

Controle do Desempenho de Estacas Hélice Contínuas através da Lógica Fuzzy

Mylane Viana Hortegal

Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil, myvhorte@gmail.com

André Luis Brasil Cavalcante

Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil, abrasil@unb.br

RESUMO: Considerando que a grande maioria das obras de fundações utilizam estacas hélice contínuas em sua execução devido à agilidade e alta produtividade, estas se tornaram o principal tipo de fundação profunda utilizada principalmente em obras verticais. Contudo, este tipo de fundação ainda apresenta variáveis subjetivas que necessitam ser melhor estudadas a fim de garantir a confiabilidade na execução e na qualidade dos estaqueamentos. A lógica *fuzzy* no controle dos estaqueamentos se apresenta como um elemento importante na automação de processos, permitindo a criação de sistemas especialistas em controles inteligentes. Assim, este trabalho mostra a análise desenvolvida com a utilização do software MATLAB®, que já apresenta o controlador *fuzzy* inserido. A partir da utilização de variáveis subjetivas tais como energia, variação de pressão arterial do operador e capacidade de carga, e de variáveis já presentes no relatório de monitoramento destas estacas, como velocidade de extração, velocidade de perfuração, torque, resistência do solo e superconsumo de concreto, foram definidos os dados de entrada e saída com as respectivas regras, de modo que os dados de entrada escolhidos referiram-se ao torque, a velocidade perfuração ideal, a resistência do solo, ao superconsumo de concreto e à variação de pressão arterial do operador. Já as variáveis de saída escolhidas foram a energia e a capacidade de carga. Os dados foram obtidos a partir de três casos de obras em que os maquinários dispunham de instrumentação e total controle dos parâmetros executivos. As regras foram portanto, elaboradas a partir das leituras obtidas em campo através de entrevistas com os operadores das perfuratrizes e, a partir da experiência de engenheiros executores de estacas hélice contínua. Desta forma, elaboraram-se variações que representavam os limites mínimos, intermediários e máximos de cada variável escolhida, para posterior combinação entre as variáveis de entrada. Assim, a partir da ferramenta de lógica *fuzzy*, foi possível entender o comportamento do estaqueamento quando da análise de cada parâmetro de entrada junto ao se saída de modo isolado, visando garantir a eficácia no controle do estaqueamento realizado.

PALAVRAS-CHAVE: Lógica fuzzy, Controle Inteligente, Hélice Contínua

1 INTRODUÇÃO

Em um projeto de fundações o engenheiro se vê diante de incertezas que são comuns no ramo da engenharia civil. Estas incertezas devem-se à variabilidade da estratigrafia do solo, o tipo de carregamento aplicado, erros nas investigações geotécnicas ou ainda erros de execução.

Atualmente, a maioria dos projetos de fundações fazem uso de estacas tipo hélice contínua, por serem estacas de fácil execução, que não geram vibrações e ruídos durante o processo executivo, além de possuírem a facilidade de escolha dos diâmetros a serem utilizadas. Porém, mesmo com estas vantagens, as estacas tipo hélice contínua merecem atenção no que tange o controle dos parâmetros

presentes durante toda a fase de construção, uma vez que, qualquer parâmetro não controlado ou diferentes das especificações de projeto, podem indicar estaqueamentos com baixa qualidade e perda da confiabilidade.

Considerando os avanços tecnológicos e visando a realização do controle durante todo o processo de execução, os maquinários deste tipo de estaca possuem sensores de monitoramento que são ligados a um sistema de captura, SACI (Continuous Flight Auger Instrumentation) da empresa Geodigitus ou de outra empresa, que visa analisar os dados de execução em tempo real. Porém, estes dados ainda são precários no aspecto do controle de qualidade das estacas. Este fato deve-se a incertezas presentes não só devido à condição de solo, como principalmente dos dados obtidos durante a execução das estacas.

Dentre os dados que são obtidos através dos sensores tem-se a inclinação da haste, profundidade da perfuração, torque e velocidade de rotação da hélice, pressão de injeção, perdas e consumo de concreto. Através desta variabilidade de parâmetros obtidos nos relatórios gerados pelo sistema de captura, é possível a associação da energia aplicada em cada estaca com a qualidade destas, visando o controle de cada estaca executada.

Silva *et al.* (2012) apresentaram uma metodologia (SCCAP) e equações para quantificar a energia ou o trabalho realizado para escavar uma estaca, sendo estas equações passíveis de implantação no sistema de monitoramento (SACI), e visam uniformização das estacas tipo hélice contínua.

