

Lógica Fuzzy Aplicada na Análise de Fundação Rasa em Solos Reforçados

Renan Barbosa Neves

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes – RJ

Paulo César de Almeida Maia

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes – RJ, maia@uenf.br

RESUMO: Na engenharia, o uso de fundações rasas reforçadas avança gradualmente; embora estudos experimentais e numéricos abordem o assunto, na prática, a utilização de geossintéticos como reforço de fundação não é comum. Vários fatores influenciam a decisão dos projetistas sobre o tipo de fundação a ser utilizado, tais como, capacidade de carga e fator de segurança. Em alguns casos, surgem dúvidas sobre a viabilidade de empregar uma fundação rasa reforçada. Este estudo desenvolveu uma modelagem para solos arenosos, considerando seis parâmetros como variáveis de entrada (densidade do solo, capacidade de carga, resistência ao longo da profundidade, tensão aplicada, fator de segurança e fator de melhoria de carga BCR), que combinados resultaram no tipo de fundação como variável de saída. Utilizou-se o programa MATLAB® R2015a e a ferramenta Fuzzy Logic Toolbox® para criar o sistema inteligente. Os resultados destacam que o fator de segurança e o fator de melhoria de carga BCR exercem uma influência significativa na escolha da fundação. No entanto, para a densidade do solo, os resultados foram inconclusivos, indicando um comportamento semelhante independentemente da densidade. Conclui-se que a modelagem Fuzzy é recomendada para análises preliminares de projeto, cabendo a cada projetista adaptar seu sistema inteligente conforme necessidade.

PALAVRAS-CHAVE: Fundação Rasa, Lógica Fuzzy, Solo Reforçado.

ABSTRACT: In engineering, the use of reinforced shallow foundations is gradually advancing; although experimental and numerical studies address the subject, in practice, the use of geosynthetics as foundation reinforcement is not common. Several factors influence the decision of designers regarding the type of foundation to be used, such as load-bearing capacity and safety factor. In some cases, doubts arise about the feasibility of employing a reinforced shallow foundation. This study developed a modeling approach for sandy soils, considering six parameters as input variables (soil density, load-bearing capacity, resistance along depth, applied stress, safety factor, and base reinforcement load improvement factor BCR), which combined resulted in the type of foundation as the output variable. The MATLAB® R2015a software and the Fuzzy Logic Toolbox® were used to create the intelligent system. The results highlight that the safety factor and the BCR load improvement factor significantly influence the choice of foundation. However, for soil density, the results were inconclusive, indicating similar behavior regardless of density. It is concluded that Fuzzy modeling is recommended for preliminary project analyses, with each designer adapting their intelligent system as needed.

KEYWORDS: Shallow Foundation, Fuzzy Logic, Reinforced Soil.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a intensa expansão urbana associada ao grande porte das obras de engenharia provoca uma necessidade cada vez maior de se construir em solos com baixa capacidade de suporte. Em geral, esses maciços menos competentes desenvolvem significativas deformações quando solicitados, o que, em muitos casos, dificulta a execução e a funcionalidade da obra. Particularmente, no caso de obra de pequeno e médio porte, muitas vezes, é possível aplicar técnicas de melhoria ou reforço do maciço de fundação, permitindo utilizar fundações rasas com eficiência e segurança, ou seja, atendendo aos critérios de Estado Limite de Serviço e

Estado Limite Último preconizados pelas normas técnicas. Obviamente, além desses aspectos técnicos, o reforço ou a melhoria do maciço para a utilização de fundações rasas deve considerar o aspecto econômico para garantir viabilidade.

Existem várias técnicas utilizadas para constituição do reforço podendo ser com o aproveitamento do próprio solo do maciço, com a substituição do solo, com a melhoria por correção granulométrica ou adição de ligante, normalmente o cimento ou a cal, ou com a introdução do reforço, normalmente estacas.

