

LÓGICA FUZZY APLICADA NA AVALIAÇÃO DE  
VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE FUNDAÇÕES RASAS  
EM MACIÇOS REFORÇADOS COM GEOGRELHA

**RENAN BARBOSA NEVES**

Laboratório de Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF**

Campos dos Goytacazes, 17 de agosto de 2023

LÓGICA FUZZY APLICADA NA AVALIAÇÃO DE  
VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE FUNDAÇÕES RASAS  
EM MACIÇOS REFORÇADOS COM GEOGRELHA

**RENAN BARBOSA NEVES**

Dissertação apresentada ao Centro de  
Ciência e Tecnologia da Universidade  
Estadual do Norte Fluminense Darcy  
Ribeiro, como parte das exigências para a  
obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Civil.

Orientador: Paulo César de Almeida Maia

Laboratório de Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF**

Campos dos Goytacazes, 17 de agosto de 2023

**FICHA CATALOGRÁFICA**

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

N518

Neves, Renan Barbosa.

LÓGICA FUZZY APLICADA NA AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE FUNDAÇÕES RASAS EM MACIÇOS REFORÇADOS COM GEOGRELHAS / Renan Barbosa Neves. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2023.

150 f.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2023.

Orientador: Paulo César de Almeida Maia.

1. Fundações rasas. 2. Reforço geossintético. 3. Lógica Fuzzy. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

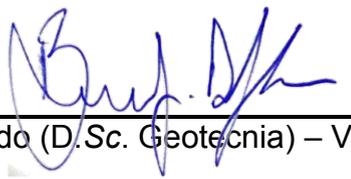
LÓGICA FUZZY APLICADA NA AVALIAÇÃO DE  
VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE FUNDAÇÕES RASAS  
EM MACIÇOS REFORÇADOS COM GEOGRELHA

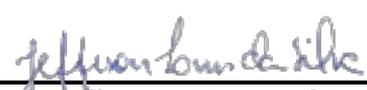
**RENAN BARBOSA NEVES**

Dissertação apresentada ao Centro de  
Ciência e Tecnologia da Universidade  
Estadual do Norte Fluminense Darcy  
Ribeiro, como parte das exigências para  
a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Civil.

Aprovado em 17 de agosto de 2023.

Comissão Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Bruno Guimarães Delgado (D.Sc. Geotecnia) – VALE (Examinador externo)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Jefferson Lins da Silva (D.Sc. Geotecnia) – EESC-USP (Examinador externo)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. José Luiz E. Dias Filho (D.Sc. Geotecnia) – PESQUISADOR/USP (Examinador externo)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Paulo Cesar de Almeida Maia (D.Sc. Geotecnia) – LECIV/UENF (Orientador)

## AGRADECIMENTOS

À Deus, minha fortaleza, meu refrigério, meu socorro bem presente por toda a eternidade.

Aos meus pais, Solange Marconi e Darcy Barbosa Neves (*in memoriam*), por terem sido pais tão presentes, educadores e acima de tudo pelo amor incondicional por mim, amo vocês.

Aos familiares, em especial as minhas irmãs Priscila Lourenço e Cristiane Freire, pelo apoio, pelas palavras de carinho e pelo acolhimento nos momentos mais necessários da minha vida.

Aos amigos Vinícius Motta, Nathalia Fernandes, Jordana Rangel, Danielle Lopes, Anne Vargas e ao meu amor Luiz Eduardo Capetini por serem compreensíveis, por me darem carinho, amor e pelas palavras que chegavam de maneira direta e acalentava o coração, minha gratidão por fazerem parte da minha trajetória, amo todos vocês.

Aos meus eternos mestres Prof<sup>a</sup>. Msc. Giana Laport, Prof<sup>o</sup>. Dsc. Rubenei Novais e Prof<sup>o</sup>. Dsc. Paulo de Almeida Maia, meu orientador, obrigado a todos pelos ensinamentos, pelas conversas e pelos conselhos, sem vocês o caminho com certeza seria maior, obrigado por me acolherem, gratidão.

À UENF e a UNIG instituições que me acolheram e me deram todo suporte necessário para que essa jornada fosse a mais sábia possível.

## RESUMO

Na engenharia o uso de fundações rasas reforçadas ainda caminha a pequenos passos; estudos experimentais e numéricos dissertam sobre o assunto, mas na prática, o uso de geossintético como reforço de fundação não é comum. Alguns fatores influenciam na tomada de decisão dos projetistas quanto à escolha do tipo de fundação utilizar, tais como, capacidade de carga, fator de segurança, realização de ensaios, entre outros, mas é certo que, em alguns casos, existe dúvida sobre a utilização de uma fundação rasa reforçada. Este estudo consiste na elaboração de uma modelagem para solos arenosos que aborda 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, combinadas, resultaram em uma variável de saída (tipo de fundação) como resposta. Para essas análises, utilizaram-se o programa MATLAB® R2015a (*MathWorks Inc. Copyright 1984-2004*) e a ferramenta *Fuzzy Logic Toolbox*® para criação do sistema inteligente. O estudo evidencia que parâmetros como fator de segurança e fator de melhora de carga *BCR* devido à inserção do geossintético, quando comparados a outros parâmetros, exercem uma influência maior no tipo de escolha da fundação, devendo haver, portanto, uma análise mais criteriosa nesses casos. Para a variável densidade do solo, os resultados foram inconclusivos; mesmo relacionando esse parâmetro com outros, os resultados mostram que, para densidade de solos diferentes, existe o mesmo comportamento. Por fim, a modelagem *Fuzzy* para determinação da utilização de fundação rasa reforçada é recomendada para análise preliminar de projeto e cabe a cada projetista modelar o seu sistema inteligente.

**Palavras-chaves:** Fundações rasas, Reforço Geossintético, Lógica *Fuzzy*.

## ABSTRACT

In engineering, the use of reinforced shallow foundations is still taking small steps; experimental and numerical studies have been carried out on the subject, but in practice, the use of geosynthetics as foundation reinforcement is not common. A number of factors influence designers' decision making regarding the type of foundation to use, such as load capacity, safety factor, testing, among others, but it is certain that in some cases there is doubt about the use of a reinforced shallow foundation. This study consists of developing a model for sandy soils that addresses six parameters as input variables (soil density, load capacity, resistance along the depth, applied stress, safety factor and BCR load improvement factor) which, when combined, result in an output variable (type of foundation) as a response. For these analyses, the MATLAB® R2015a program (MathWorks Inc. Copyright 1984-2004) and the Fuzzy Logic Toolbox® were used to create the intelligent system. The study shows that parameters such as the safety factor and the BCR load improvement factor due to the insertion of the geosynthetic, when compared to other parameters, have a greater influence on the type of foundation chosen, and therefore a more careful analysis should be carried out in these cases. For the soil density variable, the results were inconclusive; even when relating this parameter to others, the results show that the same behavior exists for different soil densities. Finally, fuzzy modeling to determine the use of reinforced shallow foundations is recommended for preliminary project analysis and it is up to each designer to model their intelligent system.

**Keywords:** Shallow foundations, Geosynthetic Reinforcement, Fuzzy Logic.

# ÍNDICE

|  |      |
|--|------|
| AGRADECIMENTOS .....   | v    |
| RESUMO.....  | vi   |
| ABSTRACT .....   | vii  |
| ÍNDICE .....   | viii |
| LISTA DE FIGURAS .....   | x    |
| LISTA DE TABELAS .....   | xiii |
| LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS .....                         | xiv  |
| 1. INTRODUÇÃO.....   | 1    |
| 1.1 Considerações Iniciais .....                                       | 1    |
| 1.2 Objetivo e justificativa .....                                     | 5    |
| 1.3 Escopo do Trabalho.....  | 6    |
| 2. REFORÇO DE FUNDAÇÃO COM GEOGRELHA.....                              | 7    |
| 2.1 Considerações Iniciais .....                                       | 7    |
| 2.2 Capacidade de carga em fundações superficiais convencionais.....   | 9    |
| 2.3 Correlações para parâmetros de resistência e peso específico ..... | 13   |
| 2.3.1. Coesão .....  | 13   |
| 2.3.2. Ângulo de atrito .....  | 14   |
| 2.3.3. Peso específico .....   | 15   |
| 2.4 Capacidade de carga em fundações superficiais reforçadas.....      | 15   |
| 2.4.1. Critérios de Projeto.....                                       | 15   |
| 2.4.2. Estudos Analíticos .....  | 17   |
| 2.4.2.1. Binquet e Lee (1795b).....                                    | 17   |
| 2.4.2.2. DGGT (1997).....  | 20   |
| 2.4.2.3. Sharma <i>et al.</i> (2009).....                              | 22   |
| 2.3.3.1 Ruptura similar a fundações com dois solos .....               | 24   |
| 2.3.3.2 Ruptura dentro da zona reforçada .....                         | 26   |
| 2.3.3.3 Tensão de tração no reforço.....                               | 27   |
| 2.4.2.4. Chen e Abu-Farsakh (2015).....                                | 29   |
| 2.4.3. Estudos Experimentais .....                                     | 31   |
| 2.6. Sistemas inteligentes .....                                       | 40   |
| 2.6.3. Lógica <i>Fuzzy</i> (lógica nebulosa) .....                     | 42   |
| 2.6.4. Lógica convencional X Lógica <i>Fuzzy</i> .....                 | 48   |
| 2.6.5. Rede Neural X Lógica <i>Fuzzy</i> .....                         | 49   |

|   |    |
|---|----|
| 3. METODOLOGIA .....  | 52 |
| 3.1 Análise dos dados que influenciam na tomada de decisão da escolha do tipo de fundação a ser utilizada ..... | 52 |
| 3.1.1 Densidade do solo (solos arenosos).....   | 53 |
| 3.1.2 Capacidade de carga do solo .....   | 53 |
| 3.1.3 Resistência ao longo da profundidade.....   | 57 |
| 3.1.4 Carga aplicada .....  | 57 |
| 3.1.5 Fator de segurança.....   | 58 |
| 3.1.6 Fator de melhoria de carga (BCR).....   | 59 |
| 3.2 Variáveis linguísticas de entrada e saída.....  | 60 |
| 3.3 Elaboração do sistema inteligente (modelagem <i>fuzzy</i> ).....  | 61 |
| 4. RESULTADOS.....  | 67 |
| 4.1 Modelo de superfície de resposta 3D .....   | 67 |
| 4.2 Validação do sistema inteligente – Aplicação em casos hipotéticos.....                                      | 74 |
| 5. CONCLUSÕES .....   | 83 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....   | 84 |
| APÊNDICE A – REGRAS DE ENTRADA FUZZY .....  | 90 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Ilustração esquemática de uma fundação rasa sobre maciço de fundação reforçado .....        | 1  |
| Figura 2. Exemplos de aplicação de reforço com geossintético (Huesker Brasil, 2019) .....             | 2  |
| Figura 3. Construção de tanque sobre maciço de solo reforçado (Alston <i>et al.</i> , 2015)           | 2  |
| Figura 4. Uso de geossintéticos de acordo com suas variâncias .....                                   | 4  |
| Figura 5. Configuração e parâmetros de uma fundação reforçada com geossintético                       | 8  |
| Figura 6. Comportamento carga recalque de fundação reforçada e não reforçada ....                     | 9  |
| Figura 7. Ângulo de atrito interno (MELLO, 1971).....   | 14 |
| Figura 8. Mecanismo de ruptura nos solos reforçados (Bingue e Lee, 1795b e Chen, 2007) .....          | 18 |
| Figura 9. Plano de ruptura e tensões no solo reforçado (Bingue e Lee, 1795b e Constancio, 2010) ..... | 18 |
| Figura 10. Âbaco para determinação de $I$ , $M$ e $J$ (Bingue e Lee, 1795b e Constancio, 2010).....   | 19 |
| Figura 11. Âbaco para determinação de $L_0$ e $X_0$ (Bingue e Lee, 1795b e Constancio, 2010).....     | 20 |
| Figura 12. Configuração de uma fundação reforçada (DGGT, 1997 e Vertematti, 2015) .....               | 21 |
| Figura 13. Mecanismo de reforço do geossintético (Chen, 2007) .....                                   | 23 |
| Figura 14. Mecanismos de ruptura da fundação em solo reforçado (Sharma <i>et al.</i> , 2009).....     | 24 |
| Figura 15. Coeficiente de empuxo no puncionamento em função do ângulo de atrito (Chen, 2007) .....    | 26 |
| Figura 16. Simplificação da deformada do reforço sintético (Chen, 2007) .....                         | 28 |
| Figura 17. Distribuição de deformação simplificada ao longo de reforço (Chen, 2007) .....             | 29 |
| Figura 18. Puncionamento seguido de ruptura por cisalhamento (Chen, 2007).....                        | 29 |
| Figura 19 - Diagrama de Venn. (Fonte: Moreira et al., 2002).....                                      | 41 |
| Figura 20. Variabilidade dos Parâmetros e Experiência do Projetista (Ramos, 2015). .....              | 45 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 21. Variabilidade dos Parâmetros e Experiência do Projetista (Ramos, 2015).<br>.....  | 46 |
| Figura 22. Diagrama do sistema da lógica <i>Fuzzy</i> .....  | 47 |
| Figura 23. Representação na forma de conjuntos da altura de uma pessoa, sob o<br>ponto de vista da Lógica convencional (à esquerda) e do da Lógica <i>Fuzzy</i> (à direita) -<br>Lopes et al. (2020). .... | 48 |
| Figura 24 – Diagrama simples da rede neural.....   | 50 |
| Figura 25 – Diagrama simples da lógica <i>fuzzy</i> . ....   | 50 |
| Figura 26. Dimensões dos bulbos de tensão. ....  | 57 |
| Figura 27 Tela do <i>Fuzzy Logic Toolbox</i> ®.....  | 61 |
| Figura 28 Sistema baseado em regras <i>Fuzzy</i> para determinação do tipo de fundação.<br>.....   | 62 |
| Figura 29 – Grau de associação para conjuntos difusos da variável da entrada –<br>Densidade do solo (solos arenosos). ....   | 63 |
| Figura 30 – Grau de associação para conjuntos difusos da variável da entrada –<br>Capacidade de carga. ....  | 63 |
| Figura 31 – Grau de associação para conjuntos difusos da variável da entrada –<br>Resistência do solo ao longo da profundidade.....  | 64 |
| Figura 32 – Grau de associação para conjuntos difusos da variável da entrada – Carga<br>aplicada. ....   | 64 |
| Figura 33 – Grau de associação para conjuntos difusos da variável da entrada – Fator<br>de segurança.....  | 65 |
| Figura 34 – Grau de associação para conjuntos difusos da variável da entrada – Fator<br>de melhoria de carga BCR. ....   | 65 |
| Figura 35 – Grau de associação para conjuntos difusos da variável de saída – Tipo de<br>fundação.....  | 66 |
| Figura 36. Análise do fator de segurança x capacidade de carga x fundação no modelo<br>de superfície de resposta 3D.....   | 67 |
| Figura 37. Análise do fator de melhoria BCR x capacidade de carga x fundação no<br>modelo de superfície de resposta 3D.....  | 68 |
| Figura 38. Análise da carga aplicada x capacidade de carga x fundação no modelo de<br>superfície de resposta 3D. ....  | 68 |
| Figura 39. Análise do fator de melhoria BCR x fator de segurança x fundação no<br>modelo de superfície de resposta 3D.....   | 69 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 40. Análise da resistência ao longo da profundidade x capacidade de carga x fundação no modelo de superfície de resposta 3D. .... | 70 |
| Figura 41. Análise do acréscimo de tensão x tensão aplicada x fundação no modelo de superfície de resposta 3D.....                       | 70 |
| Figura 42. Análise do fator de melhoria BCR x densidade do solo x fundação no modelo de superfície de resposta 3D.....                   | 71 |
| Figura 43. Análise da carga aplicada x fator de segurança x fundação no modelo de superfície de resposta 3D. ....                        | 71 |
| Figura 44. Análise da resistência ao longo da profundidade x densidade do solo x fundação no modelo de superfície de resposta 3D. ....   | 72 |
| Figura 45. Análise da carga aplicada x densidade do solo x fundação no modelo de superfície de resposta 3D. ....                         | 72 |
| Figura 46. Análise do fator de segurança x densidade do solo x fundação no modelo de superfície de resposta 3D.....                      | 73 |
| Figura 47. Análise da capacidade de carga x densidade do solo x fundação no modelo de superfície de resposta 3D.....                     | 73 |
| Figura 48. Perfil de sondagem SP01.....  | 74 |
| Figura 49. Situação 1 – Cruzamento das variáveis de entrada para resposta do tipo de fundação – Caso I. ....                             | 76 |
| Figura 50. Situação 2 – Cruzamento das variáveis de entrada para resposta do tipo de fundação – Caso I. ....                             | 77 |
| Figura 51. Situação 3 – Cruzamento das variáveis de entrada para resposta do tipo de fundação – Caso I. ....                             | 78 |
| Figura 52. Perfil de sondagem SP02.....  | 79 |
| Figura 53. Situação 1 – Cruzamento das variáveis de entrada para resposta do tipo de fundação – Caso II. ....                            | 80 |
| Figura 54. Situação 2 – Cruzamento das variáveis de entrada para resposta do tipo de fundação – Caso II. ....                            | 81 |
| Figura 55. Situação 3 – Cruzamento das variáveis de entrada para resposta do tipo de fundação – Caso II. ....                            | 82 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Fatores de forma (DE BEER, 1967, apud VESIC, 1975).....  | 12 |
| Tabela 2 – Fatores de capacidade de carga utilizando as equações 2.2, 2.3 e 2.4..                             | 12 |
| Tabela 3 – Peso específico para solos argilosos (GODOY,1972).....   | 15 |
| Tabela 4 – Peso específico para solos arenosos (GODOY,1972). .....  | 15 |
| Tabela 5 - Fatores de redução de geossintéticos para projeto básico (Vertematti, 2015)<br>.....               | 17 |
| Tabela 6 - Resumo dos principais estudos experimentais de fundação reforçada (parte<br>1) (Corrêa, 2021)..... | 33 |
| Tabela 7 – Diferença entre rede neural e lógica fuzzy. ....   | 51 |
| Tabela 8 - Classificação dos solos (NBR 7250-82).....   | 53 |
| Tabela 9 - Fatores de forma (De Beer, 1967, <i>apud</i> Vesic, 1975).....                                     | 54 |
| Tabela 10 - Fatores de forma (Terzaghi-Peck, 1948).....   | 55 |
| Tabela 11 - Peso específico de solos arenosos (Godoy, 1972).....  | 55 |
| Tabela 12 - Determinação da capacidade de carga.....  | 56 |
| Tabela 13 – Valores usuais de tensão vertical aplicada.....   | 58 |
| Tabela 14 - Fundações rasas – Fatores de segurança (NBR 6122/22) .....  | 58 |
| Tabela 15 - Capacidade de carga de fundações superficiais com reforços .....                                  | 59 |
| Tabela 16 - Variáveis de entrada e saída.....   | 60 |
| Tabela 17 - Cruzamento das variáveis de entrada do sistema – Caso I. ....                                     | 75 |
| Tabela 18 - Cruzamento das variáveis de entrada do sistema – Caso II. ....                                    | 79 |

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

|                     |   |
|---------------------|---|
| $a_t$               | abertura da geogrelha   |
| $\Delta q_c$        | acrécimo da capacidade de carga correspondente à zona de cisalhamento     |
| $\Delta q_p$        | acrécimo da capacidade de carga devido ao puncionamento                   |
| $\Delta q$          | acrécimo da capacidade de carga devido ao reforço                         |
| $\Delta q_t$        | acrécimo de carga em função da tração no reforço                          |
| $c_a$               | adesão unitária   |
| $\delta_p$          | ângulo da força passiva com a horizontal                                  |
| $\alpha$            | ângulo da tensão de tração com a horizontal na superfície aa' e bb',      |
| $\xi$               | ângulo da tensão de tração com a horizontal nas faces ac e bc             |
| $\varphi_f$         | ângulo de atrito da interface solo-reforço                                |
| $\varphi$           | ângulo de atrito do solo  |
| $\varphi_{f,k}$     | ângulo de atrito do solo de reforço                                       |
| $\delta_t$          | ângulo de atrito mobilizado na região de puncionamento                    |
| $\theta$            | ângulo entre a linha bc e a curva espiral cd                              |
| $\beta$             | ângulo entre o estado principal de tensões e o assentamento da fundação   |
| $\vartheta_{a,d}$   | ângulo que define a cunha de ruptura do solo                              |
| $q_0$               | capacidade de carga do maciço não reforçado                               |
| $q_r$               | capacidade de carga do solo reforçado                                     |
| $f$                 | coeficiente de atrito da interface solo-reforço                           |
| $K_s$               | coeficiente de empuxo no puncionamento                                    |
| $c_{f,k}$           | coesão do solo de reforço   |
| $T_{ix}$            | componente horizontal da tensão de tração $T_i$ na superfície aa' e bb'   |
| $K_{pH}$            | componente horizontal do coeficiente de empuxo passivo                    |
| $V_d$               | componente vertical do carregamento                                       |
| $l_{u,b}$           | comprimento do geossintético fora da área de projeção da sapata           |
| $l_{in,i}$          | comprimento do geossintético sob a atuação da sapata                      |
| $L_t$               | comprimento do tanque   |
| $\varepsilon$       | deformação  |
| $\varepsilon_{avg}$ | deformação média no reforço   |
| $LDR$               | densidade linear do reforço   |
| $Dr$                | densidade relativa  |
| $D_{50}$            | diâmetro médio do tamanho dos grãos do solo                               |
| $L_{ij}$            | distância entre dois pontos   |
| $T$                 | esforço no material   |
| $h$                 | espaçamento entre camadas de reforço                                      |
| $\Delta h$          | espaçamento vertical entre as camadas de geossintético                    |
| $d$ e $t_p$         | espessura total da camada de solo reforçado                               |
| $D$ e $D_f$         | espessura de solo do assentamento da fundação até a superfície do terreno |
| $b_t$               | espessura do filamento da geogrelha                                       |
| $BCR$               | fator de melhoria de carga  |
| $SRF$               | fator de redução de recalque  |
| $FRT$               | fator de redução global   |
| $FRP_{FL}$          | fator de redução parcial de fluência                                      |
| $FRP_{AQ}$          | fator de redução parcial para ataque químico                              |
| $FRP_{DI}$          | fator de redução parcial para danos mecânicos de instalação               |
| $FRP_{MA}$          | fator de redução parcial para degradação ambiental                        |

|                     |   |
|---------------------|---|
| $FS_f$              | fator de segurança parcial referente ao atrito solo-reforço           |
| $\lambda$           | fator escala do modelo  |
| $C_a$               | força de adesão   |
| $T_i$               | força de tração no material sintético                                 |
| $F_{i,d}$           | força em cada uma das camadas $i$ de reforço                          |
| $P_p$               | força resultante do empuxo passivo do solo                            |
| $\delta$            | inclinação da carga atuante   |
| LECIV               | Laboratório de Engenharia Civil da UENF                               |
| $B$                 | largura da fundação   |
| $w$                 | largura da tira do reforço  |
| $B_t$               | largura do tanque   |
| $b$                 | largura total do reforço  |
| $G$                 | módulo de deformação cisalhante do solo                               |
| $J_g$               | módulo de rigidez do geossintético                                    |
| $J_t$               | módulo de rigidez do geossintético                                    |
| $T_f$               | nível de carregamento na fluência                                     |
| $N$                 | número de camadas de reforço  |
| $N$                 | número de camadas de reforço  |
| $N_p$               | número de reforço na área de puncionamento                            |
| $N_R$               | número de tiras por metro linear                                      |
| $r_T$               | parâmetro adimensional de correção                                    |
| $e$                 | parâmetro de inclinação da deformação inicial                         |
| $C_f$               | parâmetro de inclinação do índice de fluência                         |
| $d_f$               | parâmetro exponencial do índice de fluência                           |
| $L_0$ e $X_0$       | parâmetro obtido pelo ábaco da Figura 2.6                             |
| $J, I$ e $M$        | parâmetros adimensionais obtidos pelo ábaco da Figura 10              |
| $\gamma_t$          | peso específico da camada de solo reforçado                           |
| $\gamma$            | peso específico do solo   |
| $u$                 | profundidade da primeira camada de reforço                            |
| $D_p$               | profundidade da região de cisalhamento                                |
| $H_f$               | profundidade da superfície de ruptura                                 |
| $z$                 | profundidade do reforço   |
| $Z_t$               | profundidade do tanque  |
| $s$                 | recalque  |
| $S_e$               | recalque vertical na profundidade $z$                                 |
| $T_f$               | resistência ao arrancamento do reforço                                |
| $T_f$               | resistência ao arrancamento do reforço                                |
| $q$                 | tensão aplicada   |
| $T_{avg}$           | tensão média de tração  |
| $\sigma_{\theta,i}$ | tensão vertical atuante no reforço fora da área de projeção da sapata |
| UENF                | Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro                  |
| FP                  | Fundação Profunda   |
| FR                  | Fundação Rasa   |
| FRR                 | Fundação Rasa Reforçada   |

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

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. O problema em questão pode ser ilustrado pela Figura 1, que mostra uma sapata assentada sobre uma parte do maciço que é reforçada.

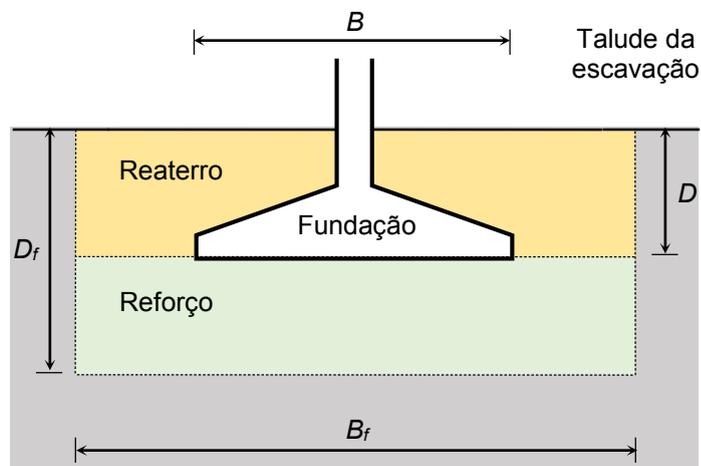


Figura 1. Ilustração esquemática de uma fundação rasa sobre maciço de fundação reforçado

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.

No entanto, um meio moderno de solucionar esse problema de cunho geotécnico é a utilização de técnicas especiais para melhorar o desempenho do

maciço de fundação. Nesse caso, o uso de geossintéticos é uma solução que merece atenção.

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). As figuras 2 e 3 apresentam exemplos de aplicação do reforço com geossintéticos em diferentes tipos de obras.



a) Reforço na engenharia de pavimentos



b) Instalação da geogrelha na obra



c) Reforço em pátio de estocagem



d) Reforço subjacente à camada asfáltica

**Figura 2. Exemplos de aplicação de reforço com geossintético (Huesker Brasil, 2019)**



a) Colocação do geossintético no maciço de fundação

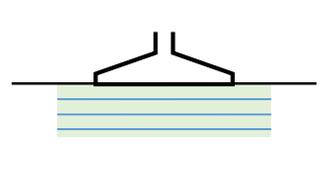
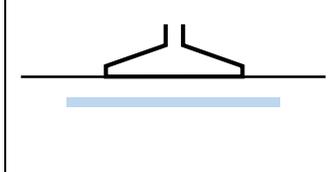
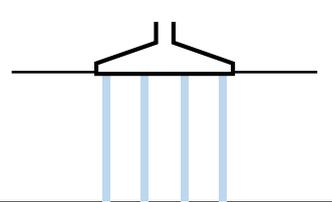
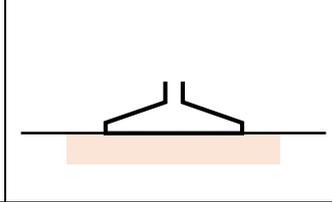


b) Tanque construído sobre maciço de solo reforçado com geogrelha

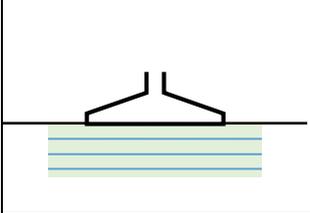
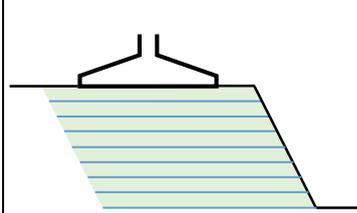
**Figura 3. Construção de tanque sobre maciço de solo reforçado (Alston et al., 2015)**

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 como mostra a Figura 2.

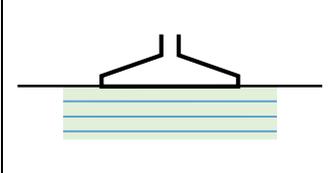
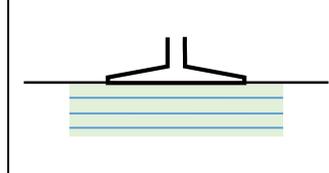
**De acordo com o tipo de geossintéticos**

|   |  |
|---|--|
|  |  |
| geogrelhas  | geocélulas   |
|  |  |
| colunas verticais encamisadas   | fibras sintéticas ou compósitos de fibras e ligantes                               |

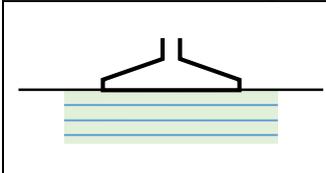
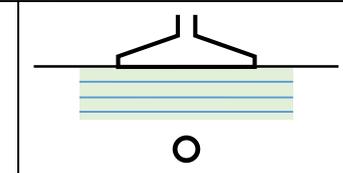
**De acordo com a superfície do terreno adjacente**

|   |  |
|---|--|
|  |  |
| Superfícies planas  | Próximo de taludes   |

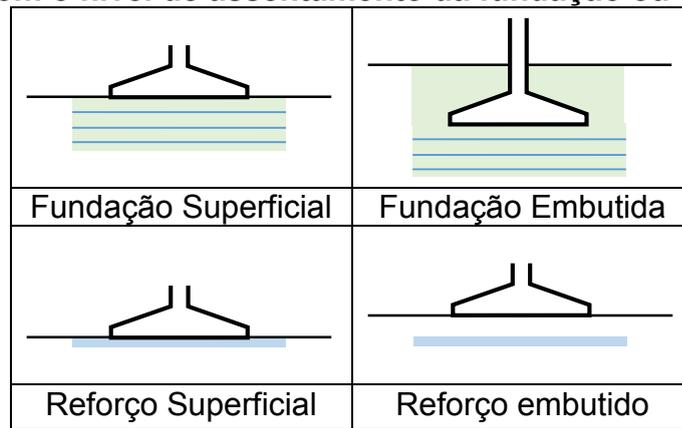
**De acordo com a rigidez relativa do maciço vs. fundação**

|   |  |
|---|--|
|  |  |
| Sapata rígida   | Sapata flexível  |

**De acordo com a presença de cavidades**

|   |  |
|---|--|
|  |  |
| Maciço contínuo   | Maciço com cavidades   |

De acordo com o nível de assentamento da fundação ou do reforço:



De acordo com a posição ou direção de carregamento

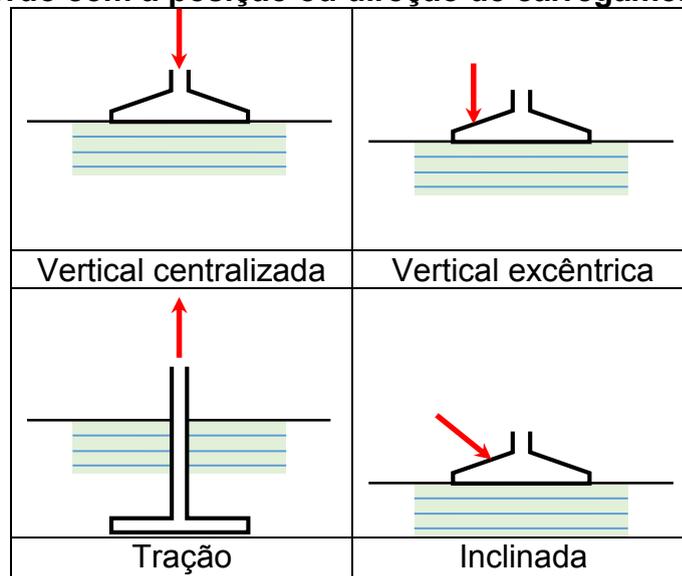


Figura 4. Uso de geossintéticos de acordo com suas variações em diversos tipos de fundações e solicitações.

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. Esse aspecto fica ainda mais relevante no caso de fundações rasas assentadas em maciços de baixa capacidade de carga e de elevada compressibilidade, onde a introdução do geossintético torna possível a aplicação da técnica e proporciona um aumento da capacidade de suporte e uma redução significativa dos recalques.

Apesar das pesquisas realizadas demonstrarem, na sua maioria, resultados positivos, o emprego de geossintéticos como reforço de fundações superficiais isoladas na prática da engenharia é ainda muito restrito, especialmente no Brasil. Isso se justifica, sobretudo, pela falta de compreensão dos mecanismos de interação entre o geossintético, o solo e a estrutura de fundação, o que restringe o desenvolvimento de metodologias de dimensionamento, até mesmo em nível internacional.

Mesmo com a evidente influência e o importante significado no comportamento carga recalque ao longo do tempo, as fundações rasas reforçadas com geossintéticos necessitam de análises que possam auxiliar na tomada de decisões em projetos.

Desse modo, entende-se que ainda há questões relevantes a serem respondidas para o caso de fundações rasas em maciços reforçados com geossintéticos.

Esta dissertação visa contribuir nas análises de viabilidade da utilização de fundações rasas em maciços reforçados com geogrelhas, transformando os parâmetros do maciço, do elemento estrutural e das tensões atuantes em funções de entrada para a Lógica *Fuzzy* e como resposta pode-se afirmar ou não a utilização desta técnica, ampliando e justificando a técnica na prática da engenharia.

## **1.2 Objetivo e justificativa**

O objetivo principal desta pesquisa é o estudo do comportamento geomecânico de fundações rasas isoladas assentadas sobre maciço de fundação reforçado com geossintético. Especialmente, procura-se entender como a interação entre o elemento estrutural de fundação, o maciço reforçado e o maciço natural de fundação se interagem durante o carregamento e ao longo da vida da obra. Entende-se que a técnica se aplica principalmente para casos de estruturas de pequeno e médio porte, mas não se descarta a possibilidade de aplicação para obras de grande porte.

Especificamente, essa pesquisa de mestrado estuda como as características geomecânicas do maciço reforçado e do maciço natural se relacionam no sentido de permitir que a técnica seja ou não viável. Isso se justifica pela premissa de que a “boa engenharia” consegue relacionar as características específicas do maciço de fundação a determinados tipos de estruturas de fundação, com razoável certeza, ou seja, sabe-se razoavelmente bem quando o maciço é competente ou não quando determinadas características são evidentes. Um exemplo disso é o uso de fundações

rasas sobre maciços arenosos densos e fundações profundas em maciços cuja resistência ocorre só em grande profundidade. No entanto, quando as características do maciço não deixam claro quando um tipo de fundação, rasa ou profunda, deve ser usada, surge a possibilidade, ou a dúvida, de se reforçar o maciço e ainda buscar uma solução de menor custo, com fundação rasa.

Para tanto, os objetivos específicos dessa dissertação são:

1 – Utilização do método para determinar a capacidade de carga com base nas formulações de Terzaghi (1943) com contribuição de VESIC (1975) e DGGT (1997) para fundações reforçadas;

2 – Definição das variáveis de entrada e saída para a elaboração do sistema inteligente;

3 – Modelagem Fuzzy dos parâmetros de entrada em função das características geomecânicas mais relevantes;

4 – Aplicação da modelagem Fuzzy em casos hipotéticos;

5 – Avaliação dos resultados da modelagem Fuzzy.

### **1.3 Escopo do Trabalho**

Este trabalho possui cinco capítulos. O primeiro capítulo introduz o tema e menciona os objetivos e justificativas do estudo. O capítulo 2 exhibe importantes aspectos do reforço com geogrelha, critérios de dimensionamento, estudos analíticos da capacidade de carga, pesquisas experimentais com parâmetros ótimos da configuração do reforço e aplicação da Lógica *Fuzzy*. O capítulo 3 apresenta a metodologia para esta dissertação, o desenvolvimento do sistema inteligente e modelagem Fuzzy. O capítulo 4 expõe os resultados da validação dos resultados da modelagem Fuzzy. O capítulo 5 registra as conclusões desta pesquisa. Por fim, são elencadas as referências bibliográficas.

## **2. REFORÇO DE FUNDAÇÃO COM GEOGRELHA**

### **2.1 Considerações Iniciais**

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 (Corrêa, 2021).

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.

Mesmo nas obras em que a função principal do geossintético é o reforço, existem variações nos tipos de solicitações quanto à intensidade, ao tempo de duração, ao mecanismo de interação, aos níveis de deformação, entre outros parâmetros, exigindo estudos diferenciados e específicos para cada aplicação.

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.

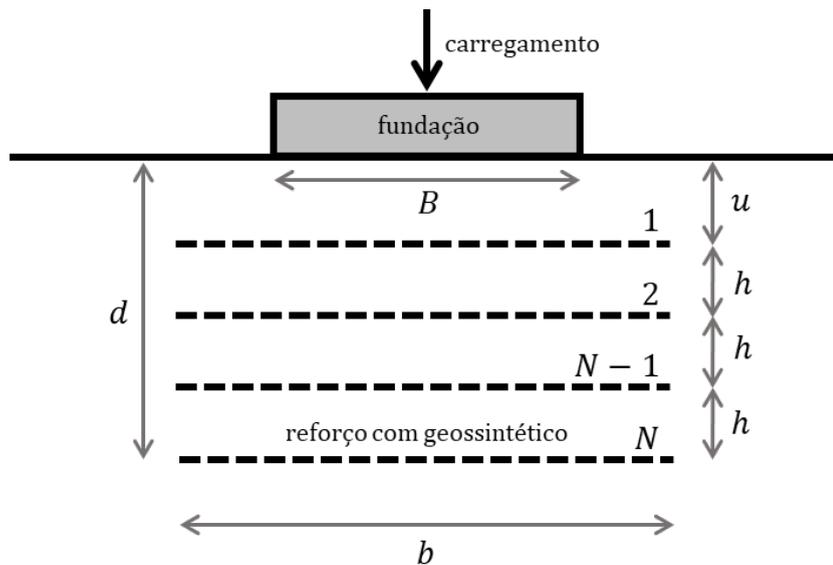
Vertematti (2004) afirma que o perfeito desempenho da função de reforço de um geossintético não depende apenas de um correto dimensionamento dos esforços solicitantes de projeto, mas também de sua correta especificação, através de valores adequados de suas propriedades relevantes.

Podem-se resumir como relevantes, para o desempenho da função reforço, as seguintes propriedades dos geossintéticos:

1. resistência à tração;
2. deformação sob tração;
3. taxa de deformação;

4. módulo de rigidez à tração;
5. comportamento em fluência;
6. resistência aos danos de instalação;
7. resistência à degradação ambiental;
8. interação mecânica com o solo envolvente;
9. fatores de redução.

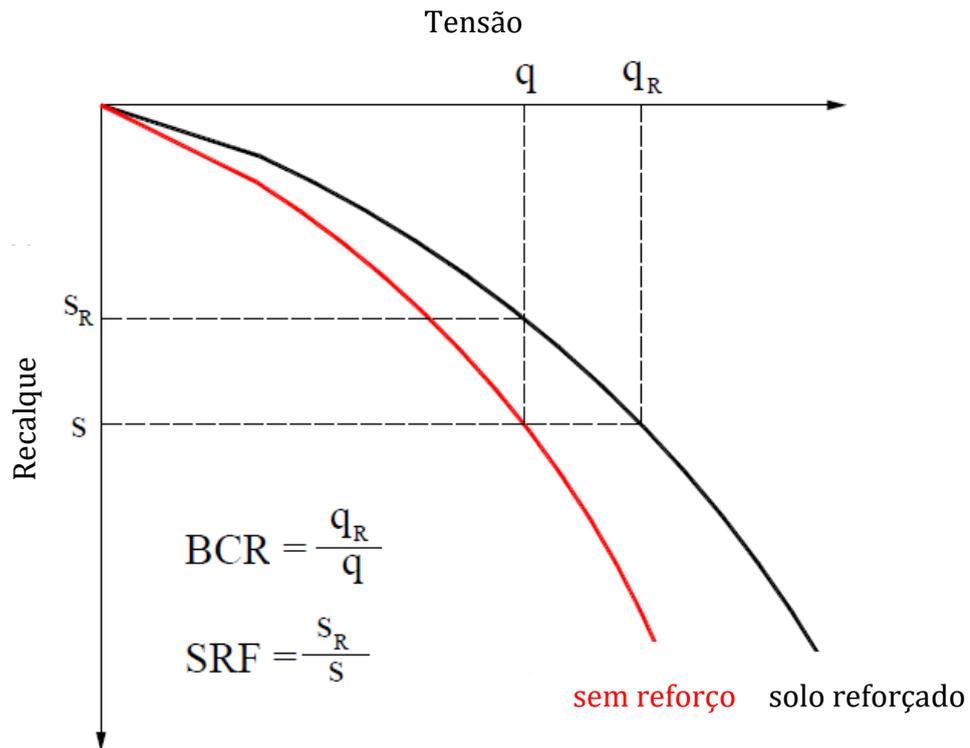
A partir dos trabalhos de Vidal (1969) e Binquet e Lee (1975a, 1975b), pesquisas desenvolvidas com base em testes experimentais e análises numéricas e analíticas investigam o desempenho do solo reforçado, bem como os efeitos de diferentes parâmetros no comportamento carga recalque. A Figura 5 representa a configuração e os parâmetros de uma fundação reforçada com geossintético



**Figura 5. Configuração e parâmetros de uma fundação reforçada com geossintético**

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 ( $d$ ).

