devido à quantidade de métodos utilizados, apenas dois.

Figura 15 Janelas de regras com os valores dos parâmetros do primeiro caso



Fonte: autor.

O N_{SPT} elevado observado no local da obra favoreceu o valor do parâmetro “resistência do solo”. As experiências de vinte anos do projetista e do executor resultaram no valor elevado do parâmetro EXP. O parâmetro MOV resultou em valores intermediários devido ao fato de o torque médio inserido ser considerado inferior aos valores favoráveis dentro do domínio desta variável. Situação semelhante ocorre com os parâmetros “velocidade de perfuração” e “velocidade de extração”.

Os parâmetros “pressão de injeção de concreto” e “superconsumo de concreto” estão dentro dos valores atualmente empregados no contexto da execução de estacas hélice contínua, o que justifica, portanto, o valor elevado do parâmetro CONC.

3.7.3 SEGUNDO CASO: SITUAÇÃO HIPOTÉTICA DESFAVORÁVEL DO PROJETO

Neste caso será considerada uma situação hipotética de projeto. O diâmetro, o comprimento e a resistência do solo permanecerão os mesmos do primeiro caso, com o objetivo de facilitar a comparação entre casos de projeto. Não se dispôs de provas de carga estática ou dinâmica, sendo a capacidade de carga estimada por apenas dois métodos semi-empíricos.

As experiências do projetista e do executor na área são, respectivamente, de cinco e doze anos. O torque médio verificado foi de 100 kN.m. Houve maiores velocidades de perfuração e extração do trado, independentemente da resistência do solo. A pressão de injeção de concreto verificada, 80 kN/m², foi abaixo do recomendado pela literatura e o superconsumo de concreto foi elevado, em torno de 50%.

Os parâmetros iniciais foram considerados com os seguintes valores:

“Diâmetro”: 300 mm;

“Comprimento”: 9 m;

“Método de determinação da capacidade de carga”: 5;

“Quantidade de métodos de determinação da capacidade de carga”: 2;

“Experiência do projetista”: 05 anos;

“Experiência do executor”: 12 anos;

“Resistência do solo”: $N_{SPT} = 34,11$ (valor médio);

“Torque”: 100 kN.m (valor médio);

“Velocidade de perfuração do trado”: 350 m/h (valor médio);

“Velocidade de extração do trado”: 125 m/h (valor médio);

“Pressão de injeção de concreto”: 80 kN/m²;

“Superconsumo de concreto”: 50%.

Os valores obtidos para os parâmetros resultantes e para a variável de confiabilidade *Fuzzy* constam na tabela 42.

Tabela 42 Valores dos parâmetros iniciais e resultantes - segundo caso

Parâmetro inicial	Valor	Parâmetro resultante	Valor
Diâmetro da estaca	300 mm	GEO	0,72
Comprimento da estaca	9 m		
Método de determinação da capacidade de carga	5	MCC	2,07
Quantidade de métodos de determinação de capacidade de carga	2		
Resistência do solo	34,11	CSO	3,88
Experiência do projetista	5 anos	EXP	2,20
Experiência do executor	12 anos		
Torque da hélice de perfuração	100 kN.m	MOV	3,31
Velocidade de perfuração do trado	350 m/h		
Velocidade de extração do trado	125 m/h		
Pressão de injeção do concreto	80 kN/m ²	CONC	3,41
Superconsumo de concreto	50%		
Variável de confiabilidade <i>Fuzzy</i>			3,18

Fonte: autor.

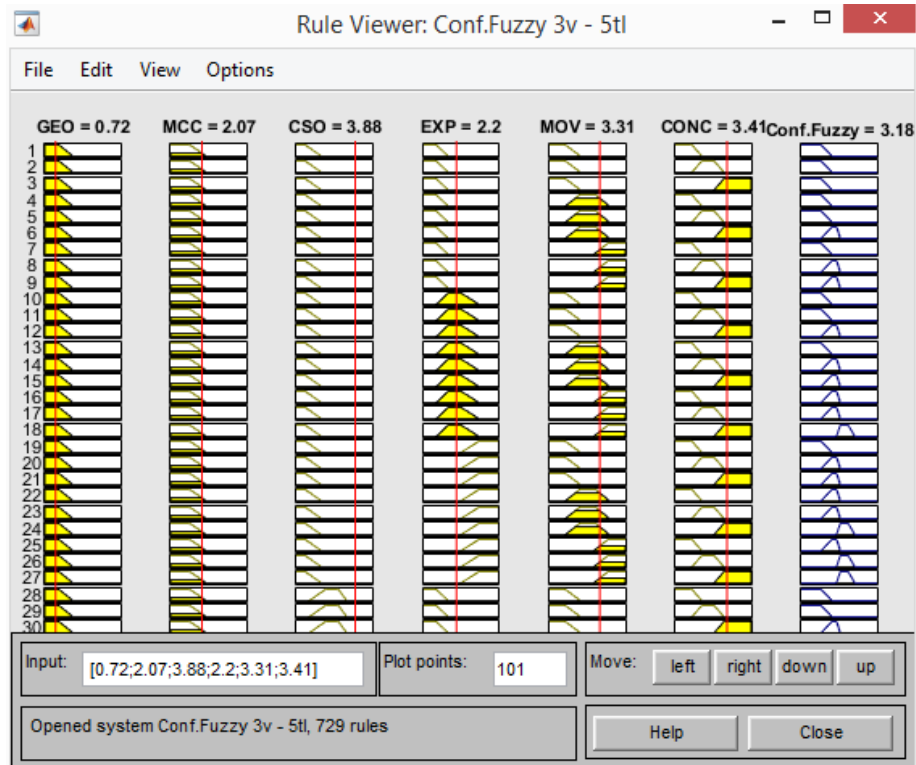
A variável de confiabilidade *Fuzzy* obtida foi de 3,18. Esse valor possui pertinência “0,8” para o conjunto *Fuzzy* “medianamente confiável” e “0,2” para o conjunto *Fuzzy* “confiável”, sendo, portanto, “mais” medianamente confiável do que confiável. A janela de regras do sistema *Fuzzy* para os dados inseridos é mostrada na figura 16. Dos resultados obtidos, fazem-se os seguintes apontamentos:

O parâmetro “diâmetro” está mais próximo dos menores valores do domínio de diâmetros executáveis. O parâmetro “comprimento”, apesar de não ser considerado tão baixo, está mais próximo do trecho inicial do domínio dos comprimentos. Em razão disso, o parâmetro GEO apresenta um valor pequeno devido à influência maior do comprimento para a confiabilidade, obtida dos dados do questionário.

A “quantidade de métodos de capacidade de carga” e os “métodos de capacidade de carga” deste caso geraram um valor baixo do parâmetro MCC principalmente em relação ao tipo de método utilizado – métodos semi-empíricos –, embora amplamente empregados na

engenharia geotécnica brasileira, são menos confiáveis do que provas de carga estática, as quais não foram utilizadas nesta situação. Além disso, contribuiu a pequena quantidade de métodos utilizados (apenas dois métodos semi-empíricos).

Figura 16 Janelas de regras com os valores dos parâmetros do segundo caso



Fonte: autor.

A resistência do solo, verificada através do N_{SPT} médio, contribuiu significativamente para o valor de CSO. Esse fato é esperado, tendo em vista que baixas resistências do solo não favorecem à confiabilidade devido ao fato de contribuírem para valores de capacidade de carga baixos.

As experiências do projetista e executor são baixas, o que resulta no baixo valor do parâmetro que considera esse fator, EXP. Em relação aos valores médios dos parâmetros iniciais que contribuem para o parâmetro MOV, o torque médio verificado condiz com o diâmetro escolhido para a estaca; as velocidades médias de perfuração e extração apresentam valor elevado e adequado respectivamente.

Como o N_{SPT} médio é elevado, há justificativa aparente para utilizar elevadas velocidades de perfuração, pois há significativa resistência do solo a ser vencida pela hélice. Velocidades de extração próximas do intervalo inferior de domínios desta variável teoricamente

não representam problemas à confiabilidade, entretanto neste programa velocidades de extração “medianas” foram consideradas mais favoráveis à confiabilidade por serem adequadas a N_{SPTS} médios, os quais representam menor risco de desconfinamento do fuste.

O parâmetro “pressão de injeção de concreto” verificado foi ligeiramente abaixo dos valores usualmente empregados. Além disso, o superconsumo de concreto foi de 50%, um valor excessivo e que pode ser caracterizado como desperdício, apesar de este fato não representar situação desfavorável à confiabilidade. A redução do parâmetro pressão de injeção não é significativa, pois se observa que o parâmetro CONC ainda é elevado. No apêndice F constam dois casos hipotéticos de projeto adicionais, semelhantes aos segundo e terceiro caso. Entretanto, o diâmetro e o comprimento apresentam diferentes valores dos apresentados na presente seção.

3.7.4 TERCEIRO CASO: SITUAÇÃO HIPOTÉTICA FAVORÁVEL DO PROJETO

Neste caso será considerada outra situação hipotética, mantidos os valores de diâmetro, comprimento e resistência do solo dos casos anteriores.

Foi realizada prova de carga estática para a estimativa da capacidade de carga das estacas. Além disso, o projetista optou pela utilização de três métodos semi-empíricos consagrados na literatura para estimar a capacidade de carga. A quantidade e o tipo de métodos utilizados implicam nota 10 para o parâmetro de métodos de determinação da capacidade de carga. A experiência do projetista é de quinze anos; o executor possui tempo longo de experiência na área, vinte e cinco anos.

Houve rigoroso controle de execução da estaca, com pequenas variações dos parâmetros de execução. O torque médio manteve-se em aproximadamente 100 kN.m; as velocidades médias de perfuração e extração do trado foram, respectivamente, 150 m/h e 100 m/h; a pressão de injeção de concreto manteve-se em 170 kN/m², aproximadamente, e o superconsumo de concreto foi de 20%.

As informações dos parâmetros iniciais são resumidas na tabela 43, onde se pode observar os resultados dos parâmetros resultantes obtidos da etapa 01 do sistema *Fuzzy* e o valor da variável de confiabilidade *Fuzzy* obtida da etapa 02.

Tabela 43 Valores dos parâmetros iniciais e resultantes - terceiro caso

Parâmetro inicial	Valor	Parâmetro resultante	Valor
Diâmetro da estaca	300 mm	GEO	0,72
Comprimento da estaca	9 m		
Método de determinação da capacidade de carga	10	MCC	4,37
Quantidade de métodos de determinação de capacidade de carga	4		
Resistência do solo	34,11	CSO	3,88
Experiência do projetista	15 anos	EXP	4,04
Experiência do executor	25 anos		
Torque da hélice de perfuração	100 kN.m	MOV	4,18
Velocidade de perfuração do trado	200 m/h		
Velocidade de extração do trado	100 m/h		
Pressão de injeção do concreto	170 kN/m ²	CONC	3,94
Superconsumo de concreto	25%		
Variável de confiabilidade <i>Fuzzy</i>			4,48

Fonte: autor.

A variável de confiabilidade *Fuzzy* obtida foi de 4,48. Esse valor possui pertinência total para o conjunto “muito confiável”. A janela da base de regras para o terceiro caso é observada na figura 17.

Figura 17 Janelas de regras com os valores dos parâmetros do terceiro caso



Fonte: autor.

O valor “muito confiável” da variável de confiabilidade *Fuzzy* se justifica pelos valores elevados dos parâmetros MCC, EXP, MOV e CONC. Os parâmetros iniciais dessas variáveis mostram situações favoráveis para a confiabilidade, como por exemplo: realização de prova de carga estática e estimativa da capacidade de carga por muitos métodos, para o parâmetro MCC; muitos anos de experiência do projetista e do executor, para a variável EXP; valores de torque, velocidades de perfuração e extração não elevados e em conformidade com o diâmetro escolhido para a estaca para a variável MOV, etc. Os parâmetros que formam o parâmetro CONC também se apresentam com valores aceitáveis que favorecem o aumento da variável de confiabilidade *Fuzzy*.

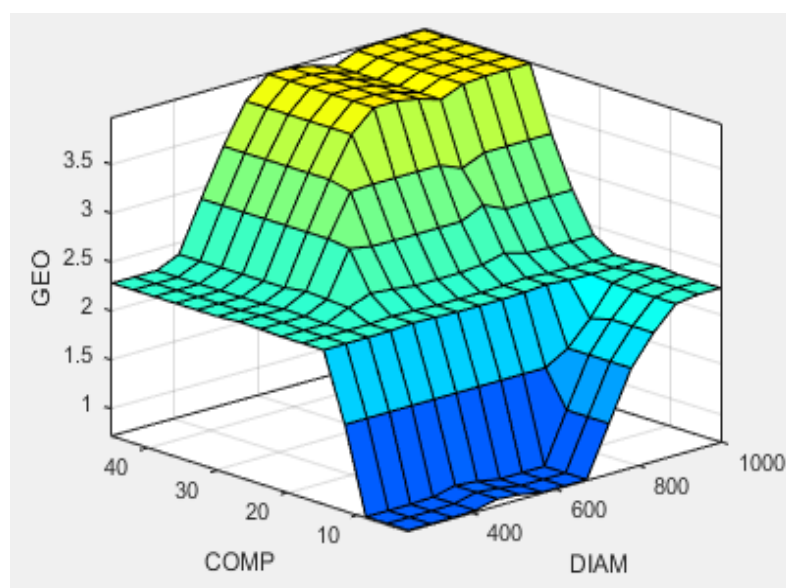
A seguir, será analisada a variação da variável de confiabilidade *Fuzzy* em função da variação dos valores dos parâmetros iniciais para o segundo caso deste trabalho, cujo valor obtido foi medianamente confiável. Primeiramente foi verificado como os parâmetros resultantes variam em função da alteração dos valores de seus respectivos parâmetros iniciais, a partir dos gráficos mostrados. Em seguida, os valores resultantes obtidos foram utilizados para obter valores da variável de confiabilidade *Fuzzy*. Os parâmetros iniciais estão representados nas figuras de acordo com as siglas da tabela 44.

Tabela 44 Siglas dos parâmetros iniciais

Parâmetro inicial	Sigla
Diâmetro da estaca	DIAM
Comprimento da estaca	COMP
Quantidade de métodos de determinação de capacidade de carga	QMCC
Método de determinação da capacidade de carga	MDCC
Experiência do projetista	EXPP
Experiência do executor	EXPE
Resistência do solo	RSOL
Torque da hélice de perfuração	TORQ
Velocidade de perfuração do trado	VPTR
Velocidade de extração do trado	VETR
Pressão de injeção do concreto	PCON
Superconsumo de concreto	SCON

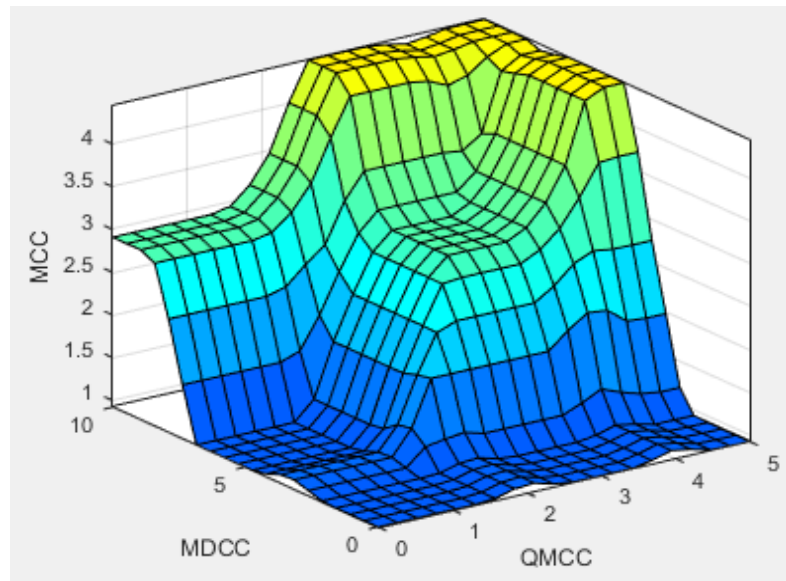
Fonte: autor.

Os gráficos 30 a 37 mostram o comportamento das variáveis resultantes considerando diferentes valores para os parâmetros iniciais.

