

**PRÓ-REITORIA ACADÊMICA  
COORDENAÇÃO GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**LUANA VILELA ANDRADE DE AGUIAR**

**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO- UNICAP**

**ESTUDO PARAMÉTRICO SOBRE RECALQUE DE RADIERS ESTAQUEADOS  
UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Recife- PE

2017

LUANA VILELA ANDRADE DE AGUIAR

**ESTUDO PARAMÉTRICO SOBRE RECALQUE DE RADIERS ESTAQUEADOS  
UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação apresentada à Universidade Católica de Pernambuco como requisito, exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Tecnologia das Construções, sob orientação do professor Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira e co-orientação do professor Dr. Romilde Almeida de Oliveira.

Recife

2017

## FICHA CATALOGRÁFICA

A282e Aguiar, Luana Vilela Andrade de  
Estudo paramétrico sobre recalque de radiers  
estaqueados utilizando o método dos elementos  
finitos / Luana Vilela Andrade de Aguiar ; orientador  
Joaquim Teodoro Romão de Oliveira ; co-orientador  
Romilde Almeida de Oliveira, 2017.  
113 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de  
Pernambuco. Pró-Reitoria Acadêmica. Coordenação  
Geral de Pós-Graduação. Mestrado em Engenharia Civil,  
2017.

1. Fundações (Engenharia). 2. Construção civil. 3.  
Radier estaqueado. I. Título.

CDU 624.15

Luana Vilela Andrade de Aguiar

**ESTUDO PARAMÉTRICO SOBRE RECALQUE DE RADIERS ESTAQUEADOS  
UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Tecnologia das Construções.

Apresentada em 09/11/2017.

Aprovada por:

---

Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira  
Orientador

---

Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira  
Co-orientador

---

Prof. Dr. Sílvio Romero M. Ferreira  
Examinador Externo

---

Prof. Dr. José Afonso Pereira Vitório  
Examinador Externo

Dedico esta dissertação à minha preciosa avó,  
Maria Julieta Pereira Vilela Andrade de  
Aguiar por ser minha incentivadora e  
referência de vida.

## AGRADECIMENTOS

Dedico à Deus o meu primeiro agradecimento. À Ele por ter me dado mais uma oportunidade de avançar no conhecimento e ter o prazer em conhecer pessoas incríveis nesta trajetória.

À toda minha família, em especial a minha mãe Júlia por ser meu porto seguro, ao meu marido Deivis por estar sempre ao meu lado apoiando minhas decisões e ajudando a alcançar patamares mais altos e aos meus filhos, João Flávio e Davi, pela paciência e estímulo para que eu pudesse concluir mais esta etapa da minha vida.

Aos meus orientadores Joaquim Teodoro Romão de Oliveira pela paciência, dedicação e suporte em cada degrau desse caminho e Romilde Almeida de Oliveira pelas contribuições fundamentais para realização deste trabalho.

À Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), por fazer parte da minha formação acadêmica na graduação, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela minha formação acadêmica no mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos, fundamental para a conclusão deste trabalho.

Aos professores do curso de mestrado Eliana Cristina Barreto Monteiro, Fernando Artur Nogueira Silva e Maria da Graça de Vasconcelos Xavier Ferreira pela competência e atenção.

Ao Professor e Engenheiro Pedro Eugênio Silva de Oliveira pela sua disponibilidade e suas “dicas” com o programa ELPLA.

Aos amigos conquistados no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, em especial Conrado Tavares, Amanda Marques e Carla Suennia.

Aos amigos que incentivaram e torceram por essa vitória, muito obrigada.

## RESUMO

Terrenos economicamente rentáveis e com boas características geotécnicas, para receber cargas oriundas do aumento do número de construções que agregam uma maior quantidade de pessoas numa menor área, são componentes cada vez mais difíceis de serem encontrados nas grandes cidades. Considerando este cenário, o trabalho evidencia a importância de conhecer melhor a solução de fundação em radier estaqueado, como ocorrem seus recalques, de maneira a racionalizar a escolha do projetista. Analisou-se o recalque de radiers estaqueados, obtidos a partir da combinação de diferentes fatores, tais como: a espessura e a forma geométrica de radiers, quantidade e diâmetro de estacas e módulos de elasticidade do solo, conferindo à implantação da fundação estudada em solos arenosos do tipo fofo, medianamente compacto e compacto. Para simulação das 288 combinações dos fatores supracitados, utilizou-se de análises tridimensionais (3D) por elementos finitos, através do programa computacional ELPLA. Dos resultados são obtidos valores estimados de recalques médios e do coeficiente de variação em função dos parâmetros atribuídos à combinação. Os resultados apontaram quanto maior o módulo de elasticidade do solo, menores são os valores obtidos dos recalques; que a espessura do radier é o fator geométrico que exerce maior influência na variação nos valores dos recalques diferenciais; os diâmetros das estacas desempenham influência irrelevante na variação dos valores de recalque; a inclusão de estacas pode não representar que haverá diminuição dos recalques diferenciais ou totais. Neste estudo, para radiers quadrados com  $L/B=1$  a quantidade ideal foi de 20 estacas e para radiers quadrados com  $L/B=2$ , a quantidade ideal foi de 40 estacas, sendo então fundamental um estudo prévio para determinação da quantidade ótima de estacas para cada espessura e dimensão do radier.

Palavras-chave: Radier estaqueado, estudo paramétrico, recalque.

## ABSTRACT

Economically profitable lands with good geotechnical characteristics to receive loads resulting from the increase in the number of constructions that aggregate more people in a smaller area are increasingly difficult components to be found in large cities. Considering this scenery, the work evidences the importance of knowing better the solution of foundation in radier staked, as its repressions occur, in order to rationalize the choice of the designer. The settling of stacked radiers, obtained from the combination of different factors, such as: the thickness and the geometric form of radiers, the number and diameter of cuttings and soil modulus of elasticity were evaluated, conferring to the implantation of the foundation studied in soils sandy, fluffy, medium-sized and compact. For the simulation of the 288 combinations of the above mentioned factors, three-dimensional (3D) analyzes were used by finite elements, through the ELPLA computational program. From the results are obtained estimated values of average and the coefficient of variation according to the parameters assigned to the combination. The effects indicated that the higher the modulus of elasticity of the soil, the lower the values obtained from the settlements; that the thickness of the radier is the geometric factor that exerts greater influence in the variation in the beliefs of the differential pressures; the diameters of the cuttings play an irrelevant influence on the variation of the amount of repression; the inclusion of cuttings may not mean that there will be a decrease in differential or total balances. In this study, for square radiers with  $L / B = 1$  the ideal quantity was 20 stakes and for square radiers with  $L / B = 2$ , the ideal quantity was 40 stakes, being therefore fundamental a previous study to determine the optimal amount of stakes for each thickness and radier size.

Keywords: Pile-raft, parametric study, settlement.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### Capítulo 2

Figura 2.1. Seções transversais utilizadas no Aqueduto de Retz ( <a href="http://ruedeslumieres.morkitu.org/">http://ruedeslumieres.morkitu.org/</a> ).....	25
Figura 2.2. Radier liso (DORIA, 2007).....	27
Figura 2.3. Radier com pedestais ou cogumelos (DORIA, 2007).....	28
Figura 2.4. Radier nervurado (DORIA, 2007). ....	28
Figura 2.5. Radier em caixão (DORIA, 2007). ....	28
Figura 2.6. Tipos de sistema de fundação: (a) Grupo de estacas; (b) Radier estaqueado ou Fundação Mista (BEZERRA, 2003).....	32
Figura 2.7. Formas de ruptura de um radier estaqueado (modificado PHUNG, 1993, <i>apud</i> Garcia, 2015).....	33
Figura 2.8. Pequeno e grande radiers estaqueados (VIGGIANI et al., 2012).....	34
Figura 2.9. Sistema de fundações. (Mandolini, 2003).....	36
Figura 2.10. Gráfico para orientar a escolha do tipo de fundação, Mandolini (2003). ....	37
Figura 2.11. Estacas centrais para redução de recalques diferenciais. (Randolph, 1994). ....	39
Figura 2.12. Modelos para análise de radiers pelo Método dos Elementos Finitos. Velloso, Santa Maria e Lopes (1998).....	42

### Capítulo 3

Figura 3.13. Fluxograma do desenvolvimento do trabalho. ....	44
Figura 3.14. Planta baixa $L/B=1$ sem estacas.....	48
Figura 3.15. Corte A-A' $L/B=1$ sem estacas. ....	48
Figura 3.16. Planta baixa $L/B=1$ com 5 estacas. ....	49
Figura 3.17. Corte A-A' $L/B=1$ com 5 estacas.....	49
Figura 3.18. Planta baixa $L/B=1$ com 9 estacas. ....	49
Figura 3.19. Corte A-A' $L/B=1$ com 9 estacas.....	49
Figura 3.20. Planta baixa $L/B=1$ com 20 estacas. ....	50
Figura 3.21. Corte A-A' $L/B=1$ com 20 estacas.....	50
Figura 3.22. Planta baixa $L/B=1$ com 29 estacas. ....	50
Figura 3.23. Corte A-A' $L/B=1$ com 29 estacas.....	50

Figura 3.24. Planta baixa L/B=1 com 40 estacas. ....	51
Figura 3.25. Corte A-A' L/B=1 com 40 estacas. ....	51
Figura 3.26. Planta baixa L/B=2 sem estacas. ....	51
Figura 3.27. Corte A-A' L/B=2 sem estacas. ....	51
Figura 3.28. Planta baixa L/B=2 com 10 estacas. ....	52
Figura 3.29. Corte A-A' L/B=2 com 10 estacas. ....	52
Figura 3.30. Planta baixa L/B=2 com 18 estacas. ....	52
Figura 3.31. Corte A-A' L/B=2 com 18 estacas. ....	52
Figura 3.32. Planta baixa L/B=2 com 40 estacas. ....	53
Figura 3.33. Corte A-A' L/B=2 com 40 estacas. ....	53
Figura 3.34. Planta baixa L/B=2 com 58 estacas. ....	53
Figura 3.35. Corte A-A' L/B=2 com 58 estacas. ....	53
Figura 3.36. Planta baixa L/B=2 com 80 estacas. ....	54
Figura 3.37. Corte A-A' L/B=2 com 80 estacas. ....	54

#### Capítulo 4

Figura 4.38. Areia fofa- M.E.=12 [MPa]; placa quadrada- sem estacas; e=0,3 m; R,máx=1,36 cm e R,min=0,88 cm. ....	57
Figura 4.39. Areia medianamente compacta- M.E.=60 [MPa]; placa quadrada- sem estacas; e=0,3 m; R,máx=0,29 cm e R, min=0,18 cm. ....	57
Figura 4.40. Areia compacta- M.E.=120 [MPa]; placa quadrada- sem estacas; e=0,3 m; R,máx=0,2 cm e R, min=0,09 cm. ....	57
Figura 4.41. Recalque médiox100/B versus módulo de elasticidade, para duas geometrias e e=0,3 m. ....	58
Figura 4.42. Recalque médiox100/B versus módulo de elasticidade, para duas geometrias e e=0,6 m. ....	58
Figura 4.43. Recalque médiox100/B versus módulo de elasticidade, para duas geometrias e e=0,9 m. ....	59
Figura 4.44. Areia fofa- M.E.=12 [MPa]; placa quadrada- sem estacas; e=0,9 m; R,máx=2,17 cm e R, min=1,81. cm. ....	59
Figura 4.45. Areia medianamente compacta- M.E.=60 [MPa]; placa quadrada- sem estacas; e=0,9 m; R,máx=0,44 cm e R, min=0,33 cm. ....	60
Figura 4.46. Areia compacta- M.E.=120 [MPa]; ]; placa quadrada- sem estacas; e=0,9 m;	

R,máx=0,27 cm e R, min=0,16 cm.....	60
Figura 4.47. Recalque médio $\times 100/B$ versus espessura do radier, para duas geometrias e areia fofa- M.E.=12 [Mpa]. .....	61
Figura 4.48. Recalque médio $\times 100/B$ versus espessura do radier, para duas geometrias e areia medianamente compacta- M.E.=60 [MPa]. .....	61
Figura 4.49. Recalque médio $\times 100/B$ versus espessura do radier, para duas geometrias e areia compacta- M.E.=120 [Mpa]. .....	62
Figura 4.50. Recalque médio $\times 100/B$ versus diâmetro da estaca; para duas geometrias; e=0,3 m; e areia fofa- M.E.=12 [Mpa]. .....	62
Figura 4.51. Recalque médio $\times 100/B$ versus diâmetro da estaca; para duas geometrias; e=0,9 m; areia fofa- M.E.=12 [Mpa]. .....	63
Figura 4.52. Sem estacas; areia fofa- M.E.=12 [MPa]; placa quadrada; e=0,3 m; R,máx=1,36 cm e R,min=0,88 cm.....	64
Figura 4.53. 9 estacas; areia fofa- M.E.=12 [MPa]; ]; placa quadrada; $\phi$ 0,5 m; placa-quadrada (L/B=1); e=0,3 m; R,máx=1,30 cm e R,min=0,82 cm. ....	64
Figura 4.54. 29 estacas- areia fofa- M.E.=12 [MPa]; R,máx=1,56 cm e R,min=1,00 cm. ....	65
Figura 4.55. 29 estacas- areia compacta- M.E.=120 [MPa]; R,máx=0,17 cm e R min=0,10 cm. ....	65
Figura 4.56. Recalque percentual versus quantidade de estacas, para L/B=2, e=30 e areia fofa- M.E.=12 [Mpa]. .....	66
Figura 4.57. Recalque percentual versus quantidade de estacas, para L/B=2, e=30 e Areia medianamente compacta- M.E.=60 [MPa]. .....	66
Figura 4.58. Recalque percentual versus quantidade de estacas, para L/B=2, e=30 e Areia compacta- M.E.=120 [MPa]. .....	67
Figura 4.59. Recalque percentual versus quantidade de estacas, para L/B=2, e=60 e areia fofa- M.E.=12 [Mpa]. .....	67
Figura 4.60. Recalque percentual versus quantidade de estacas, para L/B=2, e=60 e Areia medianamente compacta- M.E.=60 [MPa]. .....	67
Figura 4.61. Recalque percentual versus quantidade de estacas, para L/B=2, e=60 e Areia compacta- M.E.=120 [MPa]. .....	68
Figura 4.62. Recalque percentual versus quantidade de estacas, para L/B=2, e=90 e areia fofa- M.E.=12 [Mpa] .....	68
Figura 4.63. Recalque percentual versus quantidade de estacas, para L/B=2, e=90 e Areia medianamente compacta- M.E.=60 [MPa]. .....	68