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 6 apresenta o comportamento carga recalque típico de uma fundação reforçada e sem a inclusão do reforço sintético.



**Figura 6. Comportamento carga recalque de fundação reforçada e não reforçada (Corrêa, 2021)**

Nesse sentido, dois termos são usados para avaliar os benefícios do reforço com geossintéticos: o fator de melhoria de carga (*BCR* - *Bearing Capacity Ratio*) e o fator de redução do recalque (*SRF* - *Settlement Reduction Factor*). O *BCR* é definido como a razão entre a tensão no maciço reforçado e a tensão da fundação não reforçada para o mesmo recalque, enquanto o *SRF* é a razão entre o recalque do maciço reforçado e o recalque sem a introdução do reforço para o mesmo nível de tensão (Corrêa, 2021).

## 2.2 Capacidade de carga em fundações superficiais convencionais

Esta parte do trabalho não tem o intuito de cobrir toda temática de capacidade de carga das fundações rasas, mas sim apontar os elementos fundamentais à compreensão da proposta deste estudo.

O solo deve ser capaz de suportar as cargas colocadas sobre ele, sem que haja ruptura e os recalques devem ser toleráveis para a estrutura. Deste modo, em

um projeto de fundações, é de extrema importância a correta quantificação dos esforços que o solo suporta e os recalques que ele apresentará.

A capacidade de carga de um solo pode ser determinada por três enfoques distintos: capacidade de carga na ruptura (valor de capacidade de carga para qual o terreno se rompe por cisalhamento), capacidade de carga máxima (valor de capacidade de carga para o qual o solo suportará, sem risco de ruptura, um dado carregamento não considerando eventuais recalques que possam ocorrer) e capacidade de carga admissível (leva em consideração os recalques).

Os métodos tradicionais de cálculo que se baseiam na capacidade de carga na ruptura, ou seja, a carga para a qual o terreno rompe por cisalhamento.

### **2.2.1. Formulação de Terzaghi (1943)**

O primeiro autor a apresentar fórmulas para o cálculo da capacidade de carga de fundações rasas e profundas foi Terzaghi (1925). Posteriormente, Terzaghi (1943) deu ao problema um tratamento racional utilizando-se dos resultados obtidos por Prandtl (1920) na aplicação da Teoria da Plasticidade aos metais e Reissner (1924). Terzaghi (1943) define dois modos de ruptura do maciço de solo: se o solo é compacto ou rijo, tem-se a ruptura geral (brusca), em outro extremo, se o solo é fofo ou mole, tem-se a ruptura local (não evidencia uma ruptura nítida).

Para desenvolver uma teoria de capacidade de carga, Terzaghi (1943) considera as seguintes hipóteses básicas:

- a sapata é corrida, isto é, o comprimento  $L$  é bem maior do que a largura  $B$ , o que constitui um problema bidimensional;
- a profundidade de assentamento é inferior à largura da sapata ( $D \leq B$ ) situada acima da cota de apoio da sapata. Essa simplificação implica que a camada de solo superior à base da sapata pode ser substituída por uma sobrecarga de valor igual ao peso específico efetivo do solo multiplicado por sua espessura;
- o maciço de solo de solo sobre a base da sapata é compacto ou rijo, isto é, trata-se de um caso de ruptura geral.

Como o problema passa a ser o de uma faixa (sapata corrida) de largura definida, carregada uniformemente, localizada na superfície horizontal de um maciço

semi-infinito, Terzaghi (1943) montou o estado de equilíbrio plástico dessa situação, na iminência da ruptura, realizando o equilíbrio de esforços gerados.

Através desse equacionamento, Terzaghi (1943) chega a um valor aproximado da capacidade de carga do sistema sapata solo que é dado pela equação 2.1:

$$q_{ult} = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}yBN_y \quad (2.1)$$

Onde:  $q_{ult}$  é capacidade de carga do sistema,  $c$  é a coesão do solo,  $N_c - N_q - N_y$  são os fatores de capacidade de carga,  $q$  é a sobre carga e  $B$  é a largura da base da sapata.

### 2.2.2 Equação geral da capacidade de carga

Após o desenvolvimento da equação da capacidade de carga de Terzaghi, vários pesquisadores trabalharam na área e aprimoraram a solução (MEYERHOF, 1951 e 1963; LUNDGREN e MORTENSEN, 1953; BALLA, 1962). Diferentes soluções mostram que os fatores de capacidade de carga  $N_c$  e  $N_q$  não apresentam grande variação. Entretanto para um determinado valor de  $\phi$ , os valores de  $N_y$  obtidos por vários pesquisadores diferem de modo expressivo. Tal diferença é causada pela consideração de várias formas de cunha do solo abaixo da sapata.

Reissner (1924) expressou que:

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (2.2)$$

Prandtl (1921) demonstrou que:

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (2.3)$$

Meyerhof (1963) expressou que:

$$N_y = (N_q - 1) \tan(1,4\phi) \quad (2.4)$$

Utilizando-se dos fatores de forma na equação 2.5, tem-se a equação geral da capacidade de carga,

$$q_{ult} = cN_cS_c + qN_qS_q + \frac{1}{2}yBN_yS_y \quad (2.5)$$

Onde ,  $S_q$  e  $S_y$  são os fatores de forma da fundação e podem ser obtidos na Tabela 1.

**Tabela 1 – Fatores de forma (DE BEER, 1967, apud VESIC, 1975).**

| Sapata               | $S_c$   | $S_q$  | $S_y$                             |
|----------------------|---|--|-----------------------------------|
| Corrida              | 1,00  | 1,00   | 1,00                              |
| Retangular           | $1 + \left(\frac{B}{L}\right) \left(\frac{N_q}{N_c}\right)$ | $1 + \left(\frac{B}{L}\right) \text{tg}\phi$ | $1 - 0,4\left(\frac{B}{L}\right)$ |
| Circular ou quadrada | $1 + \left(\frac{N_q}{N_c}\right)$                          | $1 + \text{tg}\phi$                          | 0,60                              |

**Tabela 2 – Fatores de capacidade de carga utilizando as equações 2.2, 2.3 e 2.4.**

| $\phi$ | $N_c$ | $N_q$ | $N_y$ | $\left(\frac{N_q}{N_c}\right)$ | $\tan \phi$ |
|--------|-------|-------|-------|--------------------------------|-------------|
| 0      | 5,14  | 1,00  | 0,00  | 0,19                           | 0,00        |
| 1      | 5,38  | 1,09  | 0,00  | 0,20                           | 0,02        |
| 2      | 5,63  | 1,20  | 0,01  | 0,21                           | 0,03        |
| 3      | 5,90  | 1,31  | 0,02  | 0,22                           | 0,05        |
| 4      | 6,19  | 1,43  | 0,04  | 0,23                           | 0,07        |
| 5      | 6,49  | 1,57  | 0,07  | 0,24                           | 0,09        |
| 6      | 6,81  | 1,72  | 0,11  | 0,25                           | 0,11        |
| 7      | 7,16  | 1,88  | 0,15  | 0,26                           | 0,12        |
| 8      | 7,53  | 2,06  | 0,21  | 0,27                           | 0,14        |
| 9      | 7,92  | 2,25  | 0,28  | 0,28                           | 0,16        |
| 10     | 8,34  | 2,47  | 0,37  | 0,30                           | 0,18        |
| 11     | 8,80  | 2,71  | 0,47  | 0,31                           | 0,19        |
| 12     | 9,28  | 2,97  | 0,60  | 0,32                           | 0,21        |
| 13     | 9,81  | 3,26  | 0,74  | 0,33                           | 0,23        |
| 14     | 10,37 | 3,59  | 0,92  | 0,35                           | 0,25        |
| 15     | 10,98 | 3,94  | 1,13  | 0,36                           | 0,27        |
| 16     | 11,63 | 4,34  | 1,37  | 0,37                           | 0,29        |

|    |        |        |        |      |      |
|----|--------|--------|--------|------|------|
| 17 | 12,34  | 4,77   | 1,66   | 0,39 | 0,31 |
| 18 | 13,10  | 5,26   | 2,00   | 0,40 | 0,32 |
| 19 | 13,93  | 5,80   | 2,40   | 0,42 | 0,34 |
| 20 | 14,83  | 6,40   | 2,87   | 0,43 | 0,36 |
| 21 | 15,81  | 7,07   | 3,42   | 0,45 | 0,38 |
| 22 | 16,88  | 7,82   | 4,07   | 0,46 | 0,40 |
| 23 | 18,05  | 8,66   | 4,82   | 0,48 | 0,42 |
| 24 | 19,32  | 9,60   | 5,72   | 0,50 | 0,45 |
| 25 | 20,72  | 10,66  | 6,77   | 0,51 | 0,47 |
| 26 | 22,25  | 11,85  | 8,00   | 0,53 | 0,49 |
| 27 | 23,94  | 13,20  | 9,46   | 0,55 | 0,51 |
| 28 | 25,80  | 14,72  | 11,19  | 0,57 | 0,53 |
| 29 | 27,86  | 16,44  | 13,24  | 0,59 | 0,55 |
| 30 | 30,14  | 18,40  | 15,67  | 0,61 | 0,58 |
| 31 | 32,67  | 20,63  | 18,56  | 0,63 | 0,60 |
| 32 | 35,49  | 23,18  | 22,02  | 0,65 | 0,62 |
| 33 | 38,64  | 26,09  | 26,17  | 0,68 | 0,65 |
| 34 | 42,16  | 29,44  | 31,15  | 0,70 | 0,67 |
| 35 | 46,12  | 33,30  | 37,15  | 0,72 | 0,70 |
| 36 | 50,59  | 37,75  | 44,43  | 0,75 | 0,73 |
| 37 | 55,63  | 42,92  | 53,27  | 0,77 | 0,75 |
| 38 | 61,35  | 48,93  | 64,07  | 0,80 | 0,78 |
| 39 | 67,87  | 55,96  | 77,33  | 0,82 | 0,81 |
| 40 | 75,31  | 64,20  | 93,69  | 0,85 | 0,84 |
| 41 | 83,86  | 73,90  | 113,99 | 0,88 | 0,87 |
| 42 | 93,71  | 85,37  | 139,32 | 0,91 | 0,90 |
| 43 | 105,11 | 99,01  | 171,14 | 0,94 | 0,93 |
| 44 | 118,37 | 115,31 | 211,41 | 0,97 | 0,97 |
| 45 | 133,87 | 134,87 | 262,74 | 1,01 | 1,00 |

## 2.3 Correlações para parâmetros de resistência e peso específico

As fórmulas de capacidade de carga de fundações normalmente necessitam de parâmetros de resistência e peso específico para que seja possível sua aplicação. Tais parâmetros podem ser obtidos por ensaios de laboratório, ou de forma mais rotineira, através de correlações.

### 2.3.1. Coesão

Para a estimativa do valor da coesão não drenada ( $c_u$ ), quando não se dispõem de resultados de laboratório, Teixeira e Godoy (1996) sugerem a seguinte correlação com o índice de resistência à penetração (N) do SPT (*Standard penetration test*):

$$c_u = 10N \text{ (kPa)} \quad (2.6)$$

### 2.3.2. Ângulo de atrito

Para a adoção do ângulo de atrito interno da areia, pode-se utilizar a Figura 7 (Mello, 1971), que mostra correlações estatísticas entre os pares de valores  $(\sigma_v, N)$  e os prováveis valores de  $\phi$ .  $\sigma_v$  é a tensão efetiva na cota de obtenção de N.

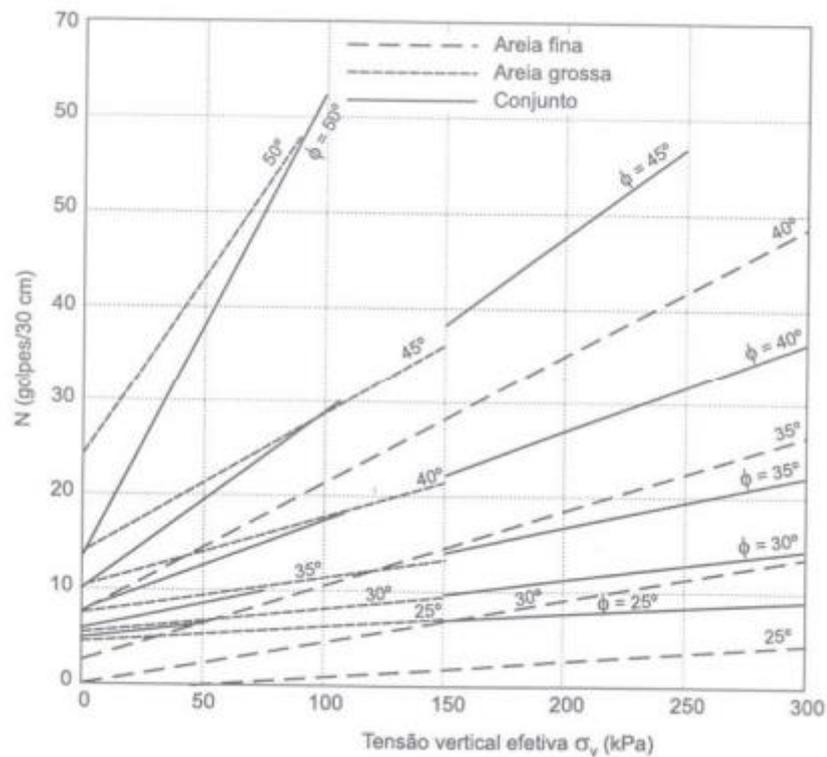


Figura 7. Ângulo de atrito interno (MELLO, 1971).

Ainda para a estimativa de  $\phi$ , Godoy (1983) menciona a seguinte correlação empírica com o índice de resistência a penetração (N) do SPT:

$$\phi = 28^\circ + 0,4N \quad (2.7)$$

Enquanto Teixeira (1996) utiliza:

$$\phi = \sqrt{20N} + 15^\circ \quad (2.8)$$

### 2.3.3. Peso específico

Se não existirem ensaios de laboratório, pode-se adotar o peso específico do solo a partir dos valores aproximados das Tabelas 3 e 4 (GODOY, 1972), em função da consistência da argila e da compactidade da areia, respectivamente. Os estados de consistência de solos finos e de compactidade de solos grossos, por sua vez, são dados em função do índice de resistência a penetração (N) do SPT.

**Tabela 3 – Peso específico para solos argilosos (GODOY,1972).**

| N (Golpes) | Consistência | Peso Específico kN/m <sup>3</sup> |
|------------|--------------|-----------------------------------|
| ≤ 2        | Muito mole   | 13                                |
| 3-5        | Mole         | 15                                |
| 6-10       | Média        | 17                                |
| 11-19      | Rija         | 19                                |
| ≥ 20       | Dura         | 21                                |

**Tabela 4 – Peso específico para solos arenosos (GODOY,1972).**

| N Golpes | Compactidade        | Peso Específico kN/m <sup>3</sup> |       |          |
|----------|---------------------|-----------------------------------|-------|----------|
|          |                     | Areia seca                        | Úmida | Saturada |
| ≤ 5      | Fofa                | 16                                | 18    | 19       |
| 3-8      | Pouco Compacta      | 16                                | 18    | 19       |
| 9-18     | Mediamente Compacta | 17                                | 19    | 20       |
| 19-40    | Rija                | 18                                | 20    | 21       |
| ≥ 40     | Dura                | 18                                | 20    | 21       |

## 2.4 Capacidade de carga em fundações superficiais reforçadas

### 2.4.1. 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, taxa de deformação, módulo de rigidez à tração e comportamento à fluência, bem como adesão e ângulo de atrito da interface solo-geossintético.

Em virtude das incertezas associadas em relação aos parâmetros adotados e às metodologias de cálculo, costuma-se majorar os esforços solicitantes da estrutura e minorar os valores de resistência. No caso dos geossintéticos, a redução é feita levando em consideração vários fatores parciais (Equação 2.9).

$$FRT = FRP_{FL} \cdot FRP_{DI} \cdot FRP_{MA} \cdot FRP_{AQ} \quad (2.9)$$

onde,  $FRT$  é o fator de redução global,  $FRP_{FL}$  é o fator de redução parcial de fluência,  $FRP_{DI}$  é o fator parcial para danos mecânicos de instalação,  $FRP_{MA}$  é o fator parcial para degradação ambiental e  $FRP_{AQ}$  é o fator de redução parcial para ataque químico.

Os valores dos coeficientes parciais podem ser obtidos por meio da bibliografia técnica, fornecidos pelos fabricantes ou determinados por meio de ensaios específicos. Na fase de projeto básico, quando ainda não se definiu o tipo exato de geossintético, são empregados fatores parciais tabelados. Vertematti (2015) apresenta, no Manual Brasileiro de Geossintéticos, uma faixa de valores indicativos para os fatores de redução utilizáveis nessa fase de projeto (Tabela 5). O ideal é que, na fase do projeto executivo, sejam empregados fatores fornecidos pelo fabricante ou obtido por meio de ensaios. Além disso, conforme as características da obra, podem ser aplicados outros tipos de fatores de redução (Corrêa, 2021).

**Tabela 5 - Fatores de redução de geossintéticos para projeto básico (Vertematti, 2015)**

| <b>Fator</b>            | <b>Valor mínimo</b> | <b>Valor máximo</b> |
|-------------------------|---------------------|---------------------|
| Fluência em tração      | 2,00                | 5,00                |
| Danos de instalação     | 1,50                | 2,00                |
| Degradação ambiental    | 1,05                | 2,00                |
| Ataque químico          | 1,00                | 2,00                |
| Fator de redução global | 3,15                | 40,00               |

### **2.4.2. 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; Dixit e Mandal, 1993; 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.

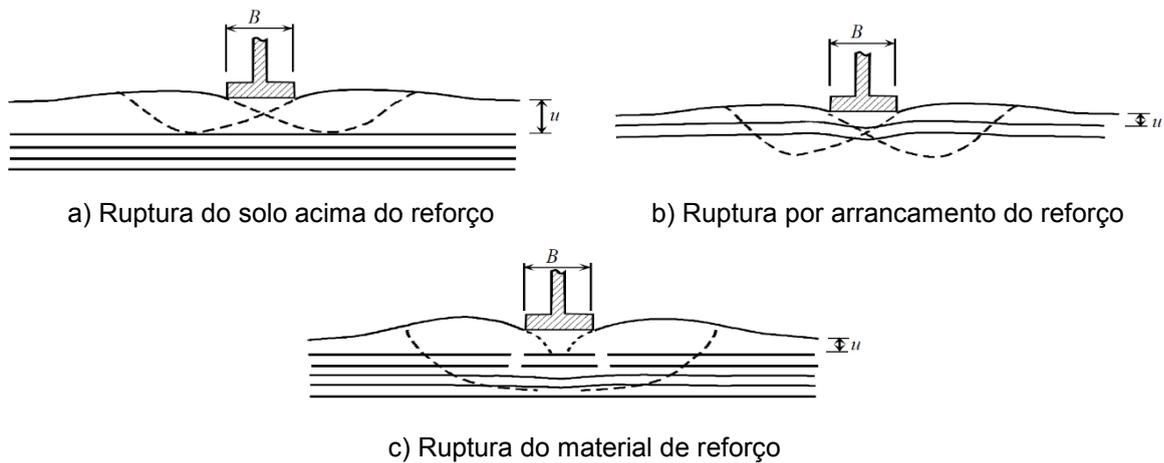
Entre os métodos presentes na literatura, quatro metodologias merecem destaque: Binquet e Lee (1795b), com um estudo pioneiro na área de reforço de solo, DGGT (1997), com um método prescrito pela norma alemã DIN V 4017-100 e apresentado no Manual Brasileiro de Geossintéticos, Sharma *et al.* (2009) pelo 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.

#### **2.4.2.1. Binquet e Lee (1795b)**

O método de Binquet e Lee (1795b) foi desenvolvido a partir dos estudos realizados em modelos reduzidos para reforço de tiras metálicas. Os autores identificaram três possíveis mecanismos de ruptura nos solos reforçados em função da resistência à tração e da configuração do reforço (Figura 8):

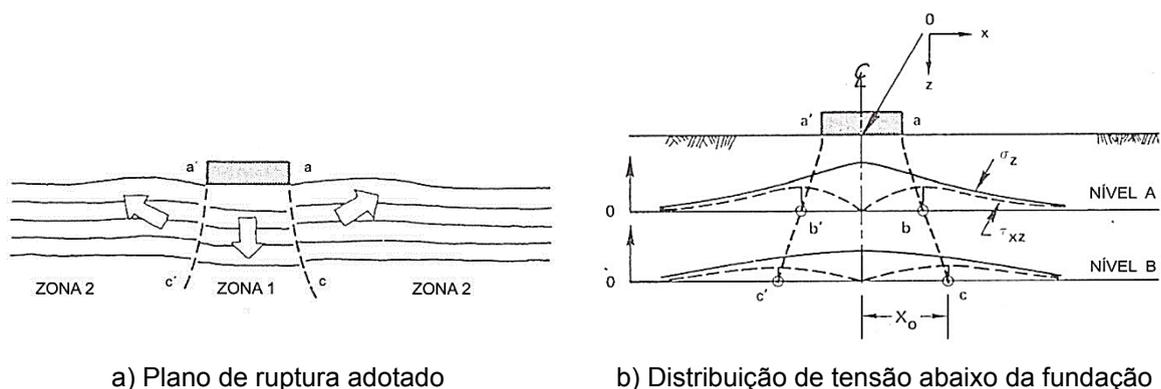
i. Ruptura do solo acima do reforço: ocorre quando a relação  $u/B$  é maior que 0,67 e os reforços são longos o suficiente para formar um limite rígido que não é ultrapassado pela superfície de ruptura;

- ii. Ruptura por arrancamento do reforço: ocorre quando a relação  $u/B$  é menor que 0,67 e o número de camadas de reforço é menor que 4 ou os reforços são muito curtos para mobilizar a resistência de arrancamento necessária;
- iii. Ruptura do material do reforço: ocorre quando a relação  $u/B$  é menor que 0,67 e são utilizadas 4 ou mais camadas de reforço.



**Figura 8. Mecanismo de ruptura nos solos reforçados (Binqe e Lee, 1795b e Chen, 2007)**

Como hipótese do método, assume-se que, conforme o carregamento aumenta, o solo logo abaixo da fundação recalca, enquanto o solo adjacente se movimenta lateralmente, formando zonas de cisalhamento. A Figura 9 ilustra o plano de ruptura adotado e a distribuição de tensão abaixo da fundação rasa.



**Figura 9. Plano de ruptura e tensões no solo reforçado (Binqe e Lee, 1795b e Constancio, 2010)**

Na concepção do método de dimensionamento, a sollicitação no reforço deve ser menor que a resistência à tração e a resistência ao arrancamento. Através do equilíbrio de esforços, a tensão no reforço é determinada pela Equação 2.10.

$$T(z, N) = \frac{1}{N} (J B - I h) q_0 \left( \frac{q_r}{q_0} - 1 \right) \quad (2.10)$$

onde,  $T$  é o esforço no material,  $z$  é a profundidade do reforço,  $N$  é o número de camadas de reforço,  $B$  é a largura da fundação,  $h$  é o espaçamento entre camadas de reforço,  $q_0$  é a capacidade de carga do solo não reforçado,  $q_r$  é a capacidade de carga do solo reforçado e  $J$  e  $I$  são parâmetros adimensionais obtidos pelo ábaco da Figura 10.

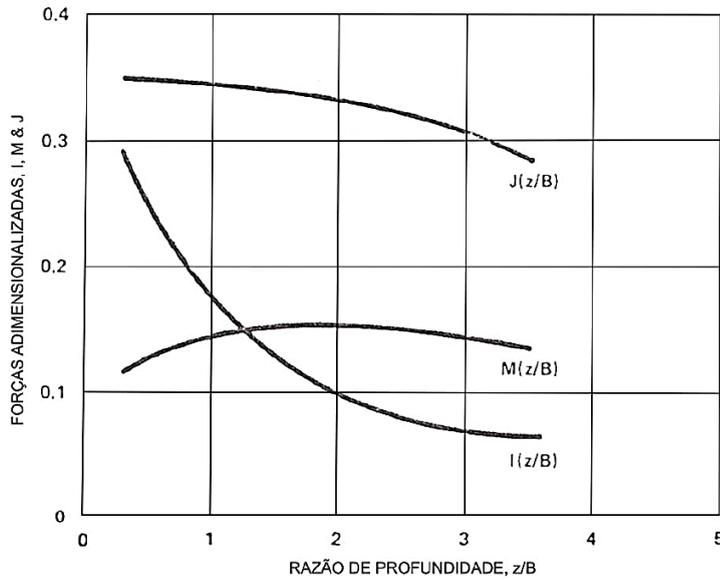


Figura 10. Ábaco para determinação de  $I$ ,  $M$  e  $J$  (Binque e Lee, 1795b e Constancio, 2010)

A resistência ao arrancamento do reforço é calculada em função da profundidade, da força normal atuante no comprimento do reforço, do coeficiente de atrito da interface solo-reforço e da densidade linear do reforço (Equação 2.11).

$$T_f(z) = 2 f LDR [M B q_r + \gamma (L_0 - X_0)(z + D)] \quad (2.11)$$

onde,  $T_f$  é a resistência ao arrancamento do reforço,  $f$  é o coeficiente de atrito da interface solo-reforço,  $LDR$  é densidade linear do reforço,  $M$  é um parâmetro adimensional que podia ser obtido pelo ábaco da Figura 10,  $\gamma$  é o peso específico do solo,  $D$  é a espessura de solo da cota de assentamento da fundação até a superfície do terreno e  $L_0$  e  $X_0$  são obtidos pelo ábaco da Figura 11.

$$f = \frac{\tan \phi_f}{FS_f} \quad (2.12)$$

onde,  $\varphi_f$  é o ângulo de atrito da interface solo-reforço e  $FS_f$  é o fator de segurança parcial referente ao atrito solo-reforço.

$$LDR = w N_R \quad (2.13)$$

onde,  $w$  é a largura da tira do reforço e  $N_R$  é número de tiras por metro linear.

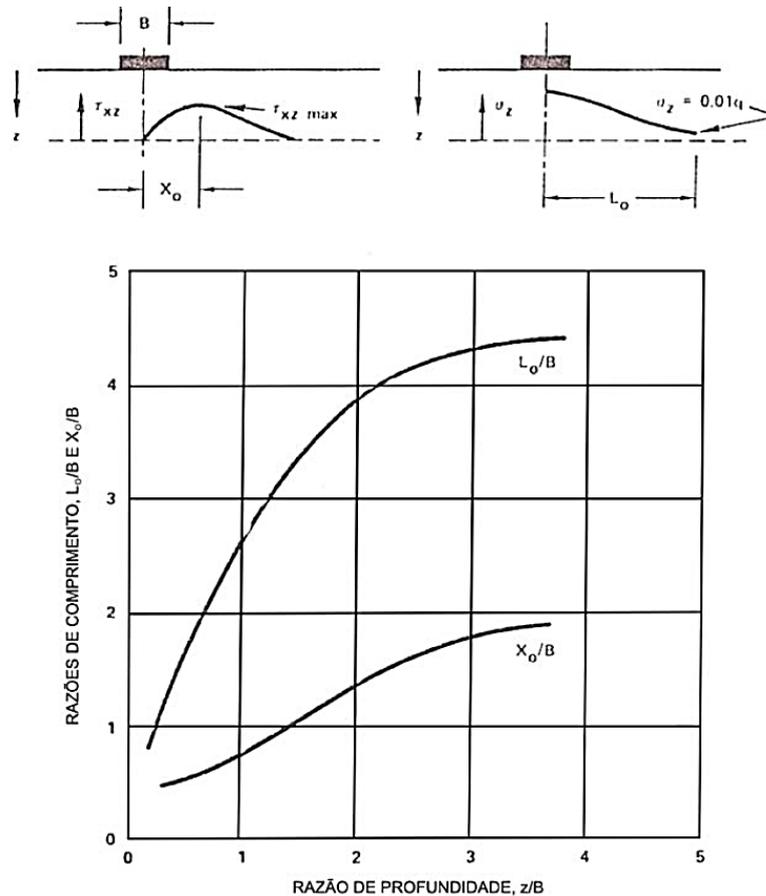


Figura 11. Ábaco para determinação de  $L_0$  e  $X_0$  (Binque e Lee, 1795b e Constancio, 2010)

#### 2.4.2.2. DGGT (1997)

Vertematti (2015) expõe, no Manual Brasileiro de Geossintéticos, um procedimento para cálculo da capacidade de carga de fundação superficial reforçada com geossintético prescrito pela norma alemã DIN V 4017-100. As recomendações da norma indicam uma forma de acrescentar uma parcela na capacidade de carga em virtude da inclusão do reforço com material sintético. A Figura 12 exhibe uma seção esquemática de uma fundação reforçada com geossintético.

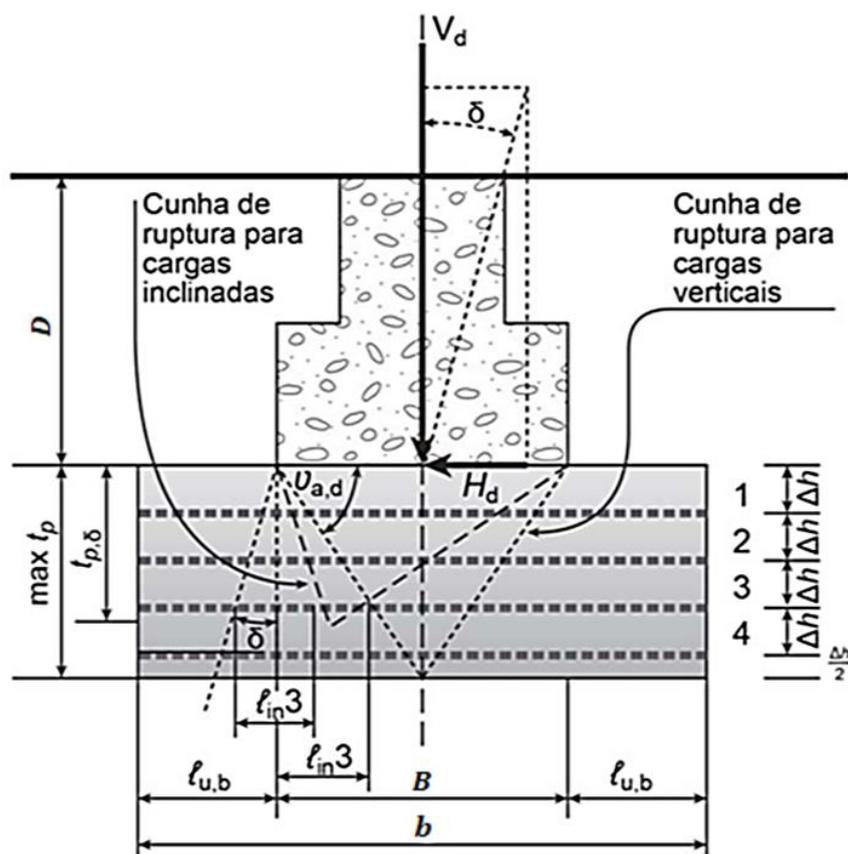


Figura 12. Configuração de uma fundação reforçada (DGGT, 1997 e Vertematti, 2015)

O princípio do método de cálculo é o do equilíbrio de esforços. As equações 14 e 2.15 determinam, respectivamente, o acréscimo da capacidade de carga devido ao reforço com geossintético e o ângulo que define a cunha de ruptura.

$$\Delta q = \frac{\cos \varphi_{f,k} \cos \delta}{\cos(\vartheta_{a,d} - \delta)} \sum_{i=1}^N F_{i,d} \quad (2.14)$$

onde,  $\Delta q$  é o acréscimo da capacidade de carga devido ao reforço,  $\varphi_{f,k}$  é o ângulo de atrito do solo de reforço,  $\delta$  é a inclinação da carga atuante,  $\vartheta_{a,d}$  é o ângulo que define a cunha de ruptura e  $F_{i,d}$  é a força que fornece cada uma das camadas  $i$  de reforço, cujo valor é limitado pela resistência à tração ou pela força de arrancamento do reforço e  $N$  é o número de camadas de reforço.

$$\vartheta_{a,d} = \operatorname{arccot} \left[ \sqrt{\left(1 + \tan^2 \varphi_{f,k}\right) \frac{\tan \varphi_f - \tan \delta}{\tan \varphi_{f,k} + \tan \delta}} - \tan \varphi_{f,k} \right] \quad (2.15)$$

A força de arrancamento atuante em cada uma das camadas de reforço é calculada pela Equação 2.16.

$$T_f = 2 f \left( \frac{V_d}{B l_{in,i}} + \sigma_{\vartheta,i} l_{u,b} \right) \quad (2.16)$$

onde,  $T_f$  é a resistência ao arrancamento do reforço,  $f$  é o coeficiente de atrito da interface solo-reforço,  $V_d$  é a componente vertical do carregamento,  $\sigma_{\vartheta,i}$  é a tensão vertical atuante no reforço fora da área de projeção da sapata,  $B$  é a largura da fundação,  $l_{in,i}$  é o comprimento do geossintético sob a atuação da sapata (Equação 17) e  $l_{u,b}$  é o comprimento do geossintético fora da área de projeção da sapata.

$$l_{in,i} = \cot \vartheta_{a,d} + \Delta h_i \tan \delta \quad (2.17)$$

onde,  $\Delta h$  é o espaçamento vertical entre as camadas de geossintético.

No dimensionamento do reforço com geossintético, devem ser obedecidos os seguintes critérios (equações 2.18 a 2.22):

$$0,15 \text{ m} \leq \Delta h \leq 0,40 \text{ m} \quad (2.18)$$

$$\Delta h \leq 0,5B \quad (2.19)$$

$$B + 5\Delta h < b \leq 2B \quad (2.20)$$

onde,  $b$  é a largura total do reforço.

$$t_p = (N + 0,5)\Delta h \quad (2.21)$$

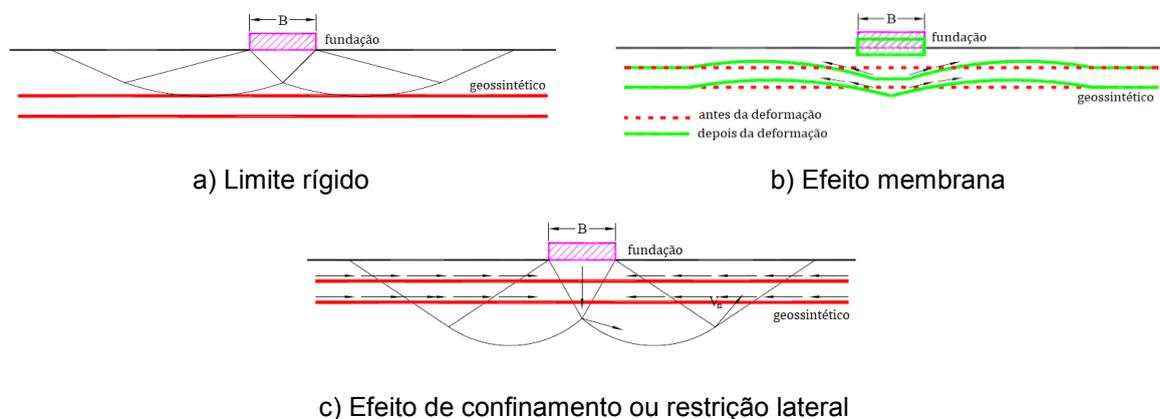
$$2,5 \Delta h \leq t_p \leq \left[ \frac{B}{2} \tan \left( \frac{45^\circ + \varphi_{f,k}}{2} \right) \right] \quad (2.22)$$

onde,  $t_p$  é a espessura total da camada de solo reforçado e  $N$  é o número de camadas de reforço

### 2.4.2.3. Sharma et al. (2009)

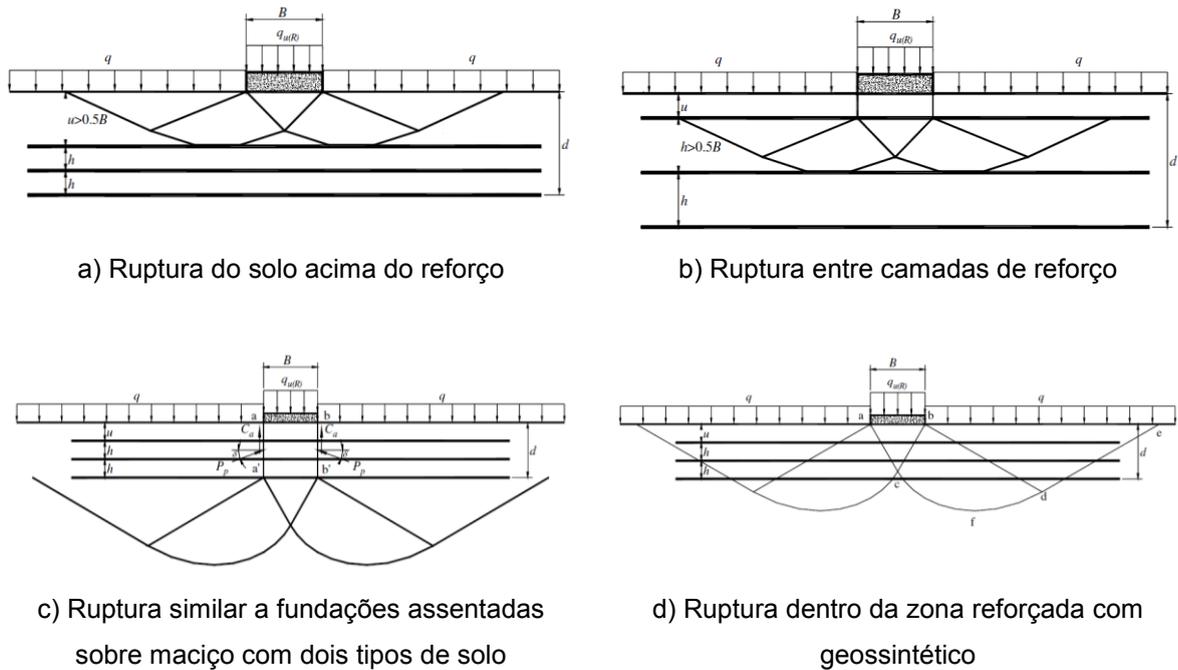
Os autores dividem os mecanismos de reforços propostos na literatura em três categorias (Figura 13):

- i. Limite rígido: quando a profundidade da primeira camada de reforço ( $u$ ) é maior que um determinado valor, o reforço atua como um limite rígido e a falha ocorre acima da primeira camada de reforço;
- ii. Efeito membrana: com a carga aplicada, a fundação e o solo se deslocam para baixo, deformando e tensionando o reforço. Devido à sua rigidez, o material sintético desenvolve uma força de tração que contribui com um aumento na capacidade de suporte do maciço. Nesse sentido, para que esse mecanismo ocorra, é necessária uma certa quantidade de recalque e, conseqüentemente, o geossintético deve possuir comprimento e rigidez para resistir aos esforços solicitantes;
- iii. Efeito de confinamento ou restrição lateral: devido ao deslocamento relativo entre solo e o reforço, uma força de atrito é induzida na interface solo-reforço. Dessa forma, um intertravamento pode ser devolvido pela interação entre o solo e o material sintético e a deformação lateral ser restringida. Como o comportamento da maioria dos solos depende do estado de tensão, o confinamento lateral tende a aumentar a resistência à compressão e diminuir a deformação vertical.



**Figura 13. Mecanismo de reforço do geossintético (Chen, 2007)**

Baseado na revisão bibliográfica, Sharma *et al.* (2009) relatam quatro tipos de ruptura da fundação em maciço de solo reforçado (Figura 14): ruptura do solo acima da primeira camada de reforço, ruptura entre as camadas de geossintético, ruptura semelhante a fundações assentadas sobre camada de solo resistente apoiada em camada menos competente e ruptura dentro da zona reforçada com material sintético.



**Figura 14. Mecanismos de ruptura da fundação em solo reforçado (Sharma et al., 2009)**

Os dois primeiros mecanismos de ruptura, acima e entre as camadas de reforço, podem ser evitados mantendo espaçamentos convenientes das camadas de geossintético. Chen (2007) mostra que esse espaçamento deve ser menor que  $0,5 B$  para evitar que ocorra os dois modos de ruptura. Na prática da Engenharia, esse requisito não é normalmente difícil de cumprir. Desse modo, o estudo enfatizou a ruptura similar a fundações em sistema com dois solos e a ruptura dentro da zona reforçada.

### 2.3.3.1 Ruptura similar a fundações com dois solos

O mecanismo de ruptura é caracterizado por um puncionamento na camada de reforço seguido de uma ruptura geral por cisalhamento no maciço não reforçado (Figura 14c). Esse tipo de ruptura ocorre de forma similar ao sistema de um solo resistente apoiado em solo de menor resistência.