Contudo, só a obtenção da energia ou do trabalho não garante a sua qualidade, sendo necessária a associação destes parâmetros com os demais obtidos pelo sistema de monitoramento. O enigma está em como associar a grande quantidade de incertezas oriundas de todo o processo executivo com resultados concretos, ou seja, não gerem dúvidas diante as respostas que se deseja obter. Para tal, faz-se uso de sistemas de controles inteligentes, como a lógica *fuzzy*, que transformam as incertezas em soluções de problemas, por meio da aproximação da lógica com o raciocínio humano. Desta forma, o

grande foco desta lógica é a solução de problemas cuja informação presente seja incerta.

2 LÓGICA FUZZY

A lógica fuzzy configura-se por ser uma extensão da lógica booleana conforme Weber e Klein (2003), uma vez que esta engloba apenas valores de 0 e 1 para qualquer valor de entrada, e o valor da saída pertence apenas aos conjuntos verdadeiro (1) ou falso (0). Já a lógica fuzzy a saída pode assumir qualquer valor entre 0 e 1.

De acordo com Hass (2010), a teoria fuzzy deriva do conceito de pertinência, em que ao se considerar *A* como um conjunto fuzzy, a sua função de pertinência μ_A estabelece para cada *X* um grau de pertinência ao conjunto expressado por:

$$\mu_A(x): U \rightarrow [0, 1] \quad (1)$$

sendo, o grau de pertinência de cada elemento *X*, de modo a assumir qualquer valor entre 0 e 1.

Esta condição representa que o grau de pertinência 0 refere-se à exclusão total e 1 a pertinência total do elemento do conjunto, conforme Zadeh (1965).

Cada conjunto fuzzy deve ser definido por regras que representam e definem o comportamento das variáveis utilizadas, além das relações condicionantes do sistema fuzzy.

As regras são obtidas a partir de dados numéricos e análises de especialistas no assunto, a fim de garantir resultados coerentes com o caso analisado (Weber e Klein, 2003), e baseadas em regras condicionante do tipo se ... então (if ... then).

Portanto, o sistema fuzzy é composto por variáveis de entrada e de saída, além de regras que associam as entradas a responder os conjuntos de saída, conforme apresentado na Figura 1.

De uma forma geral, o sistema fuzzy se inicia com um processador de entrada e um fuzzificador, que é um processo pelo qual os valores de entrada do sistema são convertidos para conjuntos fuzzy, com as respectivas faixas de valores onde estão definidos, de modo que

ocorra um mapeamento do domínio de números reais para o domínio fuzzy.

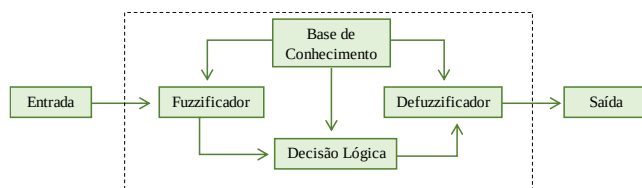


Figura 1. Sistema Fuzzy

A fuzzificação representa ainda as atribuições de valores linguísticos, descrições vagas ou qualitativas, definidas nas funções de pertinência às variáveis de entrada. Logo após, tem-se tomadas de decisões através do conjunto de inferências fuzzy, em que as regras são combinadas e ocorre o mapeamento dos conjuntos fuzzy, e por fim, há uma transformação inversa do domínio fuzzy para o domínio do mundo real, para que ocorra a obtenção entre a saída do algoritmo fuzzy e as variáveis de atuação (Silva, 2008).

Ressalta-se ainda que toda a avaliação fuzzy que ocorre na decisão lógica é efetuado através da inferência, de modo a permitir tirar conclusões partindo de fatos conhecidos (Min-Max).

Silva (2008) menciona ainda que a etapa da inferência para a obtenção da resposta real, é dividida em duas fases distintas, a avaliação da implicação de cada regra e a composição das conclusões de todas as regras em um valor consolidado. Todo o procedimento é realizado por procedimentos inferenciais na lógica fuzzy, sendo que os mais utilizados são os métodos Mamdani e o Takagi-Sugeno-Kang (Mendel, 2001).

Esta lógica apresenta ainda funções de pertinência que apresentam as possibilidades de cada teste executado. Os formatos mais comuns são a triangular, trapezoidal e gaussiana (Figura 2).