O manual brasileiro de geossintéticos, Vertematti (2015) destaca a redução de custos com o uso de geossintéticos na substituição e no aprimoramento das soluções de reforço mais tradicionais. O reforço do solo com geossintéticos é uma técnica versátil que apresenta vantagens como a relação custo-benefício, a simplicidade do processo construtivo e a grande variedade de materiais disponíveis (Pinto, 2003).

De maneira mais generalizada, o uso de geossintéticos como elemento de reforço de fundação rasa isolada pode ser classificado de acordo com o tipo de geossintético a ser utilizado no reforço; com a superfície do terreno adjacente; rigidez relativa maciço vs. fundação; presença de cavidades; nível de assentamento da fundação ou do reforço; e posição ou direção de carregamento.

Nesses tipos de reforços, o material sintético, que se deforma de acordo com a solicitação da estrutura, adiciona uma parcela de resistência à tração ao solo devido ao atrito desenvolvido. Esse efeito, que é talvez um dos mais importantes no mecanismo de interação solo-estrutura-geossintético, ganha destaque quando os ganhos, em termos de capacidade de carga e redução dos recalques, são significativos e a aplicação é economicamente justificada.

2 REFORÇO DE FUNDAÇÃO COM GEOGRELHA

2.1 Aspectos Gerais

O conceito de reforço de solo foi inicialmente introduzido por Vidal (1969) e se consolidou no pioneiro trabalho de Binquet e Lee (1975a, 1975b) com uma avaliação do comportamento de maciço arenoso reforçado com tiras de metal. No decorrer do tempo, com novas exigências e tecnologias em relação ao material, formas e tamanhos, as tiras metálicas foram substituídas por geotêxteis, geocélulas e geogrelhas.

De acordo com Vertematti (2004), os geossintéticos, em particular as geogrelhas, têm sido amplamente utilizados como materiais de reforço em diferentes tipos de obras envolvendo a engenharia geotécnica, como, por exemplo, muros de contenção, aterros, pavimentos e fundações diretas em solo reforçado, sendo este último não muito praticado em âmbito nacional e internacional.

As propriedades do geossintético que podem intervir variam também em função de seu tipo, de sua matéria prima e das condições de contorno. Assim, a correta especificação de um geossintético para reforço começa pelo estudo de suas propriedades relevantes.

Vertematti (2004) afirma que o perfeito desempenho da função de reforço de um geossintético não depende apenas de um correto dimensionamento dos esforços solicitantes de projeto, mas também de sua correta especificação, através de valores adequados de suas propriedades relevantes.

As seguintes propriedades dos geossintéticos podem ser destacadas como relevantes para o desempenho da função de reforço: resistência à tração, alongamento sob tração, taxa de deformação, módulo de rigidez à tração, comportamento em fluência, resistência aos esforços de instalação, resistência à degradação ambiental, interação mecânica com o solo circundante e fatores de redução.

A partir dos trabalhos de Vidal (1969) e Binquet e Lee (1975a, 1975b), pesquisas desenvolvidas com base em testes experimentais e análises numéricas e analíticas investigam o desempenho do solo reforçado, bem como os efeitos de diferentes parâmetros (Figura 1 (a)) no comportamento carga recalque.

Os trabalhos desenvolvidos demonstram que o uso de reforços pode aumentar significativamente a capacidade de carga e reduzir os recalques das fundações superficiais. A Figura 1 (b) apresenta o comportamento carga recalque típico de uma fundação reforçada e sem a inclusão do reforço sintético.

Os principais parâmetros estudados incluem: profundidade da primeira camada de reforço (u), largura do geossintético (b), número de reforços (N), espaçamento entre camadas (h) e espessura total de reforço (d).