Através do equilíbrio dos esforços no modelo, as equações 2.23 a 2.29 determinam a capacidade de carga do solo reforçado para o caso de uma sapata corrida:

$$q_r = q_0 + \frac{2 (C_a + P_p \text{ sen } \delta_p)}{B} - \gamma_t d + \Delta q_t \quad (2.23)$$

onde,  $q_r$  é a capacidade de carga do solo reforçado,  $q_0$  é a capacidade de carga do maciço não reforçado,  $C_a$  é a força de adesão,  $P_p$  é a força resultante do empuxo passivo do solo,  $\delta_p$  é o ângulo da força passiva com a horizontal, que se pode adotar  $0,5 \varphi_{f,k}$ , sendo  $\varphi_{f,k}$  o ângulo de atrito do solo utilizado como reforço,  $B$  é a largura da fundação,  $\gamma_t$  é o peso específico da camada de solo reforçado,  $d$  é a espessura da camada reforçada e  $\Delta q_t$  é o acréscimo de carga em função da tração no reforço.

$$C_a = c_a d \quad (2.24)$$

onde,  $c_a$  é a adesão unitária, que pode ser considerada  $0,75 c_{f,k}$ , sendo  $c_{f,k}$  a coesão do solo de reforço.

$$P_p = \left( \frac{1}{2} \gamma_t d^2 + \gamma_t D d \right) \frac{K_{pH}}{\cos \delta_p} \quad (2.25)$$

onde,  $D$  é a espessura de solo da cota de assentamento da fundação até a superfície do terreno e  $K_{pH}$  é a componente horizontal do coeficiente de empuxo passivo.

$$K_{pH} \tan \delta_p = K_s \tan \varphi_{f,k} \quad (2.26)$$

onde,  $K_s$  é o coeficiente de empuxo no punçãoamento (Figura 15).

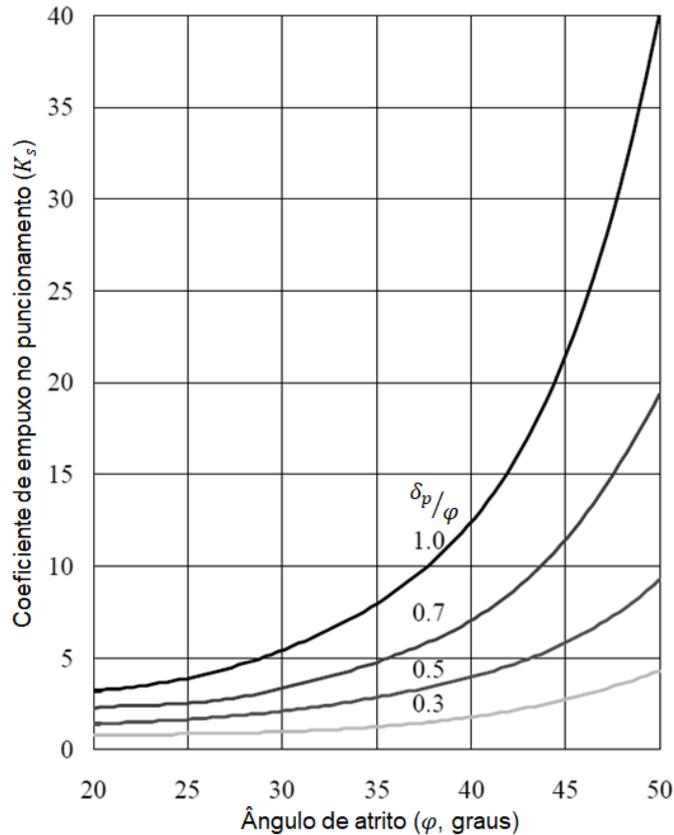
$$\Delta q_t = \frac{2 \sum_{i=1}^N T_i \tan \delta_p}{B} \quad (2.27)$$

onde,  $T_i$  é a força de tração no material sintético e  $N$  é o número de camadas de reforço.

$$q_r = q_0 + \frac{2 c_a d}{B} + \gamma_t d^2 \left( 1 + \frac{2 D}{d} \right) \frac{K_s \tan \varphi_{f,k}}{B} + \frac{2 \sum_{i=1}^N T_i \tan \delta_p}{B} - \gamma_t d \quad (2.28)$$

Analogamente, a capacidade de carga de uma fundação rasa quadrada sobre solo reforçado é determinada pela Equação 29:

$$q_r = q_0 + \frac{4 c_a d}{B} + 2 \gamma_t d^2 \left( 1 + \frac{2 D}{d} \right) \frac{K_s \tan \varphi_{f,k}}{B} + \frac{4 \sum_{i=1}^N T_i \tan \delta_p}{B} - \gamma_t d \quad (2.29)$$



**Figura 15. Coeficiente de empuxo no punção em função do ângulo de atrito (Chen, 2007)**

### 2.3.3.2 Ruptura dentro da zona reforçada

Esse tipo de ruptura ocorre quando a tensão na zona de reforço é ligeiramente maior que a tensão na camada de solo subjacente. Isso pode ocorrer quando a camada de reforço for consideravelmente espessa. Nesse sentido, a capacidade de carga do solo de reforço é determinada pelo método de equilíbrio e sobreposição dos esforços.

A Equação 2.30 determina a capacidade de carga para uma fundação corrida e a Equação 2.31 calcula o acréscimo devido à inclusão do reforço.

$$q_r = q_0 + \Delta q \quad (2.30)$$

onde,  $\Delta q$  é o acréscimo da capacidade de carga devido ao reforço.

$$\Delta q = \frac{\sum_{i=1}^N 4 T_i [u + (i - 1) h]}{B^2} \quad (2.31)$$

onde,  $N$  é o número de camadas de reforço,  $u$  é a profundidade da primeira camada de reforço e  $h$  é o espaçamento entre camadas.

De forma equivalente, o acréscimo de carga devido ao reforço em uma sapata quadrada é determinado pelas equações 2.33 a 2.35.

$$\Delta q = \frac{\sum_{i=1}^N 12 T_i [u + (i - 1) h] r_T}{B^2} \quad (2.32)$$

onde,  $r_T$  é um parâmetro adimensional de correção.

$$r_T = \begin{cases} 1 - 2 \frac{u + (i - 1) h}{B} \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right), & \text{para } u + (i - 1) h < \frac{B}{2} \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \\ \frac{1}{2} - 2 \frac{u + (i - 1) h}{2 H_f}, & \text{para } u + (i - 1) h \geq \frac{B}{2} \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \end{cases} \quad (2.33)$$

onde,  $H_f$  é a profundidade da superfície de ruptura.

$$H_f = \frac{B}{2 \cos \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)} e^{\left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \tan \varphi} \cos \varphi \quad (2.34)$$

### 2.3.3.3 Tensão de tração no reforço

Para o cálculo da capacidade de carga do solo reforçado pela solução analítica, é necessário estimar a força de tração no reforço. Estudos demonstram que a tensão desenvolvida no material sintético está diretamente relacionada com o recalque da fundação. Nesse sentido, a deformação do geossintético deve ser compatível com o deslocamento vertical ao longo do maciço de fundação (Corrêa, 2021).

Na ausência de uma solução rigorosa para o recalque e a deformação do material geossintético em determinada profundidade, Chen (2007) apresenta uma simplificação do formato do reforço e um cálculo da deformação do material para maciço arenoso (Figura 16). Assume-se que o reforço, abaixo da fundação, se move uniformemente para baixo de acordo com a linha bc e, a região fora de certo limite (linhas aa' e dd') tem um deslocamento considerado desprezível. A inclinação desse limite de fronteira aa' e dd' pode ser considerada 2:1 (vertical: horizontal), mesma configuração da distribuição simplificada de tensões.

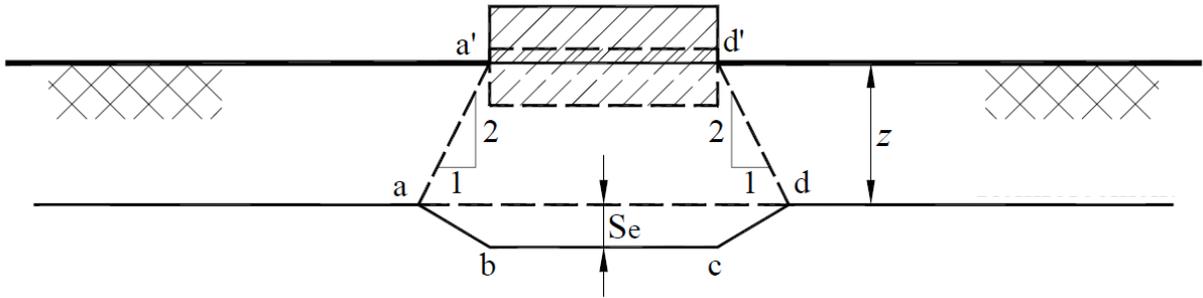


Figura 16. Simplificação da deformada do reforço sintético (Chen, 2007)

Dessa maneira, a deformação média no reforço para determinado recalque da sapata pode ser calculada pelas equações 2.35 a 2.38.

$$\varepsilon_{avg} = \frac{L_{ab} + L_{bc} + L_{cd} - L_{ad}}{L_{ad}} \quad (2.35)$$

onde,  $\varepsilon_{avg}$  é a deformação média no reforço e  $L_{ij}$  é a distância entre dois pontos quaisquer.

$$L_{ab} = L_{cd} = \sqrt{S_e^2 + \left(\frac{z}{2}\right)^2} \quad (2.36)$$

onde,  $S_e$  é o recalque vertical na profundidade  $z$ .

$$L_{bc} = B \quad (2.37)$$

$$L_{ad} = B + z \quad (2.38)$$

A tensão média de tração desenvolvida no material é calculada em função da deformação e rigidez do geossintético (Equação 39).

$$T_{avg} = J_g \varepsilon_{avg} \quad (2.39)$$

onde,  $T_{avg}$  é tensão média de tração e  $J_g$  é o módulo de rigidez do geossintético.

Resultados experimentais mostram que a distribuição de deformação ao longo do reforço não é uniforme, sendo maior no centro e reduzindo com o afastamento desse ponto. Uma distribuição triangular pode ser assumida para descrever a real

distribuição de deformação ao longo do reforço (Figura 17). Desse modo, a deformação máxima no geossintético é igual a  $2\varepsilon_{avg}$ .

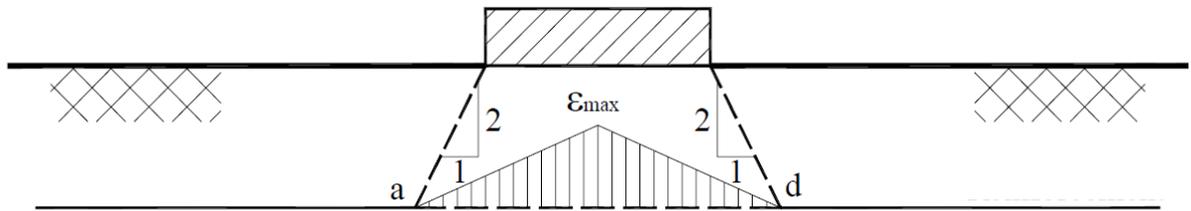


Figura 17. Distribuição de deformação simplificada ao longo de reforço (Chen, 2007)

#### 2.4.2.4. Chen e Abu-Farsakh (2015)

Os estudos de Chen e Abu-Farsakh (2015) são uma continuação do trabalho de Sharma *et al.* (2009) e se concentram na solução com dois mecanismos de reforço juntos: efeito de confinamento e efeito membrana. A análise do equilíbrio limite foi feita com o objetivo de desenvolver um modelo analítico racional e unificado para avaliação da capacidade de carga em maciços reforçados (Corrêa, 2021).

A Figura 18 mostra o mecanismo de ruptura que consiste em um puncionamento seguido de uma ruptura por cisalhamento. A capacidade de carga da sapata corrida é obtida pelo somatório da capacidade de carga do maciço não reforçado, uma parcela de acréscimo correspondente ao puncionamento e uma parcela referente à região de cisalhamento (Equações 2.41 a 2.45).

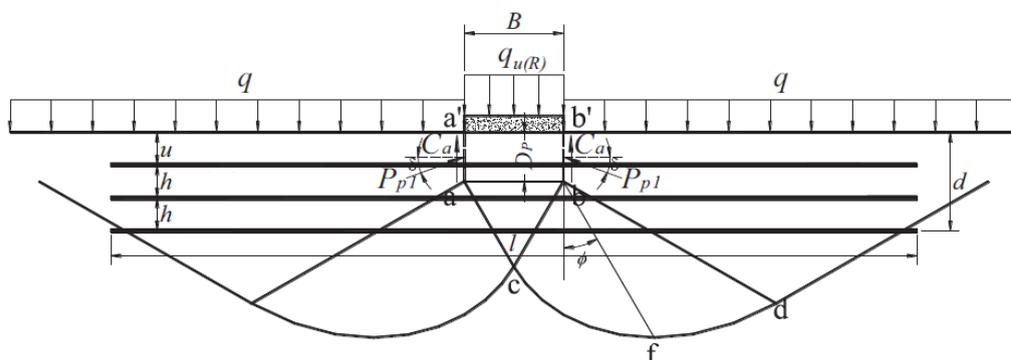


Figura 18. Puncionamento seguido de ruptura por cisalhamento (Chen, 2007)

$$q_r = q_0 + \Delta q_p + \Delta q_c \quad (2.40)$$

onde,  $q_r$  é a capacidade de carga do solo reforçado,  $q_0$  é a capacidade de carga do maciço não reforçado,  $\Delta q_p$  é o acréscimo devido ao punção e  $\Delta q_c$  é o acréscimo correspondente à zona de cisalhamento.

$$\Delta q_p = \frac{2c_a D_p}{B} + \gamma D_p^2 \left( 1 + \frac{2 D_f}{D_p} \right) \frac{K_s \tan \varphi}{B} - \gamma D_p \quad (2.41)$$

onde,  $B$  é a largura da fundação,  $c_a$  é a adesão unitária,  $D_p$  é a profundidade da região de cisalhamento,  $\gamma$  é o peso específico do solo,  $D_f$  é a espessura de solo da cota de assentamento da fundação até a superfície do terreno,  $K_s$  é o coeficiente de empuxo no punção (Figura 15) e  $\varphi$  é o ângulo de atrito do solo.

$$\Delta q_c = \sum_{i=1}^{N_p} \left( \frac{2 T_{ix} \tan \delta_t + 2 T_i \sin \alpha}{B} \right) + \sum_{i=N_p+1}^N \left( \frac{4 T_{ix} [u + (i-1)h - D_p]}{B^2} \right) + \sum_{i=N_p+1}^{N_T} \left( \frac{2 T_i \sin \xi}{B} \right) \quad (2.42)$$

onde,  $N_p$  é o número de reforço na área de punção,  $T_{ix}$  é o componente horizontal da tensão de tração  $T_i$  na superfície  $aa'$  e  $bb'$ ,  $\delta_t$  é o ângulo de atrito mobilizado na região de punção,  $\alpha$  é o ângulo da tensão de tração com a horizontal na superfície  $aa'$  e  $bb'$ ,  $u$  é a profundidade da primeira camada de reforço,  $h$  é o espaçamento entre camadas,  $N_T$  é o número de reforço acima do ponto  $c$  e  $\xi$  é o ângulo da tensão de tração com a horizontal nas faces  $ac$  e  $bc$ .

$$T_{ix} = \begin{cases} T_i \cos \alpha & \text{para } i \leq N_p \\ T_i \frac{\sin \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} + \beta - \xi \right)}{\sin \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} + \beta \right)}, & \text{para } i > N_p \end{cases} \quad (2.43)$$

onde,  $\beta$  é o ângulo entre a direção principal do estado de tensões e o plano de assentamento da fundação.

$$T_{ix} = \begin{cases} 0, & \text{para } u + (i-1)h \leq D_p + \frac{B}{2} \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \\ \theta, & \text{para } u + (i-1)h > D_p + \frac{B}{2} \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right), r_0 e^{\theta \tan \varphi} = \frac{u + (i-1)h}{\cos \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} - \theta \right)} \end{cases} \quad (2.44)$$

onde,  $r_0$  é igual a  $bc$  e  $\theta$  é o ângulo entre a linha  $bc$  e a curva espiral  $cd$ .

### 2.4.3. 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. A Tabela 6 exibe um resumo dos principais estudos experimentais (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. A melhoria na capacidade de

carga é uma função da capacidade de suporte do solo não reforçado e das propriedades e configurações do reforço.

Tabela 6 - Resumo dos principais estudos experimentais de fundação reforçada (parte 1) (Corrêa, 2021)

| Referência                 | Reforço               | Sapata     |       |      | Tanque            |                   |                   | Parâmetros Ótimos |       |      |       |
|----------------------------|-----------------------|------------|-------|------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|------|-------|
|                            |                       | Tipo       | B(cm) | L/B  | B <sub>t</sub> /B | L <sub>t</sub> /B | Z <sub>t</sub> /B | u/B               | b/B   | h/B  | N     |
| Binquet e Lee (1975a)      | Tiras de metal        | Corrida    | 7,5   | 20,0 | 7,1               | 20,0              | 4,4               | 0,33              | 20    | 0,33 | 6     |
| Fragazy e Lawton (1984)    | Tiras de metal        | Retangular | 7,5   | 2,0  | 7,5               | 16,3              | 4,8               | 0,33              | 6     | 0,33 | 3     |
| Guido <i>et al.</i> (1985) | Geotêxtil             | Quadrada   | 31,0  | 1,0  | 3,9               | 3,9               | 3,0               | 0,50              | 2,5   | 0,25 | 3     |
| Guido <i>et al.</i> (1986) | Geogrelha e Geotêxtil | Quadrada   | 31,0  | 1,0  | 3,9               | 3,9               | 3,0               | 0,25              | 3     | 0,25 | 3     |
| Huang e Tatsuoka (1990)    | Tiras de metal        | Corrida    | 10,0  | 4,0  | 18,3              | 4,0               | 7,4               | 0,50              | 6     | 0,50 | 3     |
| Mandal e Sah (1992)        | Geogrelha             | Quadrada   | 10,0  | 1,0  | 4,6               | 4,6               | 4,6               | 0,175             | -     | 0,20 | -     |
| Khing <i>et al.</i> (1993) | Geogrelha             | Corrida    | 10,0  | 3,0  | 11,0              | 3,0               | 9,0               | 0,25 - 0,40       | 11    | 0,40 | 6     |
| Omar <i>et al.</i> (1993a) | Geogrelha             | Quadrada   | 7,5   | 1,0  | 14,7              | 4,0               | 12,0              | 1,00              | 4 - 8 | 0,33 | 3     |
|                            |                       | Corrida    | 7,5   | 4,0  | 14,7              | 4,0               | 12,0              |                   |       |      |       |
|                            |                       | Quadrada   | 7,5   | 1,0  |                   |                   |                   |                   |       |      |       |
| Omar <i>et al.</i> (1993b) | Geogrelha             | Retangular | 7,5   | 2,0  | 14,7              | 4,0               | 12,0              | 0,33              | 8     | 0,33 | 6 - 7 |
|                            |                       | Corrida    | 7,5   | 4,0  |                   |                   |                   |                   |       |      |       |
| Das e Omar (1994)          | Geogrelha             | Corrida    | 10,0  | 3,0  | 19,6              | 3,0               | 9,0               | 0,33              | 8     | 0,33 | -     |
|                            |                       |            | 12,5  | 2,4  | 15,7              | 2,4               | 7,2               |                   |       |      |       |
|                            |                       |            | 15,0  | 2,0  | 13,1              | 2,0               | 6,0               |                   |       |      |       |
|                            |                       |            | 17,5  | 1,7  | 11,2              | 1,7               | 5,1               |                   |       |      |       |
| Khing <i>et al.</i> (1994) | Geogrelha             | Corrida    | 7,5   | 2,0  | 12,3              | 2,0               | 12,2              | 0,67              | 6     | 0,67 | -     |

Tabela 6 - Resumo dos principais estudos experimentais de fundação reforçada (parte 2) (Corrêa, 2021)

| Referência                 | Reforço                      | Sapata     |        |     | Tanque            |                   |                   | Parâmetros Ótimos |       |             |       |
|----------------------------|------------------------------|------------|--------|-----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|-------------|-------|
|                            |                              | Tipo       | B (cm) | L/B | B <sub>t</sub> /B | L <sub>t</sub> /B | Z <sub>t</sub> /B | u/B               | b/B   | h/B         | N     |
| Yetimoglu et al. (1994)    | Geogrelha                    | Retangular | 10,0   | 1,3 | 7,0               | 7,0               | 10,0              | 0,25              | 4,5   | 0,20        | -     |
|                            |                              |            | 30,0   | 1,0 |                   |                   |                   |                   |       |             |       |
| Adams e Collin (1997)      | Geogrelha e Geocélula        | Quadrada   | 45,0   | 1,0 |                   |                   | Ensaio no campo   | 0,48              | -     | 0,25 - 1,50 | 3     |
|                            |                              |            | 60,0   | 1,0 |                   |                   |                   |                   |       |             |       |
|                            |                              |            | 90,0   | 1,0 |                   |                   |                   |                   |       |             |       |
| Alawaji (2001)             | Geogrelha                    | Circular   | 10,0   | -   | 4,5               | -                 | 3,5               | 0,10              | 4     | 0,10        |       |
| Boushehrian (2003)         | Geogrelha                    | Circular   | 15,0   | -   | 6,7               | -                 | 6,7               | 0,47              | -     | 0,20        | 3     |
| Chen et al. (2004)         | Geogrelha e Geotêxtil        | Quadrada   | 15,0   | 1,0 | 10,0              | 6,0               | 6,0               | 0,33              | 6     | 0,33        | 5     |
| Dash et al. (2004)         | Geogrelha e Geocélula        | Corrida    | 10,0   | 3,3 | 12,0              | 3,3               | 7,0               | 0,30              | 8     | 0,30        | 6     |
| Sitharam e Sireesh (2004)  | Geogrelha                    | Circular   | 15,0   | -   | 6,0               | 6,0               | 4,0               | 0,30              | 6     | 0,40        | 6     |
| Patra et al. (2005)        | Geogrelha                    | Corrida    | 8,0    | 4,5 | 10,0              | 4,5               | 8,8               | 0,35              | 5     | 0,25        | 4     |
| Chung e Cascante (2006)    | Fibra de Vidro e de Alumínio | Quadrada   | 8,5    | 1,0 | 5,9               | 5,9               | 7,1               | 0,15 - 0,30       | 2 - 3 | 0,15 - 0,30 | 2 - 4 |
|                            |                              |            | 3,0    | -   | 14,7              | 14,7              | 7,0               |                   |       |             |       |
| Basudhar et al. (2007)     | Geotêxtil                    | Circular   | 4,0    | -   | 11,0              | 11,0              | 5,3               | 0,25              | 3,5   | 1,00        | 3     |
|                            |                              |            | 5,0    | -   | 8,8               | 8,8               | 4,2               |                   |       |             |       |
|                            |                              |            | 6,0    | -   | 7,3               | 7,3               | 3,5               |                   |       |             |       |
| Boushehrian e Hataf (2008) | Geogrelha                    | Circular   | 15,0   | -   | 6,7               | -                 | 6,7               | 0,20              | -     | 0,20        | 3     |
| Alamshahi e Hataf (2009)   | Geogrelha                    | Corrida    | 10,0   | 5,0 | 13,0              | 5,0               | 6,0               | 0,75              | -     | 0,75        | -     |

Tabela 6 - Resumo dos principais estudos experimentais de fundação reforçada (parte 3) (Corrêa, 2021)

| Referência                  | Reforço                            | Sapata     |        |     | Tanque            |                   |                   | Parâmetros Ótimos |       |             |   |
|-----------------------------|------------------------------------|------------|--------|-----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|-------------|---|
|                             |                                    | Tipo       | B (cm) | L/B | B <sub>t</sub> /B | L <sub>t</sub> /B | Z <sub>t</sub> /B | u/B               | b/B   | h/B         | N |
| Latha e Somwanshi (2009)    | Geogrelha                          | Quadrada   | 15,0   | 1,0 | 6,0               | 6,0               | 4,0               | 0,10              | 5 - 6 | 0,50        | 4 |
| El Sawwaf e Nazir (2010)    | Geogrelha                          | Retangular | 8,0    | 1,5 | 7,5               | 10,0              | 7,5               | 0,30              | 5     | 0,60        | 3 |
| Tafreshi et al. (2011)      | Geogrelha                          | Corrida    | 10,0   | 2,2 | 10,0              | 2,2               | 10,0              | 0,35              | 4 - 5 | 0,35        | 5 |
| El Sawwaf e Nazir (2012)    | Geogrelha                          | Corrida    | 8,0    | 6,3 | 12,5              | 6,3               | 6,3               | -                 | -     | 0,50        | 3 |
| Abu-Farsakh et al. (2013)   | Geogrelha, Geotêxtil e Geocomposto | Quadrada   | 15,0   | 1,0 | 10,0              | 6,0               | 6,0               | 0,33              | 6     | 0,33        | 3 |
|                             |                                    | Retangular | 15,0   | 1,7 | -                 | -                 | -                 | -                 | -     | -           | - |
| Demir et al. (2013)         | Geogrelha                          | Circular   | 30,0   | -   | Ensaio no campo   |                   |                   | 0,10 - 0,50       | -     | 0,15 - 0,30 | - |
| Biswas et al. (2015)        | Geogrelha                          | Circular   | 15,0   | -   | 6,7               | 6,7               | 6,7               | -                 | 6     | -           | - |
| Cicek et al. (2015)         | Geogrelha e Geotêxtil              | Corrida    | 10,0   | 5,0 | 10,0              | 5,0               | 10,0              | -                 | 5     | -           | - |
| Kazi et al. (2015)          | Geotêxtil                          | Corrida    | 8,0    | 5,0 | 15,0              | 5,0               | 10,0              | 0,30              | 4 - 6 | 0,30        | 3 |
| Harikumar et al. (2016)     | Plástico ABS                       | Quadrada   | 15,0   | 1,0 | 5,0               | 5,0               | 5,0               | 0,50              | -     | 0,50        | 4 |
| Prasad et al. (2016)        | Geogrelha                          | Quadrada   | 20,0   | 1,0 | 5,0               | 5,0               | 5,0               | 0,30 - 0,45       | 5     | -           | - |
| Tafreshi et al. (2016)      | Geotêxtil e Geocélula              | Circular   | 11,0   | -   | 9,1               | 9,1               | 9,1               | -                 | -     | 0,36 - 0,40 | - |
| Badakhshan e Noorzad (2017) | Geotêxtil                          | Circular   | 12,0   | -   | 6,7               | 6,7               | 6,7               | 0,40              | -     | 0,40        | 3 |
|                             |                                    | Quadrada   | 11,0   | 1,0 | 7,3               | 7,3               | 7,3               | -                 | -     | -           | - |
| Suku et al. (2017)          | Geogrelha                          | Circular   | 15,0   | -   | 10,0              | 10,0              | 6,7               | 0,33              | 3     | -           | - |

Tabela 6 - Resumo dos principais estudos experimentais de fundação reforçada (parte 4) (Corrêa, 2021)

| Referência             | Reforço   | Sapata   |          | Tanque |         |         | Parâmetros Ótimos |       |       |       |     |     |     |
|------------------------|-----------|----------|----------|--------|---------|---------|-------------------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|
|                        |           | Tipo     | $B$ (cm) | $L/B$  | $B_t/B$ | $L_t/B$ | $Z_t/B$           | $u/B$ | $b/B$ | $h/B$ | $N$ |     |     |
| El-Soud e Belal (2018) | Geogrelha | Corrida  | 7,5      | 5,1    | 16,0    | 5,3     | 16,0              | 0,25  | 7,5   | -     | -   |     |     |
|                        |           |          | 10,0     | 3,8    | 12,0    | 4,0     | 12,0              |       |       |       |     |     |     |
|                        |           |          | 12,0     | 3,2    | 10,0    | 3,3     | 10,0              |       |       |       |     |     |     |
| Roy e Deb (2018)       | Geogrelha | Quadrada | 7,5      | 1,0    | 12,0    | 12,0    | 8,0               | -     | 4 - 5 | -     | -   |     |     |
|                        |           |          | 7,5      | 1,5    |         |         |                   |       |       |       |     |     |     |
|                        |           |          | 7,5      | 2,0    |         |         |                   |       |       |       |     |     |     |
|                        |           |          | 10,0     | 1,5    |         |         |                   |       |       |       |     | 9,0 | 6,0 |
|                        |           |          | 15,0     | 1,0    |         |         |                   |       |       |       |     | 6,0 | 4,0 |
| Lopes (2019)           | Geogrelha | Corrida  | 2,0      | 2,5    | 10,0    | 2,5     | 10,0              | 0,4   | 5     | -     | -   |     |     |
|                        |           |          |          |        |         |         |                   |       |       |       |     |     |     |

onde,  $B$  é a largura da fundação,  $L$  é o comprimento da fundação,  $B_t$ ,  $L_t$  e  $Z_t$  são, respectivamente, a largura, o comprimento e a profundidade do tanque de ensaio,  $u$  é a profundidade da primeira camada de reforço,  $b$  é a largura do geossintético,  $h$  é o espaçamento entre camadas de reforço e  $N$  é o número de reforços.

## 2.5. 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 2.45:

$$BCR = \frac{q_r}{q_{ult}} \quad (2.45)$$

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

Vertematti (2004) aponta que os geossintéticos, como reforços de fundações, têm um paralelo bastante próximo com os reforços geossintéticos de rodovias, tal como proposto por Giroud e Noiray (1981). No referido estudo, avalia-se a redução das espessuras dos lastros de vias não-pavimentadas decorrente da instalação de geossintéticos em sua base. As análises são baseadas em ensaios e avaliações teóricas e mostram reduções que variam de 20 a 60% de tais espessuras.

É extenso o número de trabalhos que analisam a melhoria da capacidade de carga devido à inclusão de material geossintético. Dentre os primeiros autores a pesquisarem a inclusão de geotêxteis no solo, destacam-se Brown e Poulos (1981), seguidos por Schlosser et al. (1983) e Guido et al. (1985).

Muitos destes autores estudaram a influência do número de camadas e a distância ideal para a colocação da primeira camada de reforço, mantendo os demais parâmetros fixos. Através dos dados obtidos, pôde-se verificar que, para pequenas deformações, a posição da primeira camada de reforço não exerce influência na

capacidade de carga do solo. Já para maiores deformações, quanto mais distante da fundação estiver a primeira camada de reforço, menor será sua eficácia.

As pesquisas buscam avaliar como se comportam as influências dos parâmetros intrínsecos do modelo na melhoria do BCR (*Bearing Capacity Ratio*), tais como distância da primeira camada de reforço, embutimento da fundação, distância entre as camadas de reforço, tipo de solo do modelo, comprimento e número de camadas de reforço, tipos de reforços empregados, entre demais outros parâmetros.

Os ensaios em modelos reduzidos de Fragaszy e Lawton (1984) foram realizados buscando uma melhor compreensão dos efeitos da densidade relativa do solo arenoso empregado no estudo e do comprimento do reforço no processo de melhoria da capacidade de carga. Os resultados mostraram que a compactação eleva o atrito na interface solo-reforço melhorando a capacidade de suporte do solo.

Fragaszy e Lawton (1984) também concluíram que um aumento no comprimento total do geossintético resulta no crescimento da capacidade de carga do solo, até que se atinja um valor limite no comprimento total, em torno de 6 a 7 vezes a largura da sapata. Salientando que tais resultados se referem a modelos reduzidos, e analisam um dado tipo de solo, e que em condições reais é preciso considerar todos os parâmetros envolvidos na obra, como o atrito na interface solo-reforço, a tensão normal atuando no plano do reforço, o ângulo de atrito do solo, entre outros fatores.

Das (1989) estudou o ganho de capacidade de carga para modelos reduzidos de sapatas corridas e quadradas, apoiadas em uma camada de areia sobre uma camada de argila mole, aplicando um geotêxtil na interface entre as duas camadas. Tal modelo revelou que, para sapatas corridas (estado plano de deformações), o reforço apresenta melhor comportamento. Os resultados encontrados por Das (1989) revelaram um comprimento de ancoragem ideal em torno de 4 vezes a largura da sapata.

Esses resultados foram posteriormente confirmados por Khing et al. (1994), que realizaram ensaios com arranjo semelhante ao anteriormente citado, mas usando geogrelhas. Khing et al. (1994) em seus estudos mostraram ganhos de 20 a 25% na capacidade de carga, para uma camada única de reforço.

Manjunath e Dewaikar (1996), também com ensaios similares a Khing et al. (1994), mostraram ganhos de capacidade crescentes em função da inclinação da carga aplicada. Para cargas verticais, o ganho é de 30%, passando a 52% com cargas com inclinação de 15°.

Omar et al. (1993a), apresentaram estudos em modelos reduzidos de sapatas apoiadas em areias puras, nos quais avaliam diversos parâmetros geométricos, como comprimento de ancoragem, relação entre os lados da sapata, quantidade de camadas de reforço, espessura da camada reforçada, distância da primeira camada e espaçamento entre as camadas de reforço. Os resultados revelaram aumento do suporte em até 4 vezes, e importantes conclusões sobre as características dos parâmetros geométricos em função da geometria da fundação.

Shin et al. (1993) realizaram ensaios similares aos de Omar (1993a), mas usando solo argiloso e avaliando apenas a situação de sapata corrida. Os resultados indicaram que a profundidade ideal da primeira camada de reforço é de  $0,4B$ , independentemente do comprimento de ancoragem, sendo o valor ideal deste último situado entre  $4,5$  e  $5B$ . Também concluíram que a introdução de elementos de reforço a uma profundidade superior a  $1,8B$ , não gera influência na melhoria da capacidade de carga.

Nataraj et al. (1996) exibiram resultados de simulações numéricas. Em suas análises, variaram as dimensões da sapata, as quantidades e dimensões dos reforços. Os resultados mostraram ganho na capacidade de carga da ordem de 25% a 70%, além de indicarem ganhos maiores para fundações menores.

Dawson e Lee (1988) realizaram ensaios em modelos de verdadeira grandeza ( $15,00 \times 0,75$  m) em local com solo argiloso mole. Os autores ensaiaram uma fundação reforçada e outra não reforçada para efeito de comparação. No ensaio sem reforço, o solo local foi compactado em camadas, a fim de reproduzir a solução de uma fundação tradicional em solo compactado. As fundações foram submetidas a um carregamento inicial de 33 kPa, mantidas por cerca de 36 meses. Posteriormente foram submetidas a um carregamento de 66 kPa em sua parte central por cerca de 14 meses. Os resultados mostraram uma redução do recalque diferencial ao longo da largura da fundação de 4,5 cm para 2,0 cm. Foi verificado também que o reforço contribui principalmente para a redução das deformações para carregamentos de longa duração.

Na comparação do modelo de verdadeira grandeza com os modelos reduzidos encontrados na literatura, os autores concluíram que existe coerência dos resultados. Exceto para as deformações do solo, que em campo foram de cerca de 60% menores que as deformações dos modelos reduzidos.

Pospisil e Zednik (2002) registram resultados de ensaios em modelos reduzidos, indicando ganhos de capacidade de carga da ordem de 30 a 40% para solos reforçados com apenas uma camada de geossintético. Esses autores também concluem que a influência do reforço está relacionada à sua distância da fundação: a partir de certa profundidade, a influência passa a ser desprezível.

Shin et al. (2002) apresentam estudo de modelo reduzido, avaliando o aumento do módulo cisalhante do solo ( $G$ ), em função da quantidade de camadas de reforço. Eles esclarecem que existe uma clara relação entre ganho de módulo (ou seja, redução de recalques) e quantidade de camadas de reforço, e que estudos adicionais são necessários.

Em função da ampla área de pesquisa dos solos reforçados, é possível encontrar, ainda, grande quantidade de estudos relevantes. De maneira geral, todos os estudos citados indicam diminuição do ponto de vista da deformabilidade, bem como aumento do ponto de vista da capacidade de carga, mas segundo Fabrin e Queiroz (1999), que apresentam resultados de comparações entre modelos numéricos e reduzidos, existe a recomendação de que o comportamento dos solos reforçados precisa ser mais estudado.

## **2.6. Sistemas inteligentes**

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).

### **2.6.1. Lógica Booleana**

A lógica booleana apareceu durante o século XIX, que foi justamente uma das épocas de maior desenvolvimento da história da matemática desde os tempos da Idade antiga (Boyer, 1968). A definição desta lógica passa por diversos conceitos e leis definidas para expressar em termos algébricos uma forma de raciocínio humano.

Segundo o ponto de vista booleano, um elemento está dentro ou fora de um dado conjunto. Os conjuntos são considerados como sistemas bivalentes com seus próprios estados alternando entre inclusão ou exclusão. Portanto, um elemento tem grau de pertinência 0 se não pertencer ao conjunto, e grau de pertinência 1, se o elemento pertencer ao conjunto.

Segundo Moreira et al. (2002), a álgebra booleana é uma estrutura algébrica que captura as propriedades essenciais dos operadores lógicos e de conjuntos ou, ainda, oferece uma estrutura para se lidar com afirmações. Com base no Diagrama de Venn, é possível observar a aplicação de operadores utilizados nesse tipo de algoritmo. Ele utiliza ferramentas lógicas AND (interseção), OR (união), NOT (negação) e XOR (exclusão) como representado na Figura 19

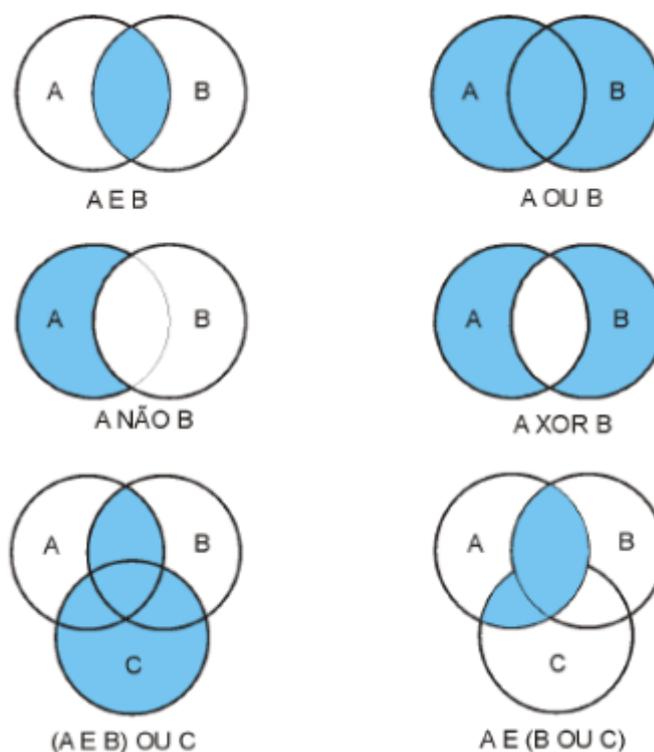


Figura 19 - Diagrama de Venn. (Fonte: Moreira et al., 2002).

### 2.6.2. Redes Neurais

As redes neurais representam uma tecnologia que tem raízes em muitas disciplinas: neurociência, matemática, estatística, física, ciência da computação e engenharia. Uma rede neural “artificial” é um dispositivo capaz de processar informação de forma distribuída e de incorporar conhecimento através de exemplos.

A motivação da construção de uma rede neural nasceu da ideia de modelar a rede de neurônios humanos visando compreender o funcionamento do cérebro. Portanto, uma rede neural artificial se assemelha ao cérebro humano em dois aspectos: o conhecimento é adquirido pela rede a partir de seu ambiente, através de um processo de aprendizagem e os pesos sinápticos, que são as forças de conexão entre neurônios, são utilizados para armazenar o conhecimento adquirido (Haykin, 1994)

Redes neurais artificiais (RNAs) têm sido usadas em engenharia geotécnica para previsões de características geotécnicas de solos a partir de propriedades previamente conhecidas. Desde o trabalho de Rumelhart, Hilton e Williams (1986) sobre o algoritmo backpropagation, a aplicação de RNAs ganhou destaque no meio acadêmico, com publicações sobre o uso de RNAs na solução de problemas geotécnicos com relativo sucesso.

Haykin (1994) diz que a aplicação de uma rede neural obedece à necessidade de uso de uma técnica de otimização de processamento de dados diversos para a solução de um problema. Por essa razão, o conjunto de dados de entrada deve ser escolhido com atenção, de forma a ser representativo no domínio de interesse do problema a ser estudado. Superadas as etapas de seleção dos dados representativos do problema a ser modelado, topologia da rede e pré-processamento das variáveis de entrada e saída, segue-se para a fase de treinamento e teste da rede, que consiste em atividade de definição dos pesos adequados para melhorar o desempenho da RNA.