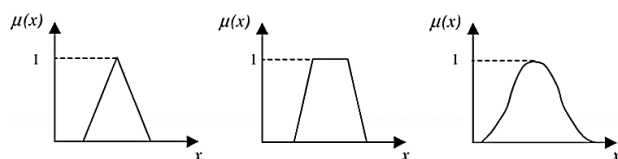


Figura 2. Funções de pertinência triangular, trapezoidal e Gaussiana (Saboya et al., 2006)

2.1 Aplicação da Fuzzy na Engenharia

A utilização da lógica fuzzy têm sido crescente e diversos pesquisadores vêm buscando a sua aplicação em diversas áreas de conhecimento, desde a área econômica, passando pela administrativa, médica, biológica, física, informática, até a área da engenharia.

Em relação à engenharia no ramo da geotecnia, tem-se alguns trabalhos da década de 90 que ditam sobre a classificação dos solos (Juang et al., 1996; Zhang & Tumay, 1999), análise de erosão (Alves, 2004), avaliação de áreas susceptíveis a escorregamentos e estabilidade de barragens (Pinto, 2002; Oliveira et al, 2005; Lee e Juang, 1992); avaliação de modelos de susceptibilidade a movimentos de massa em uma faixa de dutos (Rabaco, 2005), dentre outros.

Trabalhos relacionados à engenharia de fundações ainda são escassos, tendo como um exemplo a quantificação da capacidade de carga de fundações a partir da prova de carga (Ramos et al., 2010). Porém, ainda existem dificuldades de materiais que mencionam o uso da lógica fuzzy em estacas, principalmente estacas hélice contínua. Deste modo, este trabalho visa apresentar uma análise do desempenho da estaca hélice contínua através da utilização da lógica fuzzy.

2.2 Estaca Hélice Contínua

Considerando o avanço tecnológico e as metodologias executivas, as estacas hélice contínua ganham a cada dia mais destaque no ramo da engenharia. Tais fatos estão associados à rapidez e economicidade destas estacas, além da ausência de ruídos e vibrações em construções vizinhas.

Estas estacas tem a sua metodologia executiva realizada por perfuração, concretagem e colocação da armação, conforme várias literaturas apresentam Tavares (2009), Hortegal (2011), Elsamee (2013) e Adam et al. (2013).

Contudo, percebe-se que embora a metodologia executiva seja bastante detalhada, ainda existem poucos estudos que garantam a qualidade deste tipo de estaca, no que tange aspectos de execução, principalmente quanto à medição do

trabalho realizado ou da energia necessária para a escavação. Para tal, com a rotina SCCAP proposta por Silva (2011), foi possível indicar uma possível correção da profundidade pré-estabelecida em projeto, obtida pela medida do trabalho realizado ao escavar uma estaca, a indicação da velocidade crítica de perfuração e o controle estatístico do estaqueamento.

Os estudos decorrentes do autor, indicaram que na fase final da perfuração da estaca, a energia total dissipada ou o trabalho total realizado resulta na somatória do trabalho realizado pelas forças aplicadas no helicóide, com o trabalho realizado pela força descendente, adicionando a energia potencial inicial do sistema em relação à cota final de escavação. Desta forma, tem-se que o trabalho realizado pelo trado na execução da estaca é dado por:

$$W = \int_0^{z_b} m_{hc} \cdot g \cdot dz + \int_0^{z_b} F_{di} \cdot dz + \int_0^{m \cdot 2\pi} F_i \cdot r \cdot d\theta \quad (2)$$

onde,

W_R = trabalho realizado ou energia necessária para escavar uma estaca [J];

m_{hc} = massa do sistema de escavação [kg];

g = aceleração da gravidade [m/s^2];

z_i = deslocamento [m];

F_{di} = força descendente aplicada ao helicóide [N];

r = raio da estaca hélice [m];

F_i = força aplicada no helicóide [N];

z_b = comprimento da estaca [m];

m = número de volta do helicóide durante a escavação.

3 METODOLOGIA

O trabalho consiste em analisar a energia e a capacidade de carga das estacas hélice contínuas através da aplicação da lógica fuzzy por meio da inserção das variáveis incertas fuzzificadas. O resultado é interpretado por meio da metodologia fuzzy e apresentada na forma linguística. Para tal, foi utilizado o programa Matlab 7.8® e o Fuzzy Logic Toolbox® na análise.

O trabalho foi dividido na definição das variáveis de entrada e saída, e na análise Numérica.