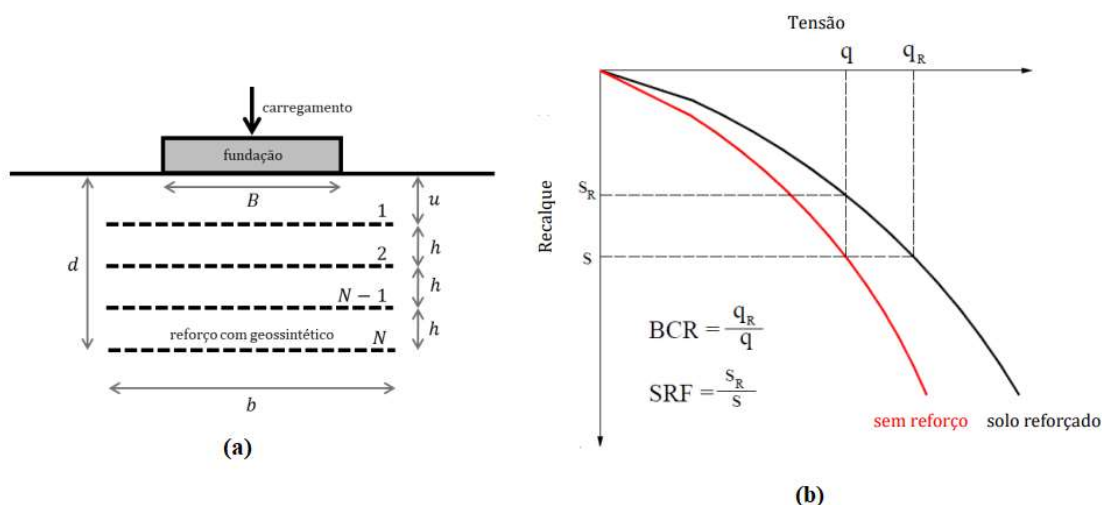


Figura 1. (a) Configuração e parâmetros de uma fundação reforçada com geossintético, (b) Comportamento carga recalque de fundação reforçada e não reforçada. Fonte: Corrêa, 2021.

2.2 Capacidade de carga em fundações superficiais reforçadas

2.2.1 Critérios de projeto

Para o dimensionamento de fundações rasas com reforços de geossintéticos, Vertematti (2015) sugere calcular a capacidade de carga utilizando um método de equilíbrio limite, considerando o reforço sintético e o recalque por metodologias consagradas na literatura como, por exemplo, a Teoria da Elasticidade. Normalmente, o dimensionamento desse tipo de fundação considera apenas o Estado Limite Último. O esforço no geossintético é limitado pelo menor valor entre a resistência à tração e a resistência ao arrancamento.

Nesse contexto, o adequado desempenho do reforço geossintético não depende apenas do correto dimensionamento, mas também, da correta especificação do material por meio de valores convenientes de suas propriedades relevantes. Para o reforço de fundação superficial, as propriedades relevantes do geossintético são resistência à tração, deformação na ruptura, módulo de rigidez à tração e comportamento à fluência, bem como adesão e ângulo de atrito da interface solo-geossintético.

2.2.2 Estudos analíticos

As soluções analíticas para cálculo da capacidade de carga em solo reforçado são baseadas, essencialmente, no método de equilíbrio limite de esforços (Binquet e Lee, 1795b; Huang e Tatsuoka, 1990; Huang e Menq, 1997; Wayne et al., 1998; Kumar e Saran, 2003; Michalowski, 2004; Sharma et al., 2009; e Chen e Abu-Farsakh, 2015). Dessa forma, com a inclusão do reforço, é somada uma parcela de resistência na capacidade de carga da fundação em maciço não reforçado.

Entre os métodos presentes na literatura, quatro metodologias merecem destaque: Binquet e Lee (1795b), com um estudo pioneiro na área de reforço de solo, DGGT (1997), com um método prescrito pela norma alemã DIN V 4017-100 e apresentado no Manual Brasileiro de Geossintéticos, Sharma et al. (2009) pelo mecanismo de ruptura semelhante a fundações sobre maciço com dois tipos de solo e Chen e Abu-Farsakh (2015) por englobar o efeito de confinamento e efeito membrana simultaneamente.