### **2.6.3. Lógica *Fuzzy* (lógica nebulosa)**

As primeiras noções da Lógica *Fuzzy*, segundo Abar (2004), foram desenvolvidas por um lógico polonês Jan Lukasiewicz (1878-1956), em 1920, que introduziu conjuntos com graus de pertinência de 0, 1/2 e 1, sendo posteriormente expandido para um número infinito de valores entre 0 e 1. Em 1965, Lotfi Asker Zadeh escreveu a primeira publicação sobre Lógica *Fuzzy*, para tratar e representar incertezas, em que constava a combinação de conceitos da lógica clássica e os conjuntos de Lukasiewicz, definindo assim os graus de pertinência. A Lógica *Fuzzy* representa a generalização da lógica Aristotélica-Fregiana, na qual são admitidos valores lógicos intermediários entre a falsidade e a verdade (como o talvez).

Hortegal (2016) afirma que a importância da Lógica *Fuzzy* deve-se à alta variabilidade de fatos que não são absolutos em sua totalidade, uma vez que esses oscilam entre dados absolutamente verdadeiros ou absolutamente falsos, e por apresentar em sua teoria fundamentos de origem nos conjuntos nebulosos, permitem a manipulação de valores não precisos e expressões verbais abstratas.

A primeira aplicação da Lógica *Fuzzy* foi em 1983, em um sistema de tratamento de água feito pela Fuji Electric, seguida em 1987 no sistema de metrô inaugurado pela Hitachi. Em 1990, a Lógica *Fuzzy* despertou maior interesse em empresas dos Estados Unidos, devido ao desenvolvimento e às inúmeras possibilidades, práticas dos sistemas *Fuzzy*, além do grande sucesso comercial de suas aplicações. Atualmente, este sistema inteligente é considerado uma técnica de grande utilização e de ampla aceitação na área de controle de processos industriais.

A utilização da Lógica *Fuzzy* permite que o usuário responda a uma tomada de decisão de forma rápida e efetiva, permitindo proporcionar uma maior capacidade de entendimento e aceitação de uma determinada situação a que está sendo submetido, uma vez que ela se fundamenta no princípio da dualidade, segundo o qual dois eventos opostos podem coexistir, transformando os paradoxos em meias verdades ou meias mentiras. O verdadeiro (1) e o falso (0) são substituídos por graus de pertinência que podem assumir qualquer valor entre 0 e 1. Neste contexto, o valor 1/2 descreve um paradoxo.

Como o uso de sistemas inteligentes na solução de problemas é cada vez mais amplo, em virtude da ausência de certezas quanto a alguns aspectos, busca-se a aproximação da lógica com o raciocínio humano através de respostas aproximadas aos problemas, por isso o grande foco desta lógica é a solução de problemas cuja informação presente seja incerta. A Lógica *Fuzzy* também é utilizada em problemas de inteligência artificial, envolvendo o desenvolvimento de projetos orientados a objetos e tecnologias tão diversas quanto às redes neurais, aos algoritmos genéticos e a teoria do caos (Hortegal, 2016).

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.

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).

As funções de pertinência *Fuzzy* representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de sistemas *Fuzzy*, podendo ser uma função numérica gráfica ou tabulada que atribui valores de pertinência *Fuzzy* para valores de uma variável linguística em seu conjunto universo. O universo da variável representa o intervalo numérico de todos os possíveis valores reais que uma variável específica pode assumir (Godinho *et. al*, 2021b).

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.

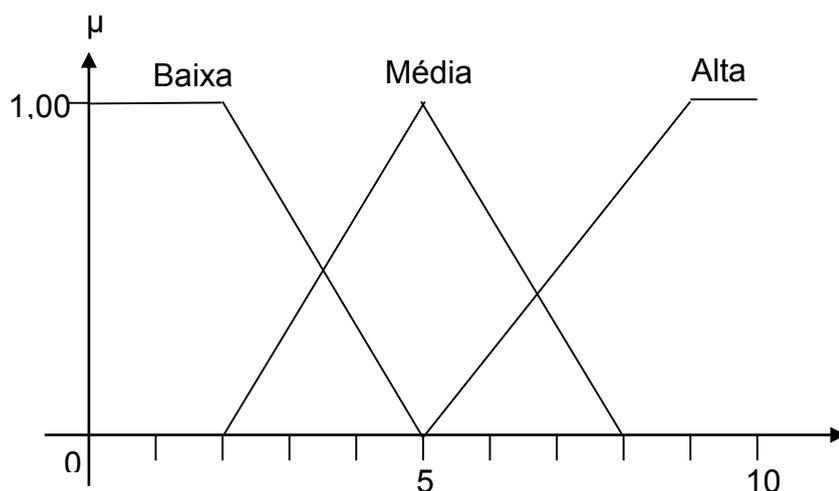
Por exemplo, no trabalho de Ramos (2015) foram feitas as análises das capacidades de carga dos métodos de estimativa através da inserção das variáveis incertas *fuzzificadas*. Foram avaliadas a comparação dos resultados com as capacidades de carga reais, determinadas por ensaios de prova de carga. O resultado foi interpretado por uma metodologia da ferramenta *Fuzzy* e apresentada na forma linguística.

Ramos (2015) utilizou uma simples metodologia para conduzir a análise do fator de segurança de projeto em função de suas incertezas. A análise foi realizada considerando os fundamentos da Lógica *Fuzzy*. As incertezas consideradas nas análises são as variáveis *Fuzzy*, ou seja, as variáveis linguísticas representadas por um conjunto de termos linguísticos. Os Termos Linguísticos ou Conjuntos *Fuzzy* (*Fuzzy Sets*) são representações verbais que expressam uma qualidade da variável *Fuzzy* a qual está associada. Deste modo, as variáveis e seus respectivos termos linguísticos escolhidos para uma abordagem visando compatibilizar o fator de segurança com as condições de projeto, são por exemplo:

- Variabilidade dos parâmetros: baixa, média e alta;
- Método de determinação dos parâmetros: pouco confiável, medianamente confiável e confiável;
- Condições de subsolo: pouco favorável, medianamente favorável e favorável;
- Experiência do projetista na região: baixa, média e alta;

A cada termo linguístico é associada uma função de pertinência, que é uma função que faz o mapeamento dos valores de pertinência relacionados a cada valor do domínio físico da variável linguística, associando-os a um termo linguístico em particular. O domínio físico é a faixa de possíveis valores instantâneos que uma variável pode assumir e o valor instantâneo é o número que representa a variável *Fuzzy* em questão, na sua unidade real. Neste sentido, as funções de pertinência são apresentadas em uma escala de 0 a 10, onde esta faixa representa a qualidade das variáveis em função dos termos linguísticos.

As Figuras 20 e 21 foram apresentadas por Ramos (2015) e ilustram um gráfico difuso (pertinência) para representar a variabilidade dos parâmetros e a experiência do projetista na região de implantação do projeto e um gráfico difuso para representar a confiabilidade dos métodos de determinação dos parâmetros e das condições de subsolo, respectivamente.



**Figura 20. Variabilidade dos Parâmetros e Experiência do Projetista (Ramos, 2015).**

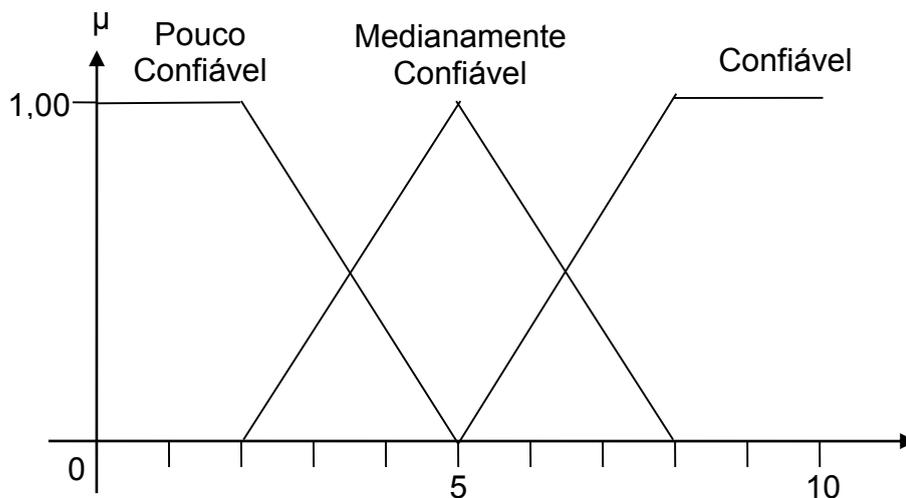


Figura 21. Variabilidade dos Parâmetros e Experiência do Projetista (Ramos, 2015).

Embora exibam funções de pertinência idênticas, as Figuras 20 e 21 têm uma diferença conceitual importante, uma vez que os termos linguísticos as emprestam características distintas.

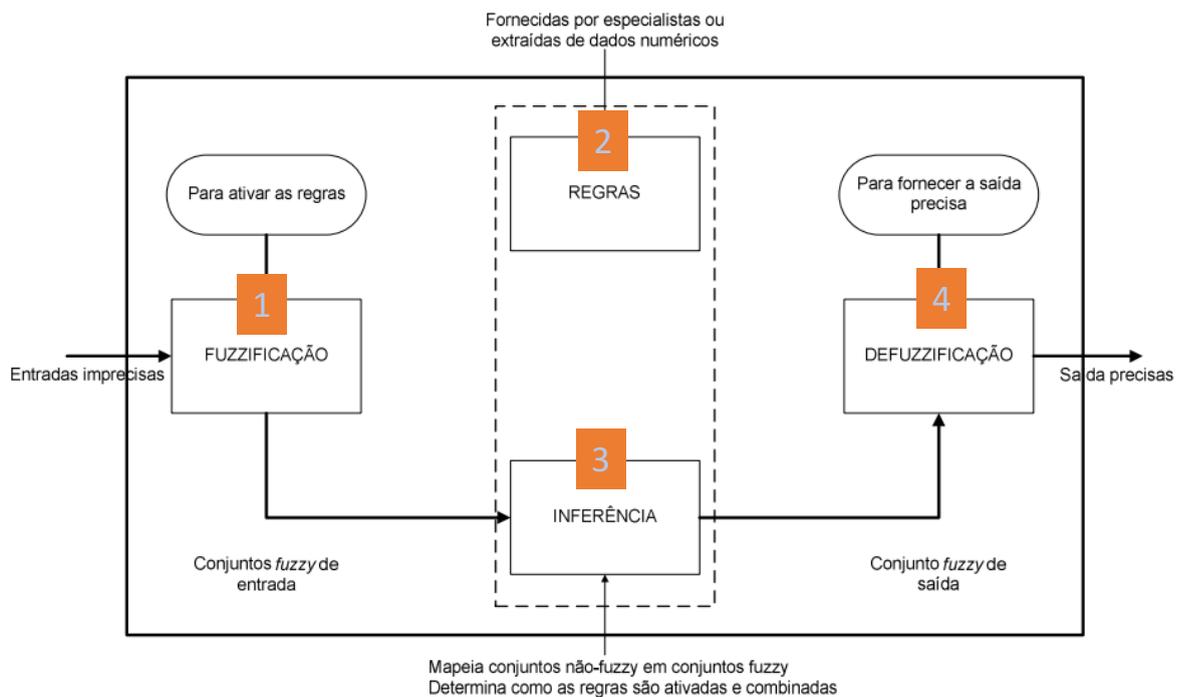
A definição das funções de pertinência deve ser feita para todas as variáveis envolvidas e impactantes no projeto. Após essa etapa é necessário determinar um conjunto de regras que definem o comportamento das variáveis em função de outras. As regras representam o conhecimento do sistema. Conhecendo-se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

Os blocos de regras contêm o controle da estratégia de um sistema de Lógica *Fuzzy*. Cada bloco de regras limita todas as regras para um mesmo contexto. Um contexto é definido pelas mesmas variáveis de entrada e de saída das regras.

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.

De forma geral, um Sistema de Lógica *Fuzzy* é composto por quatro partes, conforme descrito a seguir e esquematizado na Figura 22:

- 1) **Fuzzificador:** sua função é transformar os valores determinísticos de entrada em valores *Fuzzy*;
- 2) **Base de regras *Fuzzy*:** representa o conhecimento do problema mediante regras da forma: SE-ENTÃO;
- 3) **Área de inferência:** estabelece a relação entre as variáveis *Fuzzy* de entrada e Saída;
- 4) **Defuzzificador:** transforma os valores *Fuzzy* de saída em valores determinísticos.



**Figura 22. Diagrama do sistema da lógica *Fuzzy*.**

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 defuzzificação.

#### 2.6.4. Lógica convencional X Lógica Fuzzy

A teoria clássica de conjuntos permite o tratamento de classes de objetos e suas interrelações em um universo definido. Nessa teoria, a pertinência de um dado elemento com relação a um conjunto refere-se ao fato de tal elemento pertencer ou não a esse conjunto. De forma ilustrativa, considere o gráfico apresentado no lado esquerdo da Figura 23, que representa um exemplo típico da teoria clássica e descreve a altura de uma pessoa através de três conjuntos: baixo, médio e alto. Nesse exemplo, dado um elemento  $x$  qualquer, o mesmo pertencerá a um dos conjuntos do gráfico; por exemplo, se  $x = 1,65$ , então  $x$  pertence ao conjunto médio e não aos demais, ou seja, um elemento pertence ou não a um determinado conjunto e, além disso, tal elemento não pertence a mais de um conjunto (Lopes *et al.* 2020).

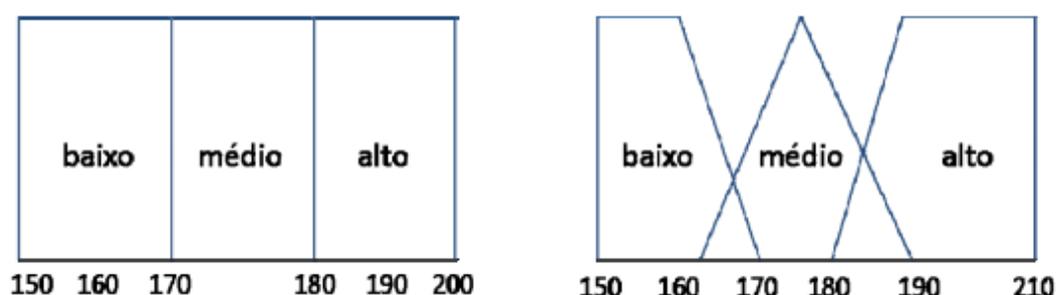


Figura 23. Representação na forma de conjuntos da altura de uma pessoa, sob o ponto de vista da Lógica convencional (à esquerda) e do da Lógica Fuzzy (à direita) - Lopes *et al.* (2020).

Ao contrário da Lógica convencional, a Lógica Fuzzy utiliza a ideia de que todas as coisas admitem (temperatura, altura, velocidade, etc.) graus de pertinências. Com isso, a Lógica Fuzzy tenta modelar o senso de palavras, a tomada de decisão ou o senso comum do ser humano. Ainda tomando como exemplo o gráfico da Figura 23, dados dois elementos  $x_1 = 1,69$  e  $x_2 = 1,71$ , se a Lógica clássica for utilizada, esses dois elementos pertencem a classes diferentes,  $x_1$  pertencendo à classe médio e  $x_2$  à classe alto. No entanto, na realidade, fica difícil dizer que uma pessoa com 1,69 m e outra com 1,71 m pertencem a classes diferentes.

Por outro lado, na Lógica Fuzzy, tanto o  $x_1$  quanto o  $x_2$  têm graus de pertinências aos conjuntos Fuzzy definidos, que podem variar de 0 a 1. Em outras palavras, enquanto a tomada de decisão, na teoria clássica, seria como a da

Expressão 1, a da Lógica Fuzzy seria como a da Expressão 2, considerando um conjunto A e um elemento x com relação a esse conjunto.

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{se, e somente se, } x \in A \\ 0 & \text{se, e somente se, } x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{se, e somente se, } x \in A \\ 0 & \text{se, e somente se, } x \notin A \\ 0 \leq \mu(x) \leq 1 & \text{se } x \text{ pertence parcialmente a } A \end{cases} \quad (2)$$

Dessa forma, a Lógica Fuzzy pode ser considerada como um conjunto de princípios matemáticos para a representação do conhecimento baseado no grau de pertinência dos termos (graus de verdade). Como pode ser observado na expressão 2, o intervalo de pertinência é [0,1], onde 0 significa que um elemento não pertence a um determinado conjunto, 1 significa completa pertinência ao conjunto, e valores entre 0 e 1 representam graus parciais de pertinências. Assim, na Lógica Fuzzy, um elemento pertence a um conjunto com um certo grau de pertinência, fazendo com que uma determinada sentença possa ser parcialmente verdadeira e parcialmente falsa. Além do mais, um mesmo elemento pode ter graus de pertinências diferentes de 0 para mais de um conjunto Fuzzy (Lopes *et al.* 2020).

### 2.6.5. Rede Neural X Lógica Fuzzy

A rede neural é um sistema de processamento de informações inspirado na maneira como os sistemas nervosos biológicos, como o cérebro, processam as informações. Uma rede neural é composta por um grande número de elementos de processamento interconectados, conhecidos como neurônios, que são usados para resolver problemas. Uma rede neural é uma tentativa de fazer um modelo de computador do cérebro humano e as redes neurais são dispositivos de computação paralela. O diagrama simples da rede neural é mostrado na Figura 24.

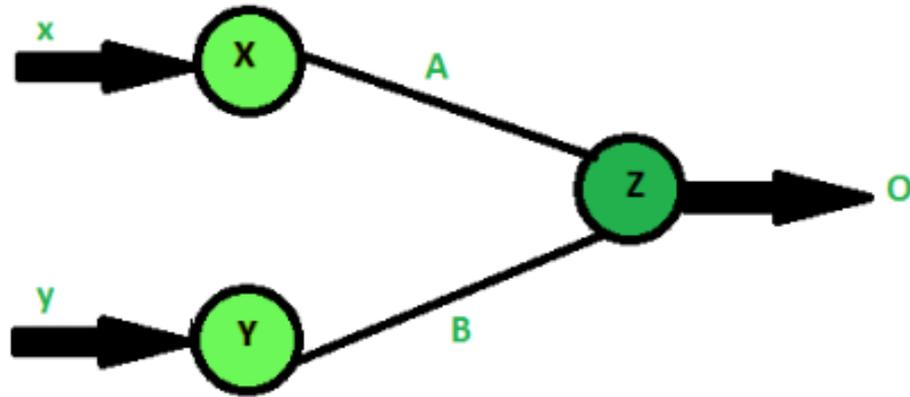


Figura 24 – Diagrama simples da rede neural.

O termo Fuzzy representa as coisas que não são claras. No mundo real, muitas vezes, encontramos uma situação em que não podemos determinar se o estado é verdadeiro ou falso, sua lógica difusa fornece uma flexibilidade muito valiosa para o raciocínio. Desta forma, podemos considerar as imprecisões e incertezas de qualquer situação. O diagrama simples da Lógica Fuzzy é mostrado na Figura 25.

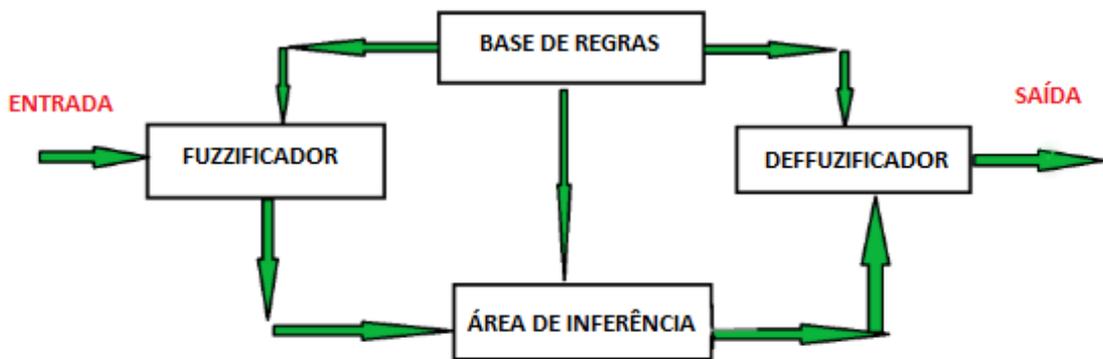


Figura 25 – Diagrama simples da lógica fuzzy.

Algumas diferenças básicas entre a rede neural e a Lógica Fuzzy estão relacionadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Diferença entre rede neural e lógica fuzzy.

| REDE NEURAL  | LÓGICA FUZZY   |
|--|--|
| Este sistema não pode ser modificado facilmente                        | Este sistema pode facilmente ser modificado                                      |
| Ele se treina aprendendo com o conjunto de dados                       | Tudo deve ser definido explicitamente  |
| É mais complexo que a Lógica Fuzzy<br>Ajuda na realização de previsões | É mais simples que a rede Neural<br>Ajuda a realizar o reconhecimento de padrões |
| Difícil de extrair conhecimento  | O conhecimento pode ser facilmente extraído                                      |
| É baseado na aprendizagem  | Não se baseia na aprendizagem  |

### 3. METODOLOGIA

A metodologia adotada nessa dissertação foi dividida nas seguintes etapas:

- Análise dos dados que influenciam na tomada de decisão sobre a escolha do tipo de fundação a ser utilizada.
- Variáveis linguísticas de entrada e saída.
- Definição das regras de fuzzyficação.
- Elaboração do sistema inteligente (modelagem *Fuzzy*).

#### 3.1 Análise dos dados que influenciam na tomada de decisão da escolha do tipo de fundação a ser utilizada

Em uma análise para tomada de decisão sobre que tipo de fundação utilizar, levam-se em consideração diferentes fatores que dependem de inúmeras variáveis, sendo algumas delas: densidade do solo, nível do lençol freático, quantidade de ensaios realizados, capacidade de carga do solo, carga de serviço, resistências das camadas até uma determinada profundidade, entre outras.

Este estudo leva em consideração 6 diferentes variáveis que, em conjunto, pode-se, com uma alguma certeza, indicar a melhor metodologia de projeto de fundações com diferentes combinações dos dados apresentados. Estas variáveis são:

- Densidade do solo (solos arenosos);
- Capacidade de carga do solo;
- Resistência ao longo da profundidade;
- Tensão aplicada;
- Fator de segurança e;
- Fator de melhoria de carga *BCR*.

### 3.1.1 Densidade do solo (solos arenosos)

Segundo a NBR 7250/82, nas amostras obtidas em sondagens, a nomenclatura do solo deve ser feita conforme o comportamento da fração predominante, adjetivada com a fração de solo que puder também ser identificada. A nomenclatura deve, ainda, ser acompanhada pela indicação da cor do material logo após a coleta e pela designação claro ou escuro

Este trabalho restringe-se ao comportamento de solos arenosos, portanto, as análises aqui discutidas não são aplicadas em outro tipo de solo.

A Tabela 8 mostra a classificação dos solos através do índice de resistência à penetração do solo, conforme a NBR 7250-82.

**Tabela 8 - Classificação dos solos (NBR 7250-82)**

| Solo     | Índice de resistência à penetração | Designação              |
|----------|------------------------------------|-------------------------|
| Areia    | $\leq 4$                           | fofa (o)                |
| e        | 5 a 8                              | pouco compacta (o)      |
| silte    | 9 a 18                             | mediamente compacta (o) |
| arenoso  | 19 a 40                            | compacta (o)            |
|          | $> 40$                             | muito compacta (o)      |
| Argila   | $\leq 2$                           | muito mole              |
| e        | 3 a 5                              | mole                    |
| silte    | 6 a 10                             | média (o)               |
| argiloso | 11 a 19                            | rija (o)                |
|          | $> 19$                             | dura (o)                |

### 3.1.2 Capacidade de carga do solo

Para o cálculo de capacidade de carga de solos arenosos, foi considerada a teoria de Terzaghi (1943):

$$\sigma_r = cN_c + qN_q + \frac{1}{2}\gamma BN_y \quad (2.46)$$

Com as proposições de Vesic (1975):

$$\sigma_r = cN_cS_c + qN_qS_q + \frac{1}{2}\gamma BN_yS_y \quad (2.47)$$

Este trabalho trata apenas de areias puras - a parcela de coesão não foi considerada para os cálculos de capacidade de carga, sendo assim, a expressão adotada foi:

$$\sigma_r = qN_qS_q + \frac{1}{2}\gamma BN_yS_y \quad (2.48)$$

Para efeito de cálculos deste estudo, adotaram-se, como fatores de forma, os valores unitários da Tabela 9 para sapatas corridas, ou seja, o comprimento L é bem maior do que sua largura B ( $L \geq 5B$ ), o que simplifica os problemas em casos bidimensionais. A profundidade de embutimento da sapata é menor que a largura da sapata ( $h \geq B$ ). Desta maneira, despreza-se a resistência ao cisalhamento da camada de solo logo acima da cota de apoio da base da sapata e considera-se uma sobrecarga  $q = \gamma h$ .

**Tabela 9 - Fatores de forma (De Beer, 1967, *apud* Vesic, 1975)**

| Sapata               | $S_c$   | $S_q$                                    | $S_\gamma$                         |
|----------------------|---|--|------------------------------------|
| Corrida              | 1,00  | 1,00                                     | 1,00                               |
| Retangular           | $1 + \left(\frac{B}{L}\right) \left(\frac{N_q}{N_c}\right)$ | $1 + \left(\frac{B}{L}\right) \tan \phi$ | $1 - 0,4 \left(\frac{B}{L}\right)$ |
| Circular ou Quadrada | $1 + \left(\frac{N_q}{N_c}\right)$                          | $1 + \tan \phi$                          | 0,60                               |

Terzaghi-Peck (1948) também consideram valores unitários para os fatores de forma  $S_c$ ,  $S_q$  e  $S_\gamma$  apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10 - Fatores de forma (Terzaghi-Peck, 1948)**

| Sapata               | $S_c$ | $S_q$ | $S_\gamma$ |
|----------------------|-------|-------|------------|
| Corrida              | 1,00  | 1,00  | 1,00       |
| Retangular           | 1,20  | 1,00  | 0,80       |
| Circular ou Quadrada | 1,20  | 1,00  | 0,60       |

Foram consideradas as correlações de Godoy (1972) para encontrar os valores de ângulo de atrito, tendo como parâmetro o índice de resistência à penetração  $N_{SPT}$ :

$$\phi = 28^\circ + 0,4N_{SPT} \quad (2.49)$$

E peso específico conforme Tabela 11 também utiliza como parâmetro o índice de resistência à penetração  $N_{SPT}$  e a compactidade dos solos arenosos, assim obtendo valores para peso específico em areias secas, úmidas e saturadas.

**Tabela 11 - Peso específico de solos arenosos (Godoy, 1972)**

| $N_{spt}$ | Compactidade        | Peso específico ( $kN/m^3$ ) |       |          |
|-----------|---------------------|------------------------------|-------|----------|
|           |                     | Areia seca                   | Úmida | Saturada |
| <5        | Fofa                |                              |       |          |
| 5 - 8     | Pouco Compacta      | 16                           | 18    | 19       |
| 9 - 18    | Mediamente Compacta | 17                           | 19    | 20       |
| 19 - 40   | Compacta            | 18                           | 20    | 21       |
| >40       | Muito Compacta      |                              |       |          |

Foram utilizados os fatores de capacidade de carga propostos por Vesic (1975) para a determinação da capacidade de carga (Tabela 12), segundo a teoria de Terzaghi (1943) – Equação 2.48.

**Tabela 12 - Determinação da capacidade de carga**

| Nspt | Ø     | Solo Arenoso        | $N_q$  | $N_y$  | $S_q$ | $S_y$ | $\gamma$ | q  | $\sigma_r$ |
|------|-------|---------------------|--------|--------|-------|-------|----------|----|------------|
| 0    | 28,00 | Fofo                | 14,72  | 16,72  | 1,00  | 1,00  | 16       | 16 | 636,80     |
| 1    | 28,40 | Fofo                | 14,72  | 16,72  | 1,00  | 1,00  | 16       | 16 | 636,80     |
| 2    | 28,80 | Fofo                | 16,44  | 19,34  | 1,00  | 1,00  | 16       | 16 | 727,20     |
| 3    | 29,20 | Fofo                | 16,44  | 19,34  | 1,00  | 1,00  | 16       | 16 | 727,20     |
| 4    | 29,60 | Fofo                | 18,40  | 22,40  | 1,00  | 1,00  | 16       | 16 | 832,00     |
| 5    | 30,00 | Pouco Compacto      | 18,40  | 22,40  | 1,00  | 1,00  | 16       | 16 | 832,00     |
| 6    | 30,40 | Pouco Compacto      | 18,40  | 22,40  | 1,00  | 1,00  | 16       | 16 | 832,00     |
| 7    | 30,80 | Pouco Compacto      | 20,63  | 25,99  | 1,00  | 1,00  | 16       | 16 | 953,84     |
| 8    | 31,20 | Pouco Compacto      | 20,63  | 25,99  | 1,00  | 1,00  | 16       | 16 | 953,84     |
| 9    | 31,60 | Mediamente Compacto | 23,18  | 30,22  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 1164,67    |
| 10   | 32,00 | Mediamente Compacto | 23,18  | 30,22  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 1164,67    |
| 11   | 32,40 | Mediamente Compacto | 23,18  | 30,22  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 1164,67    |
| 12   | 32,80 | Mediamente Compacto | 26,09  | 35,19  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 1340,88    |
| 13   | 33,20 | Mediamente Compacto | 26,09  | 35,19  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 1340,88    |
| 14   | 33,60 | Mediamente Compacto | 29,44  | 41,06  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 1547,51    |
| 15   | 34,00 | Mediamente Compacto | 29,44  | 41,06  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 1547,51    |
| 16   | 34,40 | Mediamente Compacto | 29,44  | 41,06  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 1547,51    |
| 17   | 34,80 | Mediamente Compacto | 33,30  | 48,03  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 1790,87    |
| 18   | 35,20 | Mediamente Compacto | 33,30  | 48,03  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 1790,87    |
| 19   | 35,60 | Mediamente Compacto | 37,75  | 56,31  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 2077,66    |
| 20   | 36,00 | Mediamente Compacto | 37,75  | 56,31  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 2077,66    |
| 21   | 36,40 | Mediamente Compacto | 37,75  | 56,31  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 2077,66    |
| 22   | 36,80 | Mediamente Compacto | 42,92  | 66,19  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 2417,49    |
| 23   | 37,20 | Mediamente Compacto | 42,92  | 66,19  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 2417,49    |
| 24   | 37,60 | Mediamente Compacto | 48,93  | 78,03  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 2821,58    |
| 25   | 38,00 | Mediamente Compacto | 48,93  | 78,03  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 2821,58    |
| 26   | 38,40 | Mediamente Compacto | 48,93  | 78,03  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 2821,58    |
| 27   | 38,80 | Mediamente Compacto | 55,96  | 92,25  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 3303,70    |
| 28   | 39,20 | Mediamente Compacto | 55,96  | 92,25  | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 3303,70    |
| 29   | 39,60 | Mediamente Compacto | 64,20  | 109,41 | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 3881,36    |
| 30   | 40,00 | Mediamente Compacto | 64,20  | 109,41 | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 3881,36    |
| 31   | 40,40 | Mediamente Compacto | 64,20  | 109,41 | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 3881,36    |
| 32   | 40,80 | Mediamente Compacto | 73,90  | 130,22 | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 4576,91    |
| 33   | 41,20 | Mediamente Compacto | 73,90  | 130,22 | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 4576,91    |
| 34   | 41,60 | Mediamente Compacto | 85,38  | 155,55 | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 5417,99    |
| 35   | 42,00 | Mediamente Compacto | 85,38  | 155,55 | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 5417,99    |
| 36   | 42,40 | Mediamente Compacto | 85,38  | 155,55 | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 5417,99    |
| 37   | 42,80 | Mediamente Compacto | 99,02  | 186,54 | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 6440,11    |
| 38   | 43,20 | Mediamente Compacto | 99,02  | 186,54 | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 6440,11    |
| 39   | 43,60 | Mediamente Compacto | 115,31 | 224,64 | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 7688,59    |
| 40   | 44,00 | Mediamente Compacto | 115,31 | 224,64 | 1,00  | 1,00  | 17       | 17 | 7688,59    |
| 50   | 48,00 | Compacto            | 222,31 | 496,01 | 1,00  | 1,00  | 18       | 18 | 17393,8    |

### 3.1.3 Resistência ao longo da profundidade

Em estudos de fundações rasas, devem-se levar em consideração a resistência e as características dos solos logo abaixo da base. Com a cota de assentamento definida, deve-se calcular a pressão admissível a partir do  $N_{SPT}$  de cálculo. Para definir o  $N_{SPT}$  de cálculo, realiza-se a média do  $N_{SPT}$  das camadas de suporte da sapata. Essa região de solo que suporta a sapata é definida a partir do bulbo de tensões.

Segundo Marangnon (2009), a distribuição ao longo de planos horizontais em diversas profundidades tem a forma de sino, sendo o lugar geométrico de pontos de igual pressão em qualquer profundidade é uma superfície de revolução, cuja seção transversal é possível traçar um número infinito de isóbaras deste tipo, cada qual correspondendo a uma pressão. Para efeitos práticos, considera-se que tensões menores que 10% da pressão de contato não têm efeitos na deformabilidade do solo e, portanto, esta isóbara delimitaria a zona do solo sujeita a deformações. A figura formada por esse conjunto de isóbaras denomina-se bulbo de pressões, conforme se observa na Figura 26.

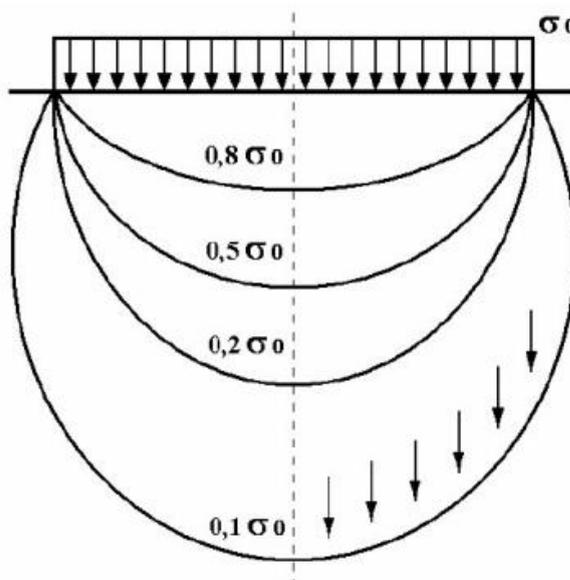


Figura 26. Dimensões dos bulbos de tensão.

### 3.1.4 Carga aplicada

Os valores de cargas adotadas como referência para este trabalho foram considerados de publicações em revistas científicas, dissertações e teses. A Tabela 13 relaciona os autores e as cargas utilizadas para seus trabalhos.

**Tabela 13 – Valores usuais de tensão vertical aplicada**

| <b>PESQUISADOR - INSTITUIÇÃO</b> | <b>CARGA USUAL (kPa)</b> |
|----------------------------------|--------------------------|
| Duarte (2006) - UFV              | 400                      |
| Marangon (2009) - UFJF           | 400                      |
| Constâncio (2010) - UNICAMP      | 120                      |
| Corrêa (2021) - UENF             | 400                      |

A maior carga aplicada encontrada nesses trabalhos se situa na ordem de até 400kPa.

### **3.1.5 Fator de segurança**

Segundo a NBR 6122/22, a verificação de segurança pode ser feita com valores característicos e fator de segurança global ou com valores de cálculo, obtidos pela aplicação de coeficientes de ponderação aos valores característicos, devendo ser obedecidos os valores da Tabela 14.

Os valores citados na tabela partem do princípio de que o método semiempírico deve atender ao domínio de validade para o terreno local e o método empírico não leva em consideração a aplicação dos coeficientes de ponderação aos parâmetros de resistência do terreno.

**Tabela 14 - Fundações rasas – Fatores de segurança (NBR 6122/22)**

| <b>Métodos para determinação da resistência última</b>   | <b>Coefficiente de ponderação da resistência última</b> | <b>Fator de segurança global</b>                       |
|--|---|--|
| Semiempíricos  | Valores propostos no próprio processo e no mínimo 2,15  | Valores propostos no próprio processo e no mínimo 3,00 |
| Analíticos   | 2,15  | 3,00   |
| Semiempíricos ou analíticos acrescidos de duas ou mais provas de carga, necessariamente executadas na fase de projeto. | 1,40  | 2,00   |

### 3.1.6 Fator de melhoria de carga (BCR)

O fator de melhoria de carga (*BCR - bearing capacity ratio*) é definido como a razão entre a tensão no maciço reforçado e a tensão da fundação não reforçada para o mesmo recalque. Fundamentalmente, quanto maior o *BCR*, maior é a porcentagem de acréscimo da resistência devido à introdução do reforço.

A Tabela 15 elenca as principais contribuições, levantadas nesta dissertação, na temática da capacidade de carga de fundações superficiais com reforços e sua relação com o *BCR*.

**Tabela 15 - Capacidade de carga de fundações superficiais com reforços**

| Referências                    | Contribuição   | Observações                               |
|--------------------------------|--|---|
| Binquet e Lee (1975a)          | Modelos reduzidos reforçando um tipo de solo com tiras metálicas, e introduziram o conceito da taxa de capacidade de carga, o <i>BCR</i>   | Modelos reduzidos<br><i>BCR</i> = 4       |
| Binquet e Lee (1975b)          |  | Modelos reduzidos<br><i>BCR</i> = 4       |
| Akinmusuru e Akinbolade (1981) | Continuação dos trabalhos de Binquet e Lee, 1975   | Modelos reduzidos<br><i>BCR</i> = 4       |
| Das (1989)                     | Modelos reduzidos com uma camada de areia sobre uma camada de argila, colocando um geotêxtil na interface destas duas camadas  | Modelos reduzidos<br><i>BCR</i> = 2 a 4   |
| Omar et al (1993)              | Modelos reduzidos de sapatas apoiadas em areias puras, nos quais avaliam diversos parâmetros geométricos, tais como comprimento de ancoragem, relação entre os lados da sapata, quantidade de camadas de reforço, etc  | Modelos reduzidos<br><i>BCR</i> = 2 a 4   |
| Corrêa (2021)                  | Modelos reduzidos de sapatas apoiadas em areias puras, em diferentes graus de compactação nos quais avaliam diversos parâmetros geométricos, tais como comprimento de ancoragem, quantidade de camadas de reforço, etc | Modelos reduzidos<br><i>BCR</i> = 1 a 2,5 |

### 3.2 Variáveis linguísticas de entrada e saída

As regras de fuzzyficação foram elaboradas preliminarmente a partir das considerações por parte do autor da dissertação, 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.

Todas as regras de fuzzyficação usadas na modelagem encontram-se dispostas na Tabela A.1 do Apêndice A.

**Tabela 16 - Variáveis de entrada e saída**

|                |          |   |               |                         |                     |                   |                |
|----------------|----------|---|---------------|-------------------------|---------------------|-------------------|----------------|
| <b>ENTRADA</b> | <b>1</b> | <b>Densidade do solo (solos arenosos)</b>           | Fofa          | Pouco compacta          | Mediamente compacta | Compacta          | Muito Compacta |
|                |          | Valores N <sub>spt</sub>                            | <= 4          | 5-8                     | 9-18                | 19-41             | >= 41          |
|                | <b>2</b> | <b>Capacidade de carga</b>                          | Baixa         | Média                   | Alta                |                   |                |
|                |          | Valores em kPa                                      | <= 900        | 901 - 7600              | >= 7601             |                   |                |
|                | <b>3</b> | <b>Resistência do solo ao longo da profundidade</b> | Baixa         | Média                   | Alta                |                   |                |
|                |          | Valores médios                                      | <= 0-10       | 11-20                   | >=21                |                   |                |
|                | <b>4</b> | <b>Carga Aplicada</b>                               | Baixa         | Média                   | Alta                |                   |                |
|                |          | Valores em kPa                                      | 0-100         | 101-299                 | 300-400             |                   |                |
|                | <b>5</b> | <b>Fator de segurança</b>                           | Baixo         | Aceitável               | Alto                |                   |                |
|                |          | Valores   | 1-1,8         | 1,81-3                  | 3,1-7               |                   |                |
|                | <b>6</b> | <b>Fator de melhoria de carga BCR</b>               | BCR baixo     | BCR médio               | BCR alto            |                   |                |
|                |          | Valores BCR %                                       | 0 - 1,4       | 1,5 - 3,5               | 3,5 - 5             |                   |                |
| <b>SAÍDA</b>   | <b>1</b> | <b>Tipo de fundação</b>                             | Fundação rasa | Fundação rasa reforçada |                     | Fundação profunda |                |

### 3.3 Elaboração do sistema inteligente (modelagem fuzzy)

Depois que todas as regras de fuzzyficação foram definidas para o conjunto de variáveis de entrada e de saída, utilizou-se o programa MATLAB® R2015a (*MathWorks Inc. Copyright 1984-2004*) e a ferramenta *Fuzzy Logic Toolbox®* para criação do sistema inteligente. O MATLAB® R2015a, da empresa *The Mathworks, Inc. Copyright 1984-2004*, foi escolhido por ser um *software* especializado e otimizado para cálculos científicos e de engenharia, além de dispor de recursos gráficos úteis para o gerenciamento na criação do modelo acoplado à superfície e do mapa de contorno.

Através do *toolbox Fuzzy Inference System (FIS)* foi modelado todo o raciocínio *Fuzzy* (Figura 27) 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 defuzzificação possibilita a visualização da variável ou das variáveis de saída do sistema em termos numéricos e, não mais, qualitativos.