3.1 Escolha das variáveis

Após identificar os principais parâmetros existentes durante o procedimento de execução das estacas hélice contínuas, escolheu-se as variáveis de entrada que seriam utilizadas na etapa de análise, bem como os intervalos com as respectivas respostas, conforme Tabela 1.

Com a preparação dos intervalos fez-se a elaboração das regras, a fim de obter a resposta de saída em função de cada variável adotada (Tabela 1).

	VARIÁVEL	RAZÃO	INTERVALO	RESPOSTA
ENTRADA	TORQUE (kN/m)	0,25 T	0 – 31,25	Muito baixo
		0,50 T	31,25 – 62,50	Baixo
		0,75 T	62,50 – 93,75	Médio
		1 T	93,75 – 125	Alto
	VELOCIDADE PERFURAÇÃO IDEAL (m/h)	0,25 V	0 – 25	Inicial
		0,50 V	25,1 – 50	Regular
		0,75 V	50,1 – 80	Ideal
		1 V	80,1 – 100	Atenção
	RESISTÊNCIA DO SOLO (N_{spr})		≤ 4	Fofo
			5 – 8	Pouco compacto
			9 – 18	Medianamente compacto
			19 – 40	Compacto
			> 40	Muito compacto
	SUPERCONSUMO DE CONCRETO (%)		0 – 5	Crítica
			6 – 10	Alerta
			11 – 20	Boa
			20 – 100	Prejuízo
	VARIAÇÃO DE PRESSÃO ARTERIAL DO OPERADOR (PA)		1 – 4	Calmo
			4 – 4,75	Agitado
			4,76 – 5,5	Estressado
			5,51 – 7	Raiva
SAÍDA	ENERGIA (MJ)	0,35 E	0 – 25,2	Boa
		0,65 E	25,61 – 46,80	Media
		1 E	46,81 – 72	Alta
	CAPACIDADE DE CARGA (kN)		0 – 500	Baixa
			501 – 1.000	Intermediária
			1.001 – 2.000	Elevada

Tabela 1. Intervalos adotados.

3.1 Análise Numérica

Após a elaboração das regras, iniciou-se a análise da fuzzificação com o uso de programas que possuem capacidade de modelagem fuzzy. O software utilizado no trabalho foi o MATLAB® da empresa The Mathworks, Inc, cuja implantação da lógica fuzzy está presente através do toolbox Fuzzy Inference System

(FIS), de modo que foi possível modelar todo o raciocínio fuzzy pretendido e visualização da variável ou das variáveis de saída do sistema. Para a análise dos dados, o programa pré-defini o Método MAMDANI, mas pode ainda ser alterada para o Método Sugeno. Considerando que o Método MAMDANI é o método já é pré-definido no programa, optou-se por sua utilização, uma vez que tal metodologia propõe que as regras de produção possuiriam relações difusas tanto em seus antecedentes quanto em seus consequentes, além de incluir módulos de interface que transformam as variáveis de entrada em conjuntos difusos, sendo os conjuntos difusos gerados na saída em grandezas numéricas proporcionais.

4 RESULTADOS

Para a análise foram realizados testes com as funções que melhor se adaptariam à engenharia de fundações, sendo que a função que melhor se adaptou foi a Gaussiana (Figura 3).

A Figura 3 apresenta apenas um exemplo de um dos parâmetros utilizados, nesse caso o torque. Para todas as variáveis foram realizadas o mesmo procedimento de obtenção da função com o parâmetro adotado.

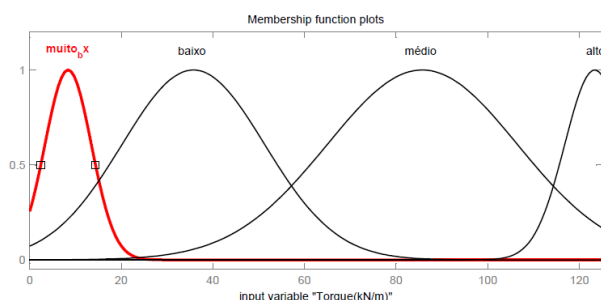


Figura 3. Variação do Torque na função Gauss

Considerando as regras pré-estipuladas pelos autores, as combinações para cada conjunto de regras e de posse dos conceitos das funções de pertinência, optou-se por utilizar malhas bem refinadas com matriz de linhas de 100 x 100 (o máximo suportado pela ferramenta).

Serão apresentados apenas algumas variações dos parâmetros de entrada com as variáveis de saída como indicativo da aplicabilidade nas obras.