2.2.3 Estudos experimentais

Os estudos experimentais buscam determinar, parametricamente, as variações na capacidade de carga das fundações superficiais provocadas pela presença do reforço. Esses trabalhos definem configurações ótimas para largura, profundidade, espaçamento e número de reforços (Corrêa, 2021).

Tais estudos, na sua maioria de modelos físicos em escala reduzida, indicam um aumento da capacidade de suporte de uma fundação rasa e redução dos recalques com a introdução do reforço. Devido às particularidades de cada trabalho, são constatadas algumas diferenças nos valores dos parâmetros ótimos da configuração do reforço. No entanto, algumas conclusões gerais e observações podem ser feitas:

- i. A profundidade ótima da primeira camada de reforço está situada entre $0,15B$ e $0,40B$;
- ii. Colocando a primeira camada de reforço em uma profundidade maior que a largura da fundação, não ocorre um aumento significativo na capacidade de carga;
- iii. A largura ótima do reforço de geossintético varia entre $4B$ e $6B$;
- iv. O espaçamento ótimo entre reforços, assim como a profundidade ótima da primeira camada, está situado entre $0,15B$ e $0,40B$;
- v. A profundidade vertical total ótima da camada de reforço varia entre $1,3B$ e $2B$;
- vi. Aumentando o número de camadas de reforço além de um número específico, de 3 a 5 camadas, não produz um aumento significativo da capacidade de carga;
- vii. Os valores de melhoria da capacidade de carga (BCR) se tornam mais expressivos em recalques mais elevados;
- viii. Quanto menor a resistência do solo de fundação, maior o valor do BCR , sugerindo que o reforço é mais eficaz em maciço com baixa capacidade de suporte.

Nesse sentido, os estudos experimentais demonstram que o reforço com material sintético constitui uma alternativa para projetar fundações superficiais em maciços com baixa resistência e alta deformabilidade

2.3 Elementos de reforço aplicados em fundações

O intuito deste item é apresentar um panorama geral da evolução na pesquisa do comportamento das fundações reforçadas, apontando relevantes contribuições alcançadas pelos pesquisadores da área.

Segundo Fabrin (1999), os precursores na pesquisa da melhoria da capacidade de carga do solo pelo uso de reforço foram Binquet e Lee (1975a, 1975b), seguidos por Akinmusuru e Akinbolade (1981). Em ambos os trabalhos, os autores analisaram a influência de diferentes variáveis, tais como: número de camadas de reforço, espaçamento entre elas e rigidez do solo. Notaram um aumento da capacidade última do solo reforçado de duas a quatro vezes a capacidade do solo sem reforço.

Binquet e Lee (1975a, 1975b) fizeram vários estudos com modelos reduzidos reforçando um tipo de solo com tiras metálicas, e introduziram o conceito fator de melhoria de carga, o BCR (Bearing Capacity Ratio), definido pela equação 1.

$$BCR = \frac{q_r}{q_{ult}} \quad (1)$$

Onde q_r e q_{ult} são as capacidades de carga do solo reforçado e não reforçado, respectivamente.

3 SISTEMA INTELIGENTE

Nos últimos anos, a utilização de sistemas inteligentes tem despertado grande interesse na resolução de problemas presentes nas indústrias, na robótica, no comércio, na automação de linhas de produção, nas simulações financeiras ou mesmo no dia a dia das pessoas, devido à ausência de certezas em vários aspectos relacionados a estes setores. Dentre as lógicas mais utilizadas, estão as lógicas convencionais booleana, as redes neurais e a Lógica Fuzzy (Hortegal, 2016).

3.1 Lógica Fuzzy

A teoria da lógica *Fuzzy* pode fornecer ambos a aproximação racional e sistemática na transferência de experiência e tomada de decisão, bem como melhorar a interpretação dos dados para um problema de

engenharia. Além disso, ela pode representar variáveis incertas ou vagas, e pode modelar a forma de pensar do ser humano, isto é, a forma de obter conclusões baseadas em avaliações subjetivas.