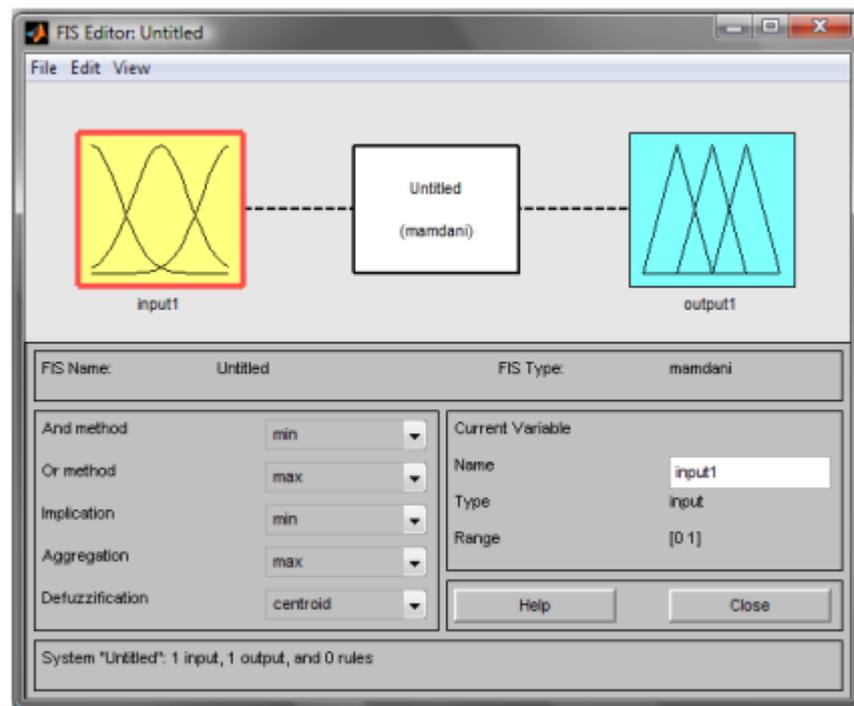
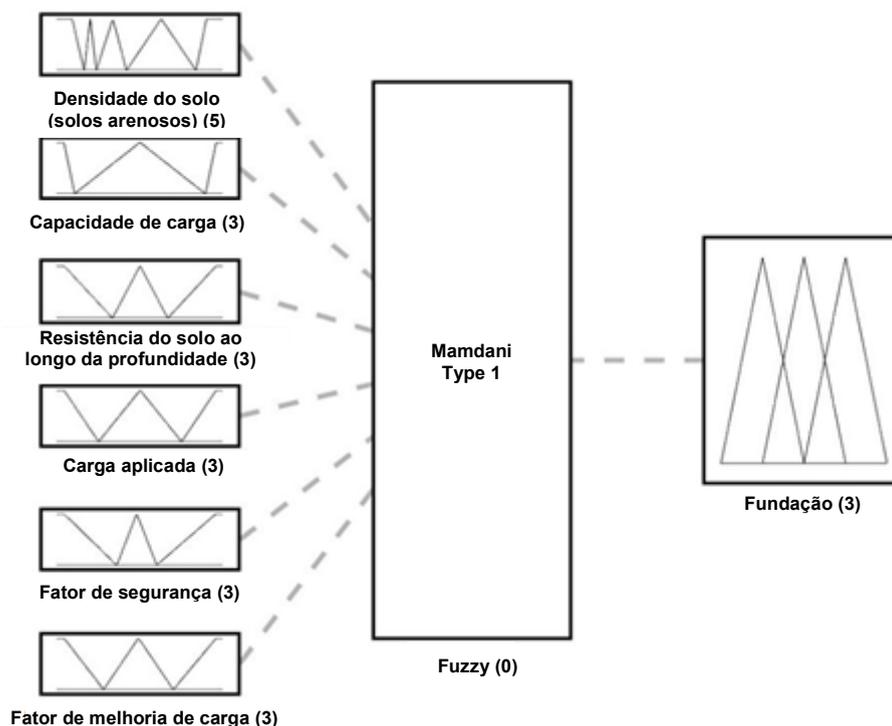


Figura 27 Tela do *Fuzzy Logic Toolbox®*

Foi desenvolvido um sistema baseado nas regras da Lógica *Fuzzy*, no qual buscou-se o tipo de fundação adequada para determinados parâmetros. Criou-se um processador de entrada (fuzzificador), um conjunto de regras linguísticas (apêndice

A), um método de inferência *Fuzzy* e um processador de saída (defuzzificador). A Figura 28 ilustra o sistema proposto com base em regras *Fuzzy*.



**Figura 28 Sistema baseado em regras *Fuzzy* para determinação do tipo de fundação.**

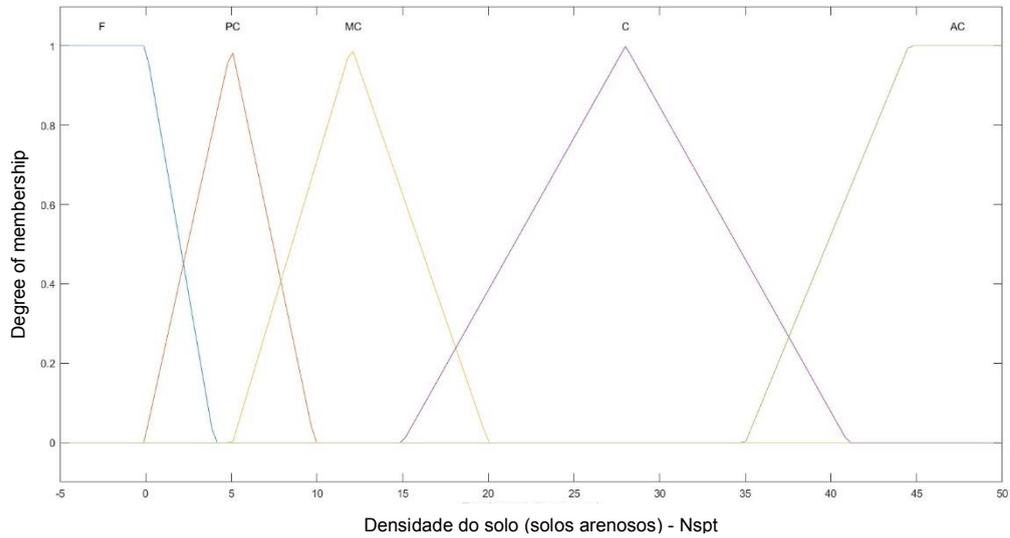
Existem diversas formas associadas às funções de pertinências que podem ser utilizadas para os dados de entrada, ou *input* e os dados de saída *output*. Conforme Godinho et al. (2021b), a forma mais comum é a triangular, entretanto, o modelo utilizado depende muito da preferência e experiência do projetista.

Para este trabalho, optou-se por utilizar o método de Mamdani, uma vez que ele pressupõe que as regras de fuzzyficação possuem relações difusas tanto entre seus antecedentes, quanto entre seus consequentes. O método também inclui módulos de interface, que transformam as variáveis de entrada em conjuntos difusos e, os conjuntos difusos gerados na saída em grandezas numéricas proporcionais.

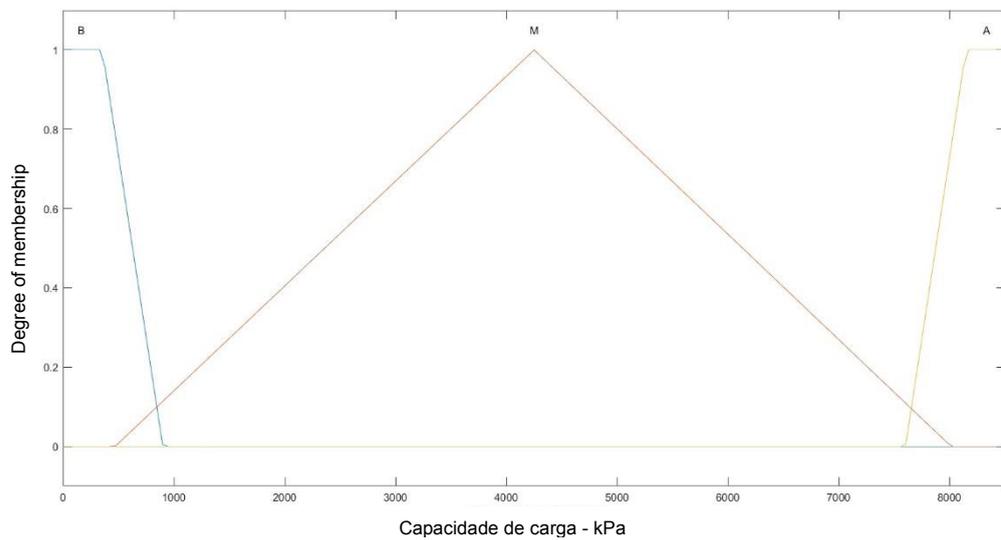
As funções de pertinência triangulares são caracterizadas por uma operacionalização simples utilizando siglas, podendo ser a, b e c, sendo, o intervalo de a e c aplicados a valores diferentes de zero, e b é o ponto onde a função de pertinência é máxima.

Com isso, foram definidas as principais funções de pertinência para os diferentes tipos de parâmetros apresentados. Desenvolveram-se seis variáveis de entrada (densidade do solo, capacidade de carga do solo, resistência do solo ao longo

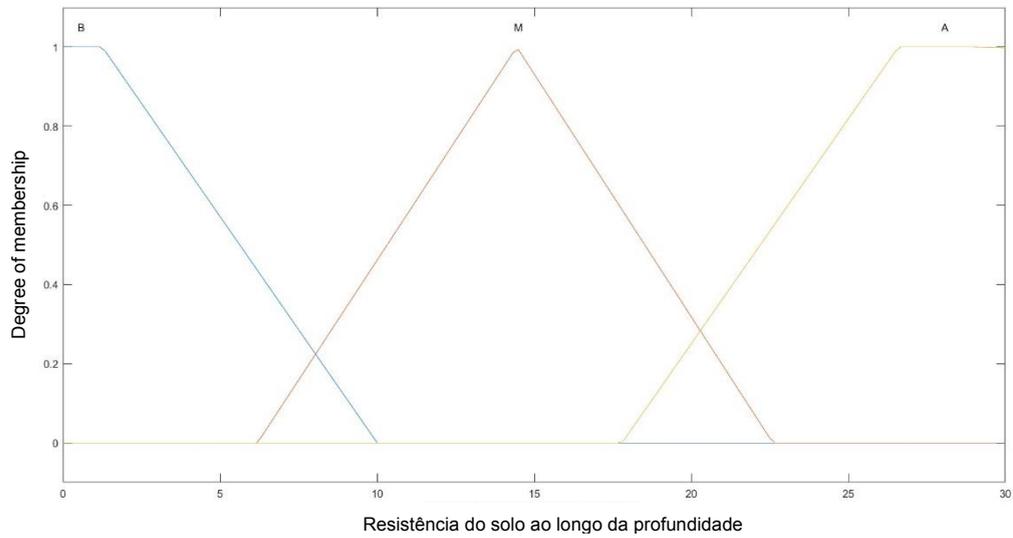
da profundidade, tensão aplicada, fator de segurança, acréscimo de tensão devido à inserção do geossintético) e, para cada entrada, diferentes graus de adesão. Os graus de pertinências para as variáveis de entrada estão relacionados nas Figura 29 a 36.



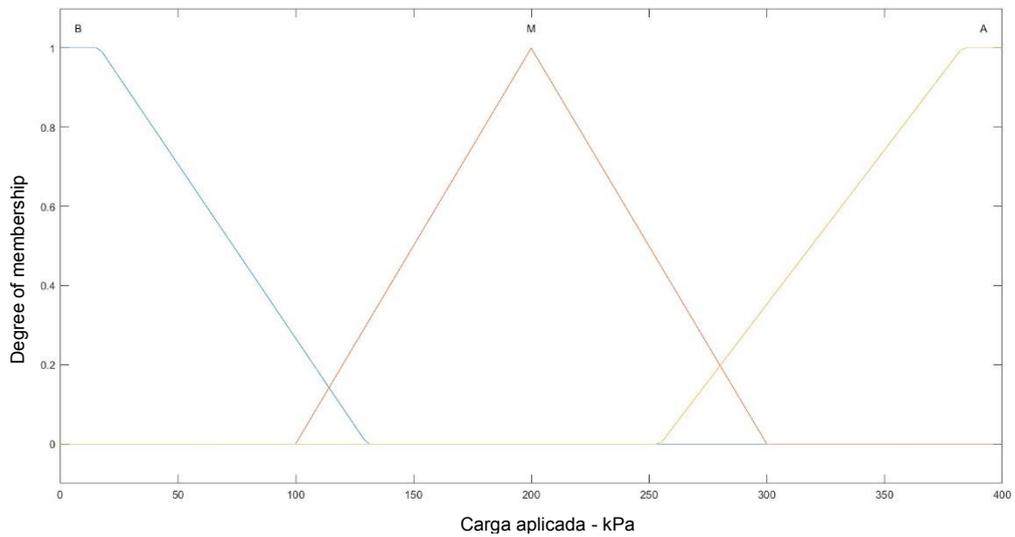
**Figura 29 – Grau de associação para conjuntos difusos da variável da entrada – Densidade do solo (solos arenosos).**



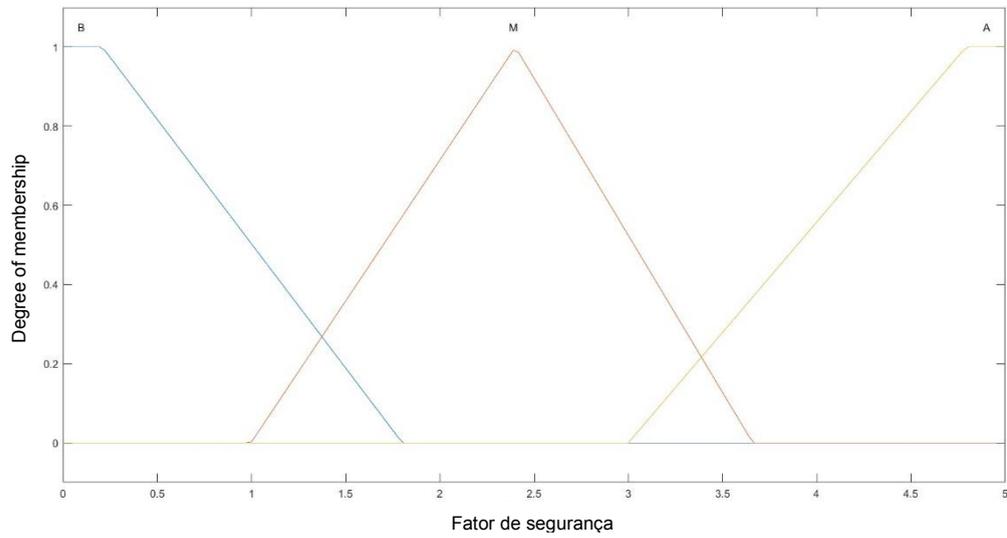
**Figura 30 – Grau de associação para conjuntos difusos da variável da entrada – Capacidade de carga.**



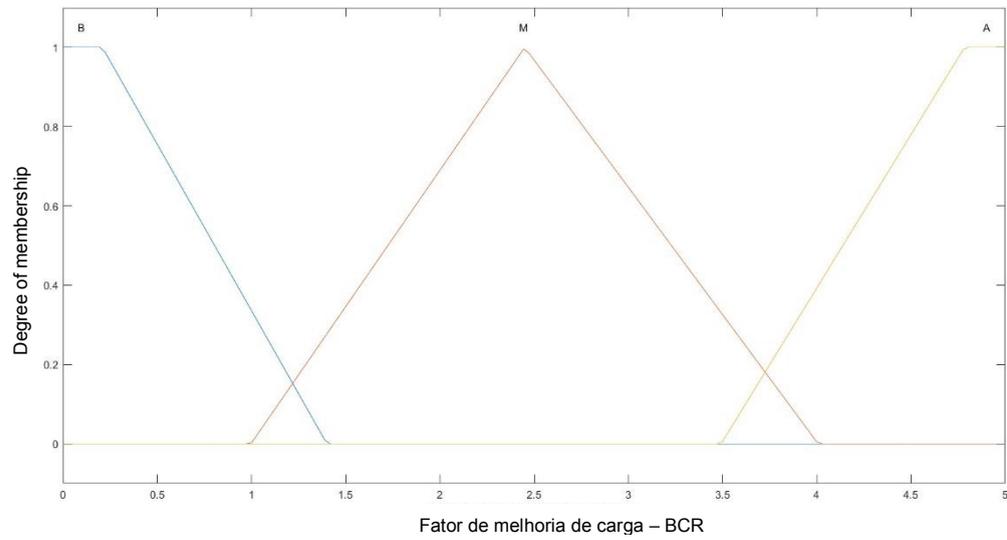
**Figura 31 – Grau de associação para conjuntos difusos da variável da entrada – Resistência do solo ao longo da profundidade.**



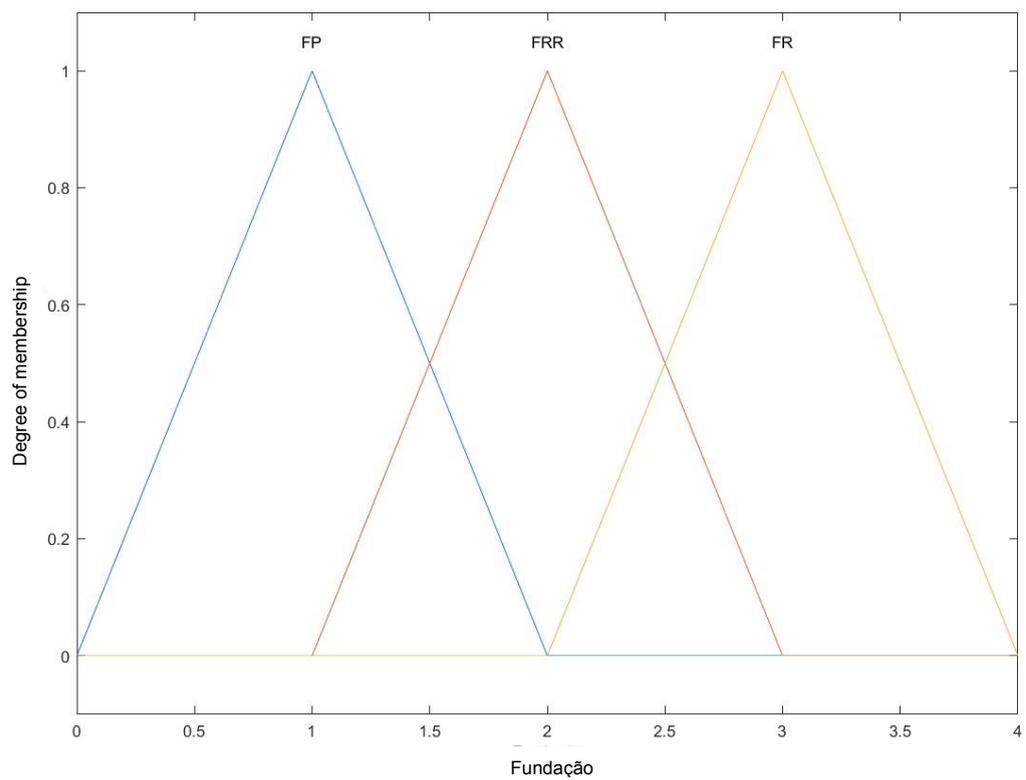
**Figura 32 – Grau de associação para conjuntos difusos da variável da entrada – Carga aplicada.**



**Figura 33 – Grau de associação para conjuntos difusos da variável da entrada – Fator de segurança**



**Figura 34 – Grau de associação para conjuntos difusos da variável da entrada – Fator de melhoria de carga BCR.**



**Figura 35 – Grau de associação para conjuntos difusos da variável de saída – Tipo de fundação.**

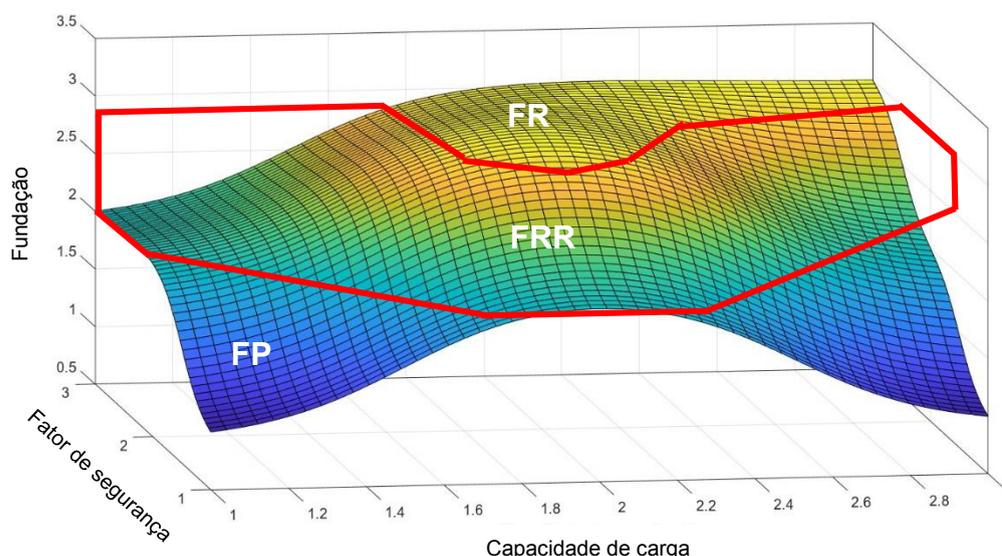
## 4. RESULTADOS

### 4.1 Modelo de superfície de resposta 3D

As Figuras 36 a 47 apresentam 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.

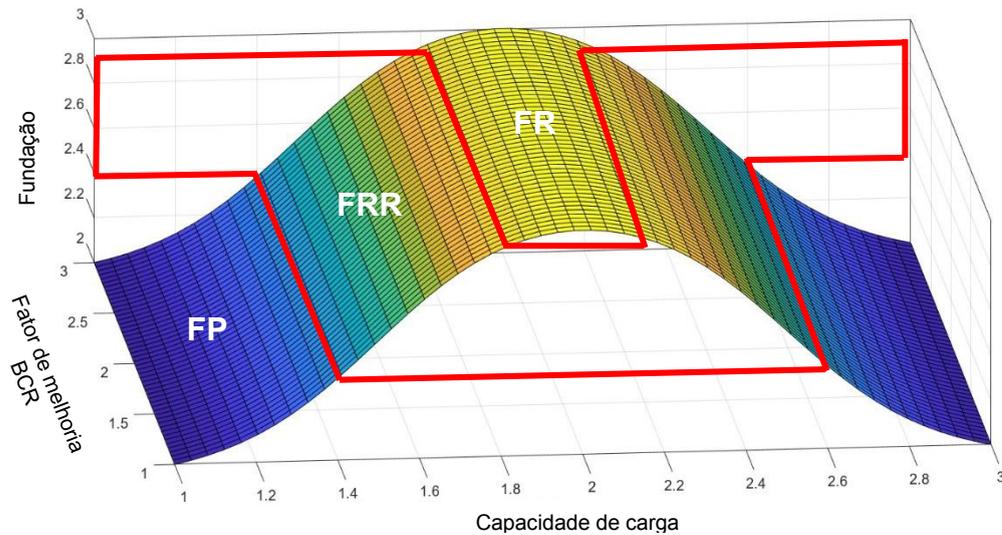
A Figura 36 mostra que, para valores médios de capacidade de carga e valores aceitáveis de fator de segurança (índice 2,0 na escala), a utilização de fundação rasa reforçada (FRR) é recomendada, já para valores altos de capacidade de carga e valores altos para o FS, é recomendada a utilização de fundação rasa (FR). Observe-se que, quando o fator de segurança é menor que o aceitável (índice 2,0 na escala), mesmo com capacidade de carga alta, a fundação profunda (FP) é recomendada.



**Figura 36. Análise do fator de segurança x capacidade de carga x fundação no modelo de superfície de resposta 3D.**

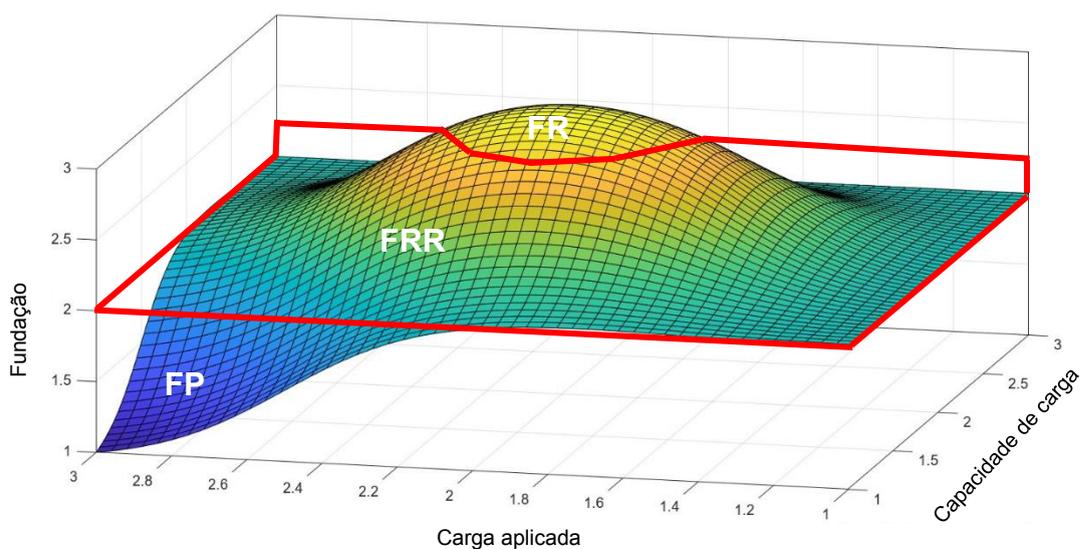
Na Figura 37, observa-se que, para valores médios de capacidade de carga e, independente do acréscimo de tensão devido ao geossintético, sugere-se a utilização de fundação rasa; para valores extremos (baixo e alto) de capacidade de carga e, para qualquer índice de acréscimo de tensão, recomenda-se a fundação profunda (FP), e,

para valores compreendidos na faixa FRR, é indicada a utilização de fundação rasa reforçada.



**Figura 37. Análise do fator de melhoria BCR x capacidade de carga x fundação no modelo de superfície de resposta 3D.**

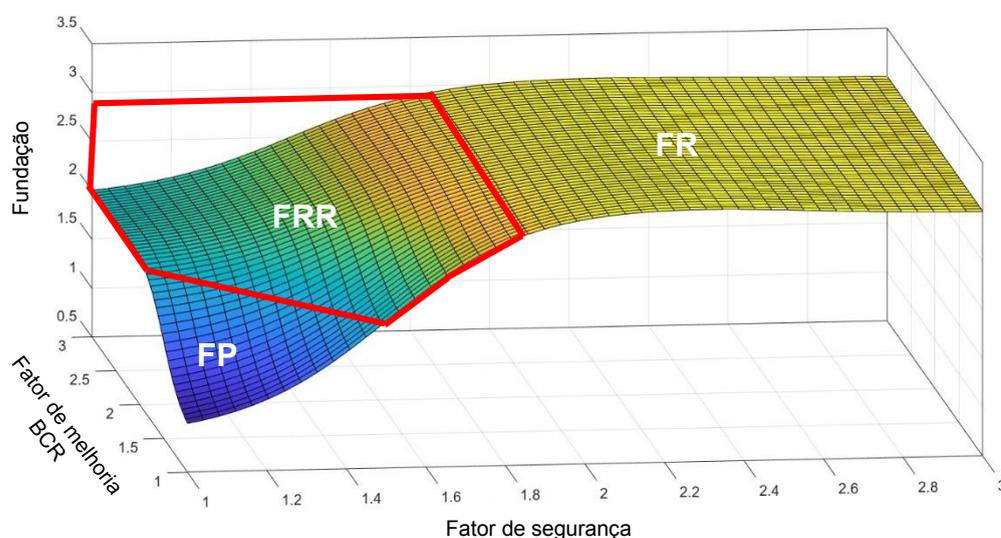
Na Figura 38, foi obtida a superfície de correlação entre o tipo de fundação, a carga aplicada e a capacidade de carga do solo. Observa-se que, para valores extremos de tensão aplicada e capacidade de carga, o índice de fundação é pequeno, sugerindo fundação profunda (FP). Já para valores médios a adoção de fundação rasa reforçada (FRR) é o recomendada.



**Figura 38. Análise da carga aplicada x capacidade de carga x fundação no modelo de superfície de resposta 3D.**

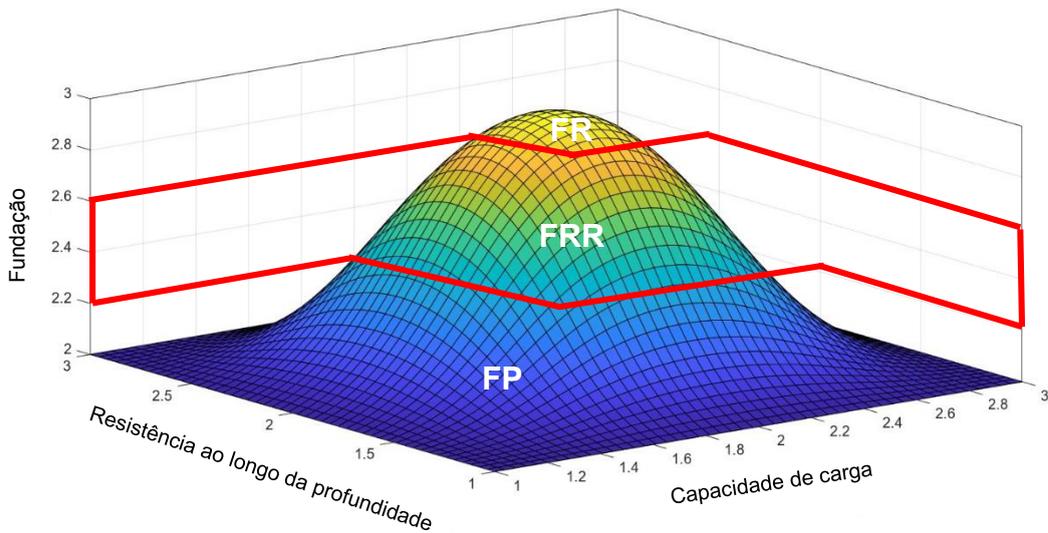
Na Figura 39, verifica-se uma tendência de adoção de fundação rasa (FR) com o aumento do fator de segurança, para valores a partir de 2,0 na escala. Nota-se que, para acréscimos de tensão no geossintético muito pequenos, o indicativo da escala é por fundação profunda (FP), seguindo para rasa reforçada (FRR com o aumento dessa tensão).

A partir de valores de fator de segurança considerados aceitáveis e valores médios de acréscimo de capacidade de carga, é indicada a utilização de fundação rasa reforçada (FRR).



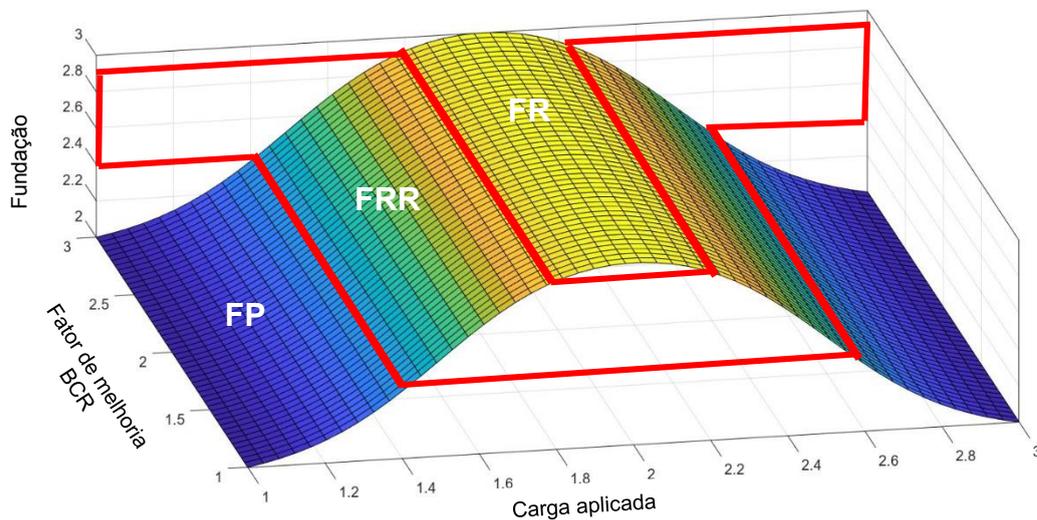
**Figura 39. Análise do fator de melhoria BCR x fator de segurança x fundação no modelo de superfície de resposta 3D.**

Na Figura 40, nota-se um nítido pico para fundação rasa para o caso de capacidade e resistência do solo médios. Para os casos maiores e menores, a adoção de fundação rasa profunda, para valores médios de capacidade de carga e resistência ao longo da profundidade, a recomendação é a utilização de fundação rasa reforçada.



**Figura 40. Análise da resistência ao longo da profundidade x capacidade de carga x fundação no modelo de superfície de resposta 3D.**

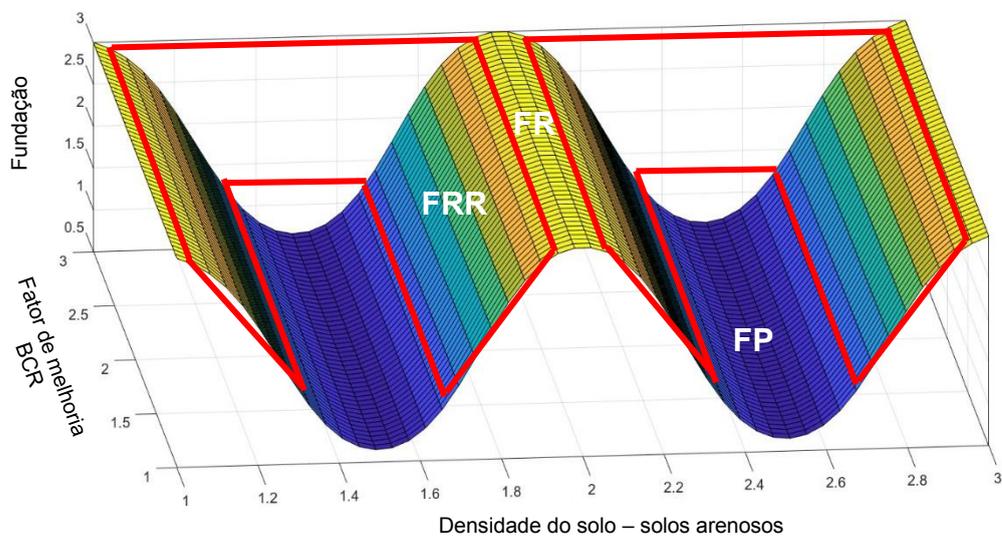
Na Figura 41, é possível perceber que o acréscimo de tensão devido ao geossintético exerce bem menos influência na escolha da fundação, quando comparada à tensão aplicada. Dessa forma, a tensão aplicada ditou a escolha da fundação, sendo, idealmente, a fundação rasa (FR) para valores médios de tensão, a rasa reforçada (FRR) e a fundação profunda (FP), nos casos extremos.



**Figura 41. Análise do acréscimo de tensão x tensão aplicada x fundação no modelo de superfície de resposta 3D.**

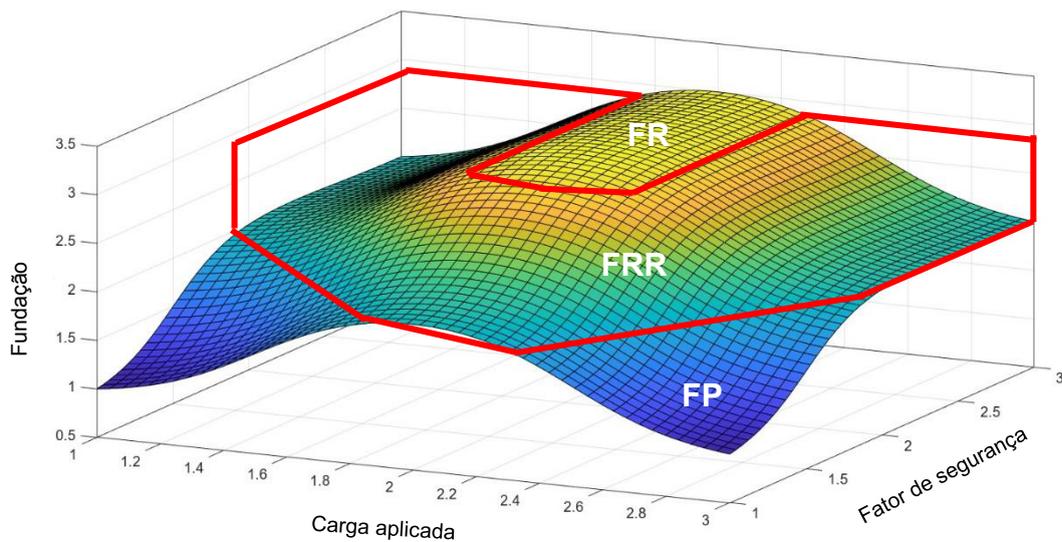
Na Figura 42, é observado um comportamento cíclico anômalo da influência da densidade do solo na fundação a se adotar. Bem como o caso anterior, o acréscimo

de tensão devido ao geossintético não alterou a resposta para uma mesma densidade do solo.



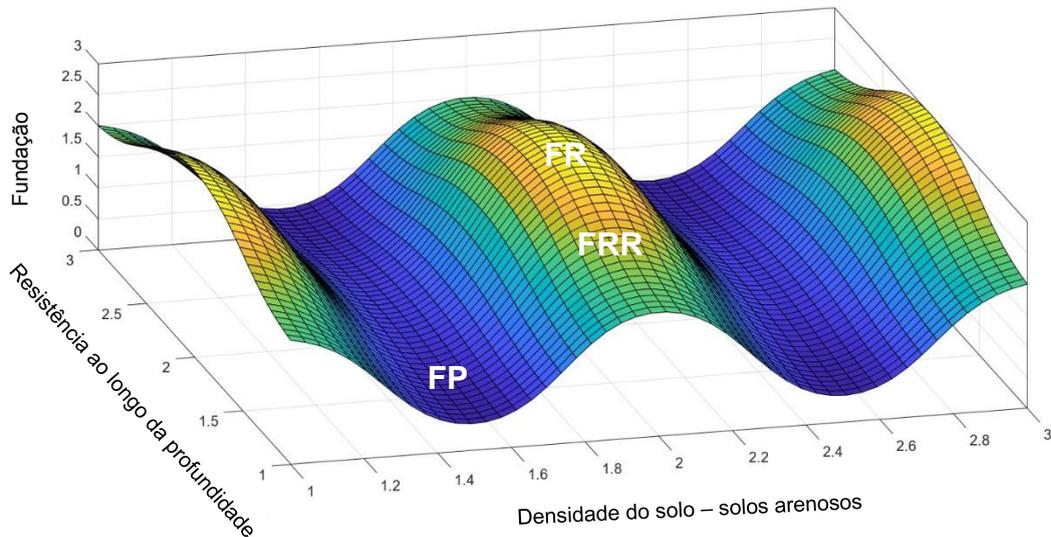
**Figura 42. Análise do fator de melhoria BCR x densidade do solo x fundação no modelo de superfície de resposta 3D.**

Na Figura 43, mais uma vez, nota-se uma tendência de maiores valores de fator de segurança para as fundações rasas, a partir do índice 2,0 na escala, com exceção da situação de tensão aplicada muito pequena, em que a recomendação é por fundação profunda. Quando o índice do FS fica compreendido entre 1,5 e 2,0 e, para qualquer índice de tensão aplicada, recomenda-se a utilização de fundação rasa reforçada.



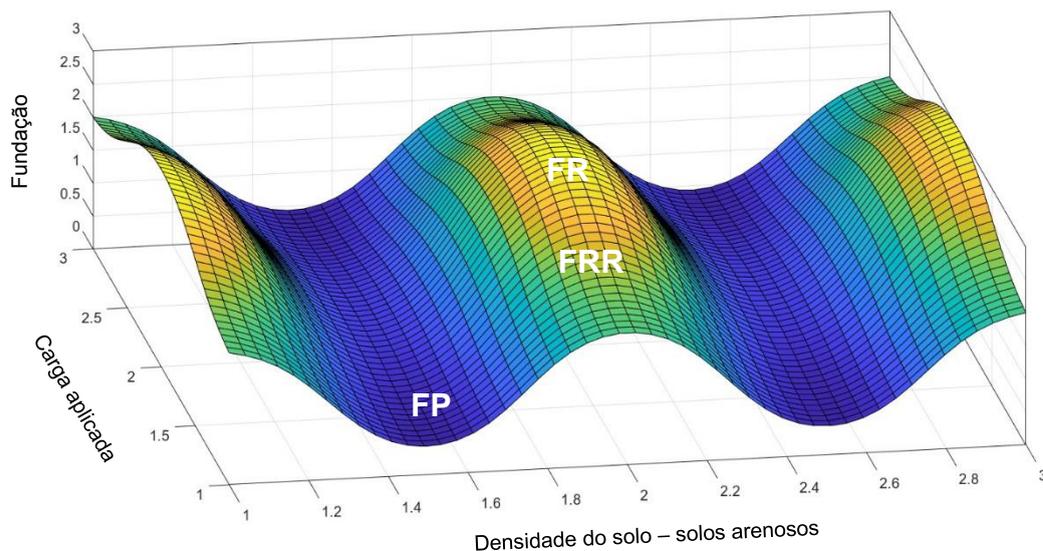
**Figura 43. Análise da carga aplicada x fator de segurança x fundação no modelo de superfície de resposta 3D.**

A Figura 44 revela um comportamento anômalo, semelhante à Figura 42, o que indica uma difícil correlação entre o tipo de fundação e a densidade do solo, para os solos arenosos.