Gráfico 30 Parâmetro GEO em função de DIAM e COMP

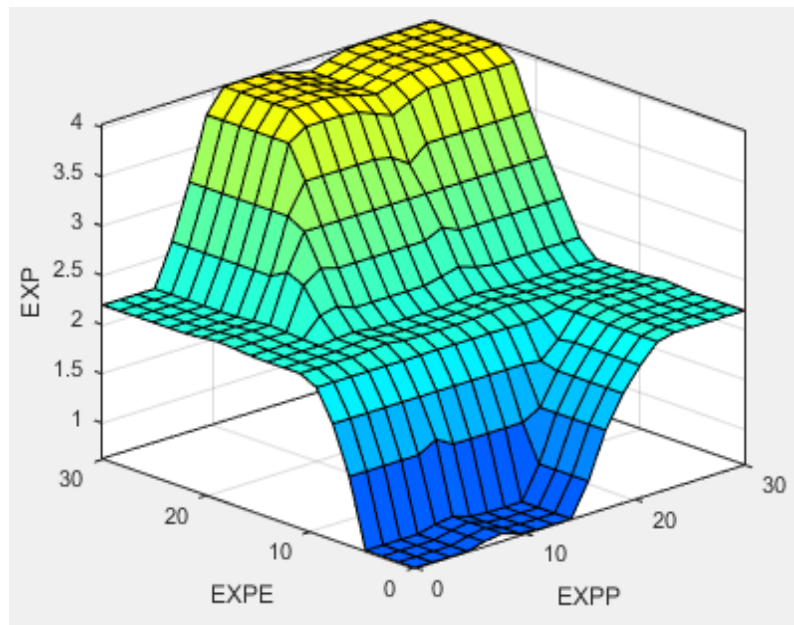
Fonte: autor.

Gráfico 31 Parâmetro MCC em função de QMCC e MDCC

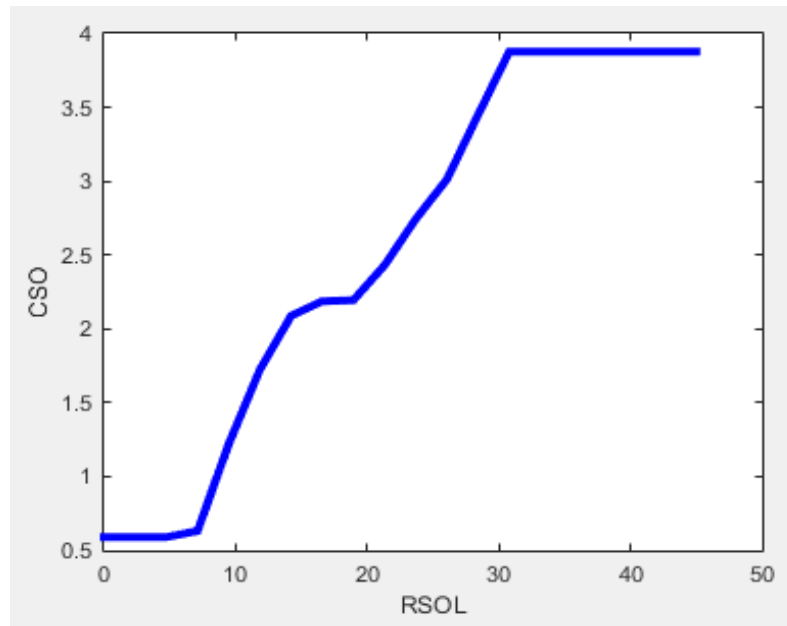


Fonte: autor.

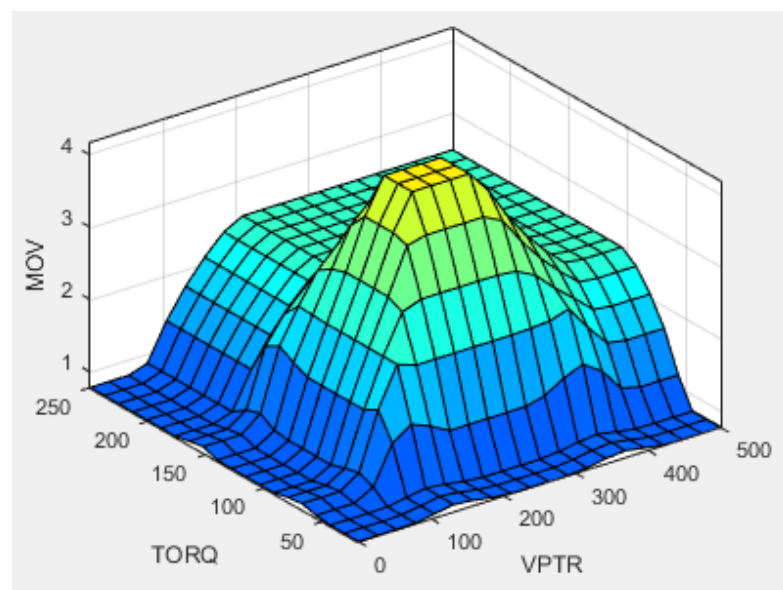
Gráfico 32 Parâmetro EXP em função de EXPP e EXPE



Fonte: autor.

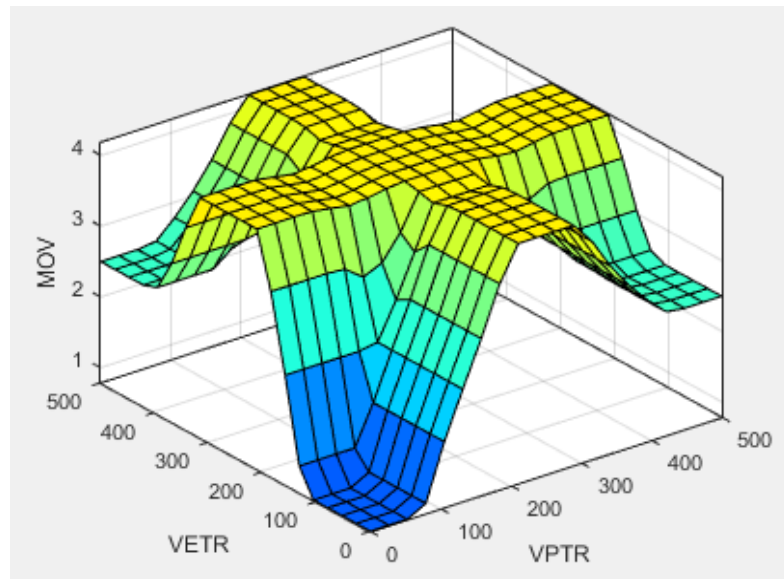
Gráfico 33 Parâmetro CSO em função de RSOL

Fonte: autor.

Gráfico 34 Parâmetro MOV em função de TORQ e VPTR

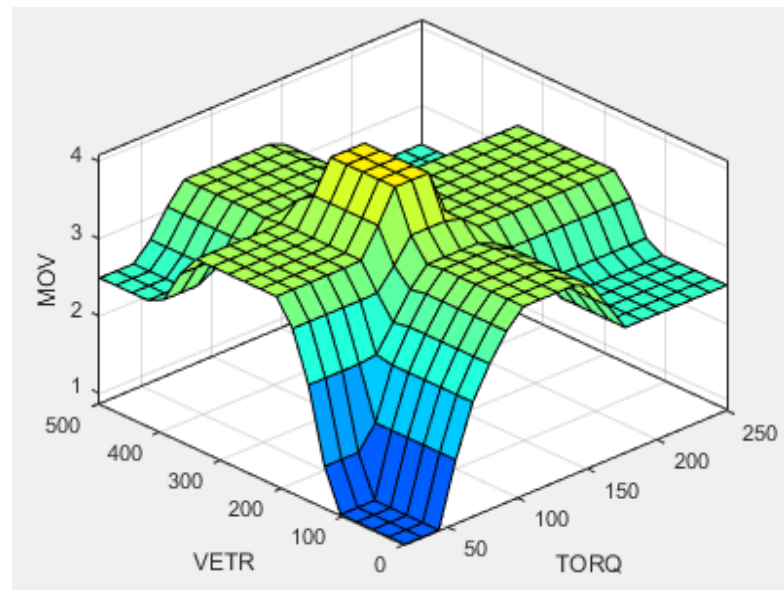
Fonte: autor.

Gráfico 35 Parâmetro MOV em função de VPTR e VETR

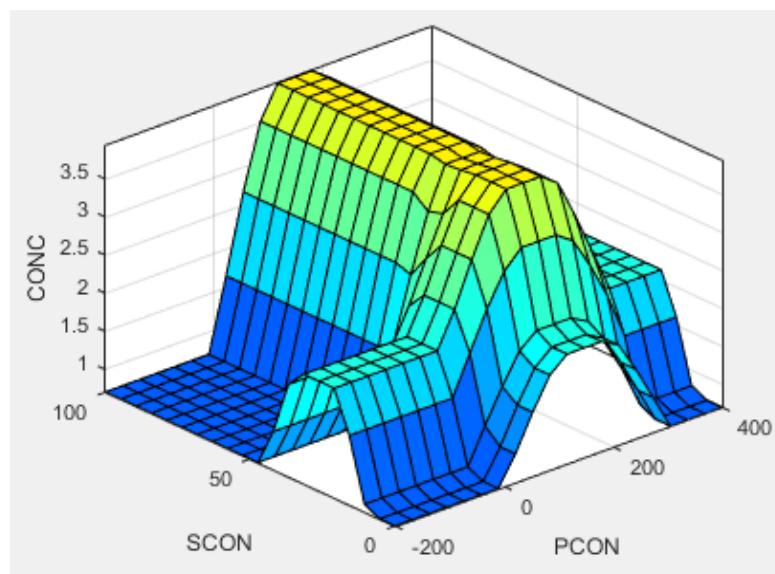


Fonte: autor.

Gráfico 36 Parâmetro GEO em função de TORQ e VETR



Fonte: autor.

Gráfico 37 Parâmetro CONC em função de PCON e SCON

Fonte: autor.

Do gráfico 30 pode-se observar que o parâmetro GEO aumenta quando os parâmetros “diâmetro - DIAM” e “comprimento - COMP” aumentam. Isso se justifica devido ao fato de que o aumento desses parâmetros iniciais tende a aumentar o valor da capacidade da carga da fundação, favorecendo a confiabilidade. Pode-se perceber também que o parâmetro GEO se aproxima de 4,00 para os maiores valores de diâmetros e comprimentos.

O aumento dos parâmetros “método de determinação da capacidade de carga - MDCC” e “quantidade de métodos de determinação da capacidade de carga - QMCC” observados no gráfico 31 aumentam o valor do parâmetro MCC. O aumento desse parâmetro favorece a confiabilidade, pois quanto maior o número de métodos utilizados e maior a precisão desses métodos, maior é a garantia de segurança da fundação. Com as entradas mais favoráveis pode-se obter valores próximos de 4,5 para esse parâmetro.

De maneira similar aos parâmetros resultantes apresentados, o parâmetro resultante EXP causa o aumento da confiabilidade quando seus parâmetros iniciais “experiência do projetista - EXPP” e “experiência do executor - EXPE” aumentam (gráfico 32). A justificativa é a de que, quanto maior a experiência dos profissionais envolvidos na construção de uma fundação, menos esperada é a ocorrência de problemas que comprometam o desempenho e a segurança desta fundação, favorecendo a confiabilidade. Para o parâmetro EXP pode-se obter o valor de 4,00, mantidos constantes os valores dos outros parâmetros iniciais.

O parâmetro “resistência do solo - RSOL” causa o aumento do parâmetro resultante CSO, conforme se pode observar no gráfico 33. Entretanto, ressalta-se que valores muito elevados de N_{SPT} dificultam ou até mesmo podem inviabilizar a execução das estacas hélice contínua devido à dificuldade de penetração da hélice. De acordo com o gráfico 33, caso esse parâmetro possuísse valores mais elevados, CSO teoricamente chegaria a valores próximos de 4,00 (considerando constantes os outros parâmetros iniciais), favorecendo a confiabilidade.

O comportamento da variável MOV em relação à variação dos parâmetros iniciais “torque - TORQ”, “velocidade de perfuração - VPTR” e “velocidade de extração - VETR” foi observado nos gráficos 34 a 36. Os valores de torque estão associados à resistência do solo e ao diâmetro da estaca. De modo geral, quanto maiores os valores desses parâmetros, maiores tendem a ser os valores de torque. Como essas características são favoráveis à confiabilidade, admitiu-se que valores de torque mais elevados favorecem a confiabilidade, como se infere dos gráficos.

A diminuição dos valores de velocidade de perfuração aumenta os valores do parâmetro resultante MOV, devido à relação inversamente proporcional que a velocidade de perfuração possui com a resistência do solo. A velocidade de extração reduz o parâmetro MOV com o aumento de seus valores. Isso se justifica devido ao fato de que a velocidade de extração deve ser lenta, para garantir o deslocamento do solo que percorre a hélice. De forma semelhante aos outros parâmetros, MOV pode alcançar valores próximos de 4,00 desde que seus parâmetros iniciais estejam de acordo com valores adequados, conforme mostrado nos gráficos 35 e 36.

Em relação à variação dos parâmetros iniciais “pressão de injeção de concreto - PCON” e “superconsumo de concreto - SCON” (figura 37), percebe-se que pressões de injeção negativas reduzem o valor de CONC, assim como valores superiores a 200 kN/m². Pressões negativas são utilizadas na ocorrência de camadas formadas por solos moles, característica que desfavorece a confiabilidade da fundação. O parâmetro CONC aumenta para valores baixos do parâmetro inicial “sobreconsumo de concreto”.

Valores muito elevados de superconsumo de concreto, em geral acima de 25%, configuram desperdício de material e valores da ordem de 10% ou inferiores reduzem a confiabilidade por colocarem em risco a integridade do fuste próximo da cota do solo. Logo, conclui-se que valores intermediários dos parâmetros iniciais de CONC são mais favoráveis à confiabilidade. De maneira semelhante ao parâmetro MOV, CONC pode obter valores próximos de 4,00 ao ter valores favoráveis atribuídos a seus parâmetros iniciais.

Ainda considerando o segundo caso abordado neste trabalho, a variável de confiabilidade *Fuzzy* pode ser alterada de um valor “medianamente confiável” para um valor “muito confiável”, alterando-se valores dos parâmetros resultantes para seus maiores valores possíveis, conforme pode ser observado na figura 18, que mostra a janela da base de regras *Fuzzy* para esta situação. Apenas os parâmetros GEO e CSO não foram alterados; o parâmetro GEO permaneceu inalterado por alcançar valores maiores para comprimentos muito elevados, o que seria inviável na prática. O parâmetro CSO não foi alterado devido à impossibilidade de alterar os valores de resistência do solo.

Por fim, comparando-se os valores de confiabilidade *Fuzzy* com os valores do índice de confiabilidade probabilístico β obtido para as estacas do HU (tabela 45), o valor elevado de β (10,92) se justifica devido às premissas conservadoras adotadas em projeto e pela reduzida variabilidade de valores de resistências e solicitações atuantes no projeto, não considerando diretamente questões relacionadas à execução das fundações e fatores subjetivos.

Tabela 45 Comparação entre os valores de índice de confiabilidade probabilístico e da variável de confiabilidade *Fuzzy*

Índice de confiabilidade probabilístico β	Casos analisados	Variável de confiabilidade <i>Fuzzy</i>	Conjunto pertencente
10,92	Primeiro	3,39	“Confiável”
-	Segundo	3,18	“Medianamente confiável”
-	Terceiro	4,48	“Muito confiável”

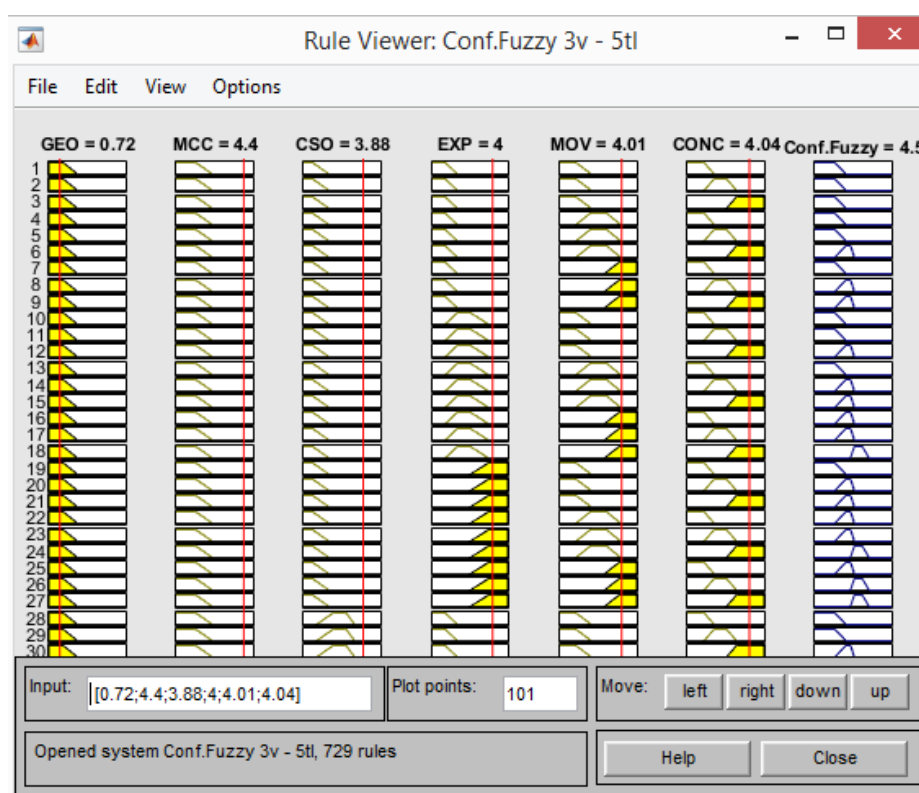
Fonte: autor.