Para a Lógica *Fuzzy*, a definição das chamadas variáveis linguísticas diferentemente da lógica tradicional é de extrema relevância, pois possibilita captar o grau de incerteza presente nessas variáveis e traduzir para um modelo matemático. Esta tradução realizada pela Lógica *Fuzzy* transforma uma variável linguística em um número que a quantifica. Esse valor é denominado valor de pertinência e, é obtido por meio das funções de pertinência. As variáveis reais são associadas a termos linguísticos que são quantificadores atribuídos a uma variável linguística a ser mensurada. Os termos linguísticos associam-se a funções de pertinência, relacionando-os a graus de pertinência, possibilitando um significado numérico. De fato, na Lógica *Fuzzy*, associa-se um valor $\mu(p)$ a uma proposição p , indicando o grau de veracidade dessa proposição.

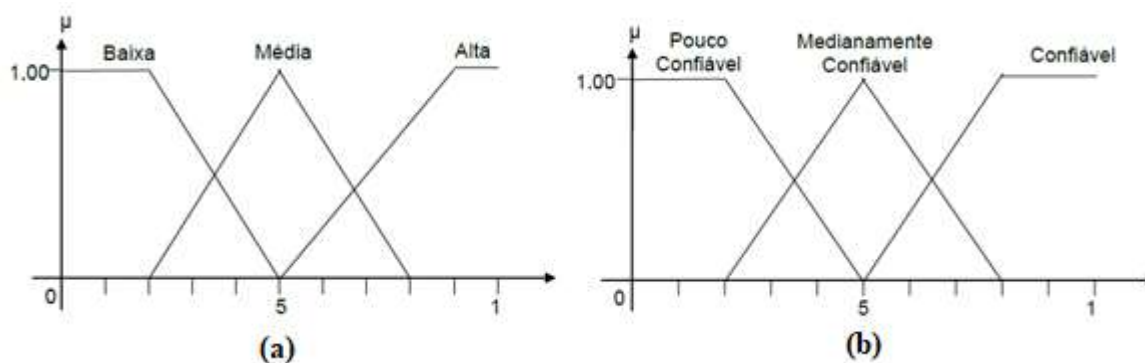


Figura 2. Gráfico de pertinência (a) Variabilidade dos Parâmetros, (b) Experiência do Projetista.
Fonte: Ramos, 2015.

As funções de pertinência são normalizadas, significando que o máximo valor que assume é sempre igual a 1, correspondendo a 100% de pertinência, enquanto, o mínimo valor é sempre 0, indicando que o valor não pertence ao grupo Ramos (2015).

A definição das funções de pertinência deve ser feita para todas as variáveis envolvidas e impactantes no projeto. Após essa etapa é necessário determinar um conjunto de regras que definem o comportamento das variáveis em função de outras. As regras representam o conhecimento do sistema. Conhecendo-se os valores das variáveis linguísticas, as regras definidas são responsáveis por determinar a ação a ser tomada.

As partes “se” das regras descrevem a situação, cujas regras são projetadas. A parte “então” descreve a resposta do sistema *Fuzzy* nesta situação. O grau de apoio (DoS) é usado para dar peso a estado de acordo com a sua importância. Por meio da combinação das variáveis linguísticas em função dos seus termos linguísticos, parte “se” das regras, define-se o termo linguístico da variável de saída, parte “então” da regra em questão.

O funcionamento de um Sistema de Lógica *Fuzzy* começa com a fuzzificação dos dados das variáveis linguísticas, os quais podem ser expressos mediante números ou conjuntos *Fuzzy*. Posteriormente, executa-se o processo de inferência Mamdani para cada uma das regras *Fuzzy*. Finalmente, realiza-se o processo de agregação e desfuzzificação.