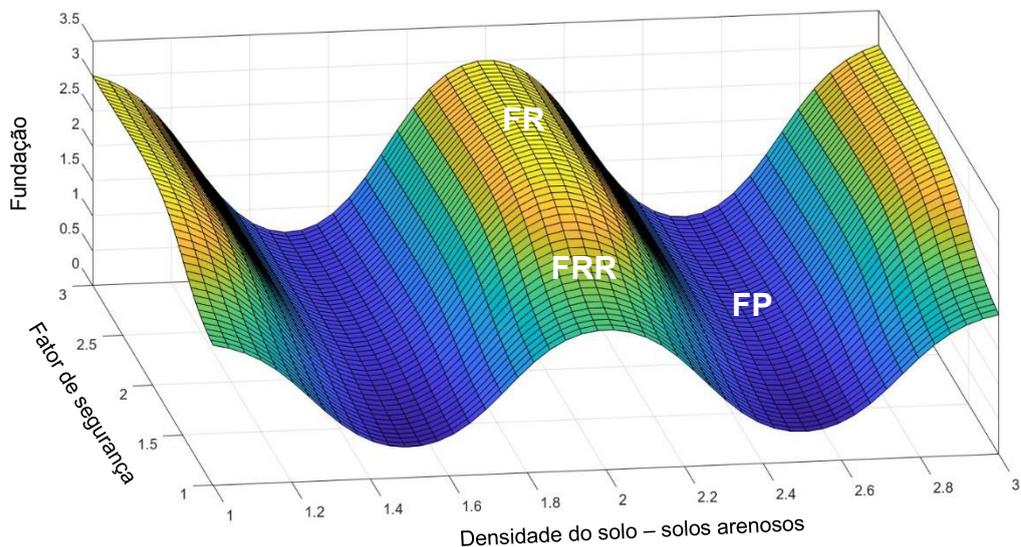
**Figura 44. Análise da resistência ao longo da profundidade x densidade do solo x fundação no modelo de superfície de resposta 3D.**

A Figura 45 indica o mesmo comportamento quando se insere a variável densidade do solo - uma tendência de correlação cíclica, o que dificulta a recomendação direta de um tipo de fundação, uma vez que pode apresentar valores iguais (ponto de vale FP) para diferentes índices de densidade, sejam médios (2 – mediamente compacto) ou extremos (1 – fofo e 3 – altamente compacto).

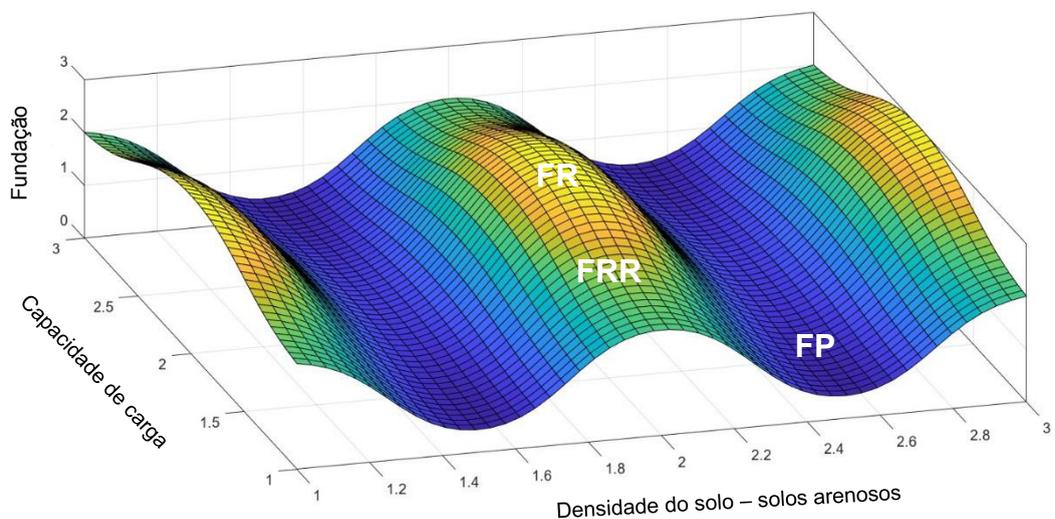


**Figura 45. Análise da carga aplicada x densidade do solo x fundação no modelo de superfície de resposta 3D.**

As Figuras 46 e 47 também apresentam esse comportamento e, ainda mais, demonstram a pouca influência do fator de segurança na escolha da fundação quando se trata da variável densidade do solo. Dessa forma, não é possível obter uma correlação direta entre densidade e o sistema de fundação a se adotar.



**Figura 46. Análise do fator de segurança x densidade do solo x fundação no modelo de superfície de resposta 3D.**



**Figura 47. Análise da capacidade de carga x densidade do solo x fundação no modelo de superfície de resposta 3D.**

As Figuras 44, 45, 46 e 47 mostram um comportamento similar devido ao parâmetro, densidade do solo, que não mostram resultados coerentes nas respostas,

portanto, não foi possível traçar as delimitações nessas figuras visto a incoerência dos resultados.

Observa-se, para cada figura acima, uma análise de duas funções de entrada para uma única variável de saída. Doze possibilidades de entradas foram consideradas, resultando em doze combinações diferentes e com avaliações independentes.

Percebe-se que, na modelagem 3D, as áreas mais claras (delimitadas em vermelho) representam melhores condições das combinações propostas nesse trabalho, sendo assim, representam a utilização das fundações rasas reforçadas. Já as cores em azul caracterizam a utilização de fundações profundas e em amarelo absoluto fundações rasas.

#### 4.2 Validação do sistema inteligente – Aplicação em casos hipotéticos

Para validação do sistema, consideram-se dois perfis de sondagens típico da região de Campos dos Goytacazes/RJ. A Figura 48 esquematiza o primeiro perfil de sondagem.

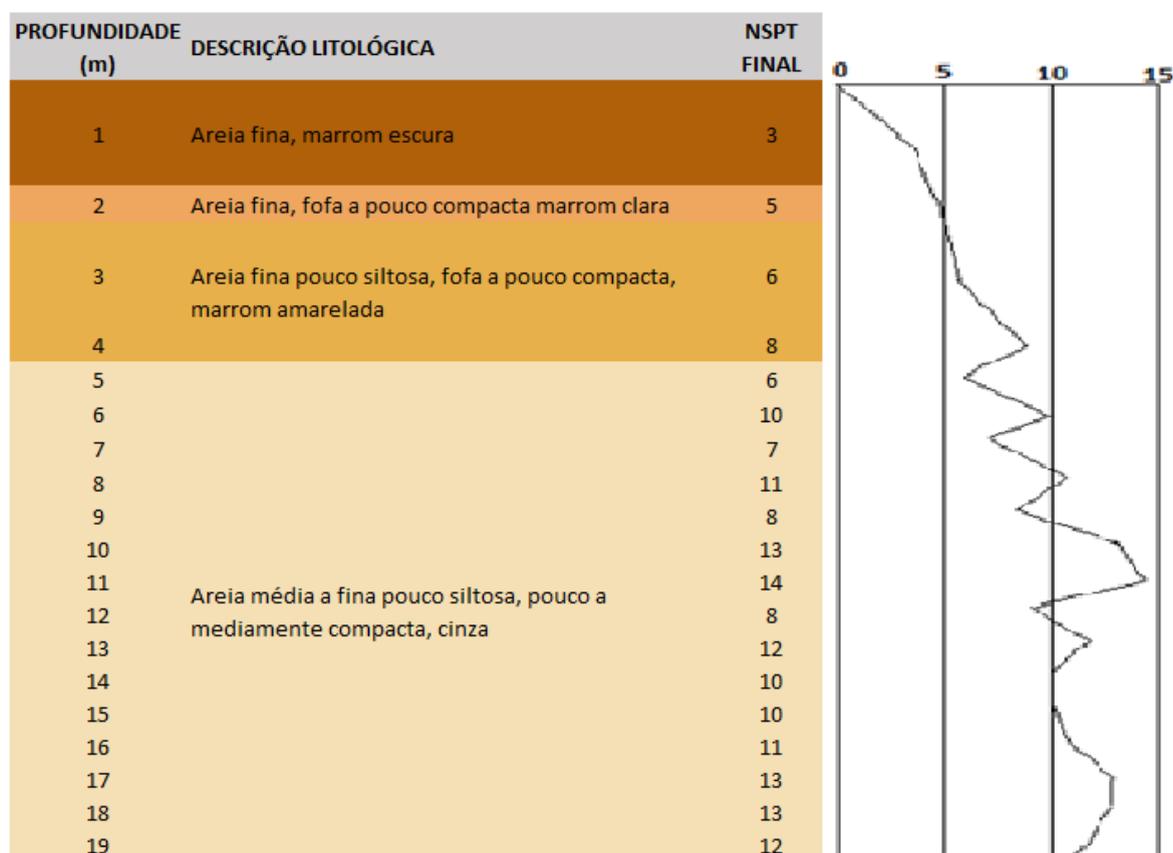


Figura 48. Perfil de sondagem SP01.

Fez-se a escolha do perfil de sondagem 01 visto a litologia do material (solo arenoso), com camadas de diferentes compacidades e resistências à penetração que gera dúvidas quanto a utilização do tipo de fundação. O perfil tem como solo superficial areia fina com transição para pouco compacta até 2m de profundidade, a 3 m de profundidade, encontra-se areia fina, de fofa a pouco compactada; já a 4 m, tem-se areia média a fina, de pouco a mediamente compactada, levando em consideração a transição de compacidade desse perfil, que aumenta com a profundidade.

A Tabela 17 apresenta 3 situações impostas ao sistema inteligente com diferentes combinações dos parâmetros de entrada para obter uma resposta.

Para as situações 1, 2, e 3 (Tabela 17) atenta-se para a variação da profundidade de assentamento da fundação, que são de 0m, 1m e 2m de profundidade respectivamente.

**Tabela 17 - Cruzamento das variáveis de entrada do sistema – Caso I.**

| Caso I<br>Cruzamento das variáveis de entrada |                                |                |                          |                    |                    |                                  |
|---|--------------------------------|----------------|--------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------|
|   | I                              | II             | III                      | IV                 | V                  | VI                               |
| Situação                                      | Densidade do Solo arenoso Nspt | Cap. Carga kPa | Resistência profundidade | Carga aplicada kPa | Fator de segurança | Fator de melhoria de carga BCR % |
| 1   | F                              | B              | B                        | B                  | AC                 | B                                |
| 2   | F                              | B              | B                        | M                  | A                  | A                                |
| 3   | PC                             | M              | B                        | M                  | AC                 | B                                |

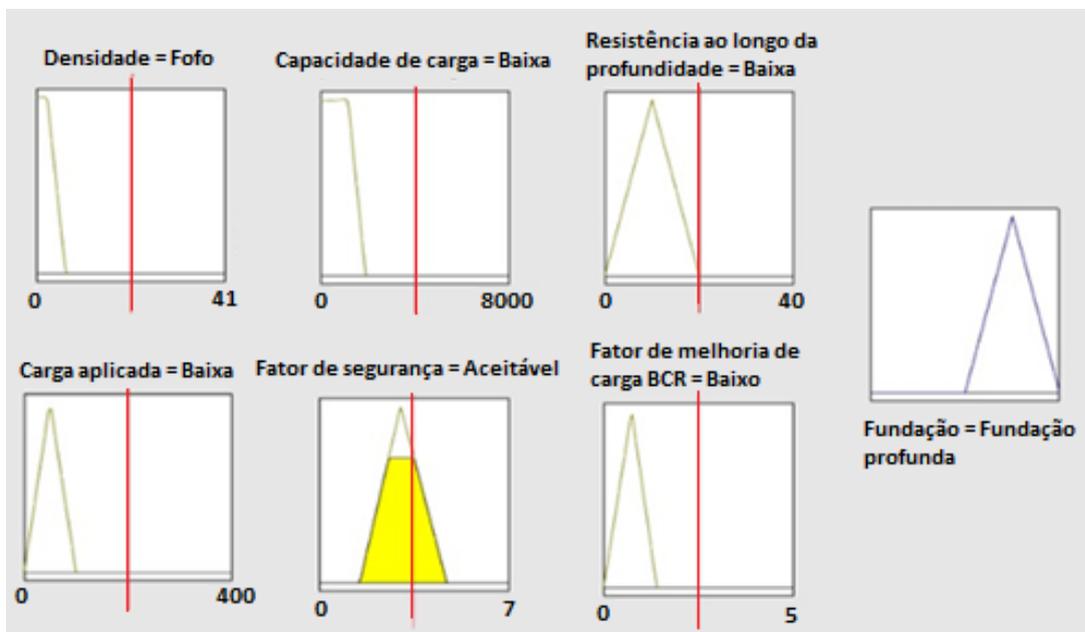
Na tabela acima, encontram-se três situações distintas, sendo elas:

1. Situação caso I – Fundação sendo considerada na superfície do terreno, cota 0m. A densidade do solo é fofa (Nspt= 0), capacidade de carga é baixa ( $\sigma_r = 402\text{kPa}$ ), resistência ao longo da profundidade é baixa (= 8), Carga aplicada é baixa ( $q = 90\text{kPa}$ ), fator de segurança aceitável (FS= 1,81) e Fator de melhoria de carga baixo (BCR= 1,0).

A classificação dos valores citados como fofa, pouco compacto, baixo, médio, alto e aceitável encontram-se na Tabela 16.

A Figura 49 apresenta os resultados de um cruzamento de regras, onde deixa bem claro que o fator primordial para melhor resposta para a variável de saída “Fundação profunda” foi o “Fator de segurança”, pois o seu limitante está dentro dos parâmetros estipulados (aceitável), observa-se que a função “fator de segurança” mesmo sendo “aceitável” possui um desvio para a esquerda não estando centralizada, ou seja, o sistema entende que esse fator não pertence 100% a esta função, portanto, minorando o resultado.

A resposta da situação 1, “fundação profunda” está de acordo com as premissas da engenharia de fundação, visto que em situações onde os parâmetros como capacidade de carga baixa, fator de segurança no limite do aceitável e fator de melhoria de carga baixo não são satisfatórios.



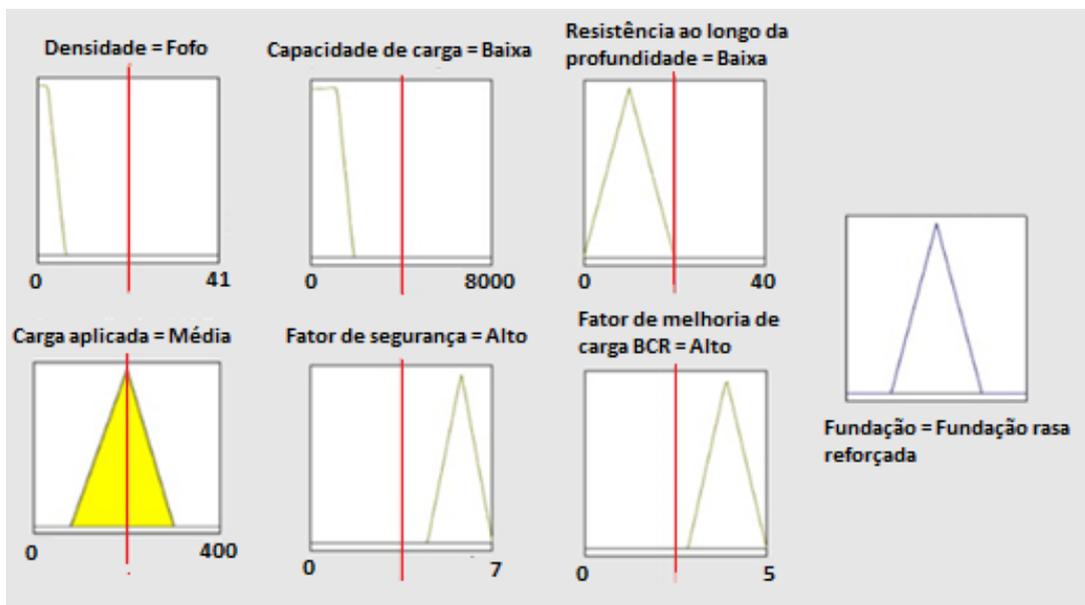
**Figura 49. Situação 1 – Cruzamento das variáveis de entrada para resposta do tipo de fundação – Caso I.**

2. Situação caso I – Fundação sendo considerada embutida, cota -1m. A densidade do solo é fofa ( $N_{spt} = 3$ ), capacidade de carga é baixa ( $\sigma_r = 728\text{kPa}$ ), resistência ao longo da profundidade é baixa ( $= 9$ ), Carga aplicada é média ( $q = 150\text{kPa}$ ), fator de segurança alta ( $FS = 2,2$ ) e Fator de melhoria de carga alto ( $BCR = 4$ ).

A Figura 50 apresenta os resultados de um cruzamento de regras, onde o fator primordial para melhor resposta para a variável de saída “Fundação rasa reforçada”

foi “Carga aplicada = Média” nota-se que esta variável está 100% centralizada e significa que ela pertence totalmente a este fator. As variáveis como densidade do solo, capacidade de carga e resistência ao longo da profundidade se mantiveram o mesmo da situação 1 pois o perfil de sondagem 1 (Figura 48) não possui grandes alterações em relação a situação 2.

Têm-se como resposta para a situação 2 a variável “fundação rasa reforçada”, as variáveis fator de segurança e fator de melhoria de carga melhoraram em relação a situação 1. O fator de melhoria de carga = 4 influencia no tomada de decisão, pois como visto neste trabalho em solos arenosos fofos a melhoria da capacidade de carga é maior em relação as outras densidades, quanto mais fofo e quanto maior o fator de melhoria de carga (BCR) maior será a capacidade de carga do conjunto.



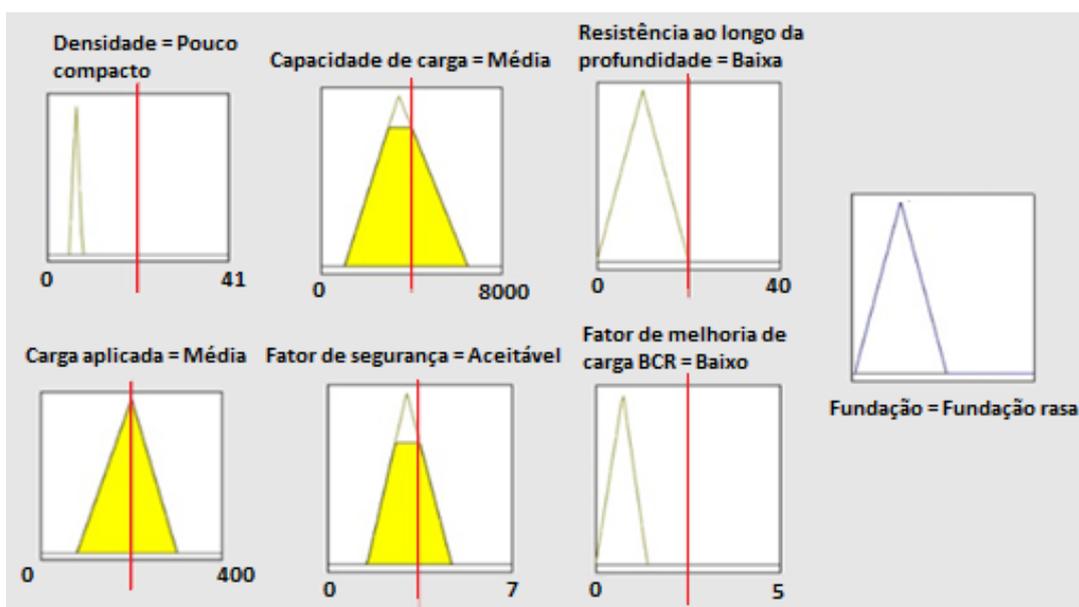
**Figura 50. Situação 2 – Cruzamento das variáveis de entrada para resposta do tipo de fundação – Caso I**

- Situação caso I – Fundação sendo considerada embutida, cota -2m. A densidade do solo é Pouco compacto ( $N_{spt}= 5$ ), capacidade de carga é média ( $\sigma_r= 1.127kPa$ ), resistência ao longo da profundidade é baixa (= 9), Carga aplicada é média ( $q= 105kPa$ ), fator de segurança aceitável ( $FS= 1,81$ ) e Fator de melhoria de carga baixa ( $BCR= 1$ ).

A Figura 51 apresenta os resultados de um cruzamento de regras, onde os fatores determinantes são as variáveis (“Capacidade de carga = média”, “Carga

aplicada = média” e “Fator de segurança = aceitável”). As variáveis, capacidade de carga e fator de segurança possuem desvio para direita, ou seja, não pertencem 100% a esta função, pode-se interpretar também que os valores estão nos limites das suas classificações como média e aceitável.

A situação 3 tem como resposta pelo sistema inteligente a “Fundação rasa”, a explicação para isso é a melhoria da capacidade de carga que leva em consideração a mudança na densidade do solo que está ligado ao aumento de resistência à penetração (Nspt).



**Figura 51. Situação 3 – Cruzamento das variáveis de entrada para resposta do tipo de fundação – Caso I.**

A Figura 52 esquematiza o segundo perfil de sondagem com características da região de Campos dos Goytacazes – Rio de Janeiro/RJ.

Fez-se a escolha do perfil de sondagem 02 pretendendo comparar com o perfil de sondagem 01. A litologia do material (solo arenoso) é similar, com camadas de diferentes compacidades e resistências à penetração ao longo da profundidade que geram dúvidas quanto a utilização do tipo de fundação. O perfil tem como solo superficial areia fina com transição para pouco compacta até 6m de profundidade, de 7 m a 16m de profundidade, encontra-se areia média, e a resistência a penetração aumenta com a profundidade.

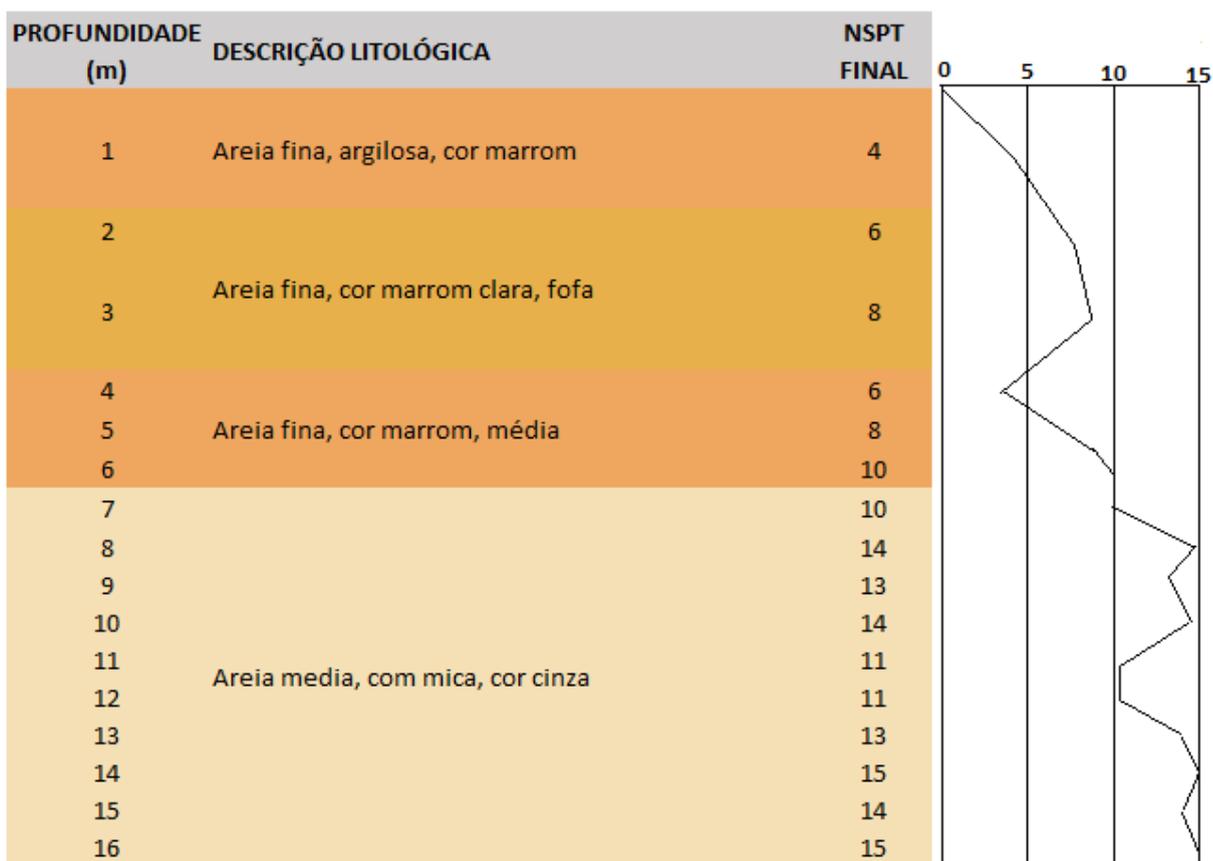


Figura 52. Perfil de sondagem SP02.

A Tabela 18 apresenta 3 situações impostas ao sistema inteligente com diferentes combinações dos parâmetros de entrada para obter uma resposta. Para as situações 1, 2, e 3 atenta-se para a variação da profundidade de assentamento da fundação, que são de 0m, 1m e 2m de profundidade respectivamente.

Tabela 18 - Cruzamento das variáveis de entrada do sistema – Caso II.

| Caso II<br>Cruzamento das variáveis de entrada |                                |                |                          |                    |                    |                                  |
|--|--------------------------------|----------------|--------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------|
| Parâmetros                                     | I                              | II             | III                      | IV                 | V                  | VI                               |
| Situação                                       | Densidade do Solo arenoso Nspt | Cap. Carga kPa | Resistência profundidade | Carga aplicada kPa | Fator de segurança | Fator de melhoria de carga BCR % |
| 1  | F                              | B              | B                        | A                  | AC                 | B                                |
| 2  | F                              | B              | B                        | B                  | A                  | A                                |
| 3  | PC                             | B              | B                        | M                  | AC                 | B                                |

A classificação dos valores citados como fofo, pouco compacto, baixo, médio, alto e aceitável encontram-se na Tabela 16.

1. Situação caso II – Fundação sendo considerada na superfície do terreno, cota 0m. A densidade do solo é fofo ( $N_{spt}= 0$ ), capacidade de carga é baixa ( $\sigma_r= 41\text{kPa}$ ), resistência ao longo da profundidade é baixa ( $= 9,3$ ), Carga aplicada é baixa ( $q= 350\text{kPa}$ ), fator de segurança aceitável ( $FS= 1,81$ ) e Fator de melhoria de carga baixo ( $BCR= 1,0$ ).

A Figura 53 apresenta os resultados de um cruzamento de regras, com o resultado da variável de saída “Fundação Profunda”, com destaque para a variável “Fator de segurança = aceitável” tendo em vista o não preenchimento total deste fator, sendo assim limitando o resultado encontrado.

Para a situação 2 a variável “fundação profunda” é a resposta do sistema inteligente. Tendo como variáveis a capacidade de carga baixa, a carga imposta alta, fator de segurança no limite do “aceitável” e sem contribuição do fator de melhoria de carga BCR a resposta do sistema é coerente com a engenharia de fundações.

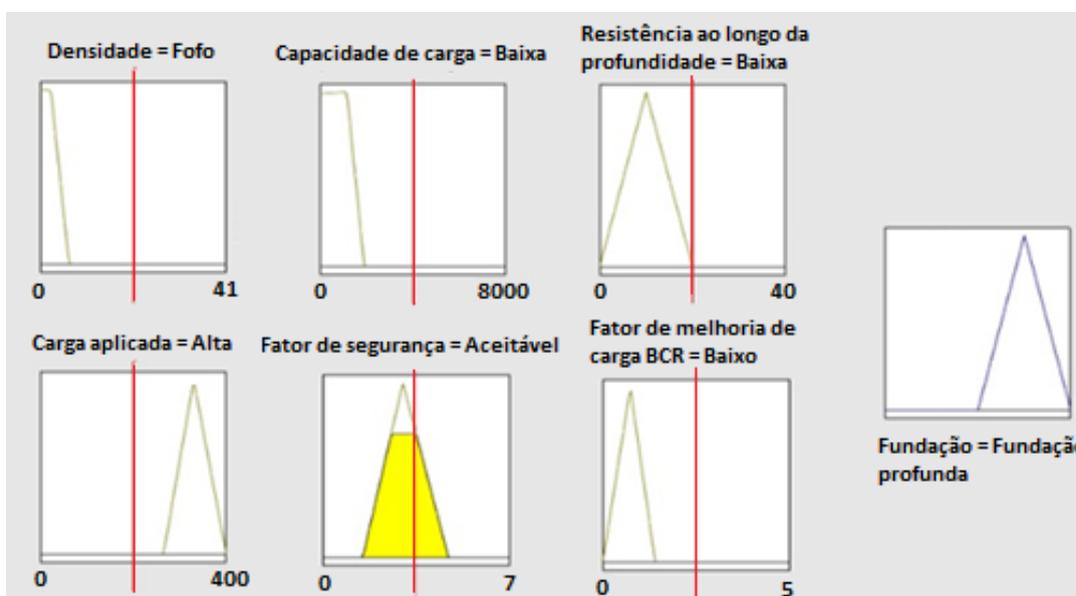


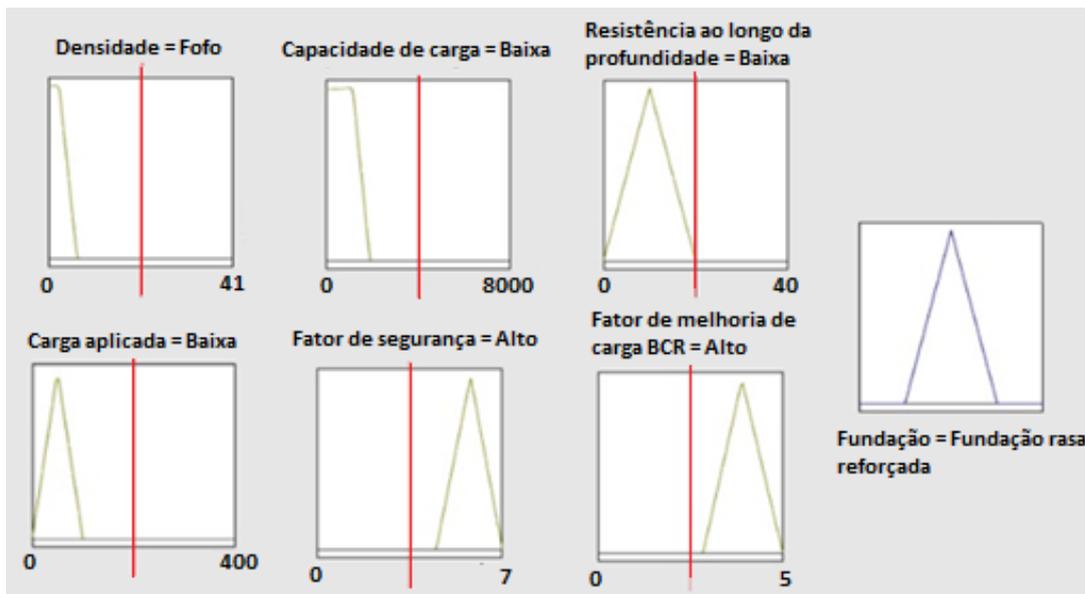
Figura 53. Situação 1 – Cruzamento das variáveis de entrada para resposta do tipo de fundação – Caso II.

2. Situação caso II – Fundação sendo considerada embutida, cota -1m. A densidade do solo é fofo ( $N_{spt}= 4$ ), capacidade de carga é baixa ( $\sigma_r= 832\text{kPa}$ ), resistência ao longo da profundidade é baixa ( $= 10$ ), Carga

aplicada é baixa ( $q = 90\text{kPa}$ ), fator de segurança alto ( $FS = 2,2$ ) e Fator de melhoria de carga alto ( $BCR = 4,5$ ).

A Figura 54 apresenta os resultados de um cruzamento de regras, onde os fatores primordiais para melhor resposta para a variável de saída “Fundação rasa reforçada” foram todas as variáveis, não havendo variáveis específicas que determinaram a variável de saída.

Têm-se como resposta para a situação 2 a variável “fundação rasa reforçada”, as variáveis fator de segurança e fator de melhoria de carga melhoraram em relação a situação 1. O cruzamento das variáveis desta situação se enquadra como similar as da situação 2 do caso 1 (Figura 50), tendo como resposta o mesmo tipo de fundação. As classificações das variáveis como baixa, média e aceitável não se alteraram.



**Figura 54. Situação 2 – Cruzamento das variáveis de entrada para resposta do tipo de fundação – Caso II.**

- Situação caso II – Fundação sendo considerada embutida, cota -2m. A densidade do solo é Pouco compacto ( $N_{spt} = 6$ ), capacidade de carga é média ( $\sigma_r = 1.127\text{kPa}$ ), resistência ao longo da profundidade é média ( $= 10.5$ ), Carga aplicada é média ( $q = 170\text{kPa}$ ), fator de segurança aceitável ( $FS = 1,95$ ) e Fator de melhoria de carga baixa ( $BCR = 1$ ).

A Figura 55 apresenta os resultados de um cruzamento de regras, onde os fatores determinantes são as variáveis (“Carga aplicada = média”, “Capacidade de

carga = Média), Fator de segurança = Aceitável”), obtendo a variável de saída “Fundação rasa”. Percebe-se que o fator “Capacidade de carga = Média” está com desvio para a direita e sem preenchimento total de amarelo, indicando que esta variável não pertence 100% a esta função e que está bem próxima dos limites impostos ao sistema. As variáveis “Carga aplicada = Média” e “Fator de segurança = Aceitável” pertencem totalmente às suas funções.

A situação 3 tem como resposta pelo sistema inteligente a “Fundação rasa”, a explicação para isso é a melhoria da capacidade de carga que leva em consideração a mudança na densidade do solo que está ligado ao aumento de resistência à penetração (Nspt), O fator Resistência ao longo da profundidade melhorou em comparação as situações anteriores juntamente com os fatores capacidade de carga e fator de segurança quando comparados a situação 1.

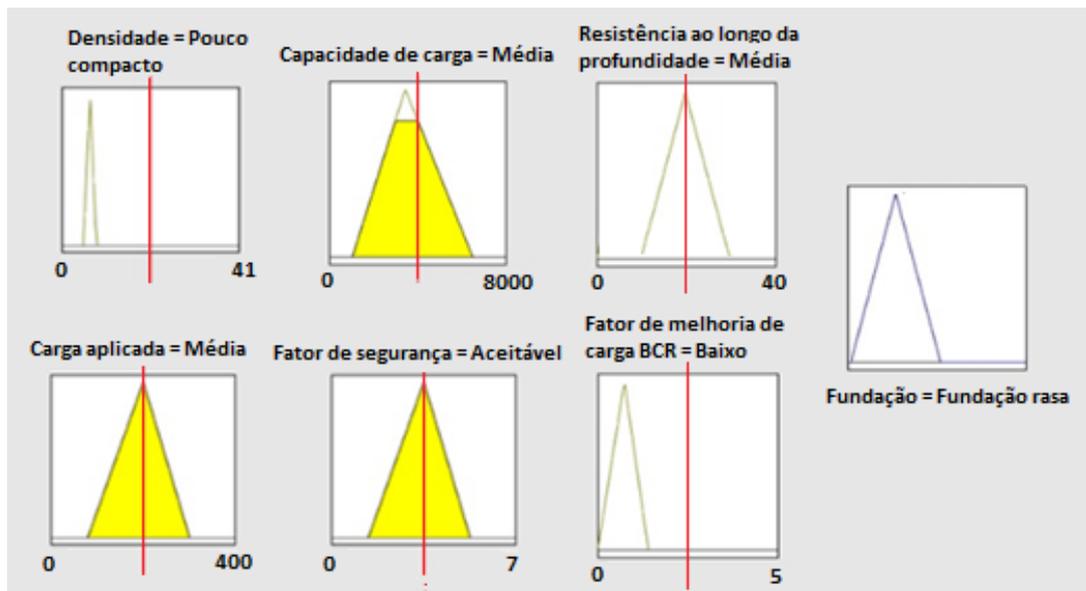


Figura 55. Situação 3 – Cruzamento das variáveis de entrada para resposta do tipo de fundação – Caso II.

## 5. CONCLUSÕES

A presente dissertação apresenta a aplicação da lógica fuzzy na viabilidade de utilização de fundação rasa em maciços reforçados em comparação com outros meios tradicionais de fundação. Nesse trabalho foi realizada um estudo com o levantamento de todas as variáveis envolvidas no processo de escolha do tipo de fundação a ser utilizada em determinados perfis/estratigrafia do solo.

Observou-se que alguns parâmetros de entrada, como, fator de segurança, fator de melhoria de carga BCR e a carga aplicada, quando combinados com outros parâmetros, possuem maior influência na escolha do tipo de fundação a ser utilizada, portanto, deve-se atenção especial a essas análises.

Percebe-se um comportamento cíclico anômalo para as análises com o parâmetro de entrada, densidade do solo. Todas as combinações mostraram que, com esse parâmetro, não é possível a determinação do tipo de fundação diante de outras variáveis. É observado, nas figuras 3D, que para diferentes densidades do solo, existe um mesmo comportamento, o que dificulta a determinação do tipo de fundação a ser utilizado.

Segundo a modelagem apresentada nesta pesquisa, nas imagens em 3D, a utilização de fundação rasa reforçada é viável nos trechos indicados como FRR, justamente na transição da fundação profunda (FP) para fundação rasa (FR). Ainda é possível observar, nas figuras 3D, que os trechos de fundação rasa reforçada (FRR) é pequena em relação às demais, este resultado reflete muito na área de inferência (área nebulosa) escolhida.

Nas 6 situações aplicadas nos 2 diferentes perfis de sondagem, observam-se, nas figuras, alguns triângulos hachurados de amarelos (áreas de inferência), reforçando que, nessas análises, aqueles parâmetros foram considerados pelo sistema os mais relevantes na tomada de decisão.

Os parâmetros de entrada e a variabilidade das escalas adotadas serão diferentes de acordo com cada projetista, nesta pesquisa adotou-se um valor de 20% no transpasse dos valores considerados para as variáveis e obteve-se respostas satisfatórias na escolha do tipo de fundação a ser utilizada.

A modelagem Fuzzy mostrou-se ser uma boa ferramenta para auxiliar nas análises de projeto de fundação rasa em maciços reforçados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7250/1982- Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos. Rio de Janeiro, ABNT.
- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6122/22- Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, ABNT.
- ABAR, C. Noções de lógica matemática. São Paulo, 2004.
- Abu-Farsakh, M.; Chen, Q.; Sharma, R. An experimental evaluation of the behavior of footings on geosynthetic-reinforced sand. *Soils and Foundations*, v. 53, n. 2, p. 335–348, 2013.
- Adams, M. T., Collin, J. G. (1997). Large Model Spread Footing Load Tests on geosynthetic reinforced soil foundation. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 123 (1), p. 66 - 72.
- Alamshahi, S.; Hataf, N. (2009). Bearing capacity of strip footings on sand slopes reinforced with geogrid and grid-anchor. *Geotextiles and Geomembranes*. V. 27(3), p. 217 – 226.
- Alawaji, H.A. (2001). Settlement and bearing capacity of geogrid reinforced sand over collapsible soil. *Geotext Geomembr*. V. 19(2), p. 75 – 88.
- 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.
- Alston, C.; Lowry, D. K.; Lister, A. (2015). Geogrid reinforced granular pad foundation resting on loose and soft soils, Hamilton Harbour, Ontario. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1, 3, p. 1 - 11.
- Badakhshan, E.; Noorzad, A. (2017). Effect of footing shape and load eccentricity on behavior of geosynthetic reinforced sand bed. *Geotextiles and Geomembranes*. V. 45, n. 2, p. 58 - 67.
- Balla, A. Bearing Capacity of Foundations. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 88, No. SM5, pp.13-34, 1962.
- Basudhar, P. K.; Saha, S.; Deb, K. (2007). Circular footings resting on geotextile-reinforced sand bed. *Geotextiles and Geomembranes*. V. 25, n. 6, p. 377 - 384.
- 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.
- 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.
- Biswas, A. et al. (2015). Behavior of Geogrid Reinforced Foundation Systems Supported on Clay Subgrades of Different Strengths. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. V. 1, n. 3, p. 1 - 10.
- Boushehrian, A.H. e Hataf, N. (2008). Bearing capacity of ring footings on reinforced clay. In *Proc. 12th. Conf. Of Int. Assoc. For Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, Goa, India, p. 3546 - 3551.