Figura 4.64. Recalque percentual <i>versus</i> quantidade de estacas, para $L/B=2$ , $e=90$ e Areia compacta- M.E.=120 [MPa].	69
Figura 4.65. 18 estacas; $e=0,3$ m- areia fofa- M.E.=12 [MPa]; $R_{m\acute{a}x}=2,18$ cm e $R_{min}=1,34$ cm.	69
Figura 4.66. 18 esacas; $e=0,3$ m- areia medianamente compacta- M.E.=60 [MPa]; $R_{m\acute{a}x}=0,46$ cm e $R_{min}=0,27$ cm.	70
Figura 4.67.18 estacas; $e=0,9$ m- areia fofa- M.E.=12 [MPa]; $R_{m\acute{a}x}=3,25$ cm e $R_{min}=2,35$ cm.	70
Figura 4.68. 18 estacas; $e=0,9$ m- areia medianamente compacta- M.E.=60 [MPa]; $R_{m\acute{a}x}=0,69$ cm e $R_{min}=0,44$ cm.	71
Figura 4.69. 58 estacas; $e=0,3$ m- areia fofa- M.E.=12 [MPa]; $R_{m\acute{a}x}=2,29$ cm e $R_{min}=1,45$ cm.	71
Figura 4.70. 58 estacas; $e=0,3$ m- areia compacta- M.E.=120 [MPa]; $R_{m\acute{a}x}=0,24$ cm e $R_{min}=0,14$ cm.	72
Figura 5.71. 58 estacas; $e=0,9$ m- areia fofa- M.E.=12 [MPa]; $R_{m\acute{a}x}=3,26$ cm e $R_{min}=2,39$ cm.	72
Figura 4.72. 58 estacas; $e=0,9$ m- areia compacta- M.E.=120 [MPa]; $R_{m\acute{a}x}=0,36$ cm e $R_{min}=0,23$ cm.	72
Figura 4.73. Recalque m\u00e9dio percentual <i>versus</i> \u00e1rea das estacas/\u00e1rea total [%], para $L/B=1$ , $e=30$ [cm] e areia fofa- M.E.=12 [MPa].	73
Figura 4.74. Recalque m\u00e9dio percentual <i>versus</i> \u00e1rea das estacas/\u00e1rea total [%], para $L/B=1$ , $e=60$ [cm] e areia fofa- M.E.=12 [MPa].	74
Figura 4.75. Recalque m\u00e9dio percentual <i>versus</i> \u00e1rea das estacas/\u00e1rea total [%], para $L/B=1$ , $e=90$ [cm] e areia fofa- M.E.=12 [MPa].	74
Figura 4.76. Recalque m\u00e9dio percentual <i>versus</i> \u00e1rea das estacas/\u00e1rea total [%], para $L/B=2$ , $e=30$ [cm] e areia fofa- M.E.=12 [MPa].	75
Figura 4.77. Recalque m\u00e9dio percentual <i>versus</i> \u00e1rea das estacas/\u00e1rea total [%], para $L/B=2$ , $e=60$ [cm] e areia fofa- M.E.=12 [MPa].	75
Figura 4.78. Recalque m\u00e9dio percentual <i>versus</i> \u00e1rea das estacas/\u00e1rea tota [%], para $L/B=21$ , $e=90$ [cm] e areia fofa- M.E.=12 [MPa].	75
Figura 4.79. Coeficiente de varia\u00e7\u00e3o (%) <i>versus</i> quantidade de estacas, para estacas com $\phi 40$ , $L/B=1$ e areia fofa- M.E.=12 [MPa].	77
Figura 4.80. Coeficiente de varia\u00e7\u00e3o (%) <i>versus</i> quantidade de estacas, para estacas com $\phi 50$ , $L/B=1$ e areia fofa- M.E.=12 [MPa].	78

Figura 4.81. Coeficiente de variação (%) <i>versus</i> quantidade de estacas, para estacas com $\phi 60$ , L/B=1 e areia fofa- M.E.=12 [MPa].....	79
Figura 4.82. Coeficiente de variação (%) <i>versus</i> quantidade de estacas, para estacas com $\phi 40$ , L/B=2 e areia fofa- M.E.=12 [MPa].....	81
Figura 4.83. Coeficiente de variação (%) <i>versus</i> quantidade de estacas, para estacas com $\phi 50$ , L/B=2 e areia fofa- M.E.=12 [MPa].....	82
Figura 4.84. Coeficiente de variação (%) <i>versus</i> quantidade de estacas, para estacas com $\phi 60$ , L/B=2 e areia fofa- M.E.=12 [MPa].....	83

## APÊNDICE

Figura 85. Planta baixa L/B=1, posicionamento dos pilares, sem estacas. ....	92
Figura 86. Planta baixa L/B=1 com 5 estacas. ....	93
Figura 87. Planta baixa L/B=1 com 9 estacas ....	93
Figura 88. Planta baixa L/B=1 com 20 estacas. ....	94
Figura 89. Planta baixa L/B=1 com 29 estacas. ....	94
Figura 90. Planta baixa L/B=1 com 40 estacas. ....	95
Figura 91. Planta baixa L/B=2, posicionamento dos pilares, sem estacas. ....	95
Figura 92. Planta baixa L/B=2 com 10 estacas. ....	96
Figura 93. Planta baixa L/B=2 com 18 estacas. ....	96
Figura 94. Planta baixa L/B=2 com 40 estacas. ....	97
Figura 95. Planta baixa L/B=2 com 58 estacas. ....	97
Figura 96. Planta baixa L/B=2 com 80 estacas. ....	98

## LISTA DE TABELAS

### Capítulo 2

Tabela 2.1. Relação entre o número de golpes do SPT e o tipo de areia. (Marangon, 2017).	40
Tabela 2.2. Fatores de forma $I_s$ para carregamentos na superfície de um meio de espessura finita (Velloso e Lopes, 2010).....	41
Tabela 2.3. Valores para $I_s$ para carregamentos na superfície ( $I_d = 1,0$ ) de um meio de espessura finita (Velloso e Lopes, 2010) - $h$ = espessura do meio; $a = B/2$ ; $m = L/B$ .....	41
Tabela 2.4. Modelos de cálculo – ELPLA.....	43

### Capítulo 3

Tabela 3.5. Módulo de elasticidade do solo .....	45
Tabela 3.6. Propriedades do concreto e do aço .....	45
Tabela 3.7. Dimensões consideradas para os radiers.....	46
Tabela 3.8. Cargas nos pilares - radier quadrado .....	46
Tabela 3.9. Cargas nos pilares – radier retângular .....	46
Tabela 3.10. Número de estacas- Radier forma quadrada. ....	47
Tabela 3.11. Número de estacas- Forma do radier retangular.....	47
Tabela 3.12. Diâmetros considerados para as estacas. ....	47
Tabela 3.13. Espessuras consideradas para os radiers.....	48

### Capítulo 4

Tabela 4.14. Relação entre diâmetro das estacas e o peso da estrutura de fundação. ....	63
---	----

### APÊNDICE

Tabela 15. Combinações desenvolvidas para análise.....	99
Tabela 16. Área relativa das estacas versus recalque médio percentual para $L/B=1$ ,	

M.E.=12MPa e e=0,3 m. ....	107
Tabela 17. Área relativa das estacas versus recalque médio percentual para L/B=1, M.E.=12MPa e e=0,6 m. ....	107
Tabela 18. Área relativa das estacas versus recalque médio percentual para L/B=1, M.E.=12MPa e e=0,9 m. ....	108
Tabela 19. Área relativa das estacas versus recalque médio percentual para L/B=2, M.E.=12MPa e e=0,3 m. ....	108
Tabela 20. Área relativa das estacas versus recalque médio percentual para L/B=2, M.E.=12MPa e e=0,6 m. ....	108
Tabela 21. Área relativa das estacas versus recalque médio percentual para L/B=2, M.E.=12MPa e e=0,9 m. ....	109
Tabela 22. Coeficiente de variação percentual para L/B=1, M.E.=12MPa, e=0,3 m e $\phi$ 40...	110
Tabela 23. Coeficiente de variação percentual para L/B=1, M.E.=12MPa, e=0,6 m e $\phi$ 40...	110
Tabela 24. Coeficiente de variação percentual para L/B=1, M.E.=12MPa, e=0,9 m e $\phi$ 40...	110
Tabela 25. Coeficiente de variação percentual para L/B=2, M.E.=12MPa, e=0,3 m e $\phi$ 40...	111
Tabela 26. Coeficiente de variação percentual para L/B=2, M.E.=12MPa, e=0,6 m e $\phi$ 40...	111
Tabela 27. Coeficiente de variação percentual para L/B=2, M.E.=12MPa, e=0,9 m e $\phi$ 40...	111
Tabela 28. Coeficiente de variação percentual para L/B=1, M.E.=12MPa, e=0,3 m e $\phi$ 50...	111
Tabela 29. Coeficiente de variação percentual para L/B=1, M.E.=12MPa, e=0,6 m e $\phi$ 50...	112
Tabela 30. Coeficiente de variação percentual para L/B=1, M.E.=12MPa, e=0,9 m e $\phi$ 50...	112
Tabela 31. Coeficiente de variação percentual para L/B=2, M.E.=12MPa, e=0,3 m e $\phi$ 50...	112
Tabela 32. Coeficiente de variação percentual para L/B=2, M.E.=12MPa, e=0,6 m e $\phi$ 50...	112
Tabela 33. Coeficiente de variação percentual para L/B=2, M.E.=12MPa, e=0,9 m e $\phi$ 50...	113
Tabela 34. Coeficiente de variação percentual para L/B=1, M.E.=12MPa, e=0,3 m e $\phi$ 60...	113
Tabela 35. Coeficiente de variação percentual para L/B=1, M.E.=12MPa, e=0,6 m e $\phi$ 60...	113
Tabela 36. Coeficiente de variação percentual para L/B=1, M.E.=12MPa, e=0,9 m e $\phi$ 60...	113
Tabela 37. Coeficiente de variação percentual para L/B=2, M.E.=12MPa, e=0,3 m e $\phi$ 60...	114
Tabela 38. Coeficiente de variação percentual para L/B=2, M.E.=12MPa, e=0,6 m e $\phi$ 60...	114
Tabela 39. Coeficiente de variação percentual para L/B=2, M.E.=12MPa, e=0,9 m e $\phi$ 60...	114

## LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

### Abreviações

ACI	American Concrete Institute
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
FHA	Federal House Administration
MEF	Método dos Elementos Finitos
UNICAP	Universidade Católica de Pernambuco

### Símbolos

B	Largura do radier
E	Módulo de elasticidade - Módulo de Young
e	Espessura do radier
E <sub>1</sub>	Areia fofa
E <sub>2</sub>	Areia medianamente compacta
E <sub>3</sub>	Areia compacta
f <sub>ck</sub>	Resistência à compressão do concreto
F <sub>SUR</sub>	Fator de segurança da estrutura
f <sub>yk</sub>	Resistência de escoamento do aço
H	Comprimento das estacas
I <sub>s</sub>	Fator de forma da sapata e de sua rigidez
I <sub>d</sub>	Fator de profundidade/embutimento
I <sub>h</sub>	Fator de espessura de camada compressível
kN	KiloNewton
L	Comprimento do radier
M	Momento fletor atuante
m	Metros
M.E.	Módulo de elasticidade do solo
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
n	Número de estacas
N <sub>SPT</sub>	Número de golpes necessários para cravar os últimos 30 cm do amostrador
P	Carga vertical
q	Pressão média aplicada
Q <sub>P</sub>	Carga vertical distribuída nas estacas
Q <sub>PR</sub>	Carga vertical distribuída na estrutura
Q <sub>R</sub>	Carga vertical distribuída no radier
R <sub>,máx</sub>	Recalque máximo
R <sub>,médio</sub>	Recalque médio
R <sub>,mín</sub>	Recalque mínimo
R <sub>UR</sub>	Resistência da estrutura
s	Espaçamento entre estacas
W <sub>ADM</sub>	Recalque admissível
W <sub>UR</sub>	Recalque máximo
α <sub>PR</sub>	Coefficiente de radier estaqueado

$\gamma_c$	Peso específico do concreto
$\gamma_s$	Peso específico aparente do solo
$\gamma_{sub}$	Peso específico aparente do solo submerso
$\epsilon$	Deformação
$\nu_c$	Coefficiente de Poisson do concreto
$\tau$	Tensão
$\phi$	Diâmetro as estacas
$\varphi$	Ângulo de atrito do solo

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	20
1.1 Justificativa e Relevância.....	20
1.2 Objetivos.....	22
1.2.1 Objetivo geral.....	22
1.2.2 Objetivos específicos.....	22
1.3. Estrutura da dissertação.....	23
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1 Sistemas de fundação.....	24
2.1.1 Fundação do tipo Radier.....	24
2.1.1.1 Histórico do radier.....	25
2.1.1.2 Classificação dos radiers.....	27
2.1.2 Fundação em estacas.....	30
2.1.3 Fundações do tipo Radier Estaqueado.....	31
2.1.3.1 Definições para radier estaqueado.....	31
2.1.3.2 Contribuição das estacas ao radier estaqueado.....	32
2.1.3.3 Influência da forma e da espessura do radier no comportamento da estrutura de fundação.....	33
2.1.3.4 Critérios para adoção do radier estaqueado.....	35
2.2 Implicações do contato entre o radier estaqueado e solo arenoso.....	38
2.3 Modelos de cálculo de recalques.....	40
2.4 Métodos dos Elementos Finitos.....	42
2.5 Programa computacional ELPLA.....	43
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1 Parâmetros geotécnicos adotados.....	44
3.2 Parâmetros da estrutura de fundação.....	45
3.3 Análises numéricas.....	54
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
4.1 Influência do módulo de elasticidade do solo no recalque médio.....	56

4.2 Influência da espessura do radier no recalque médio .....	59
4.3. Influência do diâmetro das estacas no recalque médio.....	62
4.4 Influência da quantidade das estacas no recalque médio.....	64
4.5. Influência da área das estacas em relação à área total do radier no recalque .....	73
4.6. Influência das estacas na uniformização do recalque .....	76
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	84
5.1 Conclusões .....	84
5.2 Sugestões.....	85
REFERÊNCIAS .....	87
APÊNDICE .....	92

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 Justificativa e Relevância

O número de construções que conseguem agregar uma maior quantidade de pessoas numa menor área é crescente, tornando-se uma solução viável para a expansão populacional em regiões com escassez de espaço. Conseqüentemente, as cargas estruturais atuantes nestas construções são maiores, o que demandam estudos para planejar a melhor opção de transferência dessas cargas ao solo.