4 MODELAGEM FUZZY

As regras de fuzzyficação foram elaboradas preliminarmente a partir das considerações por parte do autor e de dados de ensaios do LECIV/UENF, além do conhecimento prático e das formulações amplamente difundidas na engenharia de fundações superficiais.

Foi definido um total de 1.217 regras formuladas a partir das diferentes combinações obtidas entre as variáveis linguísticas de entrada, resultando em uma resposta de saída conforme Tabela 1.

Utilizou-se o programa MATLAB® R2015a (MathWorks Inc. Copyright 1984-2004) e a ferramenta *Fuzzy Logic Toolbox*® para criação do sistema inteligente.

Através do *Fuzzy Inference System* (FIS) foi modelado todo o raciocínio *Fuzzy* que, é composto por um conjunto de transformadores difusos (variáveis linguísticas), funções de pertinência (membership functions - MFs) e por uma base de regras, que, após o processo de desfuzzificação possibilita a visualização da variável ou das variáveis de saída do sistema em termos numéricos e, não mais, qualitativos.

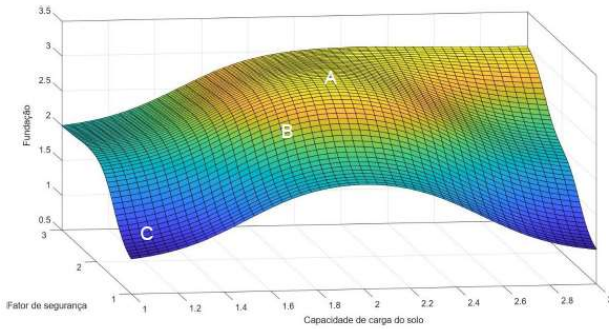
Tabela 1. Definição das variáveis de entrada e saída.

Variáveis de entrada						
1	Compacidade dos solos	Fofa	Pouco Compacta	Mediamente Compacta	Compacta	Muito Compacta
	Valores Nspt	≤ 4	5 - 8	9 - 18	19 - 41	≥ 41
2	Capacidade de carga do solo	Baixa	Média	Alta		
	Valores em kPa	≤ 900	901 – 7600	≥ 7601		
3	Resistência do solo ao longo da profundidade	Baixa	Média	Alta		
	Valores média Nspt	≤ 10	11 – 20	≥ 21		
4	Tensão aplicada	Baixa	Média	Alta		
	Valores em kPa	0 – 100	101 – 299	300 - 400		
5	Fator de segurança	Baixo	Aceitável	Alto		
	Valores	1 – 1,8	1,81 - 3	3,1 - 7		
6	Acréscimo de tensão devido ao geossintético	Baixo	Médio	Alto		
	Valores BCR (%)	0 – 1,4	1,5 – 3,5	3,5 - 5		
Variável de saída						
1	Tipo de fundação	Rasa	Rasa Reforçada	Profunda		
		FR	FRR	FP		

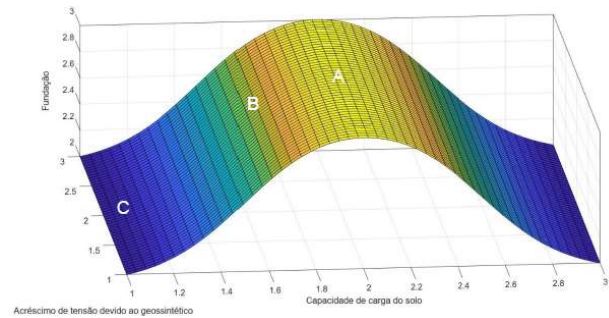
5 RESULTADOS

A Figura 3 apresenta as superfícies de resposta em 3D das diferentes combinações e resultados ao sistema Fuzzy desenvolvido utilizando a inferência de Mamdani. Cada figura representa os resultados de três combinações, sendo duas variáveis de entrada (input) e apenas uma de saída (output); a variável de saída é única, tipo de fundação, para qualquer que seja os dados de entrada.