Conforme se pode observar dos valores da variável de confiabilidade *Fuzzy*, alterações nos parâmetros referentes à execução e à experiência dos projetistas e executores causaram alterações no valor desta variável. O valor de β provavelmente não seria igual para todos os casos, porém provavelmente seria alterado apenas em função de parâmetros desfavoráveis que influenciassem nos valores das resistências, aumentando o coeficiente de variação da curva de resistências. Ou seja, através de β , não se teria clareza acerca da influência dos parâmetros de execução e das experiências do projetista e executor para a confiabilidade das estacas. Esta clareza, entretanto, é maior na variável de confiabilidade *Fuzzy*.

Entretanto, sabe-se que fatores do processo executivo, tais como os parâmetros de execução escolhidos nesse trabalho, podem influenciar no desempenho e na qualidade das

estacas, podendo inclusive vir a prejudicar sua confiabilidade, de forma geral. Dessa forma, sugere-se que, em conjunto com o índice de confiabilidade probabilístico seja utilizado uma variável de confiabilidade *Fuzzy* para considerar fatores subjetivos, de decisão e os não contemplados diretamente em β , de forma a obter uma avaliação mais abrangente e que caracterize com mais precisão os fatores relacionados a todo o processo de construção de uma fundação.

Figura 18 Janela de regras *Fuzzy* para o segundo caso com parâmetros alterados



Fonte: autor.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho objetivou a obtenção de uma variável que pudesse quantificar a confiabilidade de fundações por estacas hélice contínua a partir de dados relacionados ao projeto e à execução, tais como o diâmetro, o comprimento, o torque, entre outros, além de aspectos subjetivos, como as experiências do projetista e executor. Estes dados podem influenciar positiva ou negativamente na capacidade de carga, no desempenho, na qualidade e na segurança das estacas. Desta forma, esta variável mediu principalmente a confiabilidade das estacas com base nestas características.

Tendo em vista que alguns dados utilizados para a obtenção desta variável de confiabilidade são de natureza subjetiva (por exemplo, as experiências do projetista e do executor) e outros de difícil consideração (torque, velocidades de perfuração e extração do trado), elaborou-se um sistema *Fuzzy*, programa elaborado a partir dos conceitos da Lógica *Fuzzy* no programa MATLAB® para obter esta variável de confiabilidade, que passou a ser chamada posteriormente de “variável de confiabilidade *Fuzzy*”.

Foi implementado um questionário online, posteriormente respondido por profissionais da área de fundações, para obter informações acerca dos parâmetros de projeto e execução abordados neste trabalho e subsidiar o banco de dados do programa. Apesar de o quantitativo de respostas previsto no questionário ter sido abaixo do esperado, as informações coletadas foram úteis para fornecer o grau de importância atribuído pelos especialistas da área de fundações de todo o território brasileiro a cada um dos parâmetros considerados em relação à confiabilidade.

Os resultados obtidos a partir da análise dos três casos abordados neste trabalho foram satisfatórios, apresentando poucas incoerências. Além disso, o programa MATLAB® mostrou ser bastante funcional e adequado às necessidades do trabalho, principalmente devido à geração de gráficos que permitem visualizar com clareza o comportamento das variáveis envolvidas.

Entretanto, uma base maior de informações dos especialistas pode conduzir a resultados mais precisos e consistentes. Além disso, podem ser elaborados sistemas *Fuzzy* de acordo com diferentes regiões, abrangendo de forma mais realista as peculiaridades de cada local e as práticas específicas dos profissionais de uma determinada região.

O sistema *Fuzzy* apresentou limitações. Não consegue perceber, por exemplo, valores incoerentes entre parâmetros correlacionados. Por exemplo, a relação do torque com o N_{SPT} do solo. Torques maiores devem ser aplicados quanto maior tende a ser a resistência do solo. Caso sejam inseridos valores baixos de torque e altos valores de resistência do solo, o sistema *Fuzzy* obterá valores para os parâmetros resultantes e para a variável de confiabilidade *Fuzzy*, independentemente de possível incoerência dos parâmetros iniciais lançados. Por isso, é necessária atenção na inserção dos dados de entrada.

Há dificuldade para determinar os valores dos parâmetros que não apresentam um único valor ao longo do processo executivo, como o torque e as velocidades de perfuração e extração, mesmo que haja o gráfico da variação desses parâmetros nos relatórios de execução das estacas. Ou seja, esses parâmetros precisam ser incluídos na análise de confiabilidade de uma forma que considere esta particularidade de variação.

O sistema *Fuzzy* deve ter os resultados analisados e armazenados para verificar a necessidade de ajustes, pois nem todos os resultados puderam ser verificados. Essas medidas visam auxiliar na calibração de resultados posteriores em caso de incoerências.

Cabe ressaltar que a variável de saída do sistema *Fuzzy* não possui o objetivo de substituir o índice de confiabilidade probabilístico β , e sim, em conjunto com ele, servir de ferramenta adicional para a verificação da confiabilidade das estacas considerando aspectos construtivos não inseridos na estimativa de confiabilidade clássica.

Considerando as informações coletadas a partir do questionário e da experiência dos profissionais da área, o sistema tende a caracterizar as fundações como confiáveis, em decorrência dos poucos dados acerca do que é “não confiável” e “pouco confiável”. Assim, para que ocorram essas respostas do sistema, é preciso que muitos aspectos sejam negligenciados simultaneamente durante o processo de construção da estaca.

Conclui-se que os resultados obtidos do sistema *Fuzzy* atenderam às expectativas inicialmente pensadas, entretanto algumas questões precisam ser otimizadas para que o sistema possa ser utilizado de forma confiável. Sugere-se obter os conjuntos *Fuzzy* e as regras a partir das opiniões de especialistas atuantes na área onde o sistema deverá ser utilizado, para que a precisão dos resultados em relação às características do solo da região sejam os mais fieis possíveis. Além disso, é necessário implementar formas mais adequadas de considerar o comportamento variável dos parâmetros de execução, tendo em vista que esses parâmetros,

como as velocidades de perfuração e extração do trado, não apresentam um valor único, variando ao longo do processo executivo.

Por fim, ressalta-se a importância e a adequação da Lógica *Fuzzy* na modelagem do sistema estudado, mostrando-se uma ferramenta poderosa para descrever problemas de natureza imprecisa, subjetiva e modelagem complicada por métodos convencionais, como o abordado neste trabalho. Como a engenharia civil, sobretudo a área de Geotecnia, é permeada por incertezas e imprecisões, a Lógica *Fuzzy* tende a ganhar cada vez mais espaço nessa área.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M. F. P.; ARAÚJO, C. B. C.; MONTEIRO, T. M. Análise de métodos semi-empíricos nacionais e internacionais para determinação da capacidade de carga axial em estacas do tipo raiz. **Revista Tecnologia**. Fortaleza, CE, v. 38, n. 2, p. 1-16, dez. 2017.

ALLEDI, C. T. D. B.; POLIDO, U. F. **Capacidade de carga de estacas hélice contínua: previsão por métodos semi-empíricos versus provas de carga**. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, SEFE VII., 2012, São Paulo. Anais... São Paulo, ABEF, 2012, v. 1, p. 249-262.

ANDRAOS, N. C. **Ensaio de carregamento dinâmico em estacas moldadas in loco: contribuições para a seleção do sistema de impacto e amortecimento a partir de retro-análise**. 2009. 224f. Dissertação (mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal do Paraná, PR, 2009.

ANTUNES, W. R. et al. **Estacas Hélice Contínua – Projeto, Execução e Controle**. São Paulo: ABMS, 1997.

AOKI, N. **Segurança e Confiabilidade de Fundações Profundas**. In: Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 2005, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: 2005, V.1, p. 1-15.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 6848: Solo – sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 12131: Estacas – prova de carga estática.** Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 13208: Estacas – Ensaio de carregamento dinâmico.** Rio de Janeiro, 2007.

BARROS, L. C.; BASSANEZI, R. C. **Tópicos de Lógica *Fuzzy* e Biomatemática.** v. 5. Campinas: Coleção IMECC - Textos Didáticos, 2006.

BOWLES, E. J. **Foundation Analysis and Design.** 5 ed. McGraw-Hill Companies, 1996.

CINTRA, A. J. C.; AOKI, N. **Fundações por estacas: projeto geotécnico.** 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

COX, E. **The Fuzzy Systems Handbook: a practitioner's guide to build, using and maintain Fuzzy systems.** 1 ed. AP Professional: New York, 1994.

G1. **UNIFAP confirma lentidão na obra do Hospital Universitário em função da greve dos caminhoneiros.** Disponível em: <https://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/unifap-confirma-lentidao-na-hora-do-hospital-universitario-em-funcao-da-greve-dos-caminhonheiros.ghtml>> Acesso em: 11 nov 2018.

GEOFIX FUNDAÇÕES. **Hélice Contínua Monitorada.** Disponível em < http://www.estacas.com.br/catalogo_helice_continua.pdf >. Acesso em 26 jul. 2018. Il. Color.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e Lógica *Fuzzy*. **Revista SBA Controle & Automação.** V. 4, n. 3, p. 97-115, set-out 1994.

HACHICH, et al. **Fundações: teoria e prática.** 2 ed. São Paulo: PINI, 1998.

HORTEGAL, M. V. **Aplicação da Lógica *Fuzzy* no controle do desempenho de Estacas Hélice Contínua**. 2016. 157f. Tese (doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, DF, 2016.

MAGALHÃES, P. H. L. **Avaliação dos Métodos de Capacidade de Carga e Recalque de Estacas Hélice Contínua via Prova de Carga**. 2005. 270f. Dissertação (mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, DF, 2005.

NORTH COM ENGENHARIA. **Relatório geotécnico de fundação – prédio principal**. 12f. Rio de Janeiro, 2016.

OLIVEIRA, A. **Comparação entre os métodos estáticos com o ensaio de carregamento dinâmico em estacas pré-moldadas de concreto**. 2015. 100f. Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, PR, 2015.

RAMOS, B. M. G. **Aplicação da Lógica Difusa na avaliação do fator de segurança e da capacidade de carga de estacas hélice contínua**. 2015. 165f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Norte Fluminense, RJ, 2015.

ROCHA&ABREU. **Etapas de Execução – Estacas Hélice Contínua**. Disponível em: <http://rochaabreu.blogspot.com/2013/05/etapas-de-execucao-estacas-helice.html>. Acesso: 28 nov 2018. Il color.

RIGNEL, D. G. S.; CHENCI, G. P.; LUCAS, C. A. Uma introdução à Lógica *Fuzzy*. **Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica**. Franca, SP, v. 01, n. 01, 2011.

ROSS, T. J. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**. 3 ed. New Mexico: Wiley, 2010. Il.

VELLOSO, A. D.; LOPES, F. R. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

ZADEH, L. A. *Fuzzy sets.* **Information and Control.** V. 8, p. 338-353, 1965.

APÊNCICE A – Questionário aplicado aos engenheiros da ABMS

Análise de confiabilidade de fundações profundas por estaca hélice contínua

1. O presente formulário objetiva coletar informações para a realização de um trabalho de conclusão de curso de graduação.
2. É destinado a todos os profissionais que trabalham na área de Geotecnia, principalmente aqueles que atuam com projeto e execução de estacas hélice contínua.
3. É importante que as informações prestadas correspondam ao máximo à realidade.
4. O formulário é anônimo e não levará mais do que três minutos para ser respondido.

Seção I – Perfil do participante

Questão 1 – Qual a sua idade? _____

Questão 2 – Qual a sua região de atuação?

() Centro-oeste;

() Nordeste;

() Norte;

() Sudeste;

() Sul.

Questão 3 – Qual o seu tempo de formado?

() 0 a 5 anos;

() 5 a 10 anos;

() 10 a 15 anos;

() 15 a 20 anos;

() Mais de 20 anos.

Questão 4 – Qual a sua maior formação?

() Graduação;

() Especialização;

() Mestrado;

() Doutorado.

Questão 5 – A formação é voltada para Geotecnia?

() Sim () Não

Questão 6 – Há quanto tempo Vossa Senhoria trabalha com Geotecnia?

() 0 a 5 anos;

() 5 a 10 anos;

() 10 a 15 anos;

() 15 a 20 anos;

() Mais de 20 anos;

() A formação não é voltada para Geotecnia.

Questão 7 – Numere as áreas seguintes em uma escala de 1 a 5 de acordo com a sua experiência (1 para nenhuma experiência e 5 para muita experiência):

Área	1	2	3	4	5
Projeto e/ou execução de fundações profundas					
Projeto e/ou execução de barragens					
Projeto e/ou execução de túneis					
Projeto e/ou execução de obras de contenção de terra					
Outra (s)					

Seção II – Atuação na área de fundações profundas

Questão 8 – Numere em uma escala de 1 a 5 os métodos de determinação de capacidade de carga de estacas abaixo quanto a sua experiência em utilizá-los (1 para nenhuma experiência e 5 para muita experiência):

Método de determinação da capacidade de carga de estacas	1	2	3	4	5
Método semi-empírico de Aoki-Velloso					
Método semi-empírico de Décourt-Quaresma					
Métodos teóricos					
Ensaio de prova de carga estática ou dinâmica					

Questão 9 – Vossa Senhoria utiliza outro (s) método (s) de determinação da capacidade de carga de estacas?

() Sim () Não

Qual? (caso seja marcada a opção “Sim”) _____

Questão 10 – Com qual frequência você já realizou estudos de análise de confiabilidade da fundação de uma obra, durante sua carreira (1 para nunca realizou e 5 para sempre realizou)?

() 1 () 2 () 3 () 4 () 5

Questão 11 – Numere em uma escala de 1 a 5 os métodos de determinação de capacidade de carga abaixo quanto a sua confiabilidade (1 para não confiável e 5 para muito confiável):

Método de determinação da capacidade de carga de estacas	1	2	3	4	5
Método semi-empírico de Aoki-Velloso					
Método semi-empírico de Décourt-Quaresma					
Métodos teóricos					
Ensaio de prova de carga estática ou dinâmica					

Questão 12 – Numere em uma escala de 1 a 5 os métodos de determinação de capacidade de carga de estacas abaixo quanto a sua utilização em conjunto (1 para não confiável e 5 para muito confiável):

Método de determinação da capacidade de carga de estacas	1	2	3	4	5
Apenas o método semi-empírico de Aoki-Velloso					

Apenas o método semi-empírico de Décourt-Quaresma					
Apenas métodos teóricos					
Apenas ensaios de prova de carga estática ou dinâmica					
Ao menos dois, preferencialmente o método semi-empírico de Aoki-Velloso					
Ao menos dois, preferencialmente o semi-empírico de Décourt-Quaresma					
Ao menos dois, preferencialmente métodos teóricos					
Ao menos dois, preferencialmente ensaios de prova de carga estática ou dinâmica					
Ao menos três métodos semi-empíricos					
Ao menos três (mesclando métodos semi-empíricos com ensaios de prova de carga e/ou método direto)					
Mais do que três métodos					

Seção III – Parâmetros de projeto de estacas hélice contínua

Esta seção se destina a obter informações acerca da relevância e influência de diferentes parâmetros de projeto para a confiabilidade de fundações por estacas hélice contínua.

Foram considerados os itens da tabela abaixo como parâmetros de projeto de estacas hélice contínua:

Parâmetros de projeto	Unidade
Comprimento da estaca	m
Díâmetro da estaca	cm
Espaçamento entre eixos de estacas adjacentes	m
Experiência do projetista	ano
Método de determinação da capacidade de carga	-
Características do solo	N _{SPT}

Questão 13 – Qual a relevância da variabilidade dos parâmetros citados para a confiabilidade de fundações por estacas hélice contínua?