Terrenos economicamente rentáveis e com boas características geotécnicas para receber essas cargas são componentes cada vez mais difíceis de serem encontrados nas grandes cidades. Por isso, são necessários investimentos em pesquisas para desenvolvimento de sistemas estruturais que permitam o aproveitamento de solos de baixa capacidade de carga ou de grande deformabilidade, assegurando seu desempenho e a estabilidade global da estrutura.

A NBR 6122 (2010) – Projeto e execução de fundações – classifica as fundações em dois grupos principais, que são: fundações profundas e fundações superficiais ou diretas. As fundações superficiais ou diretas são elementos de fundação em que a carga é transmitida ao terreno, predominantemente pelas pressões distribuídas sob a base da fundação, em que a profundidade de assentamento em relação ao terreno adjacente é inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação. Incluem-se neste tipo de fundação as sapatas, os blocos, os radier, as sapatas associadas, as vigas de fundação e as sapatas corridas.

Quando o elemento de fundação transmite a carga ao terreno pela base (resistência de ponta), por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação das duas, e está assente em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo 3 m, salvo justificativa, caracteriza-se por ser uma fundação profunda. Neste tipo de fundação, por exemplo, incluem-se estacas, tubulões e caixões.

A escolha do tipo de fundação de uma obra depende do tipo de solo existente e do tipo

de construção a ser adotada, das limitações construtivas, dentre outros aspectos. Quando, em uma obra, várias soluções são possíveis, é imprescindível estudar as diversas alternativas existentes e escolher a que contemple tanto a viabilidade econômica quanto técnica, satisfazendo todos os requisitos de segurança e desempenho.

Como alternativa inicial para as construções considera-se a fundação direta. Dentre as opções deste tipo de fundação, o radier apresenta ser uma solução interessante para transferência de cargas aos solos de baixa capacidade de suporte, visto que o mesmo atua como um elemento superficial de contato, apoiado sob o solo, responsável em receber todos os esforços provenientes da estrutura e dissipá-los no maciço através da área de contato solo-fundação.

Quando a camada superficial do solo não for adequada para o uso de uma fundação direta, a utilização de fundações profundas é comumente adotada. Esta solução permite que, com a utilização de estacas, tubulões ou caixões, as cargas provenientes da superestrutura possam ser transmitidas à camada do subsolo com características geotécnicas apropriadas para a estabilidade e segurança global da estrutura.

Além das fundações diretas e profundas, existe outra concepção que ainda não está contemplada na NBR 6122 (2010) – Projeto e execução de fundações. Conhecida como fundações mistas, caracteriza-se pela combinação dos dois tipos de fundação e já vem sendo adotada como solução de fundação em diversos tipos de construções.

De acordo com Pereira e Viana da Fonseca (2016), no intuito de aumentar a capacidade de carga absorvida pela fundação e de reduzir os recalques totais e diferenciais, a inserção de estacas profundas que trabalham junto com o radier, ou simplesmente radier estaqueado, vem sendo amplamente empregado em tanto em obras de grande porte, como o Burj Khalifa, em Dubai, com 828 metros de altura, como em obras com porte não tão expressivo, como são os casos das edificações que atendem ao programa Minha Casa Minha Vida.

Visto que, sobre radier estaqueado, poucos estudos foram desenvolvidos no Brasil, mas já vem sendo empregado como solução de fundação para construções na cidade do Recife e Região Metropolitana, este trabalho evidencia a importância de conhecer melhor os recalques que ocorrem neste tipo de fundação de maneira a racionalizar a escolha do

projetista.

Por meio do estudo paramétrico busca-se compreender em quais contextos será viável a adoção deste tipo de fundação, verificando a forma como diferentes combinações entre a variável do solo (módulo de elasticidade) e as variáveis da estrutura da fundação (quantidade e diâmetro das estacas; espessura e forma do radier), podem influenciar nos valores de recalques resultantes.

## **1.2 Objetivos**

### 1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência do módulo da elasticidade do solo, da forma e espessura do radier, do diâmetro e quantidade de estacas na previsão de recalque de radiers estaqueados, através de um estudo paramétrico.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Verificar como a variação do módulo de elasticidade do solo pode influenciar na estabilidade global do sistema.
- Avaliar a influência da rigidez da placa de fundação, através da variação da forma e espessura do radier, no comportamento do solo.
- Analisar como as variações da quantidade e de diâmetros das estacas influenciam nos recalques obtidos.
- Verificar como as diferentes combinações dos parâmetros do solo e da estrutura interferem nos valores de recalque.

### **1.3. Estrutura da dissertação**

A estrutura deste trabalho é composta por cinco capítulos e está organizada da seguinte maneira:

Neste Capítulo 1 consta a introdução, os objetivos da pesquisa e a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 trata-se da revisão bibliográfica sobre: o sistema fundação radier estaqueado; a interação solo-estrutura; a influência das propriedades do solo nos valores obtidos dos recalques da estrutura; o método dos elementos finitos utilizado para análise das combinações desenvolvidas neste trabalho; e a descrição do programa ELPA e o modelo de cálculo utilizado para definição dos recalques.

O Capítulo 3 é a descrição dos programas ELPLA, utilizado para a realização do estudo paramétrico e a metodologia adotada para realização deste trabalho.

O Capítulo 4 apresenta a análise e a discussão dos resultados dos recalques obtidos por meio do programa computacional.

O Capítulo 5 é composto pelas conclusões e pelas sugestões para futuras pesquisas.

## **CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo serão apresentados estudos relacionados à fundação em radier estaqueado, à interação solo-estrutura, à influência de propriedades do solo no recalque da estrutura e o método dos elementos finitos, utilizado pelo programa ELPLA, para análise das combinações desenvolvidas neste trabalho.

### **2.1 Sistemas de fundação**

Fundação de uma obra de engenharia é o nome que pode ser dado tanto ao elemento transmissor dos esforços de uma estrutura ao terreno como ao próprio terreno. Para citar exemplos, tem-se as sapatas e as estacas que são peças enterradas responsáveis por conduzir os esforços para o solo, enquanto que em outras estruturas como barragens e pavimentos o repouso é feito diretamente no terreno sem a necessidade de um elemento transmissor (Gusmão Filho, 1998).

Velloso e Lopes (2010) dividem fundação em três grupos: direta (ou superficial ou rasa), indireta (ou profunda) e mista, que se caracteriza por ser uma fundação que agrega os dois conceitos concomitantemente. Com esta categorização em mente, este trabalho dará ênfase à fundação mista, ou seja, uma fundação com estacas (profundas) que utiliza do contato direto com o solo de um radier (superficial). Este tipo de fundação é conhecido como radier estaqueado.

#### **2.1.1 Fundação do tipo Radier**

A NBR 6122 (2010) define o radier como um elemento de fundação superficial que abrange todos os pilares da obra ou carregamentos distribuídos. Funciona como uma laje de concreto cujos esforços provenientes da estrutura são igualmente distribuídos em toda

a área de contato com o solo.

Opta-se por este tipo de fundação nas seguintes situações:

- ✓ Quando o solo tem baixa capacidade de carga;
- ✓ Em edificações de grande porte;
- ✓ Quando se deseja uniformizar os recalques;
- ✓ Quando as áreas das sapatas se aproximam umas das outras ou quando a soma das áreas destas forem maiores que a metade da área em projeção da construção;
- ✓ Em áreas sujeitas a abalos sísmicos.

#### 2.1.1.1 Histórico do radier

Segundo estudos realizados por Souza (2017), a palavra radier tem sua origem na Europa e, possivelmente, é nativa da língua francesa. Uma das primeiras utilizações da fundação em radier está registrada no projeto do aqueduto subterrâneo Retz ou L'aqueduc de Retz, responsável por levar água da fonte do Vale Rù de Buzot (Vallée du Rù de Buzot) ao castelo de St-Germain-em-Laye, residência do rei Luís XIV. Com 6 km de extensão e alturas que variavam de 0,80 m a 2,00 m, foi construída em 3 fases: a primeira iniciada em 1685 e finalizada em 1688; a segunda fase começada em 1731 e terminada em 1732; e a última fase em iniciada em 1778 e concluída em 1798. (<http://ruedeslumieres.morkitu.org>, 2017). A Figura 2.1 mostra as seções transversais do aqueduto de Retz e a utilização do sistema radier.

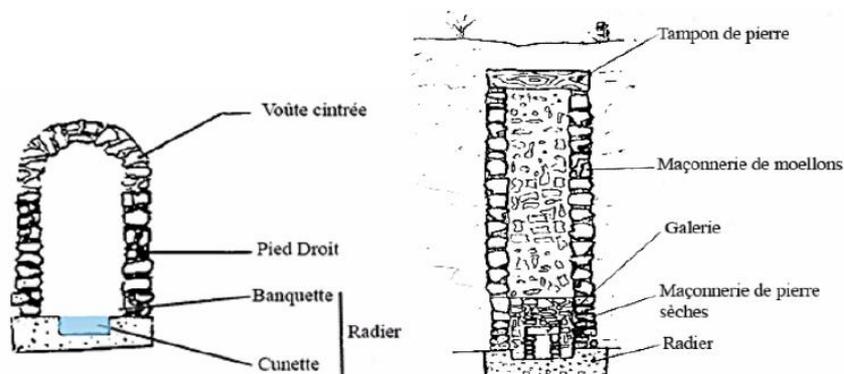


Figura 2.1. Seções transversais utilizadas no Aqueduto de Retz (<http://ruedeslumieres.morkitu.org/>)

Em 1860 datam registros do início das teorias relacionadas à radier, sob a forma de investigação estrutural através das teorias de vigas sobre base elástica. Os anos seguintes foram marcados por outras contribuições à esses estudos: em 1867, pelo o engenheiro alemão Emil Winkler; em 1923 e 1927, pelo o engenheiro dinamarquês Harald Malcom Westergaard; em 1930, pela Fazenda Experimental Arlingtn em Virgínia e pela Estação Experimental de Engenharia no estado de Iowa, ambas nos Estados Unidos da América; e em 1943, por Burmister. Segundo Burmister (1943), *apud* Souza (2017), nesta época, esta solução de fundação já estava sendo adotada em pistas de pouso para aviões e em grandes construções.

Ainda de acordo com o mesmo autor, apenas no início da década de 1950 que o sistema de fundações em radier começou a ser aplicada em fundação de residências e em construções comerciais pequenas. Mesmo expandindo a utilização deste tipo de fundação, muitos estudos necessitavam ser realizados para assegurar uma otimização de sua aplicabilidade. A Federal House Administration (FHA), criada pelo governo dos EUA, com intuito de melhorar a qualidade e as condições das habitações, iniciou pesquisas que serviram de bases para o Conselho de Consultores em Pesquisas de Construções (conhecida como Building Research Advisory Board, BRAB) desenvolverem uma importante publicação sobre lajes para fundação residencial, sob o número 33, em 1968.

Este documento, além de explorar assuntos inerentes ao radier, contribuiu também por relacionar a estrutura de fundação com as características do solo, mas não abordava questões sobre o radier protendido.

Segundo ACI 360R-10 (2010), apenas em 1960 iniciaram as primeiras construções em radier protendido, tendo sido validadas em 1968 pelo órgão competente do país, o Departamento de Habitação e Desenvolvimento Urbano dos Estados Unidos. E, em 1980, a Texas A & M University apresentou um documento que abordava recomendações de detalhamento, materiais, especificações, instalações e procedimentos para lajes nervuradas protendidas para fundações.

Com os avanços tecnológicos foi possível introduzir o método dos elementos finitos (MEF) para desenvolver os cálculos dos modelos propostos pelos autores para o dimensionamento mais otimizado do radier.

Pesquisas em materiais construtivos permitiram melhorias no concreto, justificando a aplicação de concreto reforçado com fibras de aço em lajes apoiadas no solo.

Outra evolução desenvolvida em radiers foi a inserção de estacas, surgindo o conceito de radier estaqueado que se caracteriza num sistema de fundação na qual a capacidade carga da laje é acrescida pela capacidade de carga das estacas para absorver as cargas estruturais da edificação.

Garcia (2015) atribui à Zeervaert, em 1957, a técnica do emprego de radier estaqueado, entretanto, Souza (2016) relata a existência de registros da utilização deste tipo de solução de fundação para a construção do Palácio Legislativo do México, em 1900, pela empresa Milliken Bros. Em 1933 o local foi nomeado como Monumento à Revolução, em virtude da Revolução Mexicana ocorrida entre os anos de 1910 e 1921.

Para realização desta obra, foram aplicadas 17000 estacas de areia compactada, de madeira e de concreto, sob uma placa de concreto armado, constituindo um radier estaqueado. Este tipo de fundação será abordado no item 2.1.3 deste trabalho.

#### 2.1.1.2 Classificação dos radiers

Segundo Dória (2007), os radiers podem ser classificados quanto a sua geometria, quanto à rigidez à flexão e quanto à tecnologia.

a) Quanto à geometria: classificam-se como lisos, com pedestais, nervurados e caixão.

- Radiers lisos (Figura 2.2) – tem a vantagem de ter grande facilidade de execução.

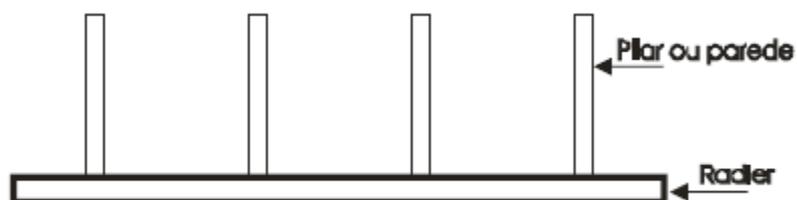


Figura 2.2. Radier liso (DORIA, 2007)

- Rádiers com pedestais ou cogumelos (Figura 2.3) – aumenta a espessura sob os pilares e melhora a resistência à flexão e ao esforço cortante. Os pedestais podem ser superior ou inferior, tendo este último a vantagem de ser feita na escavação e deixar a superfície do piso plana.