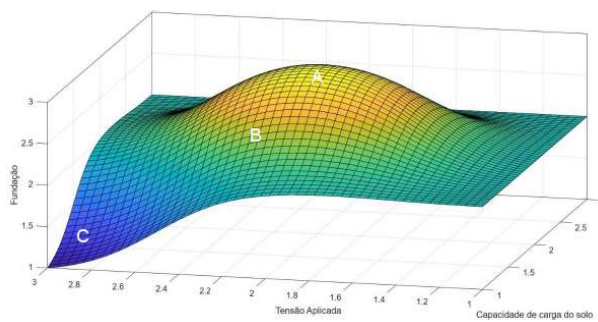
Observa-se nas Figura 3 (a, b, c, d, e e f) as demarcações denominadas de A, B e C, onde representam respectivamente, Fundação Rasa (FR), Fundação Rasa Reforçada (FRR) e Fundação Profunda (FP).



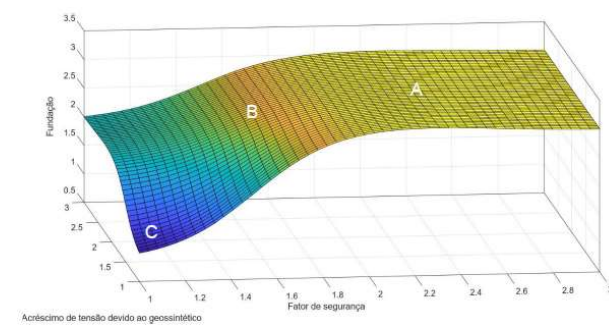
(a) Fator de segurança x Capacidade de carga



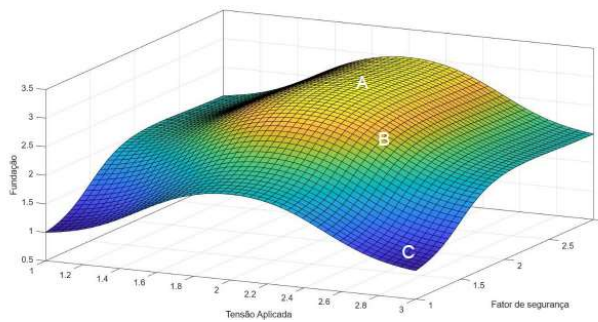
(b) BCR x Capacidade de carga



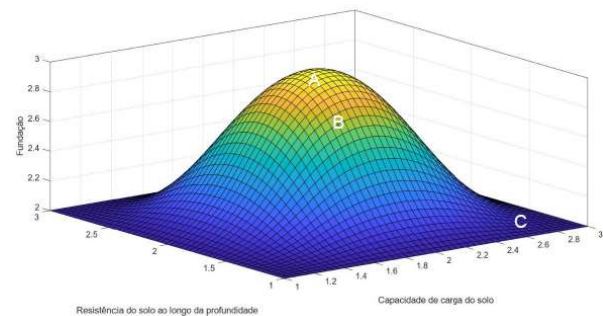
(c) Tensão aplicada x Capacidade de carga



(d) BCR x Fator de segurança



(e) Tensão aplicada x Fator de segurança



(f) Resistência prof x Capacidade de carga

Figura 3. Superfície 3D de resposta.