- Boushehrian, J. H.; Hataf, N. (2003). Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of model circular and ring footings on reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*. V. 21, n. 4, p. 241 - 256.
- Boyer, C.B. *História da Matemática*. Nova Iorque, Dover, 1968.
- Brown, B. S.; Poulos, H. G. Analysis of foundations on reinforced soil. In: 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 595-598, 1981
- Constancio, L. A. (2010). Capacidade de carga de um modelo de fundação superficial em solo arenoso fofo com reforço de geotêxtil. *Dissertação de Mestrado*. UNICAMP. p. 180.
- 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. (2007). An experimental study on characteristics and behavior of reinforced soil foundation. PhD dissertation, Louisiana State University, Baton Rouge, USA.
- Chen, Q. Et Al. Laboratory Investigation of Behavior of Foundations on Geosynthetic-Reinforced Clayey Soil. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2004, n. 1, p. 28–38, 2008.
- 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.
- Chung, W., & Cascante, G. (2006). Experimental and numerical study of soil-reinforcement effects on the low-strain stiffness and bearing capacity of shallow foundations. *Geotechnical and Geological Engineering*. 25(3), p. 265 - 281.
- Cicek, E., Guler, E., Yetimoglu, T. (2015). Effect of reinforcement length for different geosynthetic reinforcements on strip footing on sand soil. *Soils and Foundations*. Elsevier. 55 (4), p. 661 - 677.
- Constancio, L. A. (2010). Capacidade de carga de um modelo de fundação superficial em solo arenoso fofo com reforço de geotêxtil. *Dissertação de Mestrado*. UNICAMP. p. 180.
- Das, B. M. Foundation on sand underlain by soft clay with geotextile at sand-clay interface. *Geosynthetics* 89, San Diego, pp. 203-214, 1989.
- Das, B.M.; Omar, M.T. (1994). The effects of foundation width on model tests for the bearing capacity of sand with geogrid reinforcement. *Geotech Geol Eng*. V 12(3), p. 133 – 141.
- Dash, S. K.; Rajagopal, K.; Krishnaswamy, N. R. Performance of different geosynthetic reinforcement materials in sand foundations. *Geosynthetics International*, v. 11, n. 1, p. 35–42, 2009.
- Dawson, A.; Lee, R. Full scale foundation trials on grid reinforced clay: Geosynthetic for Soil Improvement. *American Society of Civil Engineers*, pp. 127-147, 1988.
- De Beer, E. E. Experimental determination of the shape factors and the bearing capacity factors of sand. *Geotechnique*, v. 20, n. 4, 1970.
- Demir, A. et al. (2013). Experimental and numerical analyses of circular footing on geogrid-reinforced granular fill underlain by soft clay. *Acta Geotechnica*. V. 9, n. 4, p. 711 - 723.
- DAS, B. M.;

- Deutsches Institut Für Normung. DIN V 4017: Soil - Calculation of design bearing capacity of soil beneath shallow foundations, 2006.
- Dixit, R. K.; Mandal J. N. (1993). Bearing capacity of geosynthetic-reinforced soil using variational method. *Geotextiles and Geomembranes*, 12, 6, p. 543 - 566.
- DGGT – German Geotechnical Society (1997). Empfehlung für Bewehrungen aus Geokunststoffen – EBGEO. Ernst & Sohn. Berlin, Alemanha.
- El Sawwaf, M. A.; Nazir, A. K. (2012). Cyclic settlement behavior of strip footings resting on reinforced layered sand slope. *Journal of Advanced Research*. V. 3, n. 4, p. 315 - 324.
- El Sawwaf, M.; Nazir, A. K. (2010). Behavior of repeatedly loaded rectangular footings resting on reinforced sand. *Alexandria Engineering Journal*. 49(4), p. 349 - 356. Doi:10.1016/j.aej.2010.07.002.
- El - Soud, S. A.; Belal, A. M. (2018). Bearing capacity of rigid shallow footing on geogridreinforced fine sand - experimental modeling. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 247, p. 1 - 10.
- 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.
- Fragaszy, R.J.; Lawton, E. (1984). Bearing capacity of reinforced sand subgrades. *J Geotech Eng Div ASCE*. V. 110(10). p. 1500 - 1507.
- Giroud, J.P.; Noiray, L. Geotextile Reinforced Unpaved Road Design. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 107, No. GT9, pp. 1233-1254, 1981.
- Godinho, E. Z.; Caneppele, f. de l.; Gasparotto, h. v. Utilização da Lógica Fuzzy Para Otimizar Aplicação de Fertilizantes no Rabanete. *brasilian journal of biosystems engineering*, vol. 15, n. 2, p. 270-282, 2021b. doi: <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2021v15n2p270-282>.
- Godoy, N.S. Fundações: Notas de Aula, Curso de Graduação, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, 65p, 1972.
- Godoy, N.S. Estimativa da capacidade de carga de estacas a partir de resultados de penetrômetro estático. Palestra, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, 1983.
- Guido, V. A.; Knuettel, J. D.; Sweeny, M. A. (1986). Plate load tests on geogrid- reinforced earth slabs. *Proc. Of Geosynthetics '87, IFAI, St. Paul, Minn.*, p. 216 - 225.
- Guido, V.A.; Biesiadecki, G.L.; Sullivan, M.J. (1985). Bearing Capacity of a Geotextile Reinforced Foundation. *Proc. 11th Int. Conf. Soil Mech. And Found. Eng.*, San Francisco, Calif., p. 1777 - 1780.
- Harikumar, M.; Sankar, N.; Chandrakaran, S. (2016). Behaviour of model footing resting on sand bed reinforced with multi-directional reinforcing elements. *Geotextiles and Geomembranes*. V. 44, n. 4, p. 568 - 578.
- Haykin, S. (1994), "Neural Network: A Comprehensive Foundation", 2nd Edition, New York, Macmillan.
- 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.
- Kazi, M.; Shukla, S. K.; Habibi, D. (2015). Effect of Submergence on Settlement and Bearing Capacity of Surface Strip Footing on Geotextile-Reinforced Sand Bed. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. V. 1, n. 1, p. 1 - 11.
- Khing, K.H.; Das, B.M.; Puri, V.K.; Cook, E.E.; Yen, S.C. (1993). The bearing capacity of a strip foundation on geogrid-reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*. 12 (4), p. 351 - 361.
- Khing, K.H.; Das, B.M.; Puri, V.K.; Yen, S.C.; Cook, E.E. (1994). Foundation on strong sand underlain by weak clay with geogrid at the interface. *Geotextiles and Geomembranes*. 13, p. 199 - 206.
- Kumar, A.; Saran, S. (2003). Bearing capacity of rectangular footing on reinforced soil. p. 201 - 224.
- Latha G. M.; Somwanshi A. (2009). Bearing capacity of square footings on geosynthetic reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*. 27, p. 281 - 294.
- Lopes, R.C. & Silva, R.N.F. Uso de lógica booleana na triage de áreas aptas para a implantação de aterro sanitário no Município de Campina Verde, Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 7, n. 16, p. 487-499, 2020.
- Lundgren H.; Mortensen K. Determination by the theory of plasticity of the bearing capacity of continuous footings on sand. *Proc. 3rd Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Zurich (Switzerland)*, 1, 409-412, 1953.
- Mandal, J. N.; Sah, H. S. (1992). Bearing capacity tests on geogrid-reinforced clay. *Geotextiles and Geomembranes*. V. 11, n. 3, p. 327 - 333.
- Manjunath, V. R.; Dewaikar, D. M. Bearing capacity of inclined loaded footing on geotextile reinforced two-layer system. *Earth Reinforcement, Ochai, Yasufuku & Omine (eds), Balkema, Rotterdam, 1996*
- Marangnon, Márcio. *Mecânica dos Solos II*. Juiz de Fora: UFJF, 2009.
- Mello, V.F.B. The standard penetration test. State-of-the-art Report. In: *Panamerican Conf. On Soil Mech. And Found. Engng. 4., 1971, Puerto Rico*, v.1, p.1- 86, 1971.
- Meyerhof, G. G. The ultimate bearing capacity of foundations. *Geotechnique*, v. 2, p. 301-332, 1951.
- Meyerhof, G. G. Some recent research on the bearing capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, v.1, n.1, p.16-26, 1963.
- Michalowski, R.L. (2004). Limit loads on reinforced foundation soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*. 130 (4), p. 381 - 390.
- Moreira, F.R.S.; Barbosa, C.; Câmara, G.; Almeida Filho, R. Inferência Geográfica e Suporte à Decisão. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Org.). *Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos, 2002.

- Nataraj, M. S.; Mcmanis, K. L.; Hoadley, P. G. Settlement and bearing capacity of footings on reinforced sand. *Earth Reinforcement* Ochai, Yasufuku & Omine (eds), Balkema, Rotterdam, 1996.
- Omar M.T., Das B.M., Puri V.K., Yen S.C. (1993a). Ultimate bearing capacity of shallow foundations on sand with geogrid reinforcement. *Can Geotech. J* 30(3), p. 545 - 549.
- Omar M.T., Das B.M., Yen S.C., Puri V.K., Cook E.E. (1993b). Ultimate bearing capacity of rectangular foundations on geogrid-reinforced sand. *Geotech Test J. V* 16(2), p. 246 - 252.
- Patra, C. R.; Das, B.M.; Atalar, C. (2005). Bearing capacity of embedded strip foundation on geogrid-reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*. 23 (5), p. 454 - 462.
- Pinto, M. I. M. (2003). Applications of geosynthetics for soil reinforcement. *Ground Improvement*, 7, 2, p. 61 - 72.
- Pospasil, K., Zednik, P. Geosynthetic impact recognition on soil bearing capacity in the Geotechnical Laboratory Testing Field, 7th Int. Conf. Geosynthetics, Nice, France, 2002.
- Prandtl, L. Über die Eindringungsfestigkeit (Härte) plastischer Baustoffe und die Festigkeit von Schneiden. *Zeit. angew. Math. Mech.* 1, 15-20, 1921.
- Prasad, B.; Hariprasad, C.; Umashankar, B. (2016). Load-Settlement Response of Square Footing on Geogrid Reinforced Layered Granular Beds. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. V. 2, n. 4, p. 1 - 10.
- 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.
- Reissner, H. Zum Erddruckproblem: Proceedings. In: 1st International Congress of Applied Mechanics, p. 295-311, 1924.
- Roy, S.; Deb, K. (2017). Effects of aspect ratio of footings on bearing capacity for geogridreinforced sand over soft soil. *Geosynthetics International*, 24, 4, p. 362 - 382.
- Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., Williams, J.R., 1986. Learning Internal Representation by Error Propagation Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition, vol. 1. MIT Press, MA, Cambridge (Chapter 8).
- 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.
- Sitharam, T.G.; Sireesh, S. (2004). Model studies of embedded circular footing on geogrid reinforced sand beds. *Ground Improv. V.* 8(2), p. 69 - 75.
- Shin, E. C.; Das, B. M.; Puri, V. K.; Cook, E. E.; Yen, S. C. The bearing capacity of a strip foundation on geogrid-reinforced clay. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 16, no 4, pp. 534-541, 1993.
- Shin, E. C.; Das, B. M.; Atalar, C. Cyclic plate load test on geogrid-reinforced granular pad. In: 7th Int. Conf. Geosynthetics, Nice, France, 2002.

- Suku, L.; Prabhu, S. S.; Sivakumar Babu, D. L. (2017). Effect of geogrid-reinforcement in granular bases under repeated loading. *Geotextiles and Geomembranes*. V. 45, n. 4, p. 377 - 389.
- Schlosser, F.; Jacobsen, H. M.; Jurna, I. Soil reinforcement. In: 8th Europe Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 1159-1180, 1983.
- Tafreshi, S. N.; Khalaj, O.; Halvae, M. (2011). Experimental study of a shallow strip footing on geogrid-reinforced sand bed above a void. *Geosynthetics International*. V. 18, n. 4, p. 178 - 195.
- Tafreshi, S. N.; Sharifi, P.; Dawson, A. R. (2016). Performance of circular footings on sand by use of multiple-geocell or -planar geotextile reinforcing layers. *Soils and Foundations*. V. 56, n. 6, p. 984 - 997.
- Teixeira, A.H. Projeto e execução de fundações. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo. V.1, p.33-50, 1996.
- Teixeira, A.H.; Godoy, N.S. Análise, projeto e execução de fundações rasas. In: Hachich et al. (eds.). *Fundações: teoria e prática*. São Paulo: Pini. Cap.7, p.227-264, 1996.
- Terzaghi, K. *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer grundlage*. Wien: Franz Deuticke, 1925.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*, New York; Wiley.
- Terzaghi, K.; Peck, R. B. *Soil mechanics in engineering practice*. New York: John Wiley & Sons, 1948.
- Vertematti J. C. (2004). *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. Editorial Edgard Blücher, São Paulo, Brasil.
- Vertematti J. C. (2015). *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. Editorial Edgard Blücher, 1 ed, São Paulo, Brasil, p. 413.
- Vesic, A. S. Bearing capacity of shallow foundations. In: WINTERKORN, H.F.; Fang, H.Y. (Eds.). *Foundation engineering handbook*. New York: Van Nostrand Reinhold Co., P. 121-147, 1975.
- 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.
- Yetimoglu, T.; WU, S.T.H.; Saglamer, A. (1994). Bearing Capacity of Rectangular Footing on Geogrid –Reinforced Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*. 120 (12), p. 2083 –

## **APÊNDICE A – REGRAS DE ENTRADA FUZZY**

| VARIÁVEIS DE ENTRADA (INPUT) |            |                          |                | VARIÁVEL DE SAÍDA (OUTPUT)         |
|------------------------------|------------|--------------------------|----------------|------------------------------------|
| Densidade do Solo            | Cap. carga | Resistência profundidade | Carga aplicada | Fator de segurança                 |
| Nspt                         | kPa        |                          | kPa            | Fator de melhoria de carga - BCR % |
| Fofa                         | Baixa      | Baixa                    | Baixa          | Baixo                              |
| Pouco compactada             | Média      | Média                    | Média          | Aceitável                          |
| Mediamente compactada        | Alta       | Alta                     | Alta           | Alto                               |
| Compactada                   |            |                          |                |                                    |
| Alta compactada              |            |                          |                |                                    |
|                              |            |                          |                | Fundação profunda                  |
|                              |            |                          |                | Fundação rasa reforçada            |
|                              |            |                          |                | Fundação rasa                      |

| Cruzamento das variáveis de entrada - Fuzzy |   |    |     |    |    |    | Variável de saída Fuzzy |
|---|---|----|-----|----|----|----|-------------------------|
|   | I | II | III | IV | V  | VI | I                       |
| Densidade do solo arenoso                   |   |    |     |    |    |    | Tipo de fundação        |
| 1   | F | B  | B   | B  | B  | B  | FP                      |
| 2   | F | B  | B   | B  | B  | M  | FP                      |
| 3   | F | B  | B   | B  | B  | A  | FP                      |
| 4   | F | B  | B   | B  | AC | B  | FP                      |





|    |   |   |   |   |    |   |     |
|----|---|---|---|---|----|---|-----|
| 62 | F | B | A | B | AC | A | FRR |
| 63 | F | B | A | B | A  | B | FR  |
| 64 | F | B | A | B | A  | M | FR  |
| 65 | F | B | A | B | A  | A | FR  |
| 66 | F | B | A | M | B  | B | FP  |
| 67 | F | B | A | M | B  | M | FP  |
| 68 | F | B | A | M | B  | A | FP  |
| 69 | F | B | A | M | AC | B | FRR |
| 70 | F | B | A | M | AC | M | FRR |
| 71 | F | B | A | M | AC | A | FRR |
| 72 | F | B | A | M | A  | B | FR  |
| 73 | F | B | A | M | A  | M | FR  |
| 74 | F | B | A | M | A  | A | FR  |
| 75 | F | B | A | A | B  | B | FP  |
| 76 | F | B | A | A | B  | M | FP  |
| 77 | F | B | A | A | B  | A | FP  |
| 78 | F | B | A | A | AC | B | FP  |
| 79 | F | B | A | A | AC | M | FRR |
| 80 | F | B | A | A | AC | A | FRR |
| 81 | F | B | A | A | A  | B | FR  |
| 82 | F | B | A | A | A  | M | FR  |
| 83 | F | B | A | A | A  | A | FR  |
| 84 | F | M | B | B | B  | B | FP  |
| 85 | F | M | B | B | B  | M | FP  |
| 86 | F | M | B | B | B  | A | FP  |
| 87 | F | M | B | B | AC | B | FP  |
| 88 | F | M | B | B | AC | M | FRR |
| 89 | F | M | B | B | AC | A | FRR |

|     |   |   |   |   |   |   |    |   |     |
|-----|---|---|---|---|---|---|----|---|-----|
| 90  | F | M | B | B | B | B | A  | B | FRR |
| 91  | F | M | B | B | B | B | A  | M | FRR |
| 92  | F | M | B | B | B | B | A  | A | FRR |
| 93  | F | M | B | M | M | M | B  | B | FP  |
| 94  | F | M | B | M | M | M | B  | M | FP  |
| 95  | F | M | B | M | M | M | B  | A | FP  |
| 96  | F | M | B | M | M | M | AC | B | FRR |
| 97  | F | M | B | M | M | M | AC | M | FRR |
| 98  | F | M | B | M | M | M | AC | A | FRR |
| 99  | F | M | B | M | M | M | A  | B | FRR |
| 100 | F | M | B | M | M | M | A  | M | FRR |
| 101 | F | M | B | M | M | M | A  | A | FRR |
| 102 | F | M | B | A | A | A | B  | B | FP  |
| 103 | F | M | B | A | A | A | B  | M | FP  |
| 104 | F | M | B | A | A | A | B  | A | FP  |
| 105 | F | M | B | A | A | A | AC | B | FRR |
| 106 | F | M | B | A | A | A | AC | M | FRR |
| 107 | F | M | B | A | A | A | AC | A | FRR |
| 108 | F | M | B | A | A | A | A  | B | FRR |
| 109 | F | M | B | A | A | A | A  | M | FRR |
| 110 | F | M | B | A | A | A | A  | A | FRR |
| 111 | F | M | M | B | B | B | B  | B | FP  |
| 112 | F | M | M | B | B | B | B  | M | FP  |
| 113 | F | M | M | B | B | B | B  | A | FP  |
| 114 | F | M | M | B | B | B | AC | B | FRR |
| 115 | F | M | M | B | B | B | AC | M | FRR |
| 116 | F | M | M | B | B | B | AC | A | FRR |
| 117 | F | M | M | B | B | B | A  | B | FRR |



|     |   |   |   |   |    |   |     |
|-----|---|---|---|---|----|---|-----|
| 146 | F | M | A | B | A  | A | FR  |
| 147 | F | M | A | M | B  | B | FP  |
| 148 | F | M | A | M | B  | M | FP  |
| 149 | F | M | A | M | B  | A | FP  |
| 150 | F | M | A | M | AC | B | FRR |
| 151 | F | M | A | M | AC | M | FRR |
| 152 | F | M | A | M | AC | A | FRR |
| 153 | F | M | A | M | A  | B | FR  |
| 154 | F | M | A | M | A  | M | FR  |
| 155 | F | M | A | M | A  | A | FR  |
| 156 | F | M | A | A | B  | B | FP  |
| 157 | F | M | A | A | B  | M | FP  |
| 158 | F | M | A | A | B  | A | FP  |
| 159 | F | M | A | A | AC | B | FP  |
| 160 | F | M | A | A | AC | M | FP  |
| 161 | F | M | A | A | AC | A | FP  |
| 162 | F | M | A | A | A  | B | FRR |
| 163 | F | M | A | A | A  | M | FRR |
| 164 | F | M | A | A | A  | A | FRR |
| 165 | F | A | B | B | B  | B | FP  |
| 166 | F | A | B | B | B  | M | FP  |
| 167 | F | A | B | B | B  | A | FP  |
| 168 | F | A | B | B | AC | B | FRR |
| 169 | F | A | B | B | AC | M | FRR |
| 170 | F | A | B | B | AC | A | FRR |
| 171 | F | A | B | B | A  | B | FR  |
| 172 | F | A | B | B | A  | M | FR  |
| 173 | F | A | B | B | A  | A | FR  |

|     |   |   |   |   |   |    |     |     |
|-----|---|---|---|---|---|----|-----|-----|
| 174 | F | A | B | M | B | B  | F   | FP  |
| 175 | F | A | B | M | B | B  | F   | FP  |
| 176 | F | A | B | M | B | B  | F   | FP  |
| 177 | F | A | B | M | B | AC | FRR | FRR |
| 178 | F | A | B | M | B | AC | FRR | FRR |
| 179 | F | A | B | M | B | AC | FRR | FRR |
| 180 | F | A | B | M | B | A  | FRR | FRR |
| 181 | F | A | B | M | B | A  | FRR | FRR |
| 182 | F | A | B | M | B | A  | FRR | FRR |
| 183 | F | A | B | A | B | B  | F   | FP  |
| 184 | F | A | B | A | B | B  | F   | FP  |
| 185 | F | A | B | A | B | B  | F   | FP  |
| 186 | F | A | B | A | B | AC | F   | FP  |
| 187 | F | A | B | A | B | AC | F   | FP  |
| 188 | F | A | B | A | B | AC | F   | FP  |
| 189 | F | A | B | A | B | A  | FRR | FRR |
| 190 | F | A | B | A | B | A  | FRR | FRR |
| 191 | F | A | B | A | B | A  | FRR | FRR |
| 192 | F | A | M | B | B | B  | F   | FP  |
| 193 | F | A | M | B | B | B  | F   | FP  |
| 194 | F | A | M | B | B | B  | F   | FP  |
| 195 | F | A | M | B | B | AC | FRR | FRR |
| 196 | F | A | M | B | B | AC | FRR | FRR |
| 197 | F | A | M | B | B | AC | FRR | FRR |
| 198 | F | A | M | B | B | A  | FRR | FRR |
| 199 | F | A | M | B | B | A  | FRR | FRR |
| 200 | F | A | M | B | B | A  | FRR | FRR |
| 201 | F | A | M | M | B | B  | F   | FP  |

|     |   |   |   |   |   |    |   |   |     |
|-----|---|---|---|---|---|----|---|---|-----|
| 202 | F | A | M | M | M | B  | M | M | FP  |
| 203 | F | A | M | M | M | B  | M | M | FP  |
| 204 | F | A | M | M | M | AC | M | B | FRR |
| 205 | F | A | M | M | M | AC | M | M | FRR |
| 206 | F | A | M | M | M | AC | M | A | FRR |
| 207 | F | A | M | M | M | A  | M | B | FR  |
| 208 | F | A | M | M | M | A  | M | M | FR  |
| 209 | F | A | M | M | M | A  | M | A | FR  |
| 210 | F | A | M | M | M | B  | M | B | FP  |
| 211 | F | A | M | M | M | B  | M | M | FP  |
| 212 | F | A | M | M | M | B  | M | A | FP  |
| 213 | F | A | M | M | M | AC | M | B | FP  |
| 214 | F | A | M | M | M | AC | M | M | FRR |
| 215 | F | A | M | M | M | AC | M | A | FRR |
| 216 | F | A | M | M | M | A  | M | B | FRR |
| 217 | F | A | M | M | M | A  | M | M | FRR |
| 218 | F | A | M | M | M | A  | M | A | FRR |
| 219 | F | A | M | M | M | B  | M | B | FP  |
| 220 | F | A | M | M | M | B  | M | M | FP  |
| 221 | F | A | M | M | M | B  | M | A | FP  |
| 222 | F | A | M | M | M | AC | M | B | FRR |
| 223 | F | A | M | M | M | AC | M | M | FRR |
| 224 | F | A | M | M | M | AC | M | A | FR  |
| 225 | F | A | M | M | M | A  | M | B | FR  |
| 226 | F | A | M | M | M | A  | M | M | FR  |
| 227 | F | A | M | M | M | A  | M | A | FR  |
| 228 | F | A | M | M | M | B  | M | B | FP  |
| 229 | F | A | M | M | M | B  | M | M | FP  |

|     |    |   |   |   |    |   |     |
|-----|----|---|---|---|----|---|-----|
| 230 | F  | A | A | M | B  | A | FP  |
| 231 | F  | A | M | M | AC | B | FRR |
| 232 | F  | A | M | M | AC | M | FRR |
| 233 | F  | A | M | M | AC | A | FRR |
| 234 | F  | A | M | M | A  | B | FR  |
| 235 | F  | A | M | M | A  | M | FR  |
| 236 | F  | A | M | M | A  | A | FR  |
| 237 | F  | A | A | A | B  | B | FP  |
| 238 | F  | A | A | A | B  | M | FP  |
| 239 | F  | A | A | A | B  | A | FP  |
| 240 | F  | A | A | A | AC | B | FR  |
| 241 | F  | A | A | A | AC | M | FR  |
| 242 | F  | A | A | A | AC | A | FR  |
| 243 | F  | A | A | A | A  | B | FR  |
| 244 | F  | A | A | A | A  | M | FR  |
| 245 | F  | A | A | A | A  | A | FR  |
| 246 | PC | B | B | B | B  | B | FP  |
| 247 | PC | B | B | B | B  | M | FP  |
| 248 | PC | B | B | B | B  | A | FP  |
| 249 | PC | B | B | B | AC | B | FP  |
| 250 | PC | B | B | B | AC | M | FRR |
| 251 | PC | B | B | B | AC | A | FRR |
| 252 | PC | B | B | B | A  | B | FRR |
| 253 | PC | B | B | B | A  | M | FRR |
| 254 | PC | B | B | B | A  | A | FRR |
| 255 | PC | B | B | M | B  | B | FP  |
| 256 | PC | B | B | M | B  | M | FP  |
| 257 | PC | B | B | M | B  | A | FP  |

|     |    |   |   |   |    |   |     |
|-----|----|---|---|---|----|---|-----|
| 258 | PC | B | B | M | AC | B | FP  |
| 259 | PC | B | M | M | AC | M | FRR |
| 260 | PC | B | M | M | AC | A | FRR |
| 261 | PC | B | M | M | A  | B | FRR |
| 262 | PC | B | M | M | A  | M | FRR |
| 263 | PC | B | M | M | A  | A | FRR |
| 264 | PC | B | A | A | B  | B | FP  |
| 265 | PC | B | A | A | B  | M | FP  |
| 266 | PC | B | A | A | B  | A | FP  |
| 267 | PC | B | A | A | AC | B | FP  |
| 268 | PC | B | A | A | AC | M | FP  |
| 269 | PC | B | A | A | AC | A | FRR |
| 270 | PC | B | A | A | A  | B | FP  |
| 271 | PC | B | A | A | A  | M | FRR |
| 272 | PC | B | A | A | A  | A | FRR |
| 273 | PC | B | M | B | B  | B | FP  |
| 274 | PC | B | M | B | B  | M | FP  |
| 275 | PC | B | M | B | B  | A | FRR |
| 276 | PC | B | M | B | AC | B | FRR |
| 277 | PC | B | M | B | AC | M | FRR |
| 278 | PC | B | M | B | AC | A | FRR |
| 279 | PC | B | M | B | A  | B | FR  |
| 280 | PC | B | M | B | A  | M | FR  |
| 281 | PC | B | M | B | A  | A | FR  |
| 282 | PC | B | M | M | B  | B | FP  |
| 283 | PC | B | M | M | B  | M | FP  |
| 284 | PC | B | M | M | B  | A | FP  |
| 285 | PC | B | M | M | AC | B | FRR |

|     |    |   |   |   |   |    |   |   |     |
|-----|----|---|---|---|---|----|---|---|-----|
| 286 | PC | B | M | M | M | AC | M | M | FRR |
| 287 | PC | B | M | M | M | AC | M | A | FRR |
| 288 | PC | B | M | M | M | A  | M | B | FRR |
| 289 | PC | B | M | M | M | A  | M | M | FRR |
| 290 | PC | B | M | M | M | A  | M | A | FRR |
| 291 | PC | B | M | M | A | B  | A | B | FP  |
| 292 | PC | B | M | M | A | B  | A | M | FP  |
| 293 | PC | B | M | M | A | B  | A | A | FP  |
| 294 | PC | B | M | M | A | AC | A | B | FP  |
| 295 | PC | B | M | M | A | AC | A | M | FP  |
| 296 | PC | B | M | M | A | AC | A | A | FP  |
| 297 | PC | B | M | M | A | A  | A | B | FRR |
| 298 | PC | B | M | M | A | A  | A | M | FRR |
| 299 | PC | B | M | M | A | A  | A | A | FRR |
| 300 | PC | B | A | A | B | B  | B | B | FP  |
| 301 | PC | B | A | A | B | B  | B | M | FP  |
| 302 | PC | B | A | A | B | B  | B | A | FP  |
| 303 | PC | B | A | A | B | AC | B | B | FRR |
| 304 | PC | B | A | A | B | AC | B | M | FRR |
| 305 | PC | B | A | A | B | AC | B | A | FRR |
| 306 | PC | B | A | A | B | A  | B | B | FR  |
| 307 | PC | B | A | A | B | A  | B | M | FR  |
| 308 | PC | B | A | A | B | A  | B | A | FR  |
| 309 | PC | B | A | A | M | B  | B | B | FP  |
| 310 | PC | B | A | A | M | B  | B | M | FP  |
| 311 | PC | B | A | A | M | B  | B | A | FP  |
| 312 | PC | B | A | A | M | AC | B | B | FRR |
| 313 | PC | B | A | A | M | AC | M | M | FRR |

|     |    |   |   |   |    |   |     |
|-----|----|---|---|---|----|---|-----|
| 314 | PC | B | A | M | AC | A | FRR |
| 315 | PC | B | A | M | A  | B | FR  |
| 316 | PC | B | A | M | A  | M | FR  |
| 317 | PC | B | A | M | A  | A | FR  |
| 318 | PC | B | A | A | B  | B | FP  |
| 319 | PC | B | A | A | B  | M | FP  |
| 320 | PC | B | A | A | B  | A | FP  |
| 321 | PC | B | A | A | AC | B | FP  |
| 322 | PC | B | A | A | AC | M | FRR |
| 323 | PC | B | A | A | AC | A | FRR |
| 324 | PC | B | A | A | A  | B | FR  |
| 325 | PC | B | A | A | A  | M | FR  |
| 326 | PC | B | A | A | A  | A | FR  |
| 327 | PC | M | B | B | B  | B | FP  |
| 328 | PC | M | B | B | B  | M | FP  |
| 329 | PC | M | B | B | B  | A | FP  |
| 330 | PC | M | B | B | AC | B | FP  |
| 331 | PC | M | B | B | AC | M | FRR |
| 332 | PC | M | B | B | AC | A | FRR |
| 333 | PC | M | B | B | A  | B | FRR |
| 334 | PC | M | B | B | A  | M | FRR |
| 335 | PC | M | B | B | A  | A | FRR |
| 336 | PC | M | B | M | B  | B | FP  |
| 337 | PC | M | B | M | B  | M | FP  |
| 338 | PC | M | B | M | B  | A | FP  |
| 339 | PC | M | B | M | AC | B | FR  |
| 340 | PC | M | B | M | AC | M | FRR |
| 341 | PC | M | B | M | AC | A | FRR |

|     |    |   |   |   |    |   |     |
|-----|----|---|---|---|----|---|-----|
| 342 | PC | M | B | M | A  | B | FRR |
| 343 | PC | M | B | M | A  | M | FRR |
| 344 | PC | M | B | M | A  | A | FRR |
| 345 | PC | M | B | A | B  | B | FP  |
| 346 | PC | M | B | A | B  | M | FP  |
| 347 | PC | M | B | A | B  | A | FP  |
| 348 | PC | M | B | A | AC | B | FRR |
| 349 | PC | M | B | A | AC | M | FRR |
| 350 | PC | M | B | A | AC | A | FRR |
| 351 | PC | M | B | A | A  | B | FRR |
| 352 | PC | M | B | A | A  | M | FRR |
| 353 | PC | M | B | A | A  | A | FRR |
| 354 | PC | M | M | B | B  | B | FP  |
| 355 | PC | M | M | B | B  | M | FP  |
| 356 | PC | M | M | B | B  | A | FP  |
| 357 | PC | M | M | B | AC | B | FRR |
| 358 | PC | M | M | B | AC | M | FRR |
| 359 | PC | M | M | B | AC | A | FRR |
| 360 | PC | M | M | B | A  | B | FRR |
| 361 | PC | M | M | B | A  | M | FRR |
| 362 | PC | M | M | B | A  | A | FRR |
| 363 | PC | M | M | M | B  | B | FP  |
| 364 | PC | M | M | M | B  | M | FRR |
| 365 | PC | M | M | M | B  | A | FRR |
| 366 | PC | M | M | M | AC | B | FR  |
| 367 | PC | M | M | M | AC | M | FR  |
| 368 | PC | M | M | M | AC | A | FR  |
| 369 | PC | M | M | M | A  | B | FR  |



|     |    |   |   |   |    |   |    |     |
|-----|----|---|---|---|----|---|----|-----|
| 398 | PC | M | A | M | A  | M | PC | FR  |
| 399 | PC | M | A | A | A  | B | PC | FP  |
| 400 | PC | M | A | A | A  | B | PC | FP  |
| 401 | PC | M | A | A | A  | B | PC | FP  |
| 402 | PC | M | A | A | AC | B | PC | FP  |
| 403 | PC | M | A | A | AC | M | PC | FP  |
| 404 | PC | M | A | A | AC | A | PC | FP  |
| 405 | PC | M | A | A | A  | B | PC | FRR |
| 406 | PC | M | A | A | A  | M | PC | FRR |
| 407 | PC | M | A | A | A  | A | PC | FRR |
| 408 | PC | A | B | B | B  | B | PC | FP  |
| 409 | PC | A | B | B | B  | M | PC | FP  |
| 410 | PC | A | B | B | B  | A | PC | FP  |
| 411 | PC | A | B | B | AC | B | PC | FRR |
| 412 | PC | A | B | B | AC | M | PC | FRR |
| 413 | PC | A | B | B | AC | A | PC | FRR |
| 414 | PC | A | B | B | A  | B | PC | FR  |
| 415 | PC | A | B | B | A  | M | PC | FR  |
| 416 | PC | A | B | B | A  | A | PC | FR  |
| 417 | PC | A | B | M | B  | B | PC | FP  |
| 418 | PC | A | B | M | M  | M | PC | FP  |
| 419 | PC | A | B | M | M  | A | PC | FP  |
| 420 | PC | A | B | M | AC | B | PC | FRR |
| 421 | PC | A | B | M | AC | M | PC | FRR |
| 422 | PC | A | B | M | AC | A | PC | FRR |
| 423 | PC | A | B | M | A  | B | PC | FRR |
| 424 | PC | A | B | M | A  | M | PC | FRR |
| 425 | PC | A | B | M | A  | A | PC | FRR |



|     |    |   |   |   |   |   |    |   |     |
|-----|----|---|---|---|---|---|----|---|-----|
| 454 | PC | A | M | A | M | A | B  | M | FP  |
| 455 | PC | A | M | A | M | A | B  | A | FP  |
| 456 | PC | A | M | A | M | A | AC | B | FP  |
| 457 | PC | A | M | A | M | A | AC | M | FRR |
| 458 | PC | A | M | A | M | A | AC | A | FRR |
| 459 | PC | A | M | A | M | A | A  | B | FRR |
| 460 | PC | A | M | A | M | A | A  | M | FRR |
| 461 | PC | A | M | A | M | A | A  | A | FRR |
| 462 | PC | A | A | B | B | B | B  | B | FP  |
| 463 | PC | A | A | B | B | B | B  | M | FP  |
| 464 | PC | A | A | B | B | B | B  | A | FP  |
| 465 | PC | A | A | B | B | B | AC | B | FRR |
| 466 | PC | A | A | B | B | B | AC | M | FRR |
| 467 | PC | A | A | B | B | B | AC | A | FR  |
| 468 | PC | A | A | B | B | B | A  | B | FR  |
| 469 | PC | A | A | B | B | B | A  | M | FR  |
| 470 | PC | A | A | B | B | B | A  | A | FR  |
| 471 | PC | A | A | M | M | M | B  | B | FP  |
| 472 | PC | A | A | M | M | M | B  | M | FP  |
| 473 | PC | A | A | M | M | M | B  | A | FP  |
| 474 | PC | A | A | M | M | M | AC | B | FRR |
| 475 | PC | A | A | M | M | M | AC | M | FRR |
| 476 | PC | A | A | M | M | M | AC | A | FRR |
| 477 | PC | A | A | M | M | M | A  | B | FR  |
| 478 | PC | A | A | M | M | M | A  | M | FR  |
| 479 | PC | A | A | M | M | M | A  | A | FR  |
| 480 | PC | A | A | A | A | A | B  | B | FP  |
| 481 | PC | A | A | A | A | A | B  | M | FP  |

|     |    |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |     |
|-----|----|---|---|---|---|---|---|---|----|----|---|-----|
| 482 | PC | A | A | A | A | A | B | B | A  | B  | A | FP  |
| 483 | PC | A | A | A | A | A | B | B | AC | AC | B | FR  |
| 484 | PC | A | A | A | A | A | B | B | AC | AC | M | FR  |
| 485 | PC | A | A | A | A | A | B | B | AC | AC | A | FR  |
| 486 | PC | A | A | A | A | A | B | B | A  | A  | B | FR  |
| 487 | PC | A | A | A | A | A | B | B | A  | A  | M | FR  |
| 488 | PC | A | A | A | A | A | B | B | A  | A  | A | FR  |
| 489 | MC | B | B | B | B | B | B | B | B  | B  | B | FP  |
| 490 | MC | B | B | B | B | B | B | B | B  | B  | M | FP  |
| 491 | MC | B | B | B | B | B | B | B | B  | B  | A | FP  |
| 492 | MC | B | B | B | B | B | B | B | AC | AC | B | FP  |
| 493 | MC | B | B | B | B | B | B | B | AC | AC | M | FRR |
| 494 | MC | B | B | B | B | B | B | B | AC | AC | A | FRR |
| 495 | MC | B | B | B | B | B | B | B | A  | A  | B | FRR |
| 496 | MC | B | B | B | B | B | B | B | A  | A  | M | FRR |
| 497 | MC | B | B | B | B | B | B | B | A  | A  | A | FRR |
| 498 | MC | B | B | B | B | B | B | M | B  | B  | B | FP  |
| 499 | MC | B | B | B | B | B | B | M | B  | B  | M | FP  |
| 500 | MC | B | B | B | B | B | B | M | B  | B  | A | FP  |
| 501 | MC | B | B | B | B | B | B | M | AC | AC | B | FP  |
| 502 | MC | B | B | B | B | B | B | M | AC | AC | M | FRR |
| 503 | MC | B | B | B | B | B | B | M | AC | AC | A | FRR |
| 504 | MC | B | B | B | B | B | B | M | A  | A  | B | FRR |
| 505 | MC | B | B | B | B | B | B | M | A  | A  | M | FRR |
| 506 | MC | B | B | B | B | B | B | M | A  | A  | A | FRR |
| 507 | MC | B | B | B | B | B | B | A | B  | B  | B | FP  |
| 508 | MC | B | B | B | B | B | B | A | B  | B  | M | FP  |
| 509 | MC | B | B | B | B | B | B | A | B  | B  | A | FP  |

|     |    |   |   |    |    |     |    |
|-----|----|---|---|----|----|-----|----|
| 510 | MC | B | B | A  | AC | B   | FP |
| 511 | MC | B | A | AC | M  | FP  |    |
| 512 | MC | B | A | AC | A  | FRR |    |
| 513 | MC | B | A | A  | B  | FP  |    |
| 514 | MC | B | A | A  | M  | FRR |    |
| 515 | MC | B | A | A  | A  | FRR |    |
| 516 | MC | B | M | B  | B  | FP  |    |
| 517 | MC | B | M | B  | B  | FP  |    |
| 518 | MC | B | M | B  | B  | FRR |    |
| 519 | MC | B | M | B  | AC | FRR |    |
| 520 | MC | B | M | B  | AC | FRR |    |
| 521 | MC | B | M | B  | AC | FRR |    |
| 522 | MC | B | M | B  | A  | FR  |    |
| 523 | MC | B | M | B  | A  | FR  |    |
| 524 | MC | B | M | B  | A  | FR  |    |
| 525 | MC | B | M | M  | B  | FP  |    |
| 526 | MC | B | M | M  | B  | FP  |    |
| 527 | MC | B | M | M  | B  | FP  |    |
| 528 | MC | B | M | M  | AC | FRR |    |
| 529 | MC | B | M | M  | AC | FRR |    |
| 530 | MC | B | M | M  | AC | FRR |    |
| 531 | MC | B | M | M  | A  | FRR |    |
| 532 | MC | B | M | M  | A  | FRR |    |
| 533 | MC | B | M | M  | A  | FRR |    |
| 534 | MC | B | M | A  | B  | FP  |    |
| 535 | MC | B | M | A  | M  | FP  |    |
| 536 | MC | B | M | A  | A  | FP  |    |
| 537 | MC | B | M | A  | AC | FP  |    |