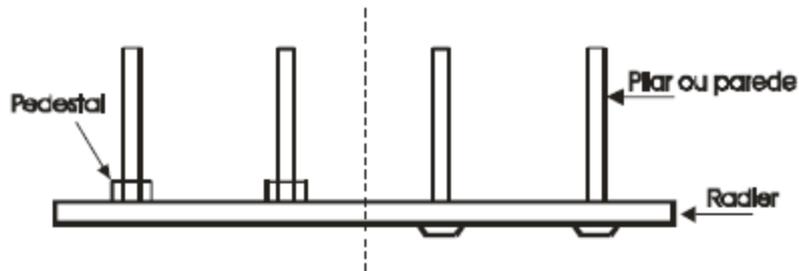


Figura 2.3. Radier com pedestais ou cogumelos (DORIA, 2007).

- Rádiers nervurados (Figura 2.4) – executa-se com nervuras secundárias e nervuras principais, colocadas sob os pilares, podendo ser superior ou inferior. No caso de nervuras inferiores executa-se sobre a escavação, o que não acontece no caso das nervuras superiores, sendo necessária a colocação de agregado para deixar a superfície do piso plana.

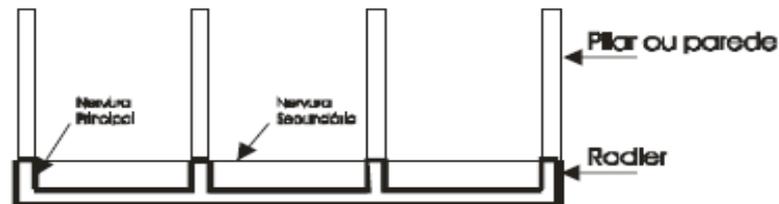


Figura 2.4. Radier nervurado (DORIA, 2007).

- Rádiers em caixão (Figura 2.5) – utiliza-se com a finalidade de ter uma grande rigidez e pode ser executado com vários pisos

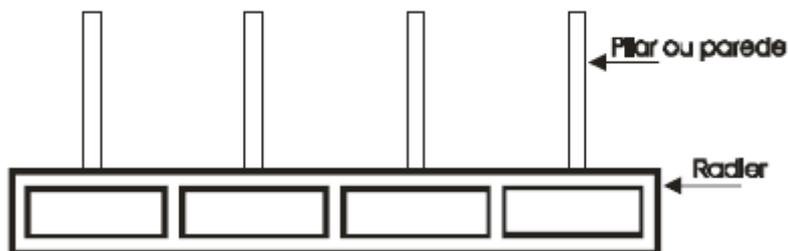


Figura 2.5. Radier em caixão (DORIA, 2007).

#### b) Quanto à rigidez

São classificados em rígidos e elásticos. Os radiers rígidos são aqueles cuja rigidez a flexão é relativamente grande, portanto, o elemento estrutural pode ser tratado como um corpo rígido. Os radiers elásticos possuem menor rigidez e os deslocamentos relativos da placa não são desprezíveis. Os radiers citados no item anterior estão em ordem crescente de rigidez.

#### c) Quanto à tecnologia

Para execução do radier, a tecnologia pode variar entre concreto armado e concreto protendido.

- Radiers em concreto armado:

A especificação da resistência à compressão do concreto tem influência direta na determinação da espessura do radier e nas propriedades das superfícies acabadas. A resistência à compressão também tem influência na deformação de retração, na deformação lenta e nas deformações devido à variação da temperatura ambiente. A determinação e a especificação dessa resistência são fundamentais para o desempenho estrutural do radier em concreto armado.

- Radiers em concreto protendido:

A determinação da altura de um elemento estrutural deve ser realizada logo na fase inicial do processo de cálculo. Cauduro (2000) recomenda que a altura de um elemento em concreto protendido seja da ordem de 70% da altura desse elemento em concreto armado.

Segundo Oliveira (2013), o radier sofre a influência de diversos fatores que afetam diretamente a desempenho da estrutura, como: o tipo de solo, a uniformidade de suporte da base, a qualidade do material a ser utilizado, o acabamento superficial, entretanto, o conhecimento da natureza e características do solo o qual será apoiado merece destaque.

A resistência do solo é muito importante para o desempenho deste tipo de fundação, e esta resistência é diretamente relacionada ao grau de compactação e à umidade do solo. A fim de se evitar problemas na estrutura, é necessário assegurar que as condições de apoio sejam uniformes para o radier. Situações com tipos de solo expansíveis ou colapsíveis

devem ser excluídas.

Como o desempenho estrutural do radier depende tanto da qualidade do concreto como também das propriedades do solo sobre o qual está apoiado, as recomendações da literatura estrangeira são enfatizadas para a dosagem, a fabricação, a aplicação e o acabamento do concreto e também para a caracterização e a preparação do solo para proporcionar um suporte uniforme para a laje.

### 2.1.2 Fundação em estacas.

A NBR 6122 (2010) estabelece que a fundação profunda transmite a carga ao terreno pela base (resistência de ponta), por sua superfície lateral (resistência do fuste) ou por uma combinação das duas. Dentre esse tipo de fundação incluem-se as estacas, os tubulões e os caixões.

A utilização de estacas como solução de fundação ocorre quando o solo resistente está situado em uma profundidade na qual é inviável tecnicamente a adoção de uma fundação direta.

Segundo Velloso (2010), as fundações em estacas podem ser classificadas segundo o material utilizado (madeira, concreto, aço e mistas), de acordo com processo executivo desenvolvido, bem como quanto aos esforços os quais serão submetidos.

Outra classificação clássica é apresentada por Terzaghi e Peck (1967), que agrupam as estacas em três tipos:

a) estacas de atrito em solos granulares muito permeáveis, conhecidas também como estacas de compactação;

b) estacas de atrito em solos finos de baixa permeabilidade, conhecidas também por fundações em estacas flutuantes, por não produzirem compactação apreciável do solo e transferirem ao solo as cargas que lhes são aplicadas pelo atrito lateral;

c) estacas de ponta, por que transferem as cargas a uma camada de solo resistente

situada abaixo da base da estrutura.

### 2.1.3 Fundações do tipo Radier Estaqueado

A escolha entre um desses tipos de fundação (superficial ou profunda) depende do tipo de solo, do tipo de construção e das limitações construtivas.

Segundo Poulos (2001) é comum, na concepção de uma fundação, considerar em primeiro lugar a utilização de um sistema de fundação superficial para suportar a estrutura e, em seguida, quando este não for adequado, recorrer ao uso de fundações profundas, como as estacas. Por fim, quando as opções anteriormente citadas são inviáveis, a concepção de estaquear fundação é adotada, na qual, convencionalmente, toda a carga de projeto é suportada pelas estacas, negligenciando a contribuição que pode ser dada através da interação solo-estrutura, quando considerada o contato radier-solo.

Se considerarmos uma fundação na qual as cargas atuantes provenientes da estrutura são verticais, podemos distribuir essas cargas ao solo através de pressões de contato existentes na fundação, bem como pelas estacas (quando presentes), desde que não haja variação do nível freático.

#### 2.1.3.1 Definições para radier estaqueado

O radier estaqueado, segundo Souza (2014), caracteriza-se por ser um sistema de fundação que trabalha através de uma laje (radier) apoiada sobre o solo, no qual a sua capacidade de carga deverá ser capaz de absorver as cargas da estrutura, sendo acrescida, na capacidade de carga da laje, a capacidade de carga do grupo de estacas.

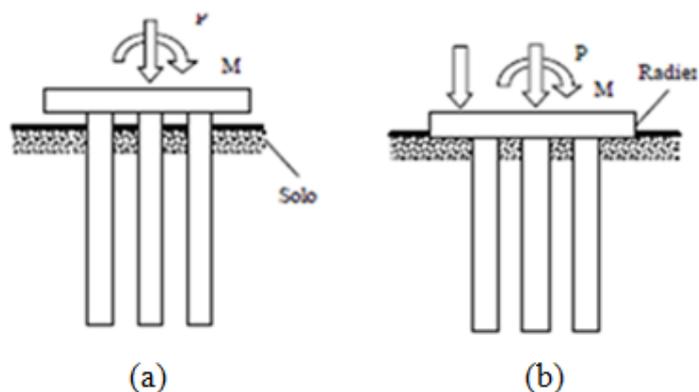
Janda *et al.* (2009) define o radier estaqueado como um sistema de fundação em que as estacas e o radier interagem uns com os outros e com o solo subjacente para sustentar cargas verticais, horizontais e momentos provenientes da superestrutura

Burland et. al (1977) assegura que a introdução de estacas ao radier favorece a redução dos valores de recalques a níveis aceitáveis.

Small et. al. (2007), apud Pezo (2013), assegura que o uso de fundações em radier estaqueados se tornou mais frequente nos últimos anos, pela ação combinada do radier e as estacas para aumentar a capacidade de carga, reduzir recalques absolutos e diferenciais no radier.

### 2.1.3.2 Contribuição das estacas ao radier estaqueado

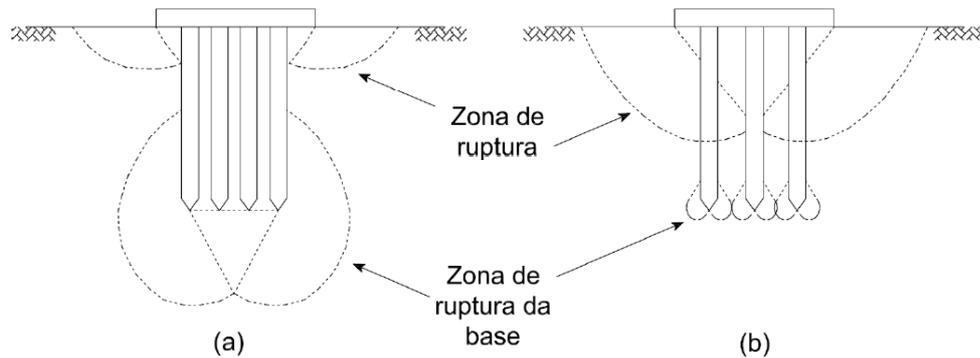
Segundo Bezerra (2003), a diferença entre um grupo de estacas e um radier estaqueado dá-se, primeiramente, pelo fato do radier manter contato direto com o solo, o que favorece a absorção de cargas da superestrutura, conforme Figura 2.6(b). Diferentemente do que ocorre com o grupo de estacas, no qual se tem estacas associadas a um elemento estrutural (bloco), que não se encontra em contato com o solo, sendo todas as cargas absorvidas pelo grupo de estacas, conforme a Figura 2.6(a).



**Figura 2.6. Tipos de sistema de fundação: (a) Grupo de estacas; (b) Radier estaqueado ou Fundação Mista (BEZERRA, 2003)**

Dados experimentais e estudos teóricos destacam que a interação adequada entre radier e estacas aumenta a rigidez global de uma estrutura de fundação, ampliando a capacidade de carga da fundação e, por fim, pode ainda contribuir para o aumento da rigidez do solo no interior da fundação.

A quantidade de estacas inseridas numa laje radier também altera a forma de ruptura da fundação. Segundo Kishida e Meyerhof (1965), *apud* Garcia (2015), quando o espaçamento entre estacas é elevado ( $s > 4\phi$ ), a capacidade de carga da fundação seria a soma da capacidade de carga do radier com a do grupo de estacas Figura 2.7(b). Na situação em que as estacas estão pouco espaçadas Figura 2.7(a), a ruptura seria em todas as estacas em conjunto ou “pilar equivalente”.

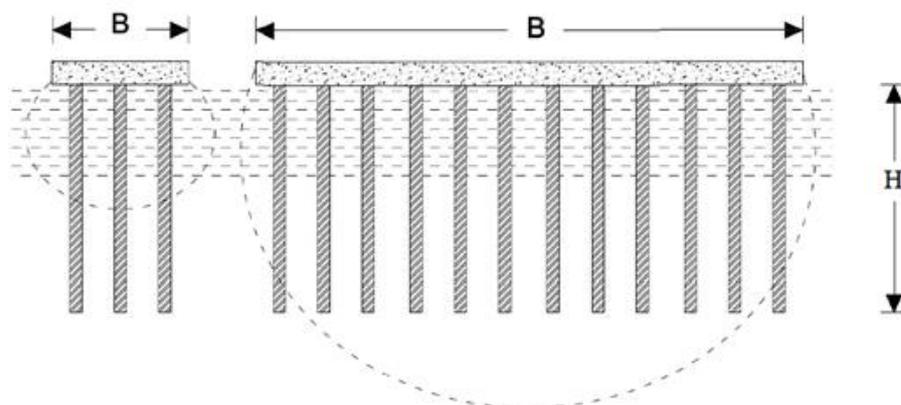


**Figura 2.7. Formas de ruptura de um radier estacado (modificado PHUNG, 1993, *apud* Garcia, 2015)**

Mandolini et al. (2005), após análises realizadas da distribuição de cargas entre estacas sob um mesmo radier estacado, concluíram que a tendência é que o aumento do espaçamento entre estacas promove maior absorção de carga pelo radier, alcançando valores de 70% para espaçamentos de 12 vezes o diâmetro da estaca.

2.1.3.3 Influência da forma e da espessura do radier no comportamento da estrutura de fundação.

Mandolini (2012) afirma que as características geométricas da laje de fundação e das estacas influenciam diretamente a projeção dos bulbos de tensões para radiers estacados, conforme Figura 2.8.



**Figura 2.8. Pequeno e grande radiers estacados (VIGGIANI et al., 2012)**

O bulbo de tensões, para radiers pequenos se desenvolve não muito além da laje de fundação, tendo seu final compreendido ao longo das estacas. Quando se refere ao bulbo de tensões em radiers com grande dimensão, o mesmo excede comprimento das estacas, dissipando as tensões em camadas mais profundas do maciço.

Viggiani et al. (2012), recalque em radier estacado pode ser mais bem previsto, considerando dois grupos:

1) Os “pequenos” radiers, que cuja capacidade de carga do radier sem estaca(s) não é suficiente para suportar a carga total com fator de segurança adequado. As estacas somente são adicionadas para aumentar a capacidade de carga e levar o fator de segurança a níveis adequados. As dimensões do radier são da ordem de 5 a 15 m e obedece à relação  $B/H < 1$ , em que H é o comprimento das estacas;

2) Os “grandes” radiers estacados, que são aqueles cuja capacidade de carga do radier sem estaca(s) é suficiente para suportar a carga total com uma margem adequada no fator de segurança. As estacas são adicionadas com o intuito de reduzir os recalques. Em geral, a largura do radier (B) é relativamente grande em comparação ao comprimento das estacas  $B/H > 1$ , em que H é o comprimento das estacas.

Segundo Mandolini et al. (2013), quando  $B/H < 1$ , é caracterizado por ser um radier pequeno no qual a capacidade de contribuição do radier à estrutura de fundação fica limitada.