A Figura 4 apresenta no eixo x o torque, no eixo y a velocidade e no eixo z a energia. Observa-se que quanto maior o torque aplicado e maior a velocidade de perfuração, maior a energia dispendida no processo executivo da estaca hélice contínua.

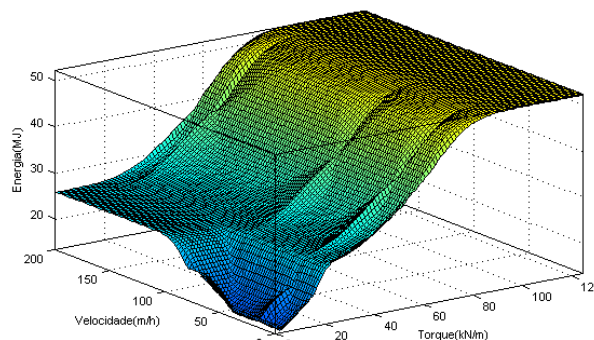


Figura 4. Variação do Torque x Velocidade x Energia

A Figura 5 apresenta no eixo x a velocidade, no eixo y o operador e no eixo z a energia. Observa-se que quanto maior a velocidade de perfuração aplicada e maior a variação da pressão arterial do operador, maior a energia dispendida no processo executivo da estaca hélice contínua. Esse comportamento deve-se ao comportamento humano durante a execução da estaca, que conforme mencionado na revisão bibliográfica o operador tende a influenciar nos parâmetros do estaqueamento.

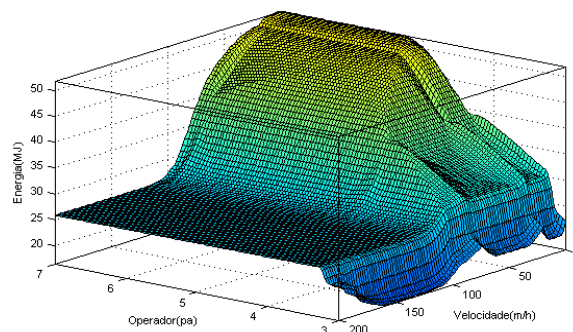


Figura 5. Variação Velocidade x Operador x Energia

A Figura 6 apresenta no eixo x o torque, no eixo y a velocidade e no eixo z a capacidade de carga. Observa-se que quanto maior o torque e maior a velocidade de perfuração aplicada, maior a capacidade de carga da estaca hélice contínua.

A Figura 7 apresenta no eixo x a variação da pressão arterial do operador, no eixo y a velocidade e no eixo z a capacidade de carga. Observa-se que quanto maior a velocidade de

perfuração aplicada e maior a variação da pressão arterial do operador, maior a capacidade de carga da estaca hélice contínua.

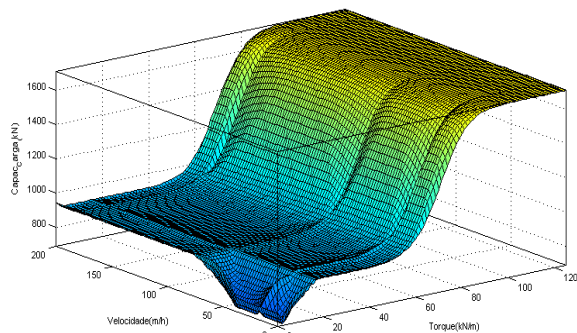


Figura 6. Variação Torque x Velocidade x Capacidade de Carga

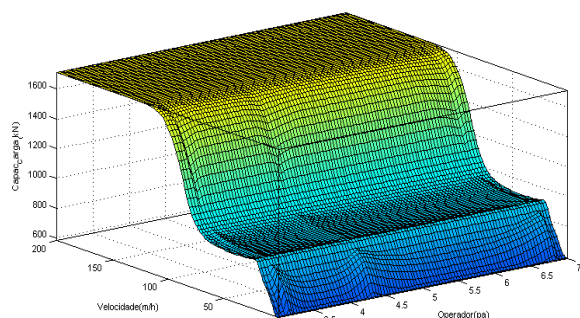


Figura 7. Variação Operador x Velocidade x Capacidade de Carga

5 CONCLUSÃO

O trabalho apresentou um estudo da uso da lógica fuzzy na avaliação da capacidade de estacas hélice contínua e da energia. Considerando várias variáveis presentes durante o processo executivo que influenciam no processo executivo, buscou-se relacionar parâmetros que apresentariam maior relação no desempenho das estacas, sendo elas, o torque, a energia, a velocidade de perfuração, o tipo de solo, a influência do operador e a capacidade de carga.