	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta
Comprimento da estaca (metros)					
Diâmetro da estaca (centímetros)					
Experiência do projetista (anos)					
Método de determinação da capacidade de carga					
Resistência do solo (N_{SPT})					

Seção IV – Parâmetros de execução de estacas hélice contínua

Esta seção se destina a obter informações acerca da relevância e influência dos diferentes parâmetros de execução para a confiabilidade de fundações por estacas hélice contínua.

Foram considerados os itens abaixo como parâmetros de execução de estacas hélice contínua:

Parâmetros de execução	Unidade
Torque da hélice de perfuração	kNm
Velocidade de perfuração do trado	m/h
Pressão de injeção de concreto	kN/m ²
Superconsumo de concreto	%
Velocidade de extração do trado	m/h
Experiência do executor	ano

Questão 14 – Qual a relevância da variabilidade dos parâmetros citados para a confiabilidade de fundações por estacas hélice contínua?

	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta
Torque da hélice de perfuração (kNm)					
Velocidade de perfuração do trado (m/h)					
Pressão de injeção de concreto (kN/m ²)					
Superconsumo de concreto (%)					

Velocidade de extração do trado (m/h)					
Experiência do executor (anos)					

Seção V – Comentários, críticas e/ou sugestões

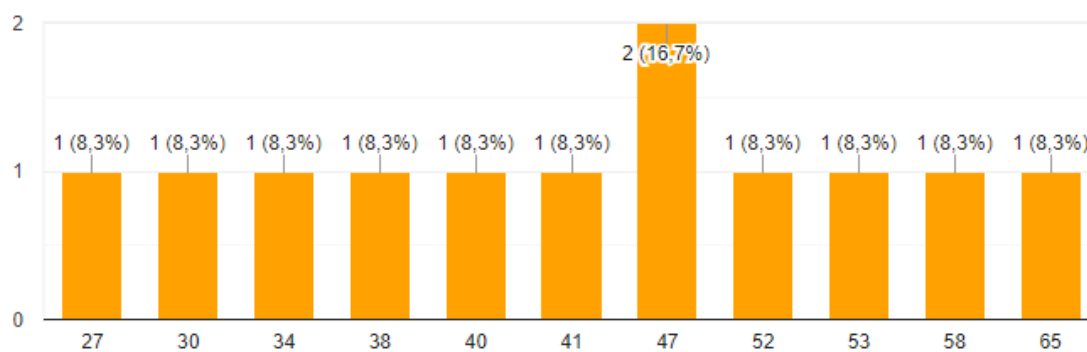
Sua opinião é muito importante. Caso queira fazer críticas, comentários e/ou sugestões sobre este questionário, a pesquisa, seu tema, metodologia, etc., sinta-se à vontade para utilizar o espaço abaixo.

Suas respostas foram registradas. Muito obrigado por participar!

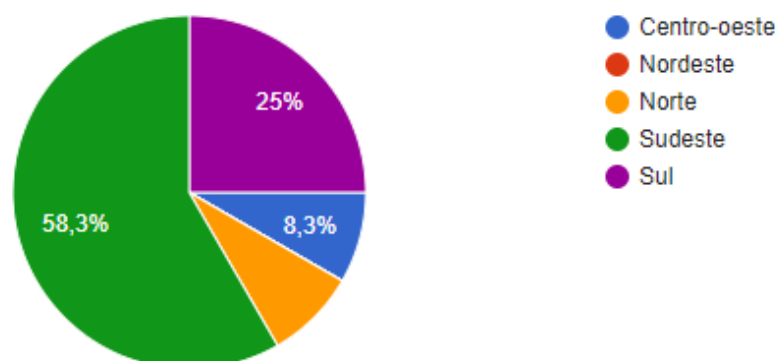
APÊNCICE B – Respostas obtidas do questionário on-line

Total de respostas: 12 (doze)

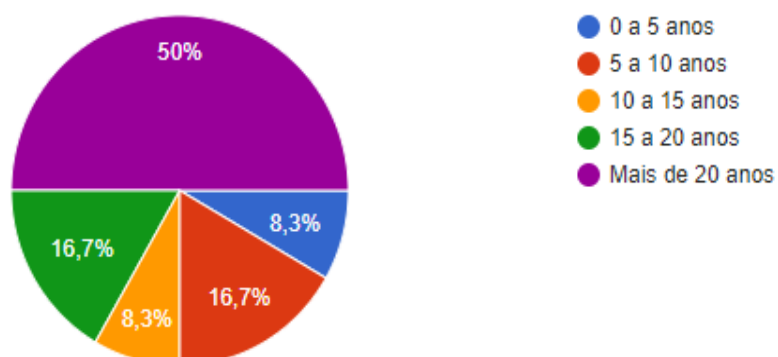
Questão 1 - Qual a sua idade?



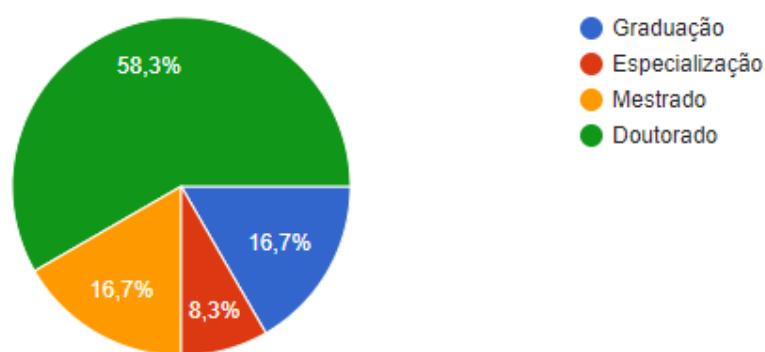
Questão 2 – Qual a sua região de atuação?



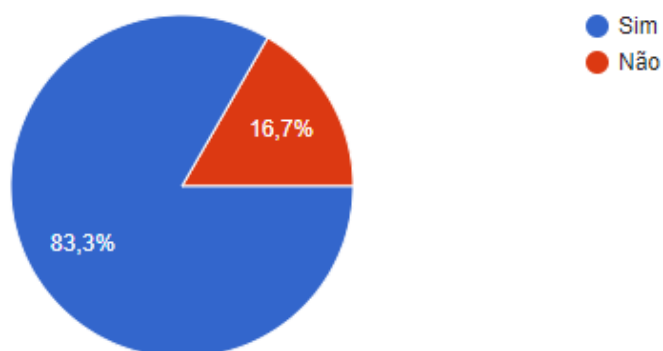
Questão 3 - Qual o seu tempo de formado?



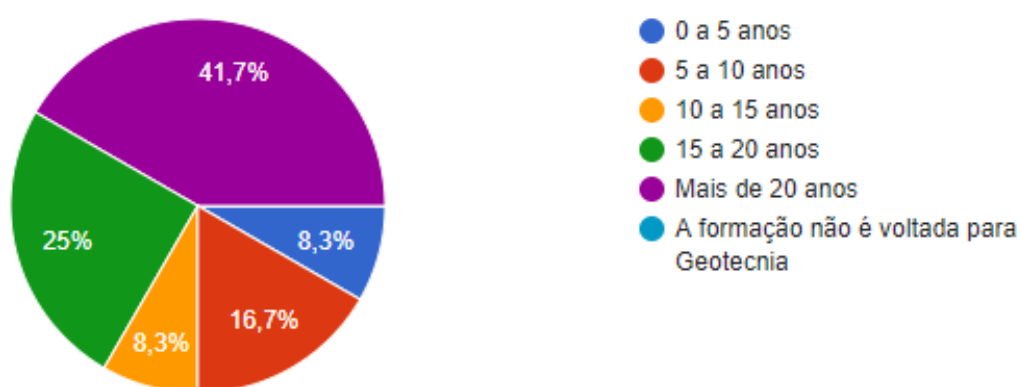
Questão 4 - Qual a sua maior formação?



Questão 5 - A formação é voltada para Geotecnia?



Questão 6 – Há quanto tempo Vossa Senhoria trabalha com Geotecnia?



Questão 7 – Numere as áreas seguintes em uma escala de 1 a 5 de acordo com a sua experiência (1 para nenhuma experiência e 5 para muita experiência):

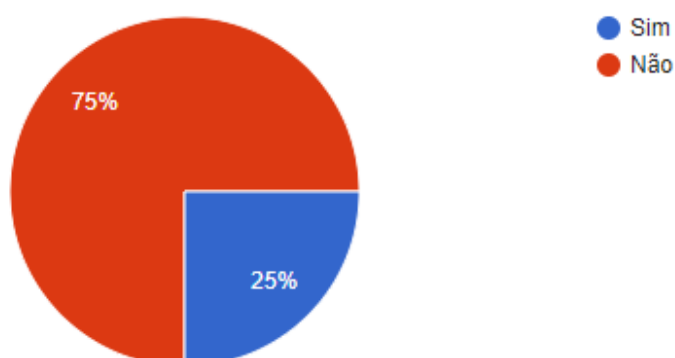
Área	1	2	3	4	5
Projeto e/ou execução de fundações profundas	-	-	8,4%	33,3%	58,3%
Projeto e/ou execução de barragens	58,3%	16,7%	8,3%	16,7%	-

Projeto e/ou execução de túneis	66,7%	16,7%	8,3%	8,3%	-
Projeto e/ou execução de obras de contenção de terra	-	8,3%	41,7%	8,3%	41,7%
Outra (s)	33,3%	8,3%	8,4%	16,7%	33,3%

Questão 8 – Numere em uma escala de 1 a 5 os métodos de determinação de capacidade de carga de estacas abaixo quanto a sua experiência em utilizá-los (1 para nenhuma experiência e 5 para muita experiência):

Método de determinação da capacidade de carga de estacas	1	2	3	4	5
Método semi-empírico de Aoki-Velloso	8,4%	-	-	58,3%	33,3%
Método semi-empírico de Décourt-Quaresma	-	-	16,7%	58,3%	25,0%
Métodos teóricos	41,7%	16,6%	16,7%	16,7%	8,3%
Ensaio de prova de carga estática ou dinâmica	8,4%	25,0%	8,3%	25,0%	33,3%

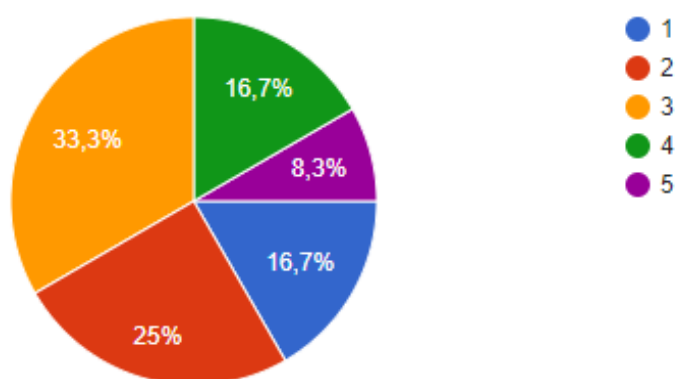
Questão 9 – Vossa Senhoria utiliza outro (s) método (s) de determinação da capacidade de carga de estacas? Qual (is)?



Respostas:

“Método Urbano Alonso (1996) ”.

Questão 10 – Com qual frequência você já realizou estudos de análise de confiabilidade da fundação de uma obra, durante sua carreira (1 para nunca realizou e 5 para sempre realizou)?



Questão 11 – Numere em uma escala de 1 a 5 os métodos de determinação de capacidade de carga abaixo quanto a sua confiabilidade (1 para não confiável e 5 para muito confiável):

Método de determinação da capacidade de carga de estacas	1	2	3	4	5
Método semi-empírico de Aoki-Velloso	-	8,3%	33,3%	41,7%	16,7%
Método semi-empírico de Décourt-Quaresma	-	-	33,3%	58,3%	8,6%
Métodos teóricos	8,3%	16,7%	41,7%	25,0%	8,3%
Ensaio de prova de carga estática ou dinâmica	-	-	-	25,0%	75,0%

Questão 12 – Numere em uma escala de 1 a 5 os métodos de determinação de capacidade de carga de estacas abaixo quanto a sua utilização em conjunto (1 para não confiável e 5 para muito confiável):

Método de determinação da capacidade de carga de estacas	1	2	3	4	5
Apenas o método semi-empírico de Aoki-Velloso	8,3%	33,3%	25,0%	25,0%	8,4%
Apenas o método semi-empírico de Décourt-Quaresma	8,3%	25,0%	33,3%	33,3%	-
Apenas métodos teóricos	16,7%	25,0%	41,7%	8,3%	8,3%
Apenas ensaios de prova de carga estática ou dinâmica	-	-	66,7%	33,3%	-
Ao menos dois, preferencialmente o método semi-empírico de Aoki-Velloso	8,3%	25,0%	25,0%	25,0%	16,7%

Ao menos dois, preferencialmente o semi-empírico de Décourt-Quaresma	-	8,3%	41,7%	33,3%	16,7%
Ao menos dois, preferencialmente métodos teóricos	25,0%	8,3%	25,0%	16,7%	25,0%
Ao menos dois, preferencialmente ensaios de prova de carga estática ou dinâmica	-	-	16,7%	33,3%	50,0%
Ao menos três métodos semi-empíricos	-	16,7%	25,0%	33,3%	25,0%
Ao menos três (mesclando métodos semi-empíricos com ensaios de prova de carga e/ou método direto)	8,4%	-	8,3%	33,3%	50,0%
Mais do que três métodos	8,3%	-	41,7%	16,7%	33,3%

Questão 13 – Qual a relevância da variabilidade dos parâmetros citados para a confiabilidade de fundações por estacas hélice contínua?

	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta
Comprimento da estaca (metros)	-	-	16,7%	75,0%	8,3%
Diâmetro da estaca (centímetros)	-	8,4%	25,0%	33,3%	33,3%
Experiência do projetista (anos)	-	-	50,0%	16,7%	33,3%
Método de determinação da capacidade de carga	-	8,3%	16,7%	50,0%	25,0%
Resistência do solo (N_{SPT})	-	-	-	41,7%	58,3%

Questão 14 – Qual a relevância da variabilidade dos parâmetros citados para a confiabilidade de fundações por estacas hélice contínua?

	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta
Torque da hélice de perfuração (kNm)	-	-	25,0%	66,7%	8,3%
Velocidade de perfuração do trado (m/h)	-	8,4%	33,3%	50,0%	8,3%
Pressão de injeção de concreto (kN/m ²)	-	-	50,0%	41,7%	8,3%
Superconsumo de concreto (%)	-	-	58,3%	41,7%	-

Velocidade de extração do trado (m/h)	-	8,3%	33,3%	33,3%	25,0%
Experiência do executor (anos)	-	-	16,7%	58,3%	25,0%

Comentários, críticas e/ou sugestões**Respostas**

"Parabéns!"