Quanto à influência da espessura do radier no sistema de fundação, os estudos

realizados através de um procedimento em elementos finitos tridimensionais e não linear, por Najjar (1994), observou-se que a variação na espessura do radier pode influenciar significativamente a distribuição de forças e momentos no topo das estacas.

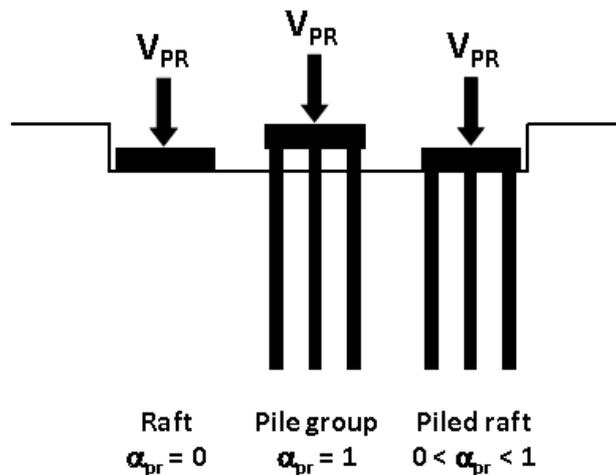
#### 2.1.3.4 Critérios para adoção do radier estaqueado

O emprego da fundação do tipo radier estaqueado é considerado viável técnica e economicamente quando um radier isolado não é capaz de absorver as cargas demandadas, quando as áreas das sapatas se aproximam umas das outras ou quando a soma das áreas destas forem maiores que a metade da área em projeção da construção, quando o solo tem baixa capacidade de carga, quando se deseja uniformizar os recalques ou em áreas sujeitas a abalos sísmicos.

Segundo Mandolini, 2012, obras situadas em regiões com variações nos níveis do lençol freático e em regiões com histórico em abalos sísmicos, também podem ser beneficiadas com a utilização de radiers estaqueados em suas fundações, visto que pesquisas realizadas asseguram o aumento da ancoragem da estrutura.

O radier distribui parte da carga vertical atuante na estrutura ( $Q_{PR}$ ), de acordo com a rigidez relativa do solo, através do contato solo-estrutura, sendo definido pela força ( $Q_R$ ) e a outra parte da carga ( $Q_{PR}$ ) é distribuída pelas estacas ( $Q_P$ ).

A relação entre o somatório das cargas aplicadas nas estacas e a carga total aplicada no radier é definida através de um coeficiente:  $\alpha_{PR}$  (coeficiente de radier estaqueado), que identifica a distribuição de cargas entre o radier e estacas, no qual  $\alpha_{PR}=0$  quando as cargas são absorvidas apenas pela fundação superficial, sem estacas, e,  $\alpha_{PR}=1$ , quando as cargas atuantes são absorvidas somente pelas estacas. Logo, o valor de  $\alpha_{PR}$  deve estar compreendido no intervalo entre 0 e 1. Ver Figura 2.9. (Mandolini, 2003)



**Figura 2.9. Sistema de fundações. (Mandolini, 2003).**

Mandolini, 2003, propôs um esquema gráfico para orientar a escolha do tipo de fundação e de uma abordagem de projeto apropriado no ponto de vista geotécnico, na qual é considerada a resistência e a rigidez do sistema de fundação, Figura 2.10.

O ponto A da Figura 2.10 representa uma condição ótima ideal, na qual as cargas verticais provenientes da estrutura são absorvidas apenas pela laje radier, admitindo um coeficiente mínimo de segurança global  $F_{SUR}$ , que neste caso foi arbitrariamente assumido o valor 3, podendo ser visualizada no eixo da abscissa do gráfico. Ao mesmo tempo, o ponto A também está submetido a um valor de deslocamento geral  $W_{ur}$  igual a um valor admissível ( $W_{ur}/W_{adm}=1$ ).

Segundo o autor, outras três situações podem ocorrer em fundações com laje radier:

- a) Ambos os valores estimados de  $F_{SUR}$  e  $W_{ur}$  são aceitáveis (Ponto [1], da Figura 2.10). A exigência do projeto está satisfeita, ou seja, a escolha de um radier não estaqueado é possível.
- b) Ambos os valores estimados de  $F_{SUR}$  e  $W_{ur}$  não são aceitáveis (Ponto [2] e [3], da Figura 2.10). Deverão ser adicionadas estacas para aumentar o fator de segurança  $F_{SUR}$  e para reduzir os recalques ( $W_{ur}$ ). Para o Ponto [2], a inclusão de estacas é fundamental para aumentar o  $F_{SUR}$ , assim como ocorre, geralmente, pela adoção de uma abordagem tradicional CBD. No Ponto [3], a adição de estacas é necessária para melhorar a resistência global e a rigidez da estrutura (abordagem

de projeto baseado na capacidade e recalque, CSBD).

- c) Diferentemente dos casos anteriores, os Pontos [4] e [5], necessitam de incluir estacas no seu projeto de fundações com laje radier para reduzir o recalque médio (abordagem baseada no recalque médio, SBD) ou recalque diferencial (abordagem baseada no recalque diferencial, DSBD), embora apresentem um fator de segurança maior ou igual ao valor mínimo admissível.

Desta forma, constata-se que a inclusão de estacas numa fundação superficial, aumenta a resistência do sistema de fundação, não apenas em sua capacidade de carga, mas na atuação contra os deslocamentos verticais da estrutura, ou seja, os recalques.

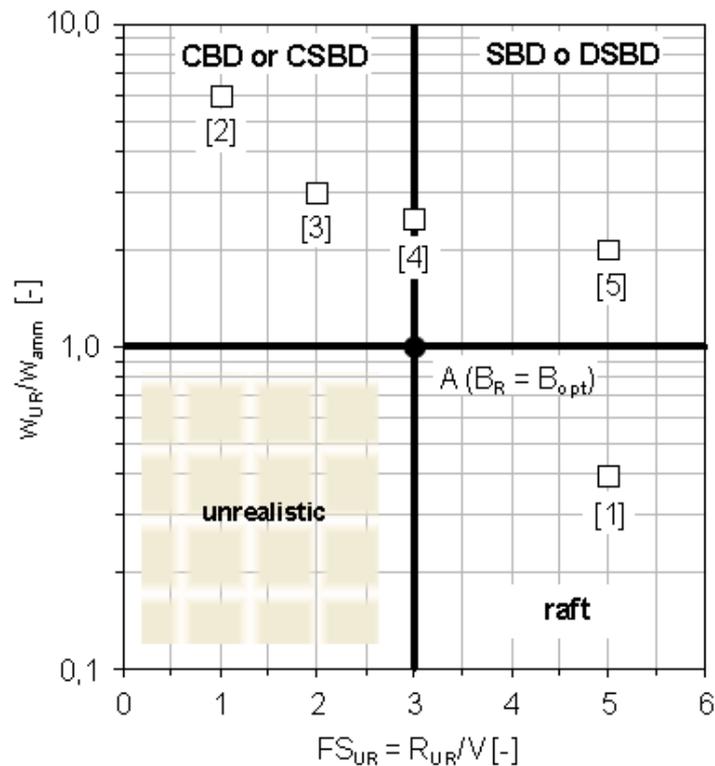


Figura 2.10. Gráfico para orientar a escolha do tipo de fundação, Mandolini (2003).

O estudo realizado por Pereira e Viana da Fonseca (2016), o qual analisou a capacidade de carga dos elementos constituintes de um radier estaqueado e, em seguida, analisou-os como um só elemento, também conclui que a quantidade de estacas adotadas

aumenta não só a capacidade de carga do sistema, mas favorece significativamente a capacidade de carga do solo no interior na fundação, podendo levar a um movimento global semelhante a um bloco rígido.

Uma pesquisa realizada por Garcia (2015), na qual se avaliou as parcelas de contribuição de cada elemento (estaca e radier) na capacidade do radier estaqueado, através de ensaios de prova de carga e análises tridimensionais (3D) por elementos finitos, revelou que as análises experimentais apontaram uma contribuição média devido ao contato radier-solo de 21% e 70% devido às estacas (lateral + ponta) em relação à capacidade total deste sistema de fundação. Já os resultados obtidos numericamente demonstraram maior participação do contato radier-solo (36%), ficando as estacas responsáveis pelos 64% restantes.

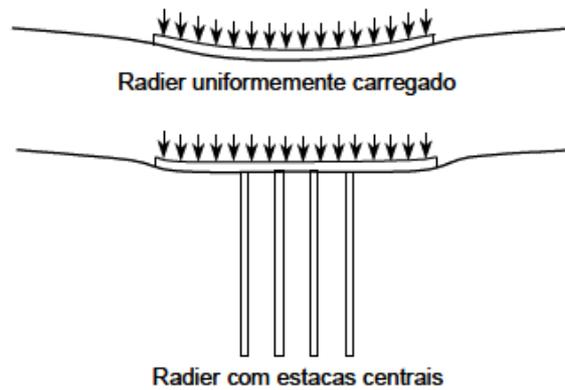
## **2.2 Implicações do contato entre o radier estaqueado e solo arenoso.**

O contato da estrutura do radier com o solo é a premissa para existência de um radier estaqueado, pois, assim como as estacas, a laje de fundação também atua como transmissor de cargas provenientes da superestrutura ao solo, promovendo ainda um aumento da capacidade de carga da estrutura e diminuição dos recalques.

A determinação de recalques é considerada um dos aspectos mais importantes nos projetos de fundações, pois, para que a estrutura desenvolva o desempenho esperado, é necessário que os valores das deformações obtidos em projeto estejam dentro dos valores admissíveis.

Estes recalques podem ser uniformemente distribuídos ou diferenciais, estes últimos se caracterizam por serem os grandes responsáveis na causa danos (trincas, rachaduras, etc.) e, em muitos casos, inviabilizar a estrutura.

De acordo com Bacelar (2003), a inclusão de estacas num projeto de radier é mais eficiente quando minimiza a ocorrência de recalques diferenciais sem necessariamente reduzir o recalque médio do sistema de modo significativo. Ver Figura 2.11.



**Figura 2.11. Estacas centrais para redução de recalques diferenciais. (Randolph, 1994).**

Segundo Marangon (2017), as deformações dos solos sob a ação de cargas podem ser causadas pelo deslocamento ou deformação dos grãos oriundas das tensões a que estão submetidas.

A compressibilidade em solos saturados varia de acordo com a alteração de volume que ocorre devido à saída ou entrada da água, pois a mesma é considerada incompressível, não sofre deformações.

Em geral, as tensões aplicadas ao solo arenoso interferem em sua compressibilidade favorecendo a ocorrência de recalques que, em geral, neste tipo de solo são imediatos, ou seja, incidem após a aplicação das cargas que induz à movimentação das partículas do solo.

Segundo Hachich (1998), na teoria da elasticidade, a relação entre as tensões e as deformações é expressa por meio de módulos, ou seja, quando as deformações são proporcionais às tensões impostas ( $\tau$ ), esta deformação ( $\epsilon$ ) é considerada elástica e é dada pela lei de Hooke, onde  $\tau = \epsilon \cdot E$ , sendo  $E$  o módulo de elasticidade do solo ou módulo de Young.

Décourt et al (1989, apud Hachich, 1998) recomendam a correlação  $E = 3N_{SPT}$ , para obtenção dos valores do módulo de elasticidade  $E$  em função do  $N_{SPT}$ .

Na falta de ensaios do solo, é possível utilizar correlações empíricas para estudos preliminares. O módulo de elasticidade do solo arenoso pode ser estabelecido pela sua correlação com  $N_{SPT}$ , citado por Terzaghi e Peck (1967), que sugeriu a seguinte equação

para areias:

$$E = 3 N$$

Em que:

E = módulo de elasticidade em MPa;

N = N<sub>SPT</sub>

A Tabela 2.1 indica a relação entre o número de golpes do SPT e o tipo de areia de referência.

**Tabela 2.1. Relação entre o número de golpes do SPT e o tipo de areia. (Marangon, 2017).**

<b>Areia</b>	<b>Nº de golpes SPT</b>
Fofa	<=4
Pouco compacta	5 - 10
Medianamente compacta	11 - 30
Compacta	31 - 50
Muito compacta	>50

### **2.3 Modelos de cálculo de recalques.**

O cálculo de recalques, segundo Velloso e Lopes (2010), é dividido em dois grupos de procedimentos: cálculos diretos e cálculos indiretos.

#### a) Cálculo direto

Este procedimento é desenvolvido através da utilização da Teoria da Plasticidade e pelo emprego de Métodos Numéricos.

A previsão de recalques de uma sapata com carga centralizada, pode ser definida pela equação a seguir:

$$w = q \cdot B \frac{1 - \nu^2}{E} I_s \cdot I_d \cdot I_h$$

Em que:

q = pressão média aplicada;

B = menor dimensão da sapata;

$\nu$  = Coeficiente de Poisson;

E= Módulo de Young;

$I_s$  = fator de forma da sapata e de sua rigidez;

$I_d$  = fator de profundidade/embutimento;

$I_h$  = fator de espessura da camada compressível.

**Tabela 2.2** Fatores de forma  $I_s$  para carregamentos na superfície de um meio de espessura finita (Velloso e Lopes, 2010)

Forma	Flexível			Rígido
	Centro	Borda	Média	
Círculo	1,00	0,64	0,85	0,79
Quadrado	1,12	0,56	0,95	0,99
Retângulo				
$L/B = 1,5$	1,36	0,67	1,15	
2	1,52	0,76	1,30	
3	1,78	0,88	1,52	
5	2,10	1,05	1,83	
10	2,53	1,26	2,25	
100	4,00	2,00	3,70	
1000	5,47	2,75	5,15	
10000	6,90	3,50	6,60	

**Tabela 2.3** Valores para  $I_s, I_h$  para carregamentos na superfície ( $I_d = 1,0$ ) de um meio de espessura finita (Velloso e Lopes, 2010) -  $h$  = espessura do meio;  $a = B/2$ ;  $m = L/B$

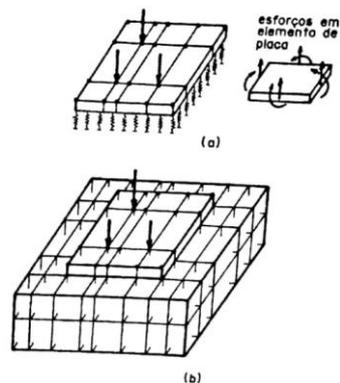
$h/a$	Círculo	Retângulo						
		$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 5$	$m = 7$	$m = 10$	$m = \infty$
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,2	0,096	0,096	0,098	0,098	0,099	0,099	0,099	0,100
0,5	0,225	0,226	0,231	0,233	0,236	0,237	0,238	0,239
1	0,396	0,403	0,427	0,435	0,441	0,444	0,446	0,452
2	0,578	0,609	0,698	0,727	0,748	0,757	0,764	0,784
3	0,661	0,711	0,856	0,910	0,952	0,965	0,982	1,018
5	0,740	0,800	1,010	1,119	1,201	1,238	1,256	1,323
7	0,776	0,842	1,094	1,223	1,346	1,402	1,442	1,532
10	0,818	0,873	1,155	1,309	1,475	1,556	1,619	1,758
$\infty$	0,849	0,946	1,300	1,527	1,826	2,028	2,246	$\infty$

## 2.4 Métodos dos Elementos Finitos.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) admite obter comparações de resultados através de uma análise numérica, permitindo analisar as combinações que maximizem a viabilidade o projeto.