6 CONCLUSÕES

Este estudo apresenta a modelagem de fundação rasa em maciço reforçado através do toolbox Fuzzy Inference System (FIS) como ferramenta para auxiliar na tomada de decisões do engenheiro geotécnico. Na modelagem 3D é possível combinar duas variáveis de entrada e como saída sempre o tipo de fundação. Através da modelagem 3D foi possível observar:

- A variável fator de segurança (FS) é predominante entre as demais variáveis;
- A variável fator de melhoria de carga (BCR) e carga aplicada possuem uma maior influência na escolha do tipo de fundação a ser utilizada em relação a resistência ao longo da profundidade;
- Observa-se na Figura 3 (d) que com a crescente da variável, fator de melhoria de carga (BCR) devido a inserção do geossintético no maciço a utilização de fundação rasa reforçada FRR é considerada;

No geral, a modelagem Fuzzy mostrou-se ser uma boa ferramenta para auxiliar nas análises de projeto de fundação rasa em maciços reforçados. Este trabalho apresenta uma modelagem com as variáveis consideradas pelos autores como importantes na tomada de decisão da escolha do tipo de fundação, cabe cada projetista a escolha das variáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akinmusuru, J. O.; Akinbolade, J. A. Stability of loaded footings on reinforced soil. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, vol. 107, n° 6, pp. 819-827, 1981.
- Binquet, J., Lee, K. L. (1975a). Bearing capacity tests on reinforced earths labs. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. 101 (12), p. 1241 - 1255.
- Binquet, J., and Lee, K.L. (1975b). Bearing capacity analysis on reinforced earth slabs. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE. V. 101, No.GT12, p. 1257 - 1276.
- Corrêa, B. R. F. (2021). Avaliação da interação solo-estrutura-geossintético em fundações rasas em maciço de solo reforçado com geogrelha. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, Laboratório de Engenharia Civil, Campos do Goytacazes, RJ.
- Chen, Q.; Abu-Farsakh, M. (2015). Ultimate bearing capacity analysis of strip footings on reinforced soil foundation. *Soils and Foundations*, v. 55, n. 1, p. 74 - 85.
- DGGT – German Geotechnical Society (1997). Empfehlung für Bewehrungen aus Geokunststoffen – EBGEO. Ernst & Sohn. Berlin, Alemanha.
- Fabrin, T. W. O uso de geossintéticos no reforço de fundações – aplicação ao caso de tubulações enterradas. Tese de mestrado, ITA - São José dos Campos, 219 pág., 1999.
- Hortegal, Mylane Viana.; Aplicação da Lógica Fuzzy no Controle do Desempenho de Estacas Hélice Contínua. [Distrito Federal] 2016.
- Huang, C. C.; Tatsuoka, F. (1990). Bearing capacity of reinforced horizontal sandy ground. *Geotextiles and Geomembranes*. 9(1), p. 51 - 82.
- Huang, C.C.; Menq, F.Y. (1997). Deep-footing and wide-slab effects in reinforced Sandy ground. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. 123 (1), 30 - 36.
- Kumar, A.; Saran, S. (2003). Bearing capacity of rectangular footing on reinforced soil. p. 201 - 224.
- Michalowski, R.L. (2004). Limit loads on reinforced foundation soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. 130 (4), p. 381 - 390.
- Pinto, M. I. M. (2003). Applications of geosynthetics for soil reinforcement. *Ground Improvement*, 7, 2, p. 61 - 72.
- Ramos, B. M. G. (2015). Aplicação da lógica difusa na avaliação do fator de segurança e da capacidade de carga de estacas hélice contínua. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, Laboratório de Engenharia Civil, Campos do Goytacazes, RJ.
- Sharma, R.; Chen, Q.; Abu-Farsakh, M.; Yoon, S. (2009). Analytical modeling of geogrid reinforced soil foundation. *Geotextiles and Geomembranes*. V. 27, p. 63 - 72.
- Vertematti J. C. (2015). Manual Brasileiro de Geossintéticos. Editorial Edgard Blücher, 1 ed, São Paulo, Brasil, p. 413.
- Vidal, H. (1969). The principle of reinforced earth. *Highway Research Record*, 282, Washington, D.C.
- Wayne, M.H.; Han, J.; Akins, K. (1998). The design of geosynthetic reinforced foundations. In: Proceedings of ASCE's 1998 Annual Convention & Exposition. ASCE Geotechnical Special Publication. 76, p. 1 - 18.