APÊNCICE C – Base de regras do Sistema *Fuzzy*

Nº	Entrada						Saída
	GEO	MCC	CSO	EXP	MOV	CONC	CONF.Fuzzy
1	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Não confiável
2	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Não confiável
3	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Não confiável
4	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Não confiável
5	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Média	Não confiável
6	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Alta	Pouco confiável
7	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Não confiável
8	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Média	Pouco confiável
9	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Pouco confiável
10	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Não confiável
11	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Média	Não confiável
12	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Alta	Pouco confiável
13	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Média	Baixa	Não confiável
14	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Média	Média	Pouco confiável
15	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Média	Alta	Pouco confiável
16	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Alta	Baixa	Pouco confiável
17	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Alta	Média	Pouco confiável
18	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Alta	Alta	Medianamente confiável
19	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Não confiável
20	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Média	Pouco confiável
21	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Pouco confiável
22	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Média	Baixa	Pouco confiável
23	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Média	Média	Pouco confiável
24	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Média	Alta	Medianamente confiável
25	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Pouco confiável
26	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Média	Medianamente confiável
27	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Alta	Medianamente confiável
28	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Não confiável
29	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Média	Não confiável
30	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Alta	Pouco confiável
31	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Média	Baixa	Não confiável
32	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Média	Média	Pouco confiável
33	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Média	Alta	Pouco confiável
34	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Alta	Baixa	Pouco confiável

35	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Alta	Média	Pouco confiável
36	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Alta	Alta	Medianamente confiável
37	Baixa	Baixa	Média	Média	Baixa	Baixa	Não confiável
38	Baixa	Baixa	Média	Média	Baixa	Média	Pouco confiável
39	Baixa	Baixa	Média	Média	Baixa	Alta	Pouco confiável
40	Baixa	Baixa	Média	Média	Média	Baixa	Pouco confiável
41	Baixa	Baixa	Média	Média	Média	Média	Pouco confiável
42	Baixa	Baixa	Média	Média	Média	Alta	Medianamente confiável
43	Baixa	Baixa	Média	Média	Alta	Baixa	Pouco confiável
44	Baixa	Baixa	Média	Média	Alta	Média	Medianamente confiável
45	Baixa	Baixa	Média	Média	Alta	Alta	Medianamente confiável
46	Baixa	Baixa	Média	Alta	Baixa	Baixa	Pouco confiável
47	Baixa	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Pouco confiável
48	Baixa	Baixa	Média	Alta	Baixa	Alta	Medianamente confiável
49	Baixa	Baixa	Média	Alta	Média	Baixa	Pouco confiável
50	Baixa	Baixa	Média	Alta	Média	Média	Medianamente confiável
51	Baixa	Baixa	Média	Alta	Média	Alta	Medianamente confiável
52	Baixa	Baixa	Média	Alta	Alta	Baixa	Medianamente confiável
53	Baixa	Baixa	Média	Alta	Alta	Média	Medianamente confiável
54	Baixa	Baixa	Média	Alta	Alta	Alta	Medianamente confiável
55	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Não confiável
56	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Média	Pouco confiável
57	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Pouco confiável
58	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Média	Baixa	Pouco confiável
59	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Média	Média	Pouco confiável
60	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Média	Alta	Medianamente confiável
61	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Pouco confiável
62	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Média	Medianamente confiável
63	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Alta	Medianamente confiável
64	Baixa	Baixa	Alta	Média	Baixa	Baixa	Pouco confiável
65	Baixa	Baixa	Alta	Média	Baixa	Média	Pouco confiável
66	Baixa	Baixa	Alta	Média	Baixa	Alta	Medianamente confiável

67	Baixa	Baixa	Alta	Média	Média	Baixa	Pouco confiável
68	Baixa	Baixa	Alta	Média	Média	Média	Medianamente confiável
69	Baixa	Baixa	Alta	Média	Média	Alta	Medianamente confiável
70	Baixa	Baixa	Alta	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
71	Baixa	Baixa	Alta	Média	Alta	Média	Medianamente confiável
72	Baixa	Baixa	Alta	Média	Alta	Alta	Medianamente confiável
73	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Pouco confiável
74	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Média	Medianamente confiável
75	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Alta	Medianamente confiável
76	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Média	Baixa	Medianamente confiável
77	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Média	Média	Medianamente confiável
78	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Média	Alta	Medianamente confiável
79	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Alta	Baixa	Medianamente confiável
80	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Alta	Média	Medianamente confiável
81	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Alta	Alta	Confiável
82	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Não confiável
83	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Não confiável
84	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Pouco confiável
85	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Não confiável
86	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Média	Média	Pouco confiável
87	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Média	Alta	Pouco confiável
88	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Pouco confiável
89	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Alta	Média	Pouco confiável
90	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Medianamente confiável
91	Baixa	Média	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Não confiável
92	Baixa	Média	Baixa	Média	Baixa	Média	Pouco confiável
93	Baixa	Média	Baixa	Média	Baixa	Alta	Pouco confiável
94	Baixa	Média	Baixa	Média	Média	Baixa	Pouco confiável
95	Baixa	Média	Baixa	Média	Média	Média	Pouco confiável
96	Baixa	Média	Baixa	Média	Média	Alta	Medianamente confiável
97	Baixa	Média	Baixa	Média	Alta	Baixa	Pouco confiável
98	Baixa	Média	Baixa	Média	Alta	Média	Medianamente confiável

99	Baixa	Média	Baixa	Média	Alta	Alta	Medianamente confiável
100	Baixa	Média	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Pouco confiável
101	Baixa	Média	Baixa	Alta	Baixa	Média	Pouco confiável
102	Baixa	Média	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Medianamente confiável
103	Baixa	Média	Baixa	Alta	Média	Baixa	Pouco confiável
104	Baixa	Média	Baixa	Alta	Média	Média	Medianamente confiável
105	Baixa	Média	Baixa	Alta	Média	Alta	Medianamente confiável
106	Baixa	Média	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Medianamente confiável
107	Baixa	Média	Baixa	Alta	Alta	Média	Medianamente confiável
108	Baixa	Média	Baixa	Alta	Alta	Alta	Medianamente confiável
109	Baixa	Média	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Não confiável
110	Baixa	Média	Média	Baixa	Baixa	Média	Pouco confiável
111	Baixa	Média	Média	Baixa	Baixa	Alta	Pouco confiável
112	Baixa	Média	Média	Baixa	Média	Baixa	Pouco confiável
113	Baixa	Média	Média	Baixa	Média	Média	Pouco confiável
114	Baixa	Média	Média	Baixa	Média	Alta	Medianamente confiável
115	Baixa	Média	Média	Baixa	Alta	Baixa	Pouco confiável
116	Baixa	Média	Média	Baixa	Alta	Média	Medianamente confiável
117	Baixa	Média	Média	Baixa	Alta	Alta	Medianamente confiável
118	Baixa	Média	Média	Média	Baixa	Baixa	Pouco confiável
119	Baixa	Média	Média	Média	Baixa	Média	Pouco confiável
120	Baixa	Média	Média	Média	Baixa	Alta	Medianamente confiável
121	Baixa	Média	Média	Média	Média	Baixa	Pouco confiável
122	Baixa	Média	Média	Média	Média	Média	Medianamente confiável
123	Baixa	Média	Média	Média	Média	Alta	Medianamente confiável
124	Baixa	Média	Média	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
125	Baixa	Média	Média	Média	Alta	Média	Medianamente confiável
126	Baixa	Média	Média	Média	Alta	Alta	Medianamente confiável
127	Baixa	Média	Média	Alta	Baixa	Baixa	Pouco confiável
128	Baixa	Média	Média	Alta	Baixa	Média	Medianamente confiável

129	Baixa	Média	Média	Alta	Baixa	Alta	Medianamente confiável
130	Baixa	Média	Média	Alta	Média	Baixa	Medianamente confiável
131	Baixa	Média	Média	Alta	Média	Média	Medianamente confiável
132	Baixa	Média	Média	Alta	Média	Alta	Medianamente confiável
133	Baixa	Média	Média	Alta	Alta	Baixa	Medianamente confiável
134	Baixa	Média	Média	Alta	Alta	Média	Medianamente confiável
135	Baixa	Média	Média	Alta	Alta	Alta	Confiável
136	Baixa	Média	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Pouco confiável
137	Baixa	Média	Alta	Baixa	Baixa	Média	Pouco confiável
138	Baixa	Média	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Medianamente confiável
139	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Baixa	Pouco confiável
140	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Média	Medianamente confiável
141	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Medianamente confiável
142	Baixa	Média	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Medianamente confiável
143	Baixa	Média	Alta	Baixa	Alta	Média	Medianamente confiável
144	Baixa	Média	Alta	Baixa	Alta	Alta	Medianamente confiável
145	Baixa	Média	Alta	Média	Baixa	Baixa	Pouco confiável
146	Baixa	Média	Alta	Média	Baixa	Média	Medianamente confiável
147	Baixa	Média	Alta	Média	Baixa	Alta	Medianamente confiável
148	Baixa	Média	Alta	Média	Média	Baixa	Medianamente confiável
149	Baixa	Média	Alta	Média	Média	Média	Medianamente confiável
150	Baixa	Média	Alta	Média	Média	Alta	Medianamente confiável
151	Baixa	Média	Alta	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
152	Baixa	Média	Alta	Média	Alta	Média	Medianamente confiável
153	Baixa	Média	Alta	Média	Alta	Alta	Confiável
154	Baixa	Média	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
155	Baixa	Média	Alta	Alta	Baixa	Média	Medianamente confiável

156	Baixa	Média	Alta	Alta	Baixa	Alta	Medianamente confiável
157	Baixa	Média	Alta	Alta	Média	Baixa	Medianamente confiável
158	Baixa	Média	Alta	Alta	Média	Média	Medianamente confiável
159	Baixa	Média	Alta	Alta	Média	Alta	Confiável
160	Baixa	Média	Alta	Alta	Alta	Baixa	Medianamente confiável
161	Baixa	Média	Alta	Alta	Alta	Média	Confiável
162	Baixa	Média	Alta	Alta	Alta	Alta	Confiável
163	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Não confiável
164	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Pouco confiável
165	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Pouco confiável
166	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Pouco confiável
167	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Média	Média	Pouco confiável
168	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Média	Alta	Medianamente confiável
169	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Pouco confiável
170	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Média	Medianamente confiável
171	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Medianamente confiável
172	Baixa	Alta	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Pouco confiável
173	Baixa	Alta	Baixa	Média	Baixa	Média	Pouco confiável
174	Baixa	Alta	Baixa	Média	Baixa	Alta	Medianamente confiável
175	Baixa	Alta	Baixa	Média	Média	Baixa	Pouco confiável
176	Baixa	Alta	Baixa	Média	Média	Média	Medianamente confiável
177	Baixa	Alta	Baixa	Média	Média	Alta	Medianamente confiável
178	Baixa	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
179	Baixa	Alta	Baixa	Média	Alta	Média	Medianamente confiável
180	Baixa	Alta	Baixa	Média	Alta	Alta	Medianamente confiável
181	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Pouco confiável
182	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Média	Medianamente confiável
183	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Medianamente confiável
184	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Média	Baixa	Medianamente confiável
185	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Média	Média	Medianamente confiável

186	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Média	Alta	Medianamente confiável
187	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Medianamente confiável
188	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Alta	Média	Medianamente confiável
189	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Alta	Alta	Confiável
190	Baixa	Alta	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Pouco confiável
191	Baixa	Alta	Média	Baixa	Baixa	Média	Pouco confiável
192	Baixa	Alta	Média	Baixa	Baixa	Alta	Medianamente confiável
193	Baixa	Alta	Média	Baixa	Média	Baixa	Pouco confiável
194	Baixa	Alta	Média	Baixa	Média	Média	Medianamente confiável
195	Baixa	Alta	Média	Baixa	Média	Alta	Medianamente confiável
196	Baixa	Alta	Média	Baixa	Alta	Baixa	Medianamente confiável
197	Baixa	Alta	Média	Baixa	Alta	Média	Medianamente confiável
198	Baixa	Alta	Média	Baixa	Alta	Alta	Medianamente confiável
199	Baixa	Alta	Média	Média	Baixa	Baixa	Pouco confiável
200	Baixa	Alta	Média	Média	Baixa	Média	Medianamente confiável
201	Baixa	Alta	Média	Média	Baixa	Alta	Medianamente confiável
202	Baixa	Alta	Média	Média	Média	Baixa	Medianamente confiável
203	Baixa	Alta	Média	Média	Média	Média	Medianamente confiável
204	Baixa	Alta	Média	Média	Média	Alta	Medianamente confiável
205	Baixa	Alta	Média	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
206	Baixa	Alta	Média	Média	Alta	Média	Medianamente confiável
207	Baixa	Alta	Média	Média	Alta	Alta	Confiável
208	Baixa	Alta	Média	Alta	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
209	Baixa	Alta	Média	Alta	Baixa	Média	Medianamente confiável
210	Baixa	Alta	Média	Alta	Baixa	Alta	Medianamente confiável
211	Baixa	Alta	Média	Alta	Média	Baixa	Medianamente confiável
212	Baixa	Alta	Média	Alta	Média	Média	Medianamente confiável

213	Baixa	Alta	Média	Alta	Média	Alta	Confiável
214	Baixa	Alta	Média	Alta	Alta	Baixa	Medianamente confiável
215	Baixa	Alta	Média	Alta	Alta	Média	Confiável
216	Baixa	Alta	Média	Alta	Alta	Alta	Confiável
217	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Pouco confiável
218	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Média	Medianamente confiável
219	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Medianamente confiável
220	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Média	Baixa	Medianamente confiável
221	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Média	Média	Medianamente confiável
222	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Média	Alta	Medianamente confiável
223	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Medianamente confiável
224	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Alta	Média	Medianamente confiável
225	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Alta	Alta	Confiável
226	Baixa	Alta	Alta	Média	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
227	Baixa	Alta	Alta	Média	Baixa	Média	Medianamente confiável
228	Baixa	Alta	Alta	Média	Baixa	Alta	Medianamente confiável
229	Baixa	Alta	Alta	Média	Média	Baixa	Medianamente confiável
230	Baixa	Alta	Alta	Média	Média	Média	Medianamente confiável
231	Baixa	Alta	Alta	Média	Média	Alta	Confiável
232	Baixa	Alta	Alta	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
233	Baixa	Alta	Alta	Média	Alta	Média	Confiável
234	Baixa	Alta	Alta	Média	Alta	Alta	Confiável
235	Baixa	Alta	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
236	Baixa	Alta	Alta	Alta	Baixa	Média	Medianamente confiável
237	Baixa	Alta	Alta	Alta	Baixa	Alta	Confiável
238	Baixa	Alta	Alta	Alta	Média	Baixa	Medianamente confiável
239	Baixa	Alta	Alta	Alta	Média	Média	Confiável
240	Baixa	Alta	Alta	Alta	Média	Alta	Confiável
241	Baixa	Alta	Alta	Alta	Alta	Baixa	Confiável
242	Baixa	Alta	Alta	Alta	Alta	Média	Confiável

243	Baixa	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Muito confiável
244	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Não confiável
245	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Não confiável
246	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Pouco confiável
247	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Não confiável
248	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Média	Pouco confiável
249	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Alta	Pouco confiável
250	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Pouco confiável
251	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Média	Pouco confiável
252	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Medianamente confiável
253	Média	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Não confiável
254	Média	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Média	Pouco confiável
255	Média	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Alta	Pouco confiável
256	Média	Baixa	Baixa	Média	Média	Baixa	Pouco confiável
257	Média	Baixa	Baixa	Média	Média	Média	Pouco confiável
258	Média	Baixa	Baixa	Média	Média	Alta	Medianamente confiável
259	Média	Baixa	Baixa	Média	Alta	Baixa	Pouco confiável
260	Média	Baixa	Baixa	Média	Alta	Média	Medianamente confiável
261	Média	Baixa	Baixa	Média	Alta	Alta	Medianamente confiável
262	Média	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Pouco confiável
263	Média	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Média	Pouco confiável
264	Média	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Medianamente confiável
265	Média	Baixa	Baixa	Alta	Média	Baixa	Pouco confiável
266	Média	Baixa	Baixa	Alta	Média	Média	Medianamente confiável
267	Média	Baixa	Baixa	Alta	Média	Alta	Medianamente confiável
268	Média	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Medianamente confiável
269	Média	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Média	Medianamente confiável
270	Média	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Alta	Medianamente confiável
271	Média	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Não confiável
272	Média	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Média	Pouco confiável
273	Média	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Alta	Pouco confiável
274	Média	Baixa	Média	Baixa	Média	Baixa	Pouco confiável
275	Média	Baixa	Média	Baixa	Média	Média	Pouco confiável
276	Média	Baixa	Média	Baixa	Média	Alta	Medianamente confiável
277	Média	Baixa	Média	Baixa	Alta	Baixa	Pouco confiável

278	Média	Baixa	Média	Baixa	Alta	Média	Medianamente confiável
279	Média	Baixa	Média	Baixa	Alta	Alta	Medianamente confiável
280	Média	Baixa	Média	Média	Baixa	Baixa	Pouco confiável
281	Média	Baixa	Média	Média	Baixa	Média	Pouco confiável
282	Média	Baixa	Média	Média	Baixa	Alta	Medianamente confiável
283	Média	Baixa	Média	Média	Média	Baixa	Pouco confiável
284	Média	Baixa	Média	Média	Média	Média	Medianamente confiável
285	Média	Baixa	Média	Média	Média	Alta	Medianamente confiável
286	Média	Baixa	Média	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
287	Média	Baixa	Média	Média	Alta	Média	Medianamente confiável
288	Média	Baixa	Média	Média	Alta	Alta	Medianamente confiável
289	Média	Baixa	Média	Alta	Baixa	Baixa	Pouco confiável
290	Média	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Medianamente confiável
291	Média	Baixa	Média	Alta	Baixa	Alta	Medianamente confiável
292	Média	Baixa	Média	Alta	Média	Baixa	Medianamente confiável
293	Média	Baixa	Média	Alta	Média	Média	Medianamente confiável
294	Média	Baixa	Média	Alta	Média	Alta	Medianamente confiável
295	Média	Baixa	Média	Alta	Alta	Baixa	Medianamente confiável
296	Média	Baixa	Média	Alta	Alta	Média	Medianamente confiável
297	Média	Baixa	Média	Alta	Alta	Alta	Confiável
298	Média	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Pouco confiável
299	Média	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Média	Pouco confiável
300	Média	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Medianamente confiável
301	Média	Baixa	Alta	Baixa	Média	Baixa	Pouco confiável
302	Média	Baixa	Alta	Baixa	Média	Média	Medianamente confiável
303	Média	Baixa	Alta	Baixa	Média	Alta	Medianamente confiável
304	Média	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Medianamente confiável
305	Média	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Média	Medianamente confiável