É representado por uma técnica numérica para encontrar soluções aproximadas de equações diferenciais parciais e seus sistemas, bem como equações integrais, ou seja, trata-se de um método para dividir um problema complicado em pequenos elementos que possam ser resolvidos em relação uns aos outros (Souza, 2016). Segundo Velloso, Santa Maria e Lopes (1998) é normalmente realizado através de análise linear bi e tridimensional de estruturas.

A análise de um radier, segundo esse método, consiste no uso de elementos de placa para representar o radier e de molas ou apoios elásticos para representar o solo, Figura 2.12 (a). Outro modelo de cálculo, empregando o mesmo método, utiliza elementos de placas (ou sólidos) para representar o radier e elementos sólidos para representar o solo, Figura 2.12 (b).



**Figura 2.12. Modelos para análise de radiers pelo Método dos Elementos Finitos. Velloso, Santa Maria e Lopes (1998)**

De acordo com Velloso, Santa Maria e Lopes (1998), estacas isoladas sob cargas axiais, pelo Método dos Elementos Finitos, podem ser tratadas como elementos unidimensionais tipo viga, com molas verticais nos nós.

## 2.5 Programa computacional ELPLA

O programa ELPLA Lite 10.1 (ELASTIC PLATE) permite que sejam realizadas análises numéricas computacionais em projetos de fundações diversos, tais como: fundações isoladas, radiers, grelhas, radier estaqueado, através do método dos elementos finitos.

Desenvolvido pela GEOTEC, o ELPLA é um pacote de programas constituído por: ELPLA- Data, responsável por editar os dados gerais do projeto; ELPLA- Solver, atribui-se à função de análise dos dados inseridos; ELPLA- Graphic, desenvolve os gráficos; ELPLA- Lista, apresenta os dados do projeto e calcula os resultados; ELPLA- Section, desenvolve gráficos para apresentação dos resultados de seções específicas; ELPLA- Boring, edita e apresenta dados de perfis de subsolo graficamente; GEOTEC- Tex, edita textos.

Na versão DEMO, a análise da fundação é desenvolvida com modelo real de subsolo, no qual é possível optar entre um modelo de subsolo infinito ou um modelo de solo em camadas.

Na sua versão profissional, o software apresenta uma série de opções de modelos de análise de fundação descritos na Tabela 2.4, além de possibilitar a escolha de uma fundação flexível, elástica ou rígida a fim de compará-las.

**Tabela 2.4. Modelos de cálculo – ELPLA**

<b>Nº do Método</b>	<b>Método</b>
1	Pressão de Contato Linear (Modelo Simples)
2	Módulo de reação constante (Modelo de Winkler)
3	Módulo de reação variável (Modelo de Winkler)
4	Modificação do modulo de reação por interação (Modelo de Winkler/Modelo Contínuo)
5	Módulo de Compressibilidade para fundações no maciço elástico semi-infinito (Modelo Contínuo)
6	Módulo de Compressibilidade para radier elástico (Solução por interação de equação linear)
7	Módulo de Compressibilidade para radier elástico sobre camadas estratificadas (Solução por eliminação de equação linear)
8	Módulo de Compressibilidade para radier rígido (Modelo Contínuo)
9	Módulo de Compressibilidade para elemento de radier flexível (Modelo Contínuo)

Na versão gratuita, apenas as opções 1, 2, 6 e 8 estão disponíveis.

## CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste Capítulo expressam-se os procedimentos adotados para obtenção dos resultados o desenvolvimento desta pesquisa seguiu as etapas apresentadas abaixo, na Figura 3.13

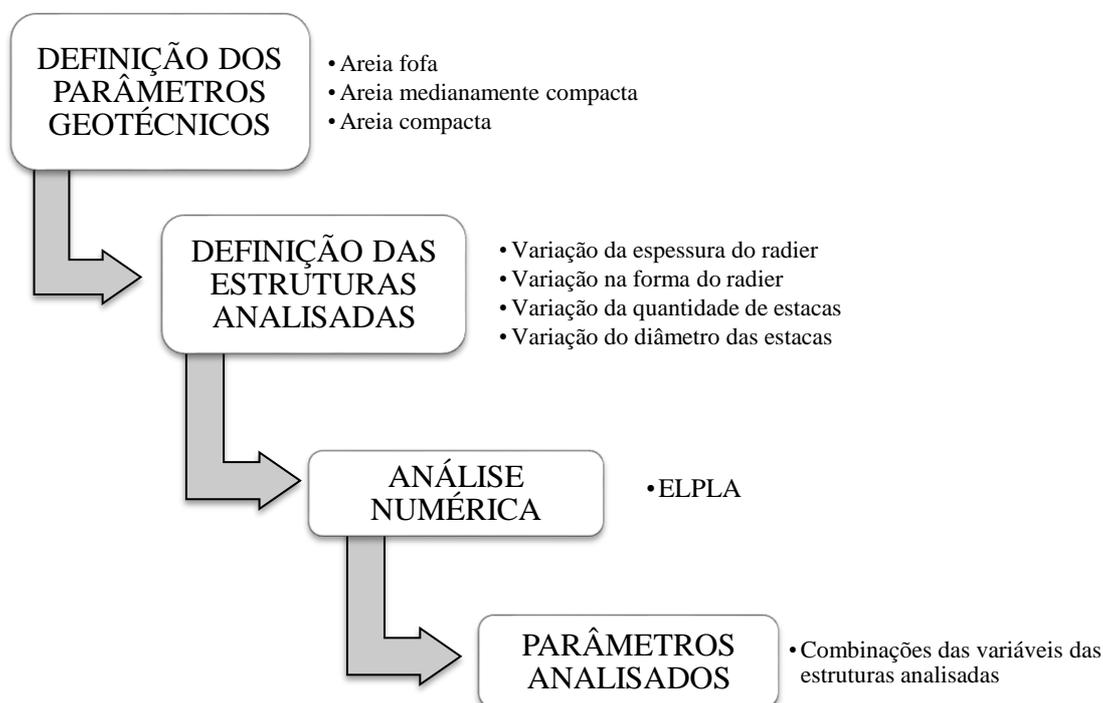


Figura 3.13. Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.

### 3.1 Parâmetros geotécnicos adotados

Este estudo considera um perfil de solo caracterizado pela predominância de areias. Para o desenvolvimento das análises das combinações em diferentes contextos foi

determinado a partir do que foi exposto no Item 2.2 deste trabalho e estão apresentadas abaixo na Tabela 3.5:

**Tabela 3.5. Módulo de elasticidade do solo**  
**MÓDULO DE ELASTICIDADE DO SOLO**

Areia fofa	$E_1$ [Mpa]=	12,0
Areia Med. Compacta	$E_2$ [Mpa]=	60,0
Areia compacta	$E_3$ [Mpa]=	120,0

Considerou-se um nível de água no mesmo nível no terreno, ou seja, um solo saturado, cujo peso específico aparente submerso  $\gamma_{sub} = 8,0 \text{ kN/m}^3$ ; coeficiente de Poisson  $\nu = 0,3$ .

### 3.2 Parâmetros da estrutura de fundação

Na Tabela 3.6 estão indicadas as propriedades do concreto e do aço utilizadas no dimensionamento do radier estaqueado:

**Tabela 3.6. Propriedades do concreto e do aço**

MATERIAL	PARÂMETRO	VALORES
<b>CONCRETO</b>	Módulo de elasticidade - E	28.000 MPa
	Coeficiente de Poisson - $\nu$	0,2
	Peso específico - $\gamma_c$	25 kN/m <sup>3</sup>
	Resistência à compressão - $f_{ck}$	25 MPa
<b>AÇO</b>	Resistência de escoamento- $f_{yk}$	500 Mpa

A profundidade adotada para o radier foi estabelecida a partir da espessura do mesmo, ou seja, um radier com espessura de 0,3 m terá a sua base numa profundidade enterrada de 0,3 m.

Para composição das combinações a fim de definir os modelos de estrutura de fundação analisados considera-se os parâmetros da Tabela 3.7 à Tabela 3.13, temos:

✓ Dois tamanhos distintos pelo seu comprimento. Na forma quadrada tem-se relação entre o comprimento (L) e a largura (B) =1. Na forma retangular, a relação L/B=2.

**Tabela 3.7. Dimensões consideradas para os radiers.**

<b>FORMA DO RADIER</b>		
Quadrada	L[m]=	15,00
	B[m]=	15,00
Retangular	L[m]=	30,00
	B[m]=	15,00

A distribuição de tensões entre os pilares teve com finalidade totalizar em 40 kN/m<sup>2</sup> a carga total da estrutura, o que corresponde à uma edificação com a média de 4 andares. As distribuições de cargas para cada pilar foi baseada pela área de influência e estão dispostas a seguir, na Tabela 3.8 e na Tabela 3.9 e nas Figura 3.14 a Figura 3.37, apresentadas posteriormente neste capítulo.

Cargas horizontais de ventos foram desprezadas, baseada na norma NBR 6123, em virtude da altura da estrutura.

**Tabela 3.8. Cargas nos pilares - radier quadrado**

**PARÂMETROS GERAIS- FORMA QUADRADA**

<b>ESTACAS</b>	Comprimento	8 m
<b>CARGAS NOS PILARES</b>	P1=P3=P10=P12	600 kN
	P2=P11	800 kN
	P4=P6=P7=P9	750 kN
	P5=P8	1000 kN

**Tabela 3.9. Cargas nos pilares – radier retangular**

**PARÂMETROS GERAIS- FORMA RETANGULAR**

<b>ESTACAS</b>	Comprimento	8 m
<b>CARGAS NOS PILARES</b>	P1=P5=P16=P20	850 kN
	P2=P3=P4=P17=P18=P19	900 kN
	P6=P10=P11=P15	800 kN
	P7=P8=P9=P12=P13=P14	1000 kN

A quantidade de estacas adotadas foi escolhida de forma aleatória, atendendo ao critério de proporcionalidade entre as duas formas do radier, conforme pode ser observado na Tabela 3.10 e na Tabela 3.11 a seguir:

**Tabela 3.10. Número de estacas- Radier forma quadrada.**

<b>NÚMERO DE ESTACAS</b>		
FORMA QUADRADA	n <sub>1</sub> =	0
	n <sub>2</sub> =	5
	n <sub>3</sub> =	9
	n <sub>4</sub> =	20
	n <sub>5</sub> =	29
	n <sub>6</sub> =	40

**Tabela 3.11. Número de estacas- Forma do radier retangular.**

<b>NÚMERO DE ESTACAS</b>		
FORMA RETÂNGULAR	n <sub>1</sub> =	0
	n <sub>2</sub> =	10
	n <sub>3</sub> =	18
	n <sub>4</sub> =	40
	n <sub>5</sub> =	58
	n <sub>6</sub> =	80

Os diâmetros das estacas assumidos nas combinações analisadas foram obtidos por serem considerados usuais em projetos estruturais:

**Tabela 3.12. Diâmetros considerados para as estacas.**

<b>DIÂMETRO DAS ESTACAS</b>		
φ40	φ <sub>1</sub> [m]=	0,40
φ 50	φ <sub>2</sub> [m]=	0,50
φ 60	φ <sub>3</sub> [m]=	0,60

A adoção de diferentes espessuras para o radiers teve como finalidade destacar a sua influência na análise global da rigidez da estrutura e estão expostos na Tabela 3.13:

**Tabela 3.13. Espessuras consideradas para os radiers.**

ESPESSURA DO RADIER		
30	$e_1[m]=$	0,30
60	$e_2[m]=$	0,60
90	$e_3[m]=$	0,90

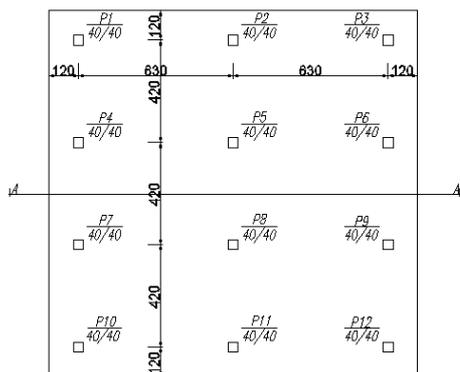
Foram formuladas 288 combinações dos parâmetros supracitados para realização deste estudo. Os modelos das estruturas analisadas, a distribuição dos pilares e o posicionamento das estacas, bem como as combinações dos parâmetros considerados para realização deste estudo foram determinados conforme dispostos nas figuras a seguir:

➤ Modelo 1:

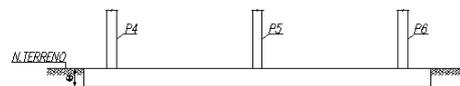
Forma quadrada-  $L/B = 1$ ;

Espessuras 0,3 m, 0,6 m e 0,9 m;

Sem estacas.



**Figura 3.14. Planta baixa  $L/B=1$  sem estacas.**



**Figura 3.15. Corte A-A'  $L/B = 1$  sem estacas.**

➤ Modelo 2:

Forma quadrada-  $L/B = 1$ ;

Espessuras 0,3 m, 0,6 m e 0,9 m;

5 estacas.

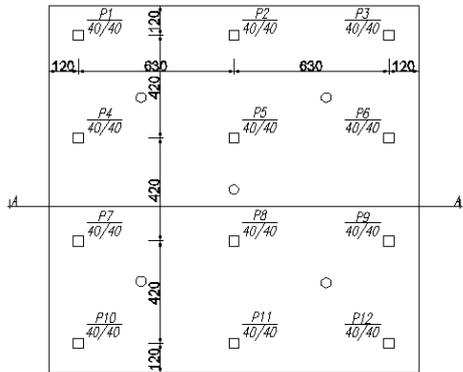


Figura 3.16. Planta baixa  $L/B=1$  com 5 estacas.