O estudo indicou que mesmo com o uso de uma análise qualitativa e subjetiva, considerando a experiência de campo, essa apresentou boas tendências no controle e capacidade das estacas executadas em campo. Considerando que o modelo reflete as observações de campo, conclui-se que a aplicabilidade do modelo fuzzy na avaliação das estacas hélice contínua mostra-

se uma ferramenta válida para o bom desempenho e análise para este tipo de estaca.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à Universidade de Brasília (UnB), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

- Adam, D., Markiewicz, R., Deix, J. D. (2013). Donau City Tower 1 – Deep foundation, excavation and dewatering scheme for the 220 m tall high-rise building in Vienna. *Vplyv vody na geotechnické konštrukcie*, Bratislava. http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_218465.pdf, acesso em 25/12/2013.
- Alves, A.S. (2004). *Avaliação do Potencial à Erosão dos Solos: Uma Análise por Lógica Fuzzy e Sistemas de Informação Geográfica*. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Cartográfica, UERJ, Rio de Janeiro.
- Elsamee, W. (2013). New Method for Prediction Pile Capacity Executed by Continuous Flight Auger (CFA), *Engineering*, Vol. 5 No. 4, 2013, pp. 344-354. doi: 10.4236/eng.2013.54047.
- Hortegal, M.V. (2011). *Avaliação do Comportamento de Estacas Hélice Contínua a Partir de Resultados de Laboratório e de Campo*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-195/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 173 p.
- Juang, C.H.; Huang, X.H.; Holtz, R.D. e Chen, J.W. (1996). Determining Relative Density of Sands From CPT Using Fuzzy Sets. 1996. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 1, p.1-6.
- Lee, D.H. e Juang, C.H. (1992). *Evaluation of failure potential in mudstone slopes using fuzzy sets*. ASCE Geotechnical Special Publication No 31, Stability and Performance of Slopes and Embankments – II, Vol. 2, p. 1137-1151.
- Mendel, J.M. (2001). *Uncertain rule-based fuzzy logic systems: introduction and new directions*. Londres: Prentice Hall P. T. R
- Oliveira, O.O.; Junior, F.S.A.; Alves, M.G. e Vieira, E.M. (2005). Uso De Técnicas de Geoprocessamento para Identificar Áreas Susceptíveis ao Escorregamento na Região de Campos dos Goytacazes – RJ. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 3191-3198, 2005.

- Pinto, W.D. (2002). *Avaliação da Susceptibilidade a Escorregamentos em Solo: Uma Abordagem Fuzzy*. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Norte Fluminense, UENF, Rio de Janeiro.
- Ramos, B.M.G., Saboya, Jr F., Maia P. C. De A. (2010). Aplicação da Lógica Difusa na Avaliação de Capacidade de Carga Fundações Profundas. In: *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Gramado. v.1. p. 16-23.
- Rabaco, L.M.L. (2005). *Avaliação de Modelos de Susceptibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa numa Faixa de Dutos*. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia de Computação - Área de Concentração Geomática, UERJ, Rio de Janeiro.
- Saboya, F. Alves, M. e Pinto, W. (2006), *Assessment of failure susceptibility of soil slopes using fuzzy logic*. Engineering Geology 86: 211–224.
- Silva, C. M.; Cavalcante, A. L. B.; Camapum De Carvalho, J. (2012). On Modelling Continuous Flight Auger Pilings by means of Energy. *International Journal of Science and Engineering Investigations*, v. 1, p. 11-16.
- Silva, M. A. da (2008). *Aplicação de Lógica Nebulosa para Previsão do Risco de Escorregamento de Taludes em Solo Residual*. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 150p.
- Tavares, C.A.A. (2009). *Elaboração e aplicação de uma metodologia de controle de qualidade para o processo executivo de estacas hélice contínua monitoradas*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117 p.
- Weber, L.; Klein, P.A.T. (2003). *Aplicação da Lógica Fuzzy em Software e Hardware*. 1 ed. Canos, Ulbra.
- Zadeh, L. A. (1965). *Fuzzy Sets*. Information and Control, vol. 8, pp 338-353
- Zhang, Z.; e Tumay, M. (1999). Statistical to Fuzzy Approach toward CPT Soil Classification. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125, No. 3, pp. 179-186.