306	Média	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Alta	Medianamente confiável
307	Média	Baixa	Alta	Média	Baixa	Baixa	Pouco confiável
308	Média	Baixa	Alta	Média	Baixa	Média	Medianamente confiável
309	Média	Baixa	Alta	Média	Baixa	Alta	Medianamente confiável
310	Média	Baixa	Alta	Média	Média	Baixa	Medianamente confiável
311	Média	Baixa	Alta	Média	Média	Média	Medianamente confiável
312	Média	Baixa	Alta	Média	Média	Alta	Medianamente confiável
313	Média	Baixa	Alta	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
314	Média	Baixa	Alta	Média	Alta	Média	Medianamente confiável
315	Média	Baixa	Alta	Média	Alta	Alta	Confiável
316	Média	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
317	Média	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Média	Medianamente confiável
318	Média	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Alta	Medianamente confiável
319	Média	Baixa	Alta	Alta	Média	Baixa	Medianamente confiável
320	Média	Baixa	Alta	Alta	Média	Média	Medianamente confiável
321	Média	Baixa	Alta	Alta	Média	Alta	Confiável
322	Média	Baixa	Alta	Alta	Alta	Baixa	Medianamente confiável
323	Média	Baixa	Alta	Alta	Alta	Média	Confiável
324	Média	Baixa	Alta	Alta	Alta	Alta	Confiável
325	Média	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Não confiável
326	Média	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Pouco confiável
327	Média	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Pouco confiável
328	Média	Média	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Pouco confiável
329	Média	Média	Baixa	Baixa	Média	Média	Pouco confiável
330	Média	Média	Baixa	Baixa	Média	Alta	Medianamente confiável
331	Média	Média	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Pouco confiável
332	Média	Média	Baixa	Baixa	Alta	Média	Medianamente confiável
333	Média	Média	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Medianamente confiável
334	Média	Média	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Pouco confiável
335	Média	Média	Baixa	Média	Baixa	Média	Pouco confiável

336	Média	Média	Baixa	Média	Baixa	Alta	Medianamente confiável
337	Média	Média	Baixa	Média	Média	Baixa	Pouco confiável
338	Média	Média	Baixa	Média	Média	Média	Medianamente confiável
339	Média	Média	Baixa	Média	Média	Alta	Medianamente confiável
340	Média	Média	Baixa	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
341	Média	Média	Baixa	Média	Alta	Média	Medianamente confiável
342	Média	Média	Baixa	Média	Alta	Alta	Medianamente confiável
343	Média	Média	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Pouco confiável
344	Média	Média	Baixa	Alta	Baixa	Média	Medianamente confiável
345	Média	Média	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Medianamente confiável
346	Média	Média	Baixa	Alta	Média	Baixa	Medianamente confiável
347	Média	Média	Baixa	Alta	Média	Média	Medianamente confiável
348	Média	Média	Baixa	Alta	Média	Alta	Medianamente confiável
349	Média	Média	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Medianamente confiável
350	Média	Média	Baixa	Alta	Alta	Média	Medianamente confiável
351	Média	Média	Baixa	Alta	Alta	Alta	Confiável
352	Média	Média	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Pouco confiável
353	Média	Média	Média	Baixa	Baixa	Média	Pouco confiável
354	Média	Média	Média	Baixa	Baixa	Alta	Medianamente confiável
355	Média	Média	Média	Baixa	Média	Baixa	Pouco confiável
356	Média	Média	Média	Baixa	Média	Média	Medianamente confiável
357	Média	Média	Média	Baixa	Média	Alta	Medianamente confiável
358	Média	Média	Média	Baixa	Alta	Baixa	Medianamente confiável
359	Média	Média	Média	Baixa	Alta	Média	Medianamente confiável
360	Média	Média	Média	Baixa	Alta	Alta	Medianamente confiável
361	Média	Média	Média	Média	Baixa	Baixa	Pouco confiável
362	Média	Média	Média	Média	Baixa	Média	Medianamente confiável

363	Média	Média	Média	Média	Baixa	Alta	Medianamente confiável
364	Média	Média	Média	Média	Média	Baixa	Medianamente confiável
365	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Medianamente confiável
366	Média	Média	Média	Média	Média	Alta	Medianamente confiável
367	Média	Média	Média	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
368	Média	Média	Média	Média	Alta	Média	Medianamente confiável
369	Média	Média	Média	Média	Alta	Alta	Confiável
370	Média	Média	Média	Alta	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
371	Média	Média	Média	Alta	Baixa	Média	Medianamente confiável
372	Média	Média	Média	Alta	Baixa	Alta	Medianamente confiável
373	Média	Média	Média	Alta	Média	Baixa	Medianamente confiável
374	Média	Média	Média	Alta	Média	Média	Medianamente confiável
375	Média	Média	Média	Alta	Média	Alta	Confiável
376	Média	Média	Média	Alta	Alta	Baixa	Medianamente confiável
377	Média	Média	Média	Alta	Alta	Média	Confiável
378	Média	Média	Média	Alta	Alta	Alta	Confiável
379	Média	Média	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Pouco confiável
380	Média	Média	Alta	Baixa	Baixa	Média	Medianamente confiável
381	Média	Média	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Medianamente confiável
382	Média	Média	Alta	Baixa	Média	Baixa	Medianamente confiável
383	Média	Média	Alta	Baixa	Média	Média	Medianamente confiável
384	Média	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Medianamente confiável
385	Média	Média	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Medianamente confiável
386	Média	Média	Alta	Baixa	Alta	Média	Medianamente confiável
387	Média	Média	Alta	Baixa	Alta	Alta	Confiável
388	Média	Média	Alta	Média	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
389	Média	Média	Alta	Média	Baixa	Média	Medianamente confiável

390	Média	Média	Alta	Média	Baixa	Alta	Medianamente confiável
391	Média	Média	Alta	Média	Média	Baixa	Medianamente confiável
392	Média	Média	Alta	Média	Média	Média	Medianamente confiável
393	Média	Média	Alta	Média	Média	Alta	Confiável
394	Média	Média	Alta	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
395	Média	Média	Alta	Média	Alta	Média	Confiável
396	Média	Média	Alta	Média	Alta	Alta	Confiável
397	Média	Média	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
398	Média	Média	Alta	Alta	Baixa	Média	Medianamente confiável
399	Média	Média	Alta	Alta	Baixa	Alta	Confiável
400	Média	Média	Alta	Alta	Média	Baixa	Medianamente confiável
401	Média	Média	Alta	Alta	Média	Média	Confiável
402	Média	Média	Alta	Alta	Média	Alta	Confiável
403	Média	Média	Alta	Alta	Alta	Baixa	Confiável
404	Média	Média	Alta	Alta	Alta	Média	Confiável
405	Média	Média	Alta	Alta	Alta	Alta	Muito confiável
406	Média	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Pouco confiável
407	Média	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Pouco confiável
408	Média	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Medianamente confiável
409	Média	Alta	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Pouco confiável
410	Média	Alta	Baixa	Baixa	Média	Média	Medianamente confiável
411	Média	Alta	Baixa	Baixa	Média	Alta	Medianamente confiável
412	Média	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Medianamente confiável
413	Média	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Média	Medianamente confiável
414	Média	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Medianamente confiável
415	Média	Alta	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Pouco confiável
416	Média	Alta	Baixa	Média	Baixa	Média	Medianamente confiável
417	Média	Alta	Baixa	Média	Baixa	Alta	Medianamente confiável
418	Média	Alta	Baixa	Média	Média	Baixa	Medianamente confiável
419	Média	Alta	Baixa	Média	Média	Média	Medianamente confiável

420	Média	Alta	Baixa	Média	Média	Alta	Medianamente confiável
421	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
422	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Média	Medianamente confiável
423	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Alta	Confiável
424	Média	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
425	Média	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Média	Medianamente confiável
426	Média	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Medianamente confiável
427	Média	Alta	Baixa	Alta	Média	Baixa	Medianamente confiável
428	Média	Alta	Baixa	Alta	Média	Média	Medianamente confiável
429	Média	Alta	Baixa	Alta	Média	Alta	Confiável
430	Média	Alta	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Medianamente confiável
431	Média	Alta	Baixa	Alta	Alta	Média	Confiável
432	Média	Alta	Baixa	Alta	Alta	Alta	Confiável
433	Média	Alta	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Pouco confiável
434	Média	Alta	Média	Baixa	Baixa	Média	Medianamente confiável
435	Média	Alta	Média	Baixa	Baixa	Alta	Medianamente confiável
436	Média	Alta	Média	Baixa	Média	Baixa	Medianamente confiável
437	Média	Alta	Média	Baixa	Média	Média	Medianamente confiável
438	Média	Alta	Média	Baixa	Média	Alta	Medianamente confiável
439	Média	Alta	Média	Baixa	Alta	Baixa	Medianamente confiável
440	Média	Alta	Média	Baixa	Alta	Média	Medianamente confiável
441	Média	Alta	Média	Baixa	Alta	Alta	Confiável
442	Média	Alta	Média	Média	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
443	Média	Alta	Média	Média	Baixa	Média	Medianamente confiável
444	Média	Alta	Média	Média	Baixa	Alta	Medianamente confiável
445	Média	Alta	Média	Média	Média	Baixa	Medianamente confiável
446	Média	Alta	Média	Média	Média	Média	Medianamente confiável

447	Média	Alta	Média	Média	Média	Alta	Confiável
448	Média	Alta	Média	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
449	Média	Alta	Média	Média	Alta	Média	Confiável
450	Média	Alta	Média	Média	Alta	Alta	Confiável
451	Média	Alta	Média	Alta	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
452	Média	Alta	Média	Alta	Baixa	Média	Medianamente confiável
453	Média	Alta	Média	Alta	Baixa	Alta	Confiável
454	Média	Alta	Média	Alta	Média	Baixa	Medianamente confiável
455	Média	Alta	Média	Alta	Média	Média	Confiável
456	Média	Alta	Média	Alta	Média	Alta	Confiável
457	Média	Alta	Média	Alta	Alta	Baixa	Confiável
458	Média	Alta	Média	Alta	Alta	Média	Confiável
459	Média	Alta	Média	Alta	Alta	Alta	Muito confiável
460	Média	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
461	Média	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Média	Medianamente confiável
462	Média	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Medianamente confiável
463	Média	Alta	Alta	Baixa	Média	Baixa	Medianamente confiável
464	Média	Alta	Alta	Baixa	Média	Média	Medianamente confiável
465	Média	Alta	Alta	Baixa	Média	Alta	Confiável
466	Média	Alta	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Medianamente confiável
467	Média	Alta	Alta	Baixa	Alta	Média	Confiável
468	Média	Alta	Alta	Baixa	Alta	Alta	Confiável
469	Média	Alta	Alta	Média	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
470	Média	Alta	Alta	Média	Baixa	Média	Medianamente confiável
471	Média	Alta	Alta	Média	Baixa	Alta	Confiável
472	Média	Alta	Alta	Média	Média	Baixa	Medianamente confiável
473	Média	Alta	Alta	Média	Média	Média	Confiável
474	Média	Alta	Alta	Média	Média	Alta	Confiável
475	Média	Alta	Alta	Média	Alta	Baixa	Confiável
476	Média	Alta	Alta	Média	Alta	Média	Confiável
477	Média	Alta	Alta	Média	Alta	Alta	Muito confiável
478	Média	Alta	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Medianamente confiável

479	Média	Alta	Alta	Alta	Baixa	Média	Confiável
480	Média	Alta	Alta	Alta	Baixa	Alta	Confiável
481	Média	Alta	Alta	Alta	Média	Baixa	Confiável
482	Média	Alta	Alta	Alta	Média	Média	Confiável
483	Média	Alta	Alta	Alta	Média	Alta	Muito confiável
484	Média	Alta	Alta	Alta	Alta	Baixa	Confiável
485	Média	Alta	Alta	Alta	Alta	Média	Muito confiável
486	Média	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Muito confiável
487	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Não confiável
488	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Pouco confiável
489	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Pouco confiável
490	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Pouco confiável
491	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Média	Pouco confiável
492	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Alta	Medianamente confiável
493	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Pouco confiável
494	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Média	Medianamente confiável
495	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Medianamente confiável
496	Alta	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Pouco confiável
497	Alta	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Média	Pouco confiável
498	Alta	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Alta	Medianamente confiável
499	Alta	Baixa	Baixa	Média	Média	Baixa	Pouco confiável
500	Alta	Baixa	Baixa	Média	Média	Média	Medianamente confiável
501	Alta	Baixa	Baixa	Média	Média	Alta	Medianamente confiável
502	Alta	Baixa	Baixa	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
503	Alta	Baixa	Baixa	Média	Alta	Média	Medianamente confiável
504	Alta	Baixa	Baixa	Média	Alta	Alta	Medianamente confiável
505	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Pouco confiável
506	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Média	Medianamente confiável
507	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Medianamente confiável
508	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Média	Baixa	Medianamente confiável
509	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Média	Média	Medianamente confiável
510	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Média	Alta	Medianamente confiável

511	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Medianamente confiável
512	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Média	Medianamente confiável
513	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Alta	Confiável
514	Alta	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Pouco confiável
515	Alta	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Média	Pouco confiável
516	Alta	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Alta	Medianamente confiável
517	Alta	Baixa	Média	Baixa	Média	Baixa	Pouco confiável
518	Alta	Baixa	Média	Baixa	Média	Média	Medianamente confiável
519	Alta	Baixa	Média	Baixa	Média	Alta	Medianamente confiável
520	Alta	Baixa	Média	Baixa	Alta	Baixa	Medianamente confiável
521	Alta	Baixa	Média	Baixa	Alta	Média	Medianamente confiável
522	Alta	Baixa	Média	Baixa	Alta	Alta	Medianamente confiável
523	Alta	Baixa	Média	Média	Baixa	Baixa	Pouco confiável
524	Alta	Baixa	Média	Média	Baixa	Média	Medianamente confiável
525	Alta	Baixa	Média	Média	Baixa	Alta	Medianamente confiável
526	Alta	Baixa	Média	Média	Média	Baixa	Medianamente confiável
527	Alta	Baixa	Média	Média	Média	Média	Medianamente confiável
528	Alta	Baixa	Média	Média	Média	Alta	Medianamente confiável
529	Alta	Baixa	Média	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
530	Alta	Baixa	Média	Média	Alta	Média	Medianamente confiável
531	Alta	Baixa	Média	Média	Alta	Alta	Confiável
532	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
533	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Medianamente confiável
534	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Alta	Medianamente confiável
535	Alta	Baixa	Média	Alta	Média	Baixa	Medianamente confiável
536	Alta	Baixa	Média	Alta	Média	Média	Medianamente confiável
537	Alta	Baixa	Média	Alta	Média	Alta	Confiável

538	Alta	Baixa	Média	Alta	Alta	Baixa	Medianamente confiável
539	Alta	Baixa	Média	Alta	Alta	Média	Confiável
540	Alta	Baixa	Média	Alta	Alta	Alta	Confiável
541	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Pouco confiável
542	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Média	Medianamente confiável
543	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Medianamente confiável
544	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Média	Baixa	Medianamente confiável
545	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Média	Média	Medianamente confiável
546	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Média	Alta	Medianamente confiável
547	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Medianamente confiável
548	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Média	Medianamente confiável
549	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Alta	Confiável
550	Alta	Baixa	Alta	Média	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
551	Alta	Baixa	Alta	Média	Baixa	Média	Medianamente confiável
552	Alta	Baixa	Alta	Média	Baixa	Alta	Medianamente confiável
553	Alta	Baixa	Alta	Média	Média	Baixa	Medianamente confiável
554	Alta	Baixa	Alta	Média	Média	Média	Medianamente confiável
555	Alta	Baixa	Alta	Média	Média	Alta	Confiável
556	Alta	Baixa	Alta	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
557	Alta	Baixa	Alta	Média	Alta	Média	Confiável
558	Alta	Baixa	Alta	Média	Alta	Alta	Confiável
559	Alta	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
560	Alta	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Média	Medianamente confiável
561	Alta	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Alta	Confiável
562	Alta	Baixa	Alta	Alta	Média	Baixa	Medianamente confiável
563	Alta	Baixa	Alta	Alta	Média	Média	Confiável
564	Alta	Baixa	Alta	Alta	Média	Alta	Confiável
565	Alta	Baixa	Alta	Alta	Alta	Baixa	Confiável
566	Alta	Baixa	Alta	Alta	Alta	Média	Confiável
567	Alta	Baixa	Alta	Alta	Alta	Alta	Muito confiável