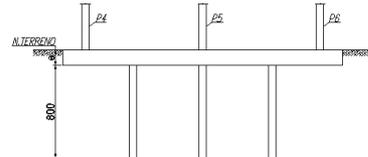


Figura 3.17. Corte A-A'  $L/B=1$  com 5 estacas.

➤ Modelo 3:

Forma quadrada-  $L/B = 1$ ;

Espessuras 0,3 m, 0,6 m e 0,9 m;

9 estacas.

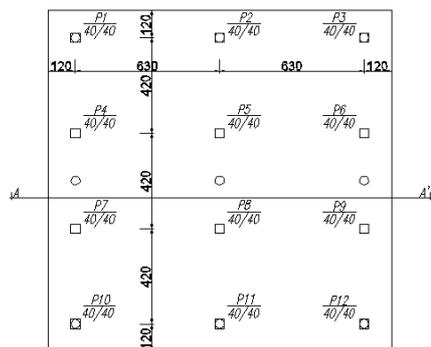


Figura 3.18. Planta baixa  $L/B=1$  com 9 estacas.

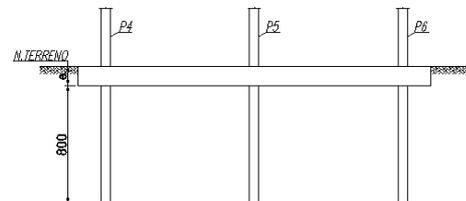


Figura 3.19. Corte A-A'  $L/B=1$  com 9 estacas

➤ Modelo 4:

Forma quadrada-  $L/B = 1$ ;

Espessuras 0,3 m, 0,6 m e 0,9 m;

20 estacas.

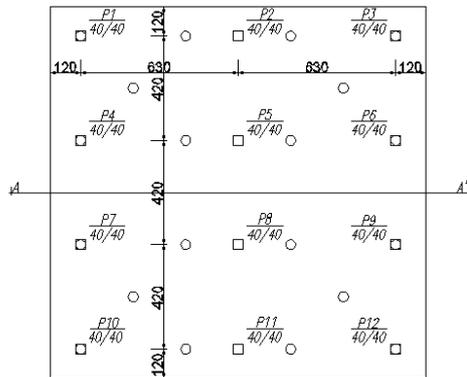


Figura 3.20. Planta baixa  $L/B=1$  com 20 estacas.

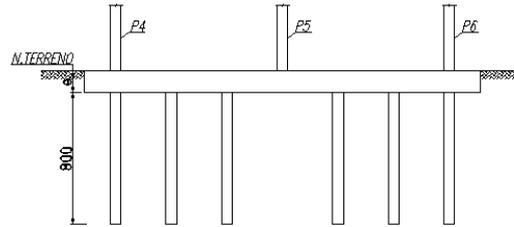


Figura 3.21. Corte A-A'  $L/B=1$  com 20 estacas.

➤ Modelo 5:

Forma quadrada-  $L/B = 1$ ;

Espessuras 0,3 m, 0,6 m e 0,9 m;

29 estacas.

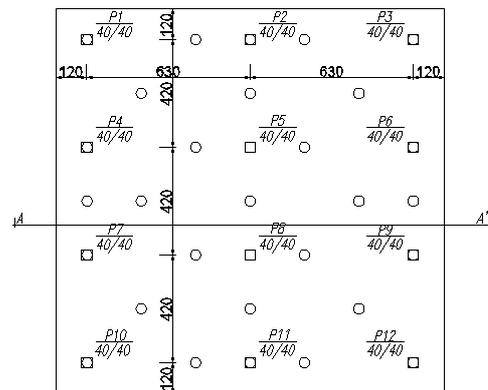


Figura 3.22. Planta baixa  $L/B=1$  com 29 estacas.

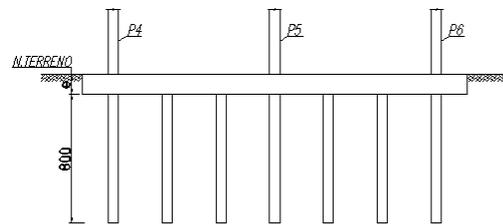


Figura 3.23. Corte A-A'  $L/B=1$  com 29 estacas.

➤ Modelo 6:

Forma quadrada-  $L/B = 1$ ;

Espessuras 0,3 m, 0,6 m e 0,9 m;

40 estacas.

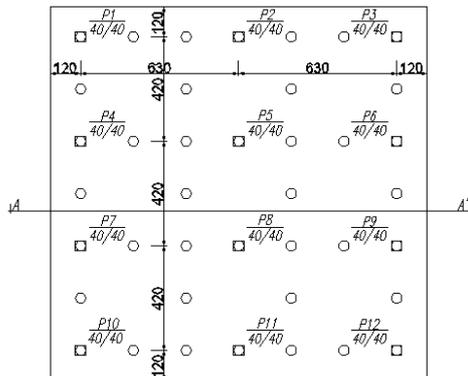


Figura 3.24. Planta baixa  $L/B=1$  com 40 estacas.

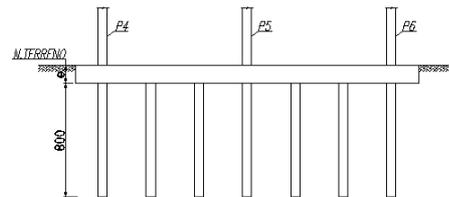


Figura 3.25. Corte A-A'  $L/B=1$  com 40 estacas.

➤ Modelo 7:

Forma retangular-  $L/B = 2$ ;

Espessuras 0,3 m, 0,6 m e 0,9 m;

Sem estacas.

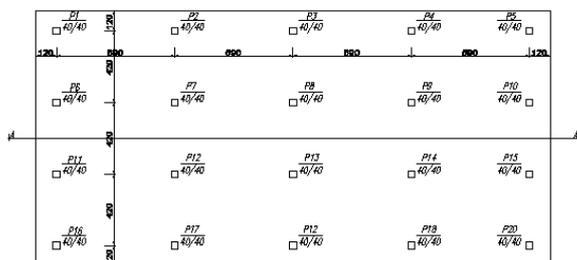


Figura 3.26. Planta baixa  $L/B=2$  sem estacas.

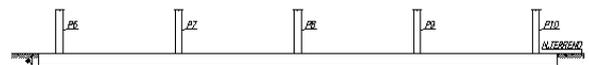


Figura 3.27. Corte A-A'  $L/B=2$  sem estacas.

➤ Modelo 8:

Forma retangular-  $L/B = 2$ ;

Espessuras 0,3 m, 0,6 m e 0,9 m;

10 estacas.

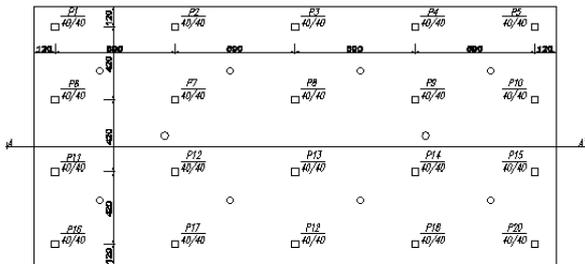


Figura 3.28. Planta baixa  $L/B=2$  com 10 estacas.

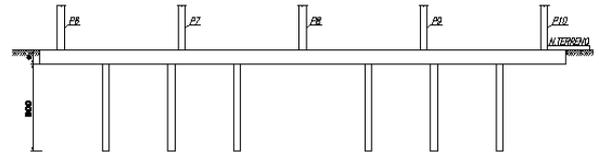


Figura 3.29. Corte A-A'  $L/B=2$  com 10 estacas.

➤ Modelo 9:

Forma retangular-  $L/B = 2$ ;

Espessuras 0,3 m, 0,6 m e 0,9 m;

18 estacas.

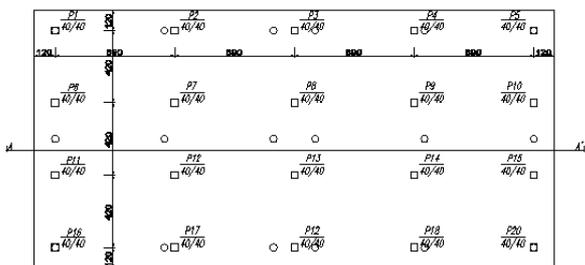


Figura 3.30. Planta baixa  $L/B=2$  com 18 estacas.

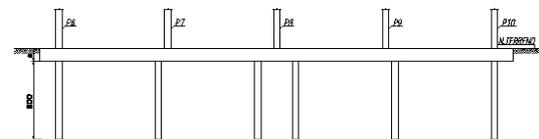


Figura 3.31. Corte A-A'  $L/B=2$  com 18 estacas.

➤ Modelo 10:

Forma retangular-  $L/B = 2$ ;

Espessuras 0,3 m, 0,6 m e 0,9 m;

40 estacas.

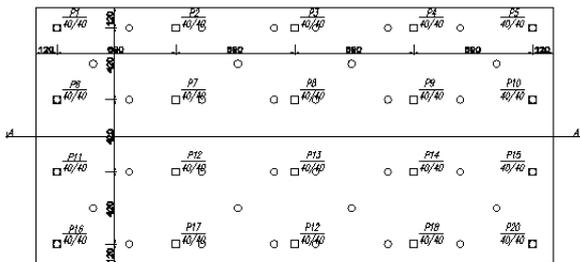


Figura 3.32. Planta baixa  $L/B=2$  com 40 estacas.

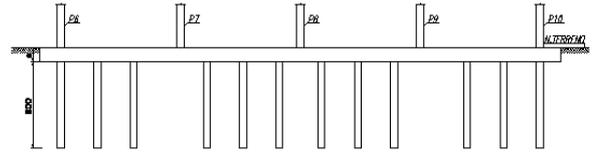


Figura 3.33. Corte A-A'  $L/B=2$  com 40 estacas.

➤ Modelo 11:

Forma retangular-  $L/B = 2$ ;

Espessuras 0,3 m, 0,6 m e 0,9 m;

58 estacas.

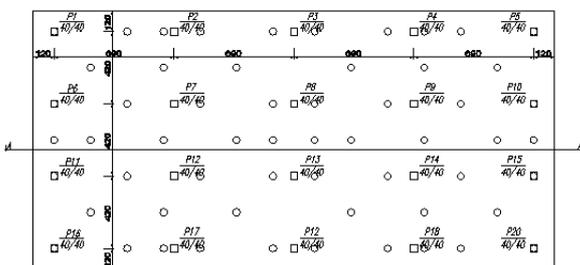


Figura 3.34. Planta baixa  $L/B=2$  com 58 estacas.

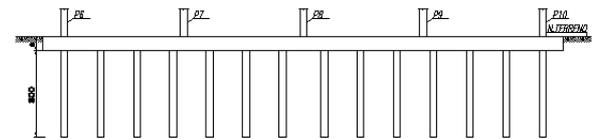


Figura 3.35. Corte A-A'  $L/B=2$  com 58 estacas.

➤ Modelo 12:

Forma retangular-  $L/B = 2$ ;

Espessuras 0,3 m, 0,6 m e 0,9 m;

80 estacas.

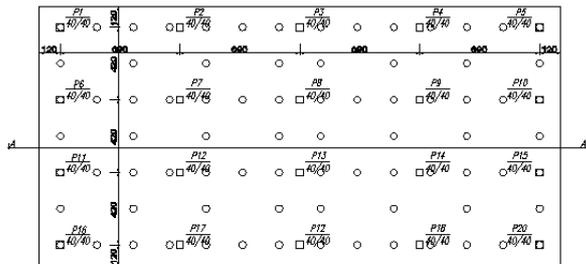


Figura 3.36. Planta baixa  $L/B=2$  com 80 estacas.

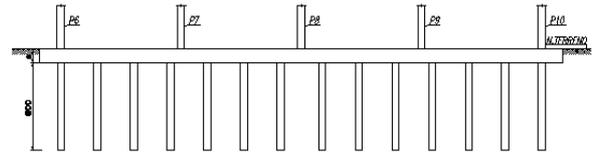


Figura 3.37. Corte A-A'  $L/B=2$  com 80 estacas.

A fim de extrair dados passíveis de comparação entre as formas do radier, dividiu-se o valor médio de recalque resultante de cada análise pelo valor da base dos radiers, tanto da forma quadrada como da forma retangular, e multiplicou-se por 100, resultando em valores de recalques médios percentuais comparáveis em suas formas.

Foram obtidos valores que permitissem observar como a quantidade de estacas e as espessuras do radier influenciam na uniformização do recalque, através do coeficiente de variação percentual desses recalques – representado pela relação entre desvio padrão (dado pelo programa) e o  $R_{\text{médio}} \times 100$ . Quanto menor for a variação, melhor é o desempenho da fundação, visto que os valores dos recalques diferenciais são reduzidos.

### 3.3 Análises numéricas

Através do software ELPLA Lite 10.1 (ELASTIC PLATE), em sua versão Demo, limitada a 300 nós, foram realizadas análises baseadas na solução da Teoria da Elasticidade, calculada ponto a ponto da fundação, por meio do Método dos Elementos Finitos e com

modelagem 3D.

Para este trabalho, foi utilizada a fundação do tipo radier estaqueado, com os dados de entrada do solo apresentados no Item 3.1 deste capítulo, para os parâmetros do aço e do concreto, cargas atuantes, características do radier e das estacas, no item 3.2.

O modelo de cálculo adotado foi o Modelo de deformabilidade ou Módulo de Compressibilidade para radier elástico (Solução por interação de equação linear) - opção 6- da Tabela 2.4 do capítulo anterior.

O modelo de subsolo infinito ou semi espaço infinito, disponível na versão gratuita, foi escolhido para o desenvolvimento deste trabalho.

Como dados de saída, foram extraídos os deslocamentos do solo (*displacements in soil*) e as deformações no solo (*strains in soil*) para análise dos recalques de diferentes radiers em função da combinação dos diferentes parâmetros explicitados nos Itens 3.1 e 3.2 deste trabalho.

## **CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo serão apresentados os resultados observados nas análises obtidas através do programa computacional ELPA, do comportamento da estrutura de fundação em relação ao recalque do solo, nas diferentes combinações entre os seguintes parâmetros: módulos de elasticidade do solo, formas e espessuras da placa de fundação e diâmetros e quantidades de estacas.