|     |    |   |   |   |    |   |     |
|-----|----|---|---|---|----|---|-----|
| 538 | MC | B | M | A | AC | M | FP  |
| 539 | MC | B | M | A | AC | A | FP  |
| 540 | MC | B | M | A | AC | B | FRR |
| 541 | MC | B | M | A | AC | M | FRR |
| 542 | MC | B | M | A | A  | A | FRR |
| 543 | MC | B | A | B | B  | B | FP  |
| 544 | MC | B | A | B | B  | M | FP  |
| 545 | MC | B | A | B | B  | A | FP  |
| 546 | MC | B | A | B | AC | B | FRR |
| 547 | MC | B | A | B | AC | M | FRR |
| 548 | MC | B | A | B | AC | A | FRR |
| 549 | MC | B | A | B | A  | B | FR  |
| 550 | MC | B | A | B | A  | M | FR  |
| 551 | MC | B | A | B | A  | A | FR  |
| 552 | MC | B | A | M | B  | B | FP  |
| 553 | MC | B | A | M | B  | M | FP  |
| 554 | MC | B | A | M | B  | A | FP  |
| 555 | MC | B | A | M | AC | B | FRR |
| 556 | MC | B | A | M | AC | M | FRR |
| 557 | MC | B | A | M | AC | A | FRR |
| 558 | MC | B | A | M | A  | B | FR  |
| 559 | MC | B | A | M | A  | M | FR  |
| 560 | MC | B | A | M | A  | A | FR  |
| 561 | MC | B | A | A | B  | B | FP  |
| 562 | MC | B | A | A | B  | M | FP  |
| 563 | MC | B | A | A | B  | A | FP  |
| 564 | MC | B | A | A | AC | B | FP  |
| 565 | MC | B | A | A | AC | M | FRR |

|     |    |   |   |   |   |    |    |   |     |
|-----|----|---|---|---|---|----|----|---|-----|
| 566 | MC |   | B | A | A | AC | A  | A | FRR |
| 567 | MC |   | B | A | A | A  | A  | B | FR  |
| 568 | MC |   | B | A | A | A  | A  | M | FR  |
| 569 | MC |   | B | A | A | A  | A  | A | FR  |
| 570 | MC | M | B | B | B | B  | B  | B | FP  |
| 571 | MC | M | B | B | B | B  | B  | M | FP  |
| 572 | MC | M | B | B | B | B  | B  | A | FP  |
| 573 | MC | M | B | B | B | AC | B  | B | FP  |
| 574 | MC | M | B | B | B | AC | AC | M | FRR |
| 575 | MC | M | B | B | B | AC | AC | A | FRR |
| 576 | MC | M | B | B | B | A  | A  | B | FRR |
| 577 | MC | M | B | B | B | A  | A  | M | FRR |
| 578 | MC | M | B | B | B | A  | A  | A | FRR |
| 579 | MC | M | B | M | M | B  | B  | B | FP  |
| 580 | MC | M | B | M | M | B  | B  | M | FP  |
| 581 | MC | M | B | M | M | B  | B  | A | FP  |
| 582 | MC | M | B | M | M | AC | AC | B | FRR |
| 583 | MC | M | B | M | M | AC | AC | M | FRR |
| 584 | MC | M | B | M | M | AC | AC | A | FRR |
| 585 | MC | M | B | M | M | A  | A  | B | FRR |
| 586 | MC | M | B | M | M | A  | A  | M | FRR |
| 587 | MC | M | B | M | M | A  | A  | A | FRR |
| 588 | MC | M | B | A | A | B  | B  | B | FP  |
| 589 | MC | M | B | A | A | B  | B  | M | FP  |
| 590 | MC | M | B | A | A | B  | B  | A | FP  |
| 591 | MC | M | B | A | A | AC | AC | B | FRR |
| 592 | MC | M | B | A | A | AC | AC | M | FRR |
| 593 | MC | M | B | A | A | AC | AC | A | FRR |

|     |    |   |   |   |    |    |    |     |
|-----|----|---|---|---|----|----|----|-----|
| 594 | MC | M | B | A | A  | A  | B  | FRR |
| 595 | MC | M | B | A | A  | A  | M  | FRR |
| 596 | MC | M | B | A | A  | A  | A  | FRR |
| 597 | MC | M | M | B | B  | B  | B  | FP  |
| 598 | MC | M | M | B | B  | B  | M  | FP  |
| 599 | MC | M | M | B | B  | B  | A  | FP  |
| 600 | MC | M | M | B | B  | B  | B  | FRR |
| 601 | MC | M | M | B | B  | B  | AC | FRR |
| 602 | MC | M | M | B | B  | B  | AC | FRR |
| 603 | MC | M | M | B | B  | B  | AC | FRR |
| 604 | MC | M | M | B | B  | B  | A  | FRR |
| 605 | MC | M | M | B | B  | B  | A  | FRR |
| 606 | MC | M | M | M | B  | B  | B  | FP  |
| 607 | MC | M | M | M | M  | M  | M  | FRR |
| 608 | MC | M | M | M | M  | M  | A  | FRR |
| 609 | MC | M | M | M | M  | M  | AC | FR  |
| 610 | MC | M | M | M | M  | M  | AC | FR  |
| 611 | MC | M | M | M | M  | M  | AC | FR  |
| 612 | MC | M | M | M | M  | M  | A  | FR  |
| 613 | MC | M | M | M | M  | M  | B  | FR  |
| 614 | MC | M | M | M | M  | M  | M  | FR  |
| 615 | MC | M | M | A | B  | B  | B  | FP  |
| 616 | MC | M | M | A | B  | B  | M  | FP  |
| 617 | MC | M | M | A | B  | B  | A  | FRR |
| 618 | MC | M | M | A | AC | AC | B  | FRR |
| 619 | MC | M | M | A | AC | AC | M  | FRR |
| 620 | MC | M | M | A | AC | AC | A  | FRR |
| 621 | MC | M | M | A | A  | A  | B  | FRR |

|     |    |   |   |   |   |   |   |   |    |    |   |     |
|-----|----|---|---|---|---|---|---|---|----|----|---|-----|
| 622 | MC | M | M | A | A | A | A | M | A  | A  | M | FRR |
| 623 | MC | M | M | A | A | A | A | M | A  | A  | A | FR  |
| 624 | MC | M | A | B | B | B | B | A | B  | B  | B | FP  |
| 625 | MC | M | A | B | B | B | B | A | B  | B  | M | FP  |
| 626 | MC | M | A | B | B | B | B | A | B  | B  | A | FP  |
| 627 | MC | M | A | B | B | B | B | A | AC | AC | B | FRR |
| 628 | MC | M | A | B | B | B | B | A | AC | AC | M | FRR |
| 629 | MC | M | A | B | B | B | B | A | AC | AC | A | FRR |
| 630 | MC | M | A | B | B | B | B | A | A  | A  | B | FRR |
| 631 | MC | M | A | B | B | B | B | A | A  | A  | M | FR  |
| 632 | MC | M | A | B | B | B | B | A | A  | A  | A | FR  |
| 633 | MC | M | A | M | M | M | M | A | B  | B  | B | FP  |
| 634 | MC | M | A | M | M | M | M | A | B  | B  | M | FP  |
| 635 | MC | M | A | M | M | M | M | A | B  | B  | A | FP  |
| 636 | MC | M | A | M | M | M | M | A | AC | AC | B | FRR |
| 637 | MC | M | A | M | M | M | M | A | AC | AC | M | FRR |
| 638 | MC | M | A | M | M | M | M | A | AC | AC | A | FRR |
| 639 | MC | M | A | M | M | M | M | A | A  | A  | B | FR  |
| 640 | MC | M | A | M | M | M | M | A | A  | A  | M | FR  |
| 641 | MC | M | A | M | M | M | M | A | A  | A  | A | FR  |
| 642 | MC | M | A | A | A | A | A | A | B  | B  | B | FP  |
| 643 | MC | M | A | A | A | A | A | A | B  | B  | M | FP  |
| 644 | MC | M | A | A | A | A | A | A | B  | B  | A | FP  |
| 645 | MC | M | A | A | A | A | A | A | AC | AC | B | FP  |
| 646 | MC | M | A | A | A | A | A | A | AC | AC | M | FP  |
| 647 | MC | M | A | A | A | A | A | A | AC | AC | A | FP  |
| 648 | MC | M | A | A | A | A | A | A | A  | A  | B | FRR |
| 649 | MC | M | A | A | A | A | A | A | A  | A  | M | FRR |

|     |    |   |   |   |   |   |   |    |   |     |
|-----|----|---|---|---|---|---|---|----|---|-----|
| 650 | MC | M | A | A | A | A | A | A  | A | FRR |
| 651 | MC | A | B | B | B | B | B | B  | B | FP  |
| 652 | MC | A | B | B | B | B | B | B  | B | FP  |
| 653 | MC | A | B | B | B | B | B | B  | B | FP  |
| 654 | MC | A | B | B | B | B | B | AC | B | FRR |
| 655 | MC | A | B | B | B | B | B | AC | M | FRR |
| 656 | MC | A | B | B | B | B | B | AC | A | FRR |
| 657 | MC | A | B | B | B | B | B | A  | B | FR  |
| 658 | MC | A | B | B | B | B | B | A  | M | FR  |
| 659 | MC | A | B | B | B | B | B | A  | A | FR  |
| 660 | MC | A | B | M | M | M | M | B  | B | FP  |
| 661 | MC | A | B | M | M | M | M | B  | M | FP  |
| 662 | MC | A | B | M | M | M | M | B  | A | FP  |
| 663 | MC | A | B | M | M | M | M | AC | B | FRR |
| 664 | MC | A | B | M | M | M | M | AC | M | FRR |
| 665 | MC | A | B | M | M | M | M | AC | A | FRR |
| 666 | MC | A | B | M | M | M | M | A  | B | FRR |
| 667 | MC | A | B | M | M | M | M | A  | M | FRR |
| 668 | MC | A | B | M | M | M | M | A  | A | FRR |
| 669 | MC | A | B | A | A | A | A | B  | B | FP  |
| 670 | MC | A | B | A | A | A | A | B  | M | FP  |
| 671 | MC | A | B | A | A | A | A | B  | A | FP  |
| 672 | MC | A | B | A | A | A | A | AC | B | FP  |
| 673 | MC | A | B | A | A | A | A | AC | M | FP  |
| 674 | MC | A | B | A | A | A | A | AC | A | FP  |
| 675 | MC | A | B | A | A | A | A | A  | B | FRR |
| 676 | MC | A | B | A | A | A | A | A  | M | FRR |
| 677 | MC | A | B | A | A | A | A | A  | A | FRR |



|     |    |   |   |   |   |   |   |    |    |    |   |     |
|-----|----|---|---|---|---|---|---|----|----|----|---|-----|
| 706 | MC | A | A | B | B | B | B | M  | B  | B  | M | FP  |
| 707 | MC | A | A | B | B | B | B | A  | B  | B  | A | FP  |
| 708 | MC | A | A | B | B | B | B | AC | AC | AC | B | FRR |
| 709 | MC | A | A | B | B | B | B | AC | AC | AC | M | FRR |
| 710 | MC | A | A | B | B | B | B | AC | AC | AC | A | FR  |
| 711 | MC | A | A | B | B | B | B | A  | A  | A  | B | FR  |
| 712 | MC | A | A | B | B | B | B | A  | A  | A  | M | FR  |
| 713 | MC | A | A | B | B | B | B | A  | A  | A  | A | FR  |
| 714 | MC | A | A | B | B | B | B | M  | B  | B  | B | FP  |
| 715 | MC | A | A | B | B | B | B | M  | B  | B  | M | FP  |
| 716 | MC | A | A | B | B | B | B | M  | B  | B  | A | FP  |
| 717 | MC | A | A | B | B | B | B | M  | AC | AC | B | FRR |
| 718 | MC | A | A | B | B | B | B | M  | AC | AC | M | FRR |
| 719 | MC | A | A | B | B | B | B | M  | AC | AC | A | FRR |
| 720 | MC | A | A | B | B | B | B | M  | A  | A  | B | FR  |
| 721 | MC | A | A | B | B | B | B | M  | A  | A  | M | FR  |
| 722 | MC | A | A | B | B | B | B | M  | A  | A  | A | FR  |
| 723 | MC | A | A | B | B | B | B | A  | B  | B  | B | FP  |
| 724 | MC | A | A | B | B | B | B | A  | B  | B  | M | FP  |
| 725 | MC | A | A | B | B | B | B | A  | B  | B  | A | FP  |
| 726 | MC | A | A | B | B | B | B | A  | AC | AC | B | FR  |
| 727 | MC | A | A | B | B | B | B | A  | AC | AC | M | FR  |
| 728 | MC | A | A | B | B | B | B | A  | AC | AC | A | FR  |
| 729 | MC | A | A | B | B | B | B | A  | A  | A  | B | FR  |
| 730 | MC | A | A | B | B | B | B | A  | A  | A  | M | FR  |
| 731 | MC | A | A | B | B | B | B | A  | A  | A  | A | FR  |
| 732 | C  | B | B | B | B | B | B | B  | B  | B  | B | FP  |
| 733 | C  | B | B | B | B | B | B | B  | B  | B  | M | FP  |



|     |   |   |   |   |    |   |     |
|-----|---|---|---|---|----|---|-----|
| 762 | C | B | M | B | AC | B | FRR |
| 763 | C | B | M | B | AC | M | FRR |
| 764 | C | B | M | B | AC | A | FRR |
| 765 | C | B | M | B | A  | B | FR  |
| 766 | C | B | M | B | A  | M | FR  |
| 767 | C | B | M | B | A  | A | FR  |
| 768 | C | B | M | M | B  | B | FP  |
| 769 | C | B | M | M | B  | M | FP  |
| 770 | C | B | M | M | B  | A | FP  |
| 771 | C | B | M | M | AC | B | FRR |
| 772 | C | B | M | M | AC | M | FRR |
| 773 | C | B | M | M | AC | A | FRR |
| 774 | C | B | M | M | A  | B | FRR |
| 775 | C | B | M | M | A  | M | FRR |
| 776 | C | B | M | M | A  | A | FRR |
| 777 | C | B | M | A | B  | B | FP  |
| 778 | C | B | M | A | B  | M | FP  |
| 779 | C | B | M | A | B  | A | FP  |
| 780 | C | B | M | A | AC | B | FP  |
| 781 | C | B | M | A | AC | M | FP  |
| 782 | C | B | M | A | AC | A | FP  |
| 783 | C | B | M | A | A  | B | FRR |
| 784 | C | B | M | A | A  | M | FRR |
| 785 | C | B | M | A | A  | A | FRR |
| 786 | C | B | A | B | B  | B | FP  |
| 787 | C | B | A | B | B  | M | FP  |
| 788 | C | B | A | B | B  | A | FP  |
| 789 | C | B | A | B | AC | B | FRR |

|     |   |   |   |   |   |    |    |   |     |
|-----|---|---|---|---|---|----|----|---|-----|
| 790 | C | B | A | B | A | M  | AC | M | FRR |
| 791 | C | B | A | B | A | AC | AC | A | FRR |
| 792 | C | B | A | B | A | B  | A  | B | FR  |
| 793 | C | B | A | B | A | B  | A  | M | FR  |
| 794 | C | B | A | B | A | B  | A  | A | FR  |
| 795 | C | B | A | M | A | M  | B  | B | FP  |
| 796 | C | B | A | M | A | M  | B  | M | FP  |
| 797 | C | B | A | M | A | M  | B  | A | FP  |
| 798 | C | B | A | M | A | M  | AC | B | FRR |
| 799 | C | B | A | M | A | M  | AC | M | FRR |
| 800 | C | B | A | M | A | M  | AC | A | FRR |
| 801 | C | B | A | M | A | M  | A  | B | FR  |
| 802 | C | B | A | M | A | M  | A  | M | FR  |
| 803 | C | B | A | M | A | M  | A  | A | FR  |
| 804 | C | B | A | A | A | B  | B  | B | FP  |
| 805 | C | B | A | A | A | B  | B  | M | FP  |
| 806 | C | B | A | A | A | B  | B  | A | FP  |
| 807 | C | B | A | A | A | AC | AC | B | FP  |
| 808 | C | B | A | A | A | AC | AC | M | FRR |
| 809 | C | B | A | A | A | AC | AC | A | FRR |
| 810 | C | B | A | A | A | A  | A  | B | FR  |
| 811 | C | B | A | A | A | A  | A  | M | FR  |
| 812 | C | B | A | A | A | A  | A  | A | FR  |
| 813 | C | M | B | B | B | B  | B  | B | FP  |
| 814 | C | M | B | B | B | B  | B  | M | FP  |
| 815 | C | M | B | B | B | B  | B  | A | FP  |
| 816 | C | M | B | B | B | B  | AC | B | FP  |
| 817 | C | M | B | B | B | B  | AC | M | FRR |

|     |   |   |   |   |   |   |    |   |     |
|-----|---|---|---|---|---|---|----|---|-----|
| 818 | C | M | B | B | M | B | AC | A | FRR |
| 819 | C | M | B | B | M | A | A  | B | FRR |
| 820 | C | M | B | B | M | A | A  | M | FRR |
| 821 | C | M | B | B | M | A | A  | A | FRR |
| 822 | C | M | B | B | M | M | B  | B | FP  |
| 823 | C | M | B | B | M | M | B  | M | FP  |
| 824 | C | M | B | B | M | M | B  | A | FP  |
| 825 | C | M | B | B | M | M | AC | B | FRR |
| 826 | C | M | B | B | M | M | AC | M | FRR |
| 827 | C | M | B | B | M | M | AC | A | FRR |
| 828 | C | M | B | B | M | M | A  | B | FRR |
| 829 | C | M | B | B | M | M | A  | M | FRR |
| 830 | C | M | B | B | M | M | A  | A | FRR |
| 831 | C | M | B | B | M | A | B  | B | FP  |
| 832 | C | M | B | B | M | A | B  | M | FP  |
| 833 | C | M | B | B | M | A | B  | A | FP  |
| 834 | C | M | B | B | M | A | AC | B | FRR |
| 835 | C | M | B | B | M | A | AC | M | FRR |
| 836 | C | M | B | B | M | A | AC | A | FRR |
| 837 | C | M | B | B | M | A | A  | B | FRR |
| 838 | C | M | B | B | M | A | A  | M | FRR |
| 839 | C | M | B | B | M | A | A  | A | FRR |
| 840 | C | M | M | B | M | B | B  | B | FP  |
| 841 | C | M | M | B | M | B | B  | M | FP  |
| 842 | C | M | M | B | M | B | B  | A | FP  |
| 843 | C | M | M | B | M | B | AC | B | FRR |
| 844 | C | M | M | B | M | B | AC | M | FRR |
| 845 | C | M | M | B | M | B | AC | A | FRR |

|     |   |   |   |   |   |    |   |     |
|-----|---|---|---|---|---|----|---|-----|
| 846 | C | M | M | M | B | A  | B | FRR |
| 847 | C | M | M | B | A | A  | M | FRR |
| 848 | C | M | M | B | A | A  | A | FRR |
| 849 | C | M | M | M | M | B  | B | FP  |
| 850 | C | M | M | M | M | B  | M | FRR |
| 851 | C | M | M | M | M | B  | A | FRR |
| 852 | C | M | M | M | M | AC | B | FR  |
| 853 | C | M | M | M | M | AC | M | FR  |
| 854 | C | M | M | M | M | AC | A | FR  |
| 855 | C | M | M | M | M | A  | B | FR  |
| 856 | C | M | M | M | M | A  | M | FR  |
| 857 | C | M | M | M | M | A  | A | FR  |
| 858 | C | M | M | A | A | B  | B | FP  |
| 859 | C | M | M | A | A | B  | M | FP  |
| 860 | C | M | M | A | A | B  | A | FRR |
| 861 | C | M | M | A | A | AC | B | FRR |
| 862 | C | M | M | A | A | AC | M | FRR |
| 863 | C | M | M | A | A | AC | A | FRR |
| 864 | C | M | M | A | A | A  | B | FRR |
| 865 | C | M | M | A | A | A  | M | FRR |
| 866 | C | M | M | A | A | A  | A | FR  |
| 867 | C | M | A | B | B | B  | B | FP  |
| 868 | C | M | A | B | B | B  | M | FP  |
| 869 | C | M | A | B | B | B  | A | FP  |
| 870 | C | M | A | B | B | AC | B | FRR |
| 871 | C | M | A | B | B | AC | M | FRR |
| 872 | C | M | A | B | B | AC | A | FRR |
| 873 | C | M | A | B | B | A  | B | FRR |

|     |   |   |   |   |    |   |     |
|-----|---|---|---|---|----|---|-----|
| 874 | C | M | A | B | A  | M | FR  |
| 875 | C | M | A | B | A  | A | FR  |
| 876 | C | M | A | M | B  | B | FP  |
| 877 | C | M | A | M | M  | M | FP  |
| 878 | C | M | A | M | M  | A | FP  |
| 879 | C | M | A | M | AC | B | FRR |
| 880 | C | M | A | M | AC | M | FRR |
| 881 | C | M | A | M | AC | A | FRR |
| 882 | C | M | A | M | A  | B | FR  |
| 883 | C | M | A | M | A  | M | FR  |
| 884 | C | M | A | M | A  | A | FR  |
| 885 | C | M | A | A | B  | B | FP  |
| 886 | C | M | A | A | B  | M | FP  |
| 887 | C | M | A | A | B  | A | FP  |
| 888 | C | M | A | A | AC | B | FP  |
| 889 | C | M | A | A | AC | M | FP  |
| 890 | C | M | A | A | AC | A | FP  |
| 891 | C | M | A | A | A  | B | FRR |
| 892 | C | M | A | A | A  | M | FRR |
| 893 | C | M | A | A | A  | A | FRR |
| 894 | C | A | B | B | B  | B | FP  |
| 895 | C | A | B | B | B  | M | FP  |
| 896 | C | A | B | B | B  | A | FP  |
| 897 | C | A | B | B | AC | B | FRR |
| 898 | C | A | B | B | AC | M | FRR |
| 899 | C | A | B | B | AC | A | FRR |
| 900 | C | A | B | B | A  | B | FR  |
| 901 | C | A | B | B | A  | M | FR  |

|     |   |   |   |   |    |    |   |     |
|-----|---|---|---|---|----|----|---|-----|
| 902 | C | A | B | B | A  | B  | A | FR  |
| 903 | C | A | B | B | M  | B  | B | FP  |
| 904 | C | A | B | B | M  | B  | M | FP  |
| 905 | C | A | B | B | M  | B  | A | FP  |
| 906 | C | A | B | B | M  | AC | B | FRR |
| 907 | C | A | B | B | M  | AC | M | FRR |
| 908 | C | A | B | B | M  | AC | A | FRR |
| 909 | C | A | B | B | M  | A  | B | FRR |
| 910 | C | A | B | B | M  | A  | M | FRR |
| 911 | C | A | B | B | M  | A  | A | FRR |
| 912 | C | A | B | B | A  | B  | B | FP  |
| 913 | C | A | B | B | A  | B  | M | FP  |
| 914 | C | A | B | B | A  | B  | A | FP  |
| 915 | C | A | B | B | A  | AC | B | FP  |
| 916 | C | A | B | B | A  | AC | M | FP  |
| 917 | C | A | B | B | A  | AC | A | FP  |
| 918 | C | A | B | B | A  | A  | B | FRR |
| 919 | C | A | B | B | A  | A  | M | FRR |
| 920 | C | A | B | B | A  | A  | A | FRR |
| 921 | C | A | M | B | B  | B  | B | FP  |
| 922 | C | A | M | B | B  | B  | M | FP  |
| 923 | C | A | M | B | B  | B  | A | FP  |
| 924 | C | A | M | B | AC | B  | B | FRR |
| 925 | C | A | M | B | AC | B  | M | FRR |
| 926 | C | A | M | B | AC | A  | A | FRR |
| 927 | C | A | M | B | A  | A  | B | FRR |
| 928 | C | A | M | B | A  | A  | M | FRR |
| 929 | C | A | M | B | A  | A  | A | FRR |

|     |   |   |   |   |   |   |    |    |   |     |
|-----|---|---|---|---|---|---|----|----|---|-----|
| 930 | C | A | M | M | M | B | M  | B  | B | FP  |
| 931 | C | A | M | M | M | M | M  | B  | M | FP  |
| 932 | C | A | M | M | M | B | B  | B  | A | FP  |
| 933 | C | A | M | M | M | M | AC | AC | B | FRR |
| 934 | C | A | M | M | M | M | AC | AC | M | FRR |
| 935 | C | A | M | M | M | M | AC | AC | A | FRR |
| 936 | C | A | M | M | M | M | A  | A  | B | FR  |
| 937 | C | A | M | M | M | M | A  | A  | M | FR  |
| 938 | C | A | M | M | M | M | A  | A  | A | FR  |
| 939 | C | A | M | M | M | M | A  | B  | B | FP  |
| 940 | C | A | M | M | M | M | A  | B  | M | FP  |
| 941 | C | A | M | M | M | M | A  | B  | A | FP  |
| 942 | C | A | M | M | M | M | A  | AC | B | FP  |
| 943 | C | A | M | M | M | M | A  | AC | M | FRR |
| 944 | C | A | M | M | M | M | A  | AC | A | FRR |
| 945 | C | A | M | M | M | M | A  | A  | B | FRR |
| 946 | C | A | M | M | M | M | A  | A  | M | FRR |
| 947 | C | A | M | M | M | M | A  | A  | A | FRR |
| 948 | C | A | A | B | B | B | B  | B  | B | FP  |
| 949 | C | A | A | B | B | B | B  | B  | M | FP  |
| 950 | C | A | A | B | B | B | B  | B  | A | FP  |
| 951 | C | A | A | B | B | B | AC | AC | B | FRR |
| 952 | C | A | A | B | B | B | AC | AC | M | FRR |
| 953 | C | A | A | B | B | B | AC | AC | A | FR  |
| 954 | C | A | A | B | B | B | A  | A  | B | FR  |
| 955 | C | A | A | B | B | B | A  | A  | M | FR  |
| 956 | C | A | A | B | B | B | A  | A  | A | FR  |
| 957 | C | A | A | M | M | M | B  | B  | B | FP  |

|     |    |   |   |   |    |   |   |     |
|-----|----|---|---|---|----|---|---|-----|
| 958 | C  | A | A | M | B  | M | M | FP  |
| 959 | C  | A | A | M | B  | A | A | FP  |
| 960 | C  | A | A | M | AC | B | B | FRR |
| 961 | C  | A | A | M | AC | M | M | FRR |
| 962 | C  | A | A | M | AC | A | A | FRR |
| 963 | C  | A | A | M | A  | B | B | FR  |
| 964 | C  | A | A | M | A  | M | M | FR  |
| 965 | C  | A | A | M | A  | A | A | FR  |
| 966 | C  | A | A | A | B  | B | B | FP  |
| 967 | C  | A | A | A | B  | M | M | FP  |
| 968 | C  | A | A | A | B  | A | A | FP  |
| 969 | C  | A | A | A | AC | B | B | FR  |
| 970 | C  | A | A | A | AC | M | M | FR  |
| 971 | C  | A | A | A | AC | A | A | FR  |
| 972 | C  | A | A | A | A  | B | B | FR  |
| 973 | C  | A | A | A | A  | M | M | FR  |
| 974 | C  | A | A | A | A  | A | A | FR  |
| 975 | AC | B | B | B | B  | B | B | FP  |
| 976 | AC | B | B | B | B  | M | M | FP  |
| 977 | AC | B | B | B | B  | A | A | FP  |
| 978 | AC | B | B | B | AC | B | B | FP  |
| 979 | AC | B | B | B | AC | M | M | FRR |
| 980 | AC | B | B | B | AC | A | A | FRR |
| 981 | AC | B | B | B | A  | B | B | FRR |
| 982 | AC | B | B | B | A  | M | M | FRR |
| 983 | AC | B | B | B | A  | A | A | FRR |
| 984 | AC | B | B | M | B  | B | B | FP  |
| 985 | AC | B | B | M | B  | M | M | FP  |

|      |    |   |   |   |    |   |    |     |
|------|----|---|---|---|----|---|----|-----|
| 986  | AC | B | B | M | B  | A | B  | FP  |
| 987  | AC | B | M | M | AC | B | AC | FP  |
| 988  | AC | B | M | M | AC | M | AC | FRR |
| 989  | AC | B | M | M | AC | A | AC | FRR |
| 990  | AC | B | M | M | A  | B | A  | FRR |
| 991  | AC | B | M | M | A  | M | A  | FRR |
| 992  | AC | B | M | M | A  | A | A  | FRR |
| 993  | AC | B | A | A | B  | B | B  | FP  |
| 994  | AC | B | A | A | B  | M | B  | FP  |
| 995  | AC | B | A | A | B  | A | A  | FP  |
| 996  | AC | B | A | A | AC | B | B  | FP  |
| 997  | AC | B | A | A | AC | M | AC | FP  |
| 998  | AC | B | A | A | AC | A | A  | FRR |
| 999  | AC | B | A | A | A  | B | A  | FP  |
| 1000 | AC | B | A | A | A  | M | A  | FRR |
| 1001 | AC | B | A | A | A  | A | A  | FRR |
| 1002 | AC | B | M | B | B  | B | B  | FP  |
| 1003 | AC | B | M | B | B  | M | B  | FP  |
| 1004 | AC | B | M | B | B  | A | B  | FRR |
| 1005 | AC | B | M | B | AC | B | AC | FRR |
| 1006 | AC | B | M | B | AC | M | AC | FRR |
| 1007 | AC | B | M | B | AC | A | AC | FRR |
| 1008 | AC | B | M | B | A  | B | A  | FR  |
| 1009 | AC | B | M | B | A  | M | B  | FR  |
| 1010 | AC | B | M | B | A  | A | A  | FR  |
| 1011 | AC | B | M | M | B  | B | B  | FP  |
| 1012 | AC | B | M | M | B  | M | B  | FP  |
| 1013 | AC | B | M | M | B  | A | B  | FP  |

|      |    |   |   |   |   |    |   |     |
|------|----|---|---|---|---|----|---|-----|
| 1014 | AC | B | M | M | M | AC | B | FRR |
| 1015 | AC | B | M | M | M | AC | M | FRR |
| 1016 | AC | B | M | M | M | AC | A | FRR |
| 1017 | AC | B | M | M | M | A  | B | FRR |
| 1018 | AC | B | M | M | M | A  | M | FRR |
| 1019 | AC | B | M | M | M | A  | A | FRR |
| 1020 | AC | B | M | A | A | B  | B | FP  |
| 1021 | AC | B | M | A | A | B  | M | FP  |
| 1022 | AC | B | M | A | A | B  | A | FP  |
| 1023 | AC | B | M | A | A | AC | B | FP  |
| 1024 | AC | B | M | A | A | AC | M | FP  |
| 1025 | AC | B | M | A | A | AC | A | FP  |
| 1026 | AC | B | M | A | A | A  | B | FRR |
| 1027 | AC | B | M | A | A | A  | M | FRR |
| 1028 | AC | B | M | A | A | A  | A | FRR |
| 1029 | AC | B | A | B | B | B  | B | FP  |
| 1030 | AC | B | A | B | B | B  | M | FP  |
| 1031 | AC | B | A | B | B | B  | A | FP  |
| 1032 | AC | B | A | B | B | AC | B | FRR |
| 1033 | AC | B | A | B | B | AC | M | FRR |
| 1034 | AC | B | A | B | B | AC | A | FRR |
| 1035 | AC | B | A | B | B | A  | B | FR  |
| 1036 | AC | B | A | B | B | A  | M | FR  |
| 1037 | AC | B | A | B | B | A  | A | FR  |
| 1038 | AC | B | A | M | M | B  | B | FP  |
| 1039 | AC | B | A | M | M | B  | M | FP  |
| 1040 | AC | B | A | M | M | B  | A | FP  |
| 1041 | AC | B | A | M | M | AC | B | FRR |

|      |    |   |   |   |    |   |   |     |
|------|----|---|---|---|----|---|---|-----|
| 1042 | AC | B | A | M | AC | M | M | FRR |
| 1043 | AC | B | A | M | AC | A | A | FRR |
| 1044 | AC | B | A | M | A  | B | B | FR  |
| 1045 | AC | B | A | M | A  | M | M | FR  |
| 1046 | AC | B | A | M | A  | A | A | FR  |
| 1047 | AC | B | A | A | B  | B | B | FP  |
| 1048 | AC | B | A | A | B  | M | M | FP  |
| 1049 | AC | B | A | A | B  | A | A | FP  |
| 1050 | AC | B | A | A | AC | B | B | FP  |
| 1051 | AC | B | A | A | AC | M | M | FRR |
| 1052 | AC | B | A | A | AC | A | A | FRR |
| 1053 | AC | B | A | A | A  | B | B | FR  |
| 1054 | AC | B | A | A | A  | M | M | FR  |
| 1055 | AC | B | A | A | A  | A | A | FR  |
| 1056 | AC | M | B | B | B  | B | B | FP  |
| 1057 | AC | M | B | B | B  | M | M | FP  |
| 1058 | AC | M | B | B | B  | A | A | FP  |
| 1059 | AC | M | B | B | AC | B | B | FP  |
| 1060 | AC | M | B | B | AC | M | M | FRR |
| 1061 | AC | M | B | B | AC | A | A | FRR |
| 1062 | AC | M | B | B | A  | B | B | FRR |
| 1063 | AC | M | B | B | A  | M | M | FRR |
| 1064 | AC | M | B | B | A  | A | A | FRR |
| 1065 | AC | M | B | M | B  | B | B | FP  |
| 1066 | AC | M | B | M | B  | M | M | FP  |
| 1067 | AC | M | B | M | B  | A | A | FP  |
| 1068 | AC | M | B | M | AC | B | B | FRR |
| 1069 | AC | M | B | M | AC | M | M | FRR |

|      |    |   |   |   |    |   |     |
|------|----|---|---|---|----|---|-----|
| 1070 | AC | M | B | M | AC | A | FRR |
| 1071 | AC | M | B | M | A  | B | FRR |
| 1072 | AC | M | B | M | A  | M | FRR |
| 1073 | AC | M | B | M | A  | A | FRR |
| 1074 | AC | M | B | A | B  | B | FP  |
| 1075 | AC | M | B | A | B  | M | FP  |
| 1076 | AC | M | B | A | B  | A | FP  |
| 1077 | AC | M | B | A | AC | B | FRR |
| 1078 | AC | M | B | A | AC | M | FRR |
| 1079 | AC | M | B | A | AC | A | FRR |
| 1080 | AC | M | B | A | A  | B | FRR |
| 1081 | AC | M | B | A | A  | M | FRR |
| 1082 | AC | M | B | A | A  | A | FRR |
| 1083 | AC | M | M | B | B  | B | FP  |
| 1084 | AC | M | M | B | B  | M | FP  |
| 1085 | AC | M | M | B | B  | A | FP  |
| 1086 | AC | M | M | B | AC | B | FRR |
| 1087 | AC | M | M | B | AC | M | FRR |
| 1088 | AC | M | M | B | AC | A | FRR |
| 1089 | AC | M | M | B | A  | B | FRR |
| 1090 | AC | M | M | B | A  | M | FRR |
| 1091 | AC | M | M | B | A  | A | FRR |
| 1092 | AC | M | M | M | B  | B | FP  |
| 1093 | AC | M | M | M | B  | M | FRR |
| 1094 | AC | M | M | M | B  | A | FRR |
| 1095 | AC | M | M | M | AC | B | FR  |
| 1096 | AC | M | M | M | AC | M | FR  |
| 1097 | AC | M | M | M | AC | A | FR  |



|      |    |   |   |   |    |   |     |
|------|----|---|---|---|----|---|-----|
| 1126 | AC | M | A | M | A  | M | FR  |
| 1127 | AC | M | A | M | A  | M | FR  |
| 1128 | AC | M | A | A | B  | B | FP  |
| 1129 | AC | M | A | A | B  | M | FP  |
| 1130 | AC | M | A | A | B  | A | FP  |
| 1131 | AC | M | A | A | AC | B | FP  |
| 1132 | AC | M | A | A | AC | M | FP  |
| 1133 | AC | M | A | A | AC | A | FP  |
| 1134 | AC | M | A | A | A  | B | FRR |
| 1135 | AC | M | A | A | A  | M | FRR |
| 1136 | AC | M | A | A | A  | A | FRR |
| 1137 | AC | A | B | B | B  | B | FP  |
| 1138 | AC | A | B | B | B  | M | FP  |
| 1139 | AC | A | B | B | B  | A | FP  |
| 1140 | AC | A | B | B | AC | B | FRR |
| 1141 | AC | A | B | B | AC | M | FRR |
| 1142 | AC | A | B | B | AC | A | FRR |
| 1143 | AC | A | B | B | A  | B | FR  |
| 1144 | AC | A | B | B | A  | M | FR  |
| 1145 | AC | A | B | B | A  | A | FR  |
| 1146 | AC | A | B | M | B  | B | FP  |
| 1147 | AC | A | B | M | B  | M | FP  |
| 1148 | AC | A | B | M | B  | A | FP  |
| 1149 | AC | A | B | M | AC | B | FRR |
| 1150 | AC | A | B | M | AC | M | FRR |
| 1151 | AC | A | B | M | AC | A | FRR |
| 1152 | AC | A | B | M | A  | B | FRR |
| 1153 | AC | A | B | M | A  | M | FRR |

|      |    |   |   |   |    |   |   |     |
|------|----|---|---|---|----|---|---|-----|
| 1154 | AC | A | B | M | A  | A | A | FRR |
| 1155 | AC | A | B | A | B  | B | B | FP  |
| 1156 | AC | A | B | A | B  | B | M | FP  |
| 1157 | AC | A | B | A | B  | B | A | FP  |
| 1158 | AC | A | B | A | AC | B | B | FP  |
| 1159 | AC | A | B | A | AC | M | M | FP  |
| 1160 | AC | A | B | A | AC | A | A | FP  |
| 1161 | AC | A | B | A | A  | B | B | FRR |
| 1162 | AC | A | B | A | A  | M | M | FRR |
| 1163 | AC | A | B | A | A  | A | A | FRR |
| 1164 | AC | A | M | B | B  | B | B | FP  |
| 1165 | AC | A | M | B | B  | B | M | FP  |
| 1166 | AC | A | M | B | B  | B | A | FP  |
| 1167 | AC | A | M | B | AC | B | B | FRR |
| 1168 | AC | A | M | B | AC | M | M | FRR |
| 1169 | AC | A | M | B | AC | A | A | FRR |
| 1170 | AC | A | M | B | A  | B | B | FRR |
| 1171 | AC | A | M | B | A  | M | M | FRR |
| 1172 | AC | A | M | B | A  | A | A | FRR |
| 1173 | AC | A | M | M | B  | B | B | FP  |
| 1174 | AC | A | M | M | B  | M | M | FP  |
| 1175 | AC | A | M | M | B  | A | A | FP  |
| 1176 | AC | A | M | M | AC | B | B | FRR |
| 1177 | AC | A | M | M | AC | M | M | FRR |
| 1178 | AC | A | M | M | AC | A | A | FRR |
| 1179 | AC | A | M | M | A  | B | B | FR  |
| 1180 | AC | A | M | M | A  | M | M | FR  |
| 1181 | AC | A | M | M | A  | A | A | FR  |

|      |    |   |   |   |    |   |     |
|------|----|---|---|---|----|---|-----|
| 1182 | AC | A | M | A | A  | A | FP  |
| 1183 | AC | A | M | A | B  | M | FP  |
| 1184 | AC | A | M | A | B  | A | FP  |
| 1185 | AC | A | M | A | AC | B | FP  |
| 1186 | AC | A | M | A | AC | M | FRR |
| 1187 | AC | A | M | A | AC | A | FRR |
| 1188 | AC | A | M | A | A  | B | FRR |
| 1189 | AC | A | M | A | A  | M | FRR |
| 1190 | AC | A | M | A | A  | A | FRR |
| 1191 | AC | A | A | B | B  | B | FP  |
| 1192 | AC | A | A | B | B  | M | FP  |
| 1193 | AC | A | A | B | B  | A | FP  |
| 1194 | AC | A | A | B | AC | B | FRR |
| 1195 | AC | A | A | B | AC | M | FRR |
| 1196 | AC | A | A | B | AC | A | FR  |
| 1197 | AC | A | A | B | A  | B | FR  |
| 1198 | AC | A | A | B | A  | M | FR  |
| 1199 | AC | A | A | B | A  | A | FR  |
| 1200 | AC | A | A | M | B  | B | FP  |
| 1201 | AC | A | A | M | B  | M | FP  |
| 1202 | AC | A | A | M | B  | A | FP  |
| 1203 | AC | A | A | M | AC | B | FRR |
| 1204 | AC | A | A | M | AC | M | FRR |
| 1205 | AC | A | A | M | AC | A | FRR |
| 1206 | AC | A | A | M | A  | B | FR  |
| 1207 | AC | A | A | M | A  | M | FR  |
| 1208 | AC | A | A | M | A  | A | FR  |
| 1209 | AC | A | A | A | B  | B | FP  |

|      |    |   |   |    |    |   |    |
|------|----|---|---|----|----|---|----|
| 1210 | AC | A | A | A  | B  | M | FP |
| 1211 | AC | A | A | B  | A  | A | FP |
| 1212 | AC | A | A | AC | B  | B | FR |
| 1213 | AC | A | A | AC | AC | M | FR |
| 1214 | AC | A | A | AC | A  | A | FR |
| 1215 | AC | A | A | A  | A  | B | FR |
| 1216 | AC | A | A | A  | A  | M | FR |
| 1217 | AC | A | A | A  | A  | A | FR |