568	Alta	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Pouco confiável
569	Alta	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Pouco confiável
570	Alta	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Medianamente confiável
571	Alta	Média	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Pouco confiável
572	Alta	Média	Baixa	Baixa	Média	Média	Medianamente confiável
573	Alta	Média	Baixa	Baixa	Média	Alta	Medianamente confiável
574	Alta	Média	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Medianamente confiável
575	Alta	Média	Baixa	Baixa	Alta	Média	Medianamente confiável
576	Alta	Média	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Medianamente confiável
577	Alta	Média	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Pouco confiável
578	Alta	Média	Baixa	Média	Baixa	Média	Medianamente confiável
579	Alta	Média	Baixa	Média	Baixa	Alta	Medianamente confiável
580	Alta	Média	Baixa	Média	Média	Baixa	Medianamente confiável
581	Alta	Média	Baixa	Média	Média	Média	Medianamente confiável
582	Alta	Média	Baixa	Média	Média	Alta	Medianamente confiável
583	Alta	Média	Baixa	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
584	Alta	Média	Baixa	Média	Alta	Média	Medianamente confiável
585	Alta	Média	Baixa	Média	Alta	Alta	Confiável
586	Alta	Média	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
587	Alta	Média	Baixa	Alta	Baixa	Média	Medianamente confiável
588	Alta	Média	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Medianamente confiável
589	Alta	Média	Baixa	Alta	Média	Baixa	Medianamente confiável
590	Alta	Média	Baixa	Alta	Média	Média	Medianamente confiável
591	Alta	Média	Baixa	Alta	Média	Alta	Confiável
592	Alta	Média	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Medianamente confiável
593	Alta	Média	Baixa	Alta	Alta	Média	Confiável
594	Alta	Média	Baixa	Alta	Alta	Alta	Confiável
595	Alta	Média	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Pouco confiável

596	Alta	Média	Média	Baixa	Baixa	Média	Medianamente confiável
597	Alta	Média	Média	Baixa	Baixa	Alta	Medianamente confiável
598	Alta	Média	Média	Baixa	Média	Baixa	Medianamente confiável
599	Alta	Média	Média	Baixa	Média	Média	Medianamente confiável
600	Alta	Média	Média	Baixa	Média	Alta	Medianamente confiável
601	Alta	Média	Média	Baixa	Alta	Baixa	Medianamente confiável
602	Alta	Média	Média	Baixa	Alta	Média	Medianamente confiável
603	Alta	Média	Média	Baixa	Alta	Alta	Confiável
604	Alta	Média	Média	Média	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
605	Alta	Média	Média	Média	Baixa	Média	Medianamente confiável
606	Alta	Média	Média	Média	Baixa	Alta	Medianamente confiável
607	Alta	Média	Média	Média	Média	Baixa	Medianamente confiável
608	Alta	Média	Média	Média	Média	Média	Medianamente confiável
609	Alta	Média	Média	Média	Média	Alta	Confiável
610	Alta	Média	Média	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
611	Alta	Média	Média	Média	Alta	Média	Confiável
612	Alta	Média	Média	Média	Alta	Alta	Confiável
613	Alta	Média	Média	Alta	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
614	Alta	Média	Média	Alta	Baixa	Média	Medianamente confiável
615	Alta	Média	Média	Alta	Baixa	Alta	Confiável
616	Alta	Média	Média	Alta	Média	Baixa	Medianamente confiável
617	Alta	Média	Média	Alta	Média	Média	Confiável
618	Alta	Média	Média	Alta	Média	Alta	Confiável
619	Alta	Média	Média	Alta	Alta	Baixa	Confiável
620	Alta	Média	Média	Alta	Alta	Média	Confiável
621	Alta	Média	Média	Alta	Alta	Alta	Muito confiável
622	Alta	Média	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
623	Alta	Média	Alta	Baixa	Baixa	Média	Medianamente confiável
624	Alta	Média	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Medianamente confiável

625	Alta	Média	Alta	Baixa	Média	Baixa	Medianamente confiável
626	Alta	Média	Alta	Baixa	Média	Média	Medianamente confiável
627	Alta	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Confiável
628	Alta	Média	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Medianamente confiável
629	Alta	Média	Alta	Baixa	Alta	Média	Confiável
630	Alta	Média	Alta	Baixa	Alta	Alta	Confiável
631	Alta	Média	Alta	Média	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
632	Alta	Média	Alta	Média	Baixa	Média	Medianamente confiável
633	Alta	Média	Alta	Média	Baixa	Alta	Confiável
634	Alta	Média	Alta	Média	Média	Baixa	Medianamente confiável
635	Alta	Média	Alta	Média	Média	Média	Confiável
636	Alta	Média	Alta	Média	Média	Alta	Confiável
637	Alta	Média	Alta	Média	Alta	Baixa	Confiável
638	Alta	Média	Alta	Média	Alta	Média	Confiável
639	Alta	Média	Alta	Média	Alta	Alta	Muito confiável
640	Alta	Média	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
641	Alta	Média	Alta	Alta	Baixa	Média	Confiável
642	Alta	Média	Alta	Alta	Baixa	Alta	Confiável
643	Alta	Média	Alta	Alta	Média	Baixa	Confiável
644	Alta	Média	Alta	Alta	Média	Média	Confiável
645	Alta	Média	Alta	Alta	Média	Alta	Muito confiável
646	Alta	Média	Alta	Alta	Alta	Baixa	Confiável
647	Alta	Média	Alta	Alta	Alta	Média	Muito confiável
648	Alta	Média	Alta	Alta	Alta	Alta	Muito confiável
649	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Pouco confiável
650	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Média	Medianamente confiável
651	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Medianamente confiável
652	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Medianamente confiável
653	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Média	Média	Medianamente confiável
654	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Média	Alta	Medianamente confiável
655	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Medianamente confiável
656	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Média	Medianamente confiável

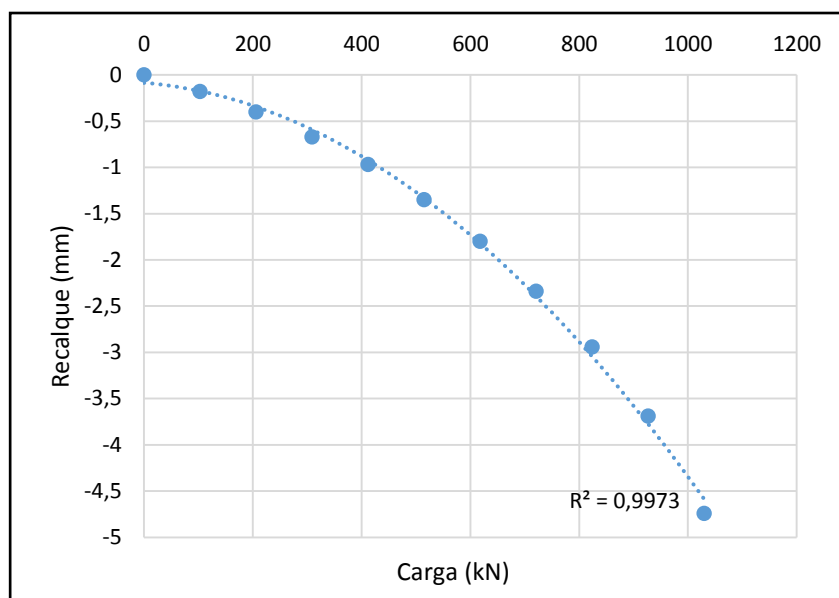
657	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Confiável
658	Alta	Alta	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
659	Alta	Alta	Baixa	Média	Baixa	Média	Medianamente confiável
660	Alta	Alta	Baixa	Média	Baixa	Alta	Medianamente confiável
661	Alta	Alta	Baixa	Média	Média	Baixa	Medianamente confiável
662	Alta	Alta	Baixa	Média	Média	Média	Medianamente confiável
663	Alta	Alta	Baixa	Média	Média	Alta	Confiável
664	Alta	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Medianamente confiável
665	Alta	Alta	Baixa	Média	Alta	Média	Confiável
666	Alta	Alta	Baixa	Média	Alta	Alta	Confiável
667	Alta	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
668	Alta	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Média	Medianamente confiável
669	Alta	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Confiável
670	Alta	Alta	Baixa	Alta	Média	Baixa	Medianamente confiável
671	Alta	Alta	Baixa	Alta	Média	Média	Confiável
672	Alta	Alta	Baixa	Alta	Média	Alta	Confiável
673	Alta	Alta	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Confiável
674	Alta	Alta	Baixa	Alta	Alta	Média	Confiável
675	Alta	Alta	Baixa	Alta	Alta	Alta	Muito confiável
676	Alta	Alta	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
677	Alta	Alta	Média	Baixa	Baixa	Média	Medianamente confiável
678	Alta	Alta	Média	Baixa	Baixa	Alta	Medianamente confiável
679	Alta	Alta	Média	Baixa	Média	Baixa	Medianamente confiável
680	Alta	Alta	Média	Baixa	Média	Média	Medianamente confiável
681	Alta	Alta	Média	Baixa	Média	Alta	Confiável
682	Alta	Alta	Média	Baixa	Alta	Baixa	Medianamente confiável
683	Alta	Alta	Média	Baixa	Alta	Média	Confiável
684	Alta	Alta	Média	Baixa	Alta	Alta	Confiável
685	Alta	Alta	Média	Média	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
686	Alta	Alta	Média	Média	Baixa	Média	Medianamente confiável

687	Alta	Alta	Média	Média	Baixa	Alta	Confiável
688	Alta	Alta	Média	Média	Média	Baixa	Medianamente confiável
689	Alta	Alta	Média	Média	Média	Média	Confiável
690	Alta	Alta	Média	Média	Média	Alta	Confiável
691	Alta	Alta	Média	Média	Alta	Baixa	Confiável
692	Alta	Alta	Média	Média	Alta	Média	Confiável
693	Alta	Alta	Média	Média	Alta	Alta	Muito confiável
694	Alta	Alta	Média	Alta	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
695	Alta	Alta	Média	Alta	Baixa	Média	Confiável
696	Alta	Alta	Média	Alta	Baixa	Alta	Confiável
697	Alta	Alta	Média	Alta	Média	Baixa	Confiável
698	Alta	Alta	Média	Alta	Média	Média	Confiável
699	Alta	Alta	Média	Alta	Média	Alta	Muito confiável
700	Alta	Alta	Média	Alta	Alta	Baixa	Confiável
701	Alta	Alta	Média	Alta	Alta	Média	Muito confiável
702	Alta	Alta	Média	Alta	Alta	Alta	Muito confiável
703	Alta	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
704	Alta	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Média	Medianamente confiável
705	Alta	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Confiável
706	Alta	Alta	Alta	Baixa	Média	Baixa	Medianamente confiável
707	Alta	Alta	Alta	Baixa	Média	Média	Confiável
708	Alta	Alta	Alta	Baixa	Média	Alta	Confiável
709	Alta	Alta	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Confiável
710	Alta	Alta	Alta	Baixa	Alta	Média	Confiável
711	Alta	Alta	Alta	Baixa	Alta	Alta	Muito confiável
712	Alta	Alta	Alta	Média	Baixa	Baixa	Medianamente confiável
713	Alta	Alta	Alta	Média	Baixa	Média	Confiável
714	Alta	Alta	Alta	Média	Baixa	Alta	Confiável
715	Alta	Alta	Alta	Média	Média	Baixa	Confiável
716	Alta	Alta	Alta	Média	Média	Média	Confiável
717	Alta	Alta	Alta	Média	Média	Alta	Muito confiável
718	Alta	Alta	Alta	Média	Alta	Baixa	Confiável
719	Alta	Alta	Alta	Média	Alta	Média	Muito confiável
720	Alta	Alta	Alta	Média	Alta	Alta	Muito confiável
721	Alta	Alta	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Confiável
722	Alta	Alta	Alta	Alta	Baixa	Média	Confiável
723	Alta	Alta	Alta	Alta	Baixa	Alta	Muito confiável
724	Alta	Alta	Alta	Alta	Média	Baixa	Confiável

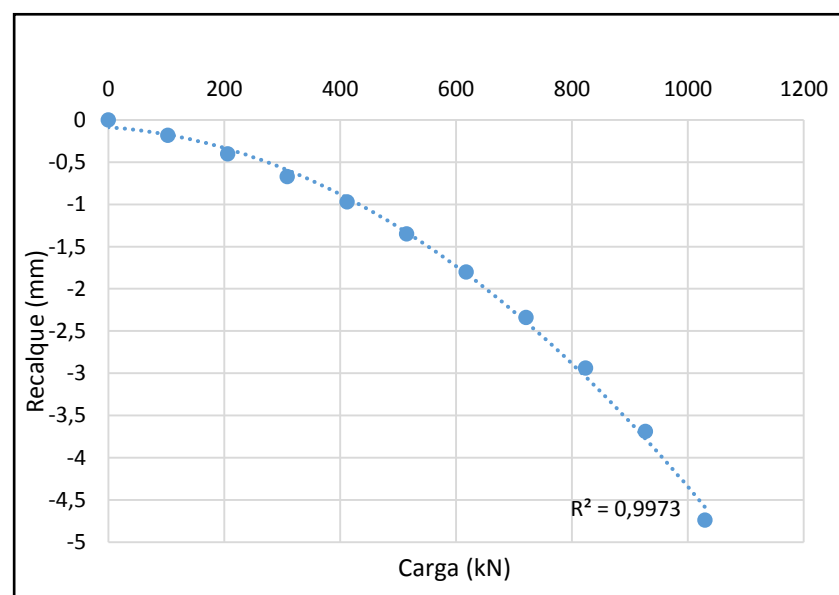
APÊNCICE D – Gráficos das curvas carga versus recalque das estacas do HU

ensaiadas à prova de carga estática, diâmetro $\phi 300$ mm

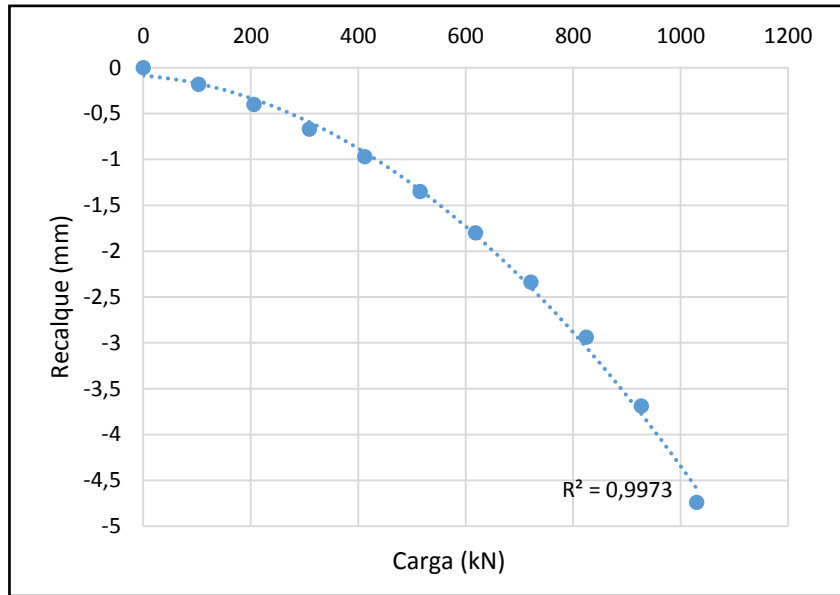
Estaca	P-06A
Carga (kN)	Recalque (mm)
0	0
103	-0,11
206	-0,29
309	-0,52
412	-0,77
515	-1,09
618	-1,47
721	-1,91
824	-2,4
927	-2,97
1030	-4,01



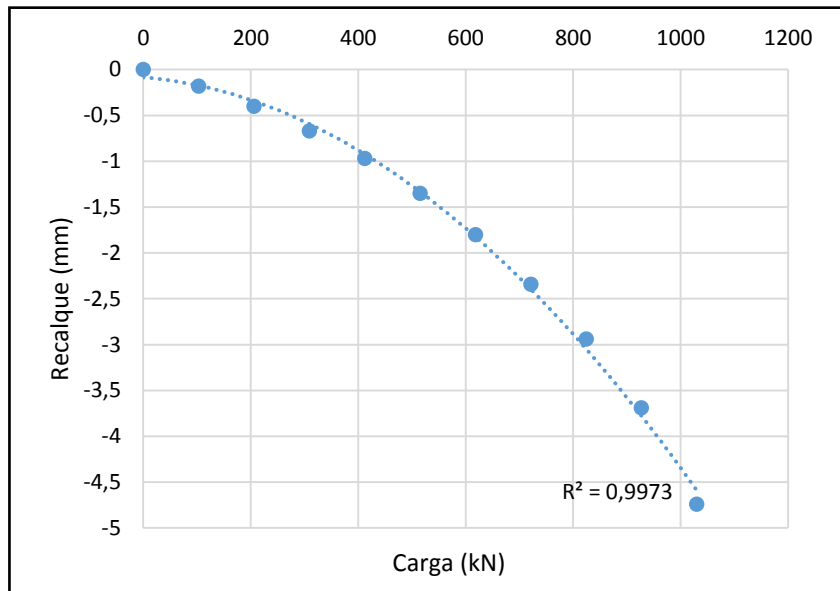
Estaca	P-07A
Carga (kN)	Recalque (mm)
0	0
103	-0,15
206	-0,32
309	-0,53
412	-0,77
515	-1,06
618	-1,47
721	-2,14
824	-3,01
927	-4,06
1030	-6,06