A partir das análises obtidas nos resultados das 288 simulações computacionais das combinações entre os parâmetros supracitados, obtiveram-se figuras de iso-recalques extraídas após a conclusão dos processos de cálculo do programa. Foram também elaborados gráficos de tendência nos quais podemos considerar o efeito de cada parâmetro mencionado no desenvolvimento do recalque da estrutura, Figura 4.38 à Figura 4.84.

### **4.1 Influência do módulo de elasticidade do solo no recalque médio**

Os recalques médios - representados pela razão entre o recalque médio ( $R_{\text{médio}}$ ) e o menor lado do radier ( $B$ ) x 100 - resultantes das análises das combinações, sob a influência da variação do módulo de elasticidade do solo, apresentam diminuição no valor do recalque médio em função do aumento do módulo de elasticidade do solo. Este resultado já estava previsto na literatura, visto que o aumento do módulo de elasticidade do solo representa maior resistência do solo às deformações.

Da mesma forma, é possível observar, da Figura 4.38 à Figura 4.40, os valores de recalques máximos e mínimos obtidos a partir de um radier sem estacas, com 0,3 m de espessura, tendo seus valores reduzidos em função do aumento variação do módulo de elasticidade do solo.

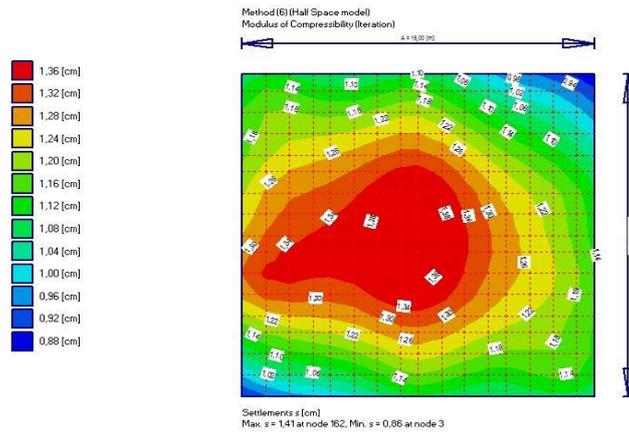


Figura 4.38. Areia fofa- M.E.=12 [MPa]; placa quadrada- sem estacas;  $e=0,3$  m;  $R_{\text{máx}}=1,36$  cm e  $R_{\text{min}}=0,88$  cm.

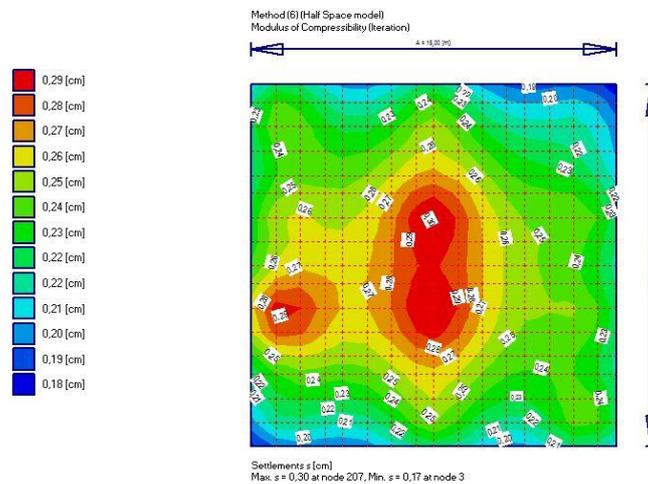


Figura 4.39. Areia medianamente compacta- M.E.=60 [MPa]; placa quadrada- sem estacas;  $e=0,3$  m;  $R_{\text{máx}}=0,29$  cm e  $R_{\text{min}}=0,18$  cm.

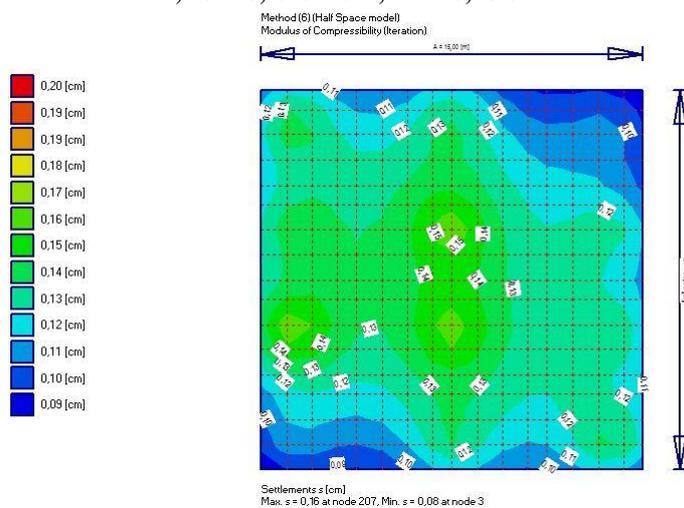


Figura 4.40. Areia compacta- M.E.=120 [MPa]; placa quadrada- sem estacas;  $e=0,3$  m;  $R_{\text{máx}}=0,2$  cm e  $R_{\text{min}}=0,09$  cm.

Considerando as duas geometrias adotadas (quadradas e retangulares), percebe-se ainda que a variação dos valores de recalques médios   maior quando é aumentado o módulo de elasticidade do solo de 12 MPa (areia fofa) para 60 MPa (areia medianamente compacta): de 0,12 % para 0,02 %, do que observados quando se aumenta de 60 MPa (areia medianamente compacta) para 120 MPa (areia compacta): de 0,02 % para 0,01 %.

Da Figura 4.41   Figura 4.43   possível observar tal comportamento, estabelecido entre a rela o representados pela razão entre  $R_{médio} \times 100 / B$  - valor dado em percentual (%) – com a varia o módulo de elasticidade do solo, em MPa.

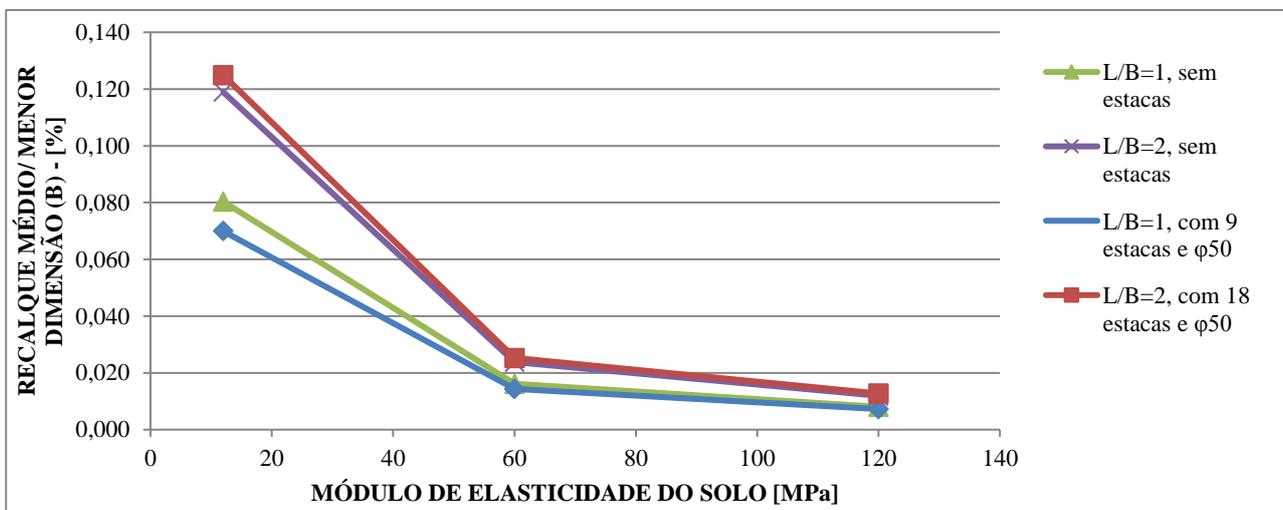


Figura 4.41. Recalque médio $\times 100/B$  versus módulo de elasticidade, para duas geometrias e  $e=0,3$  m.

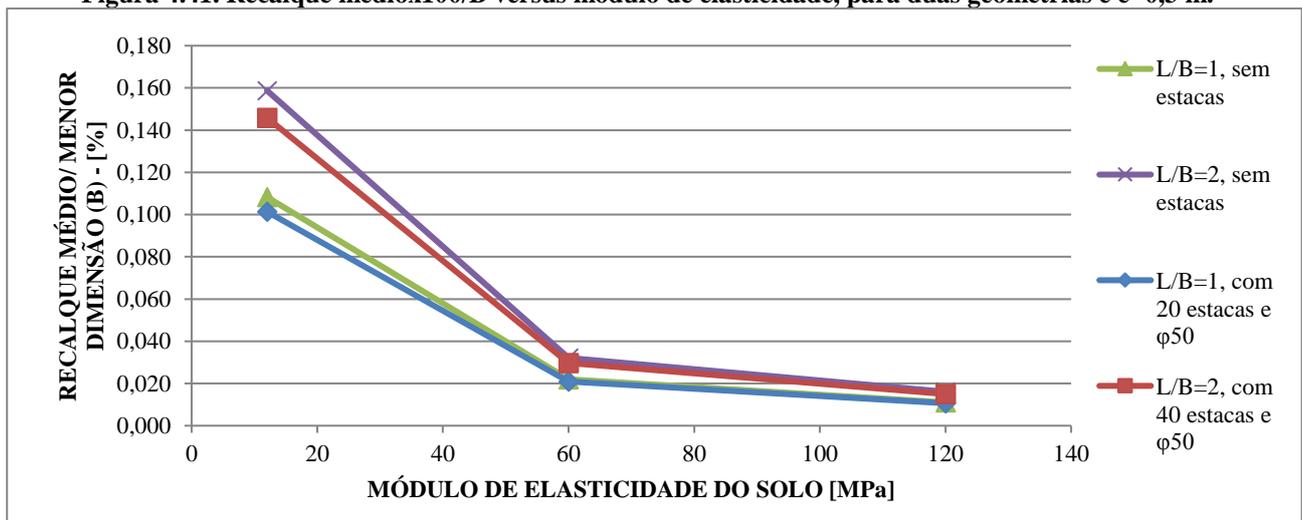


Figura 4.42. Recalque médio $\times 100/B$  versus módulo de elasticidade, para duas geometrias e  $e=0,6$  m.

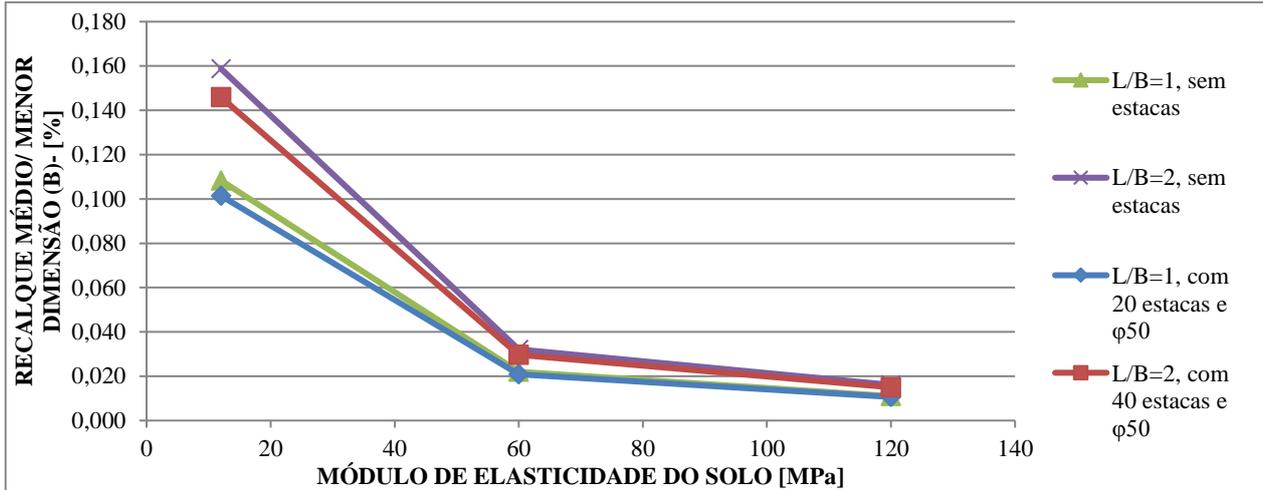


Figura 4.43. Recalque médio  $\times 100/B$  versus módulo de elasticidade, para duas geometrias e  $e=0,9$  m.

#### 4.2 Influência da espessura do radier no recalque médio

O aumento da espessura do radier de 0,3 m (Figura 4.38 à Figura 4.40) para 0,9 m (Figura 4.44 à Figura 4.46) eleva os valores médios de recalque.

Os resultados extraídos do programa através da representação de isolinhas sugerem que os recalques que ocorrem em radier com espessura de 0,9 m são mais uniformes quando comparados com os recalques nos radiers com 0,3 m de espessura.

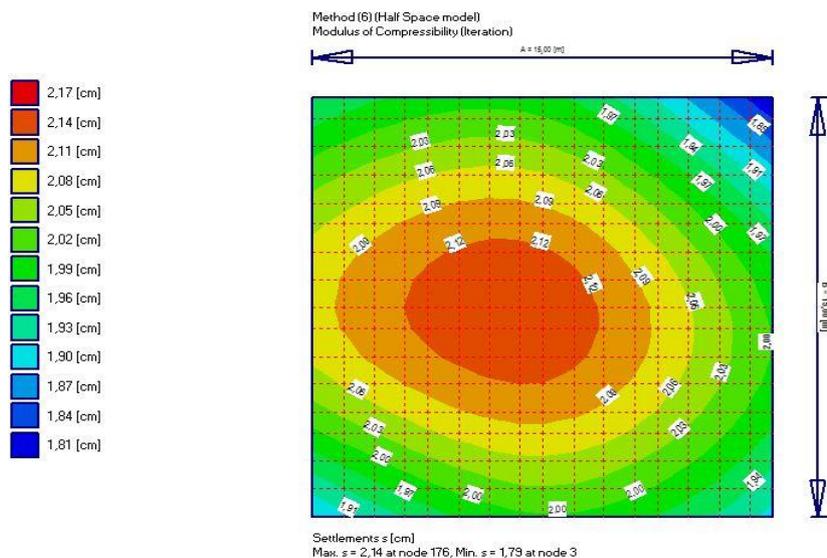