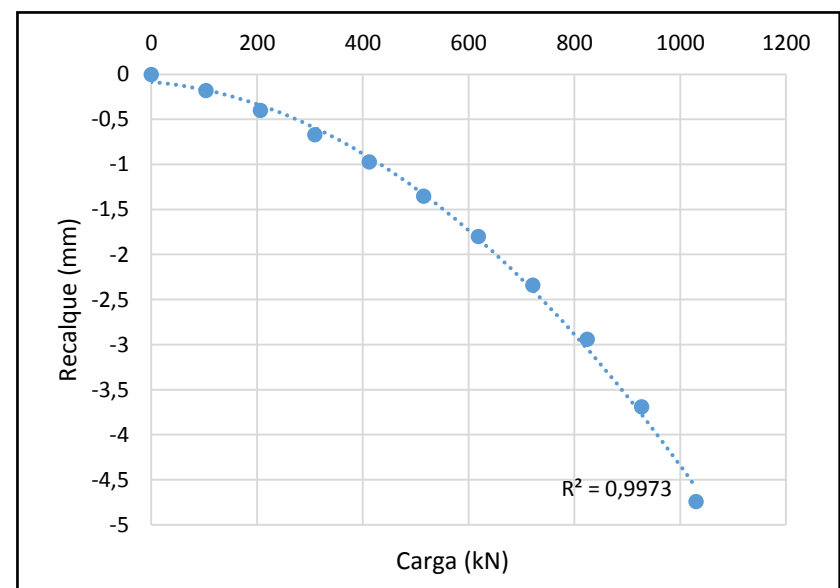
Estaca	P-17A
Carga (kN)	Recalque (mm)
0	0
103	-0,05
206	-0,15
309	-0,35
412	-0,69
515	-1,16
618	-1,92
721	-2,99
824	-4,43
927	-6,13
1030	-8,15



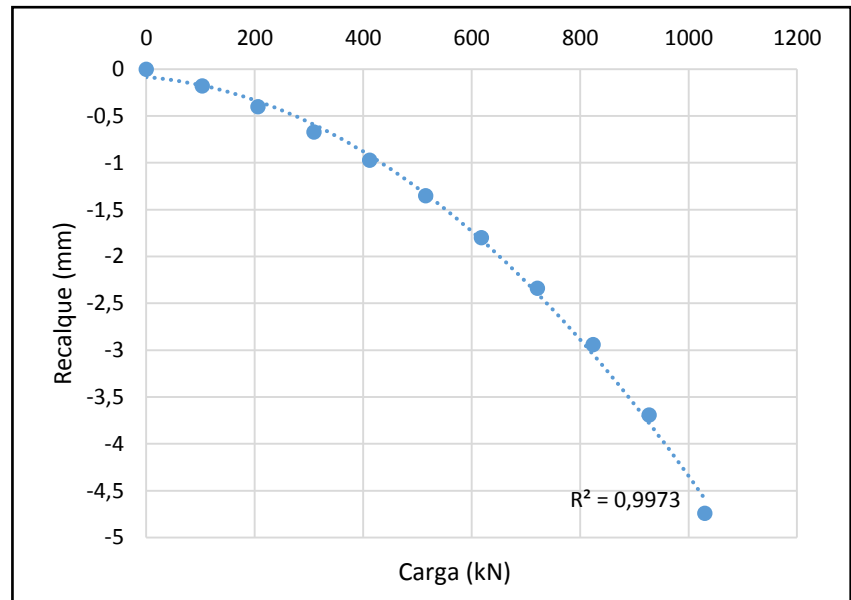
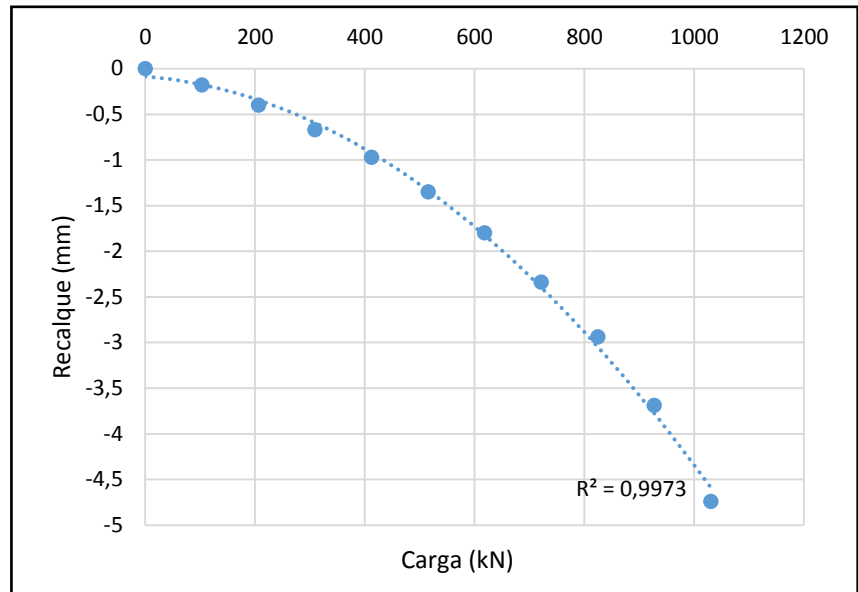
Estaca	P-20A
Carga (kN)	Recalque (mm)
0	0
103	-0,12
206	-0,3
309	-0,5
412	-0,77
515	-1,09
618	-1,5
721	-2,08
824	-2,92
927	-3,97
1030	-5,98



Estaca	P-21A
Carga (kN)	Recalque (mm)
0	0
103	-0,16
206	-0,68
309	-0,84
412	-1,19
515	-1,64
618	-2,22
721	-2,85
824	-3,93
927	-5,2
1030	-7,22



Estaca	P-25A
Carga (kN)	Recalque (mm)
0	0
103	-0,09
206	-0,22
309	-0,41
412	-0,7
515	-1,02
618	-1,41
721	-1,84
824	-2,33
927	-2,99
1030	-4,04
Estaca	PX8-G
Carga (kN)	Recalque (mm)
0	0
103	-0,18
206	-0,4
309	-0,67
412	-0,97
515	-1,35
618	-1,8
721	-2,34
824	-2,94
927	-3,69
1030	-4,74



APÊNCICE E – Cálculo do índice de confiabilidade probabilístico β

Cálculos realizados em planilha eletrônica do programa Microsoft Excel 2016®.

Capacidade de carga estimada pelo método de Van der Veen constante em Cintra e Aoki (2010).

Equações utilizadas (Cintra e Aoki, 2010):

$$F_S = \frac{R_{méd}}{S_{méd}} \quad \sigma_R = \sqrt{\frac{\sum(R - R_{méd})^2}{n_R}} \quad v_R = \frac{\sigma_R}{R_{méd}}$$

$$P_a = \frac{R_{méd}}{F_S} \quad \sigma_S = \sqrt{\frac{\sum(S - S_{méd})^2}{n_S}} \quad v_S = \frac{\sigma_S}{S_{méd}}$$

$$Z_{méd} = R_{méd} - S_{méd} \quad \sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad \beta = \frac{Z_{méd}}{\sigma_Z}$$

Probabilidade de ruína (p_f) obtida pela fórmula do Microsoft Excel 2016® (Cintra e Aoki, 2010):

= - INV.NORM.N(β ;0;1;VERDADEIRO)

Estaca	Carga de ensaio (kN)	Cap. de carga (kN)	Solicitações (kN)	Nº estacas	Solicitações por estaca (kN)
P-06A	1030	1220	1760	4	440,00
P-07A	1030	1090	1839	4	459,75
P-17A	1030	1100	1639	4	409,75
P-20A	1030	1090	1759	4	439,75
P-21A	1030	1120	1800	4	450,00
P-25A	1030	1190	1882	4	470,50
PX8-G	1030	1250	1724	4	431,00

Dados estatísticos		Margem de segurança Z	
R_{méd} (kN)	1151,43	Z_{méd} (kN)	708,47
S_{méd} (kN)	442,96	σ_Z (kN)	64,85
F_s	2,60	v_Z	0,092
σ_R (kN)	62,20	β	10,92
σ_S (kN)	18,34	p_f	0
v_R	0,054	1/	#DIV/0!
v_S	0,041	-	-

$$R_{méd} = \frac{1220 + 1090 + 1100 + 1090 + 1120 + 1190 + 1250}{7} = 1151,43 \text{ kN}$$

$$S_{méd} = \frac{440 + 459,75 + 409,75 + 439,75 + 450 + 470,5 + 431}{7} = 442,96 \text{ kN}$$

$$\sigma_R = 62,20 \text{ kN} =$$

$$\sqrt{\frac{(R_{méd}-1220)^2 + 2*(R_{méd}-1090)^2 + (R_{méd}-1100)^2 + (R_{méd}-1120)^2 + (R_{méd}-1190)^2 + (R_{méd}-1250)^2}{7}}$$

$$\sigma_S = 18,34 \text{ kN} =$$

$$\sqrt{\frac{(S_{méd}-440)^2 + (S_{méd}-459,75)^2 + (S_{méd}-409,75)^2 + (S_{méd}-439,75)^2 + (S_{méd}-450)^2 + (S_{méd}-470,5)^2 + (S_{méd}-431)^2}{7}}$$

$$v_R = \frac{62,20}{1151,43} = 0,054$$

$$v_S = \frac{18,34}{442,96} = 0,041$$

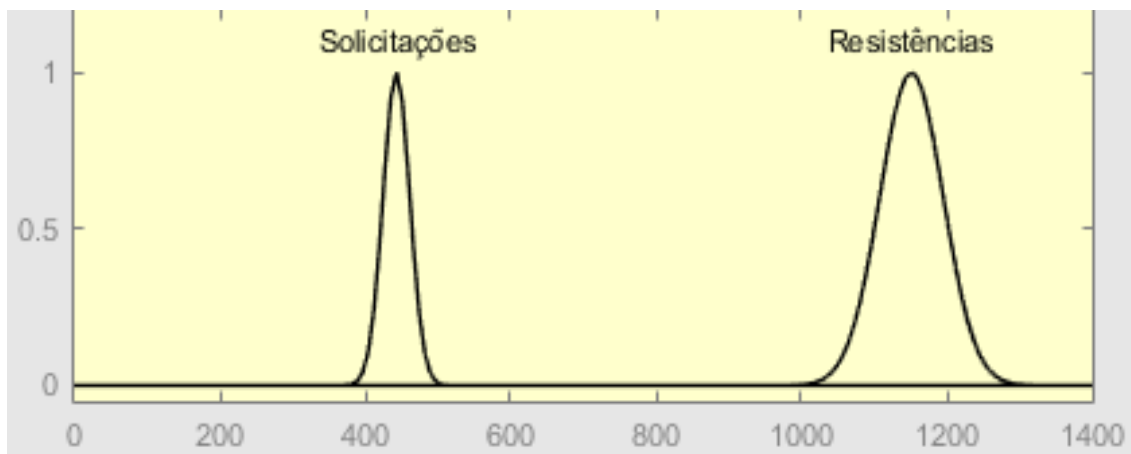
$$Z_{méd} = 1151,43 - 442,96 = 708,47 \text{ kN}$$

$$\sigma_Z = \sqrt{62,20^2 + 18,34^2} = 64,85 \text{ kN}$$

$$v_Z = \frac{64,85}{708,47} = 0,092$$

$$\beta = \frac{708,47}{64,85} = 10,92$$

Curva de solicitações e resistências traçada no programa MATLAB®



APÊNCICE F – Dois casos de projeto adicionais

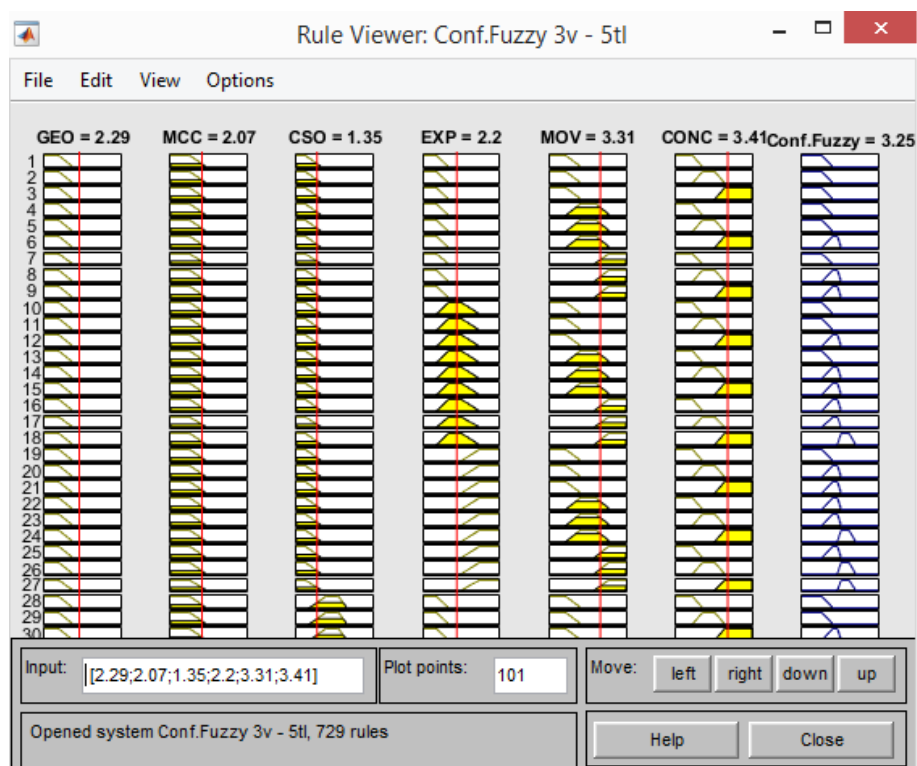
Quarto caso – situação desfavorável, semelhante ao segundo caso, exceto pelos valores de diâmetro e comprimento, iguais a 600 mm e 20 m, respectivamente.

Parâmetro inicial	Valor	Parâmetro resultante	Valor
Diâmetro da estaca	600 mm	GEO	2,29
Comprimento da estaca	20 m		
Método de determinação da capacidade de carga	5	MCC	2,07
Quantidade de métodos de determinação de capacidade de carga	2		
Resistência do solo (média)	10	CSO	1,35
Experiência do projetista	5 anos	EXP	2,20
Experiência do executor	12 anos		
Torque da hélice de perfuração (médio)	100 kN.m	MOV	3,31
Velocidade de perfuração do trado (média)	350 m/h		
Velocidade de extração do trado (média)	125 m/h		
Pressão de injeção do concreto	80 kN/m ²	CONC	3,41
Superconsumo de concreto	50%		
Variável de confiabilidade <i>Fuzzy</i>			3,25

Pertinências da variável de confiabilidade *Fuzzy* obtida:

Medianamente confiável: 0,64

Confiável: 0,36



Quinto caso - situação favorável, semelhante ao terceiro caso, exceto pelos valores de diâmetro e comprimento, iguais a 600 mm e 20 m, respectivamente.

Parâmetro inicial	Valor	Parâmetro resultante	Valor
Diâmetro da estaca	600 mm	GEO	2,29
Comprimento da estaca	20 m		
Método de determinação da capacidade de carga	10	MCC	4,37
Quantidade de métodos de determinação de capacidade de carga	4		
Resistência do solo	10	CSO	1,35
Experiência do projetista	15 anos	EXP	4,04
Experiência do executor	25 anos		
Torque da hélice de perfuração	100 kN.m	MOV	4,18
Velocidade de perfuração do trado	200 m/h		
Velocidade de extração do trado	100 m/h		
Pressão de injeção do concreto	170 kN/m ²	CONC	3,94
Superconsumo de concreto	25%		
Variável de confiabilidade <i>Fuzzy</i>			4,06

Pertinências da variável de confiabilidade *Fuzzy* obtida:

Confiável: 0,38

Muito confiável: 0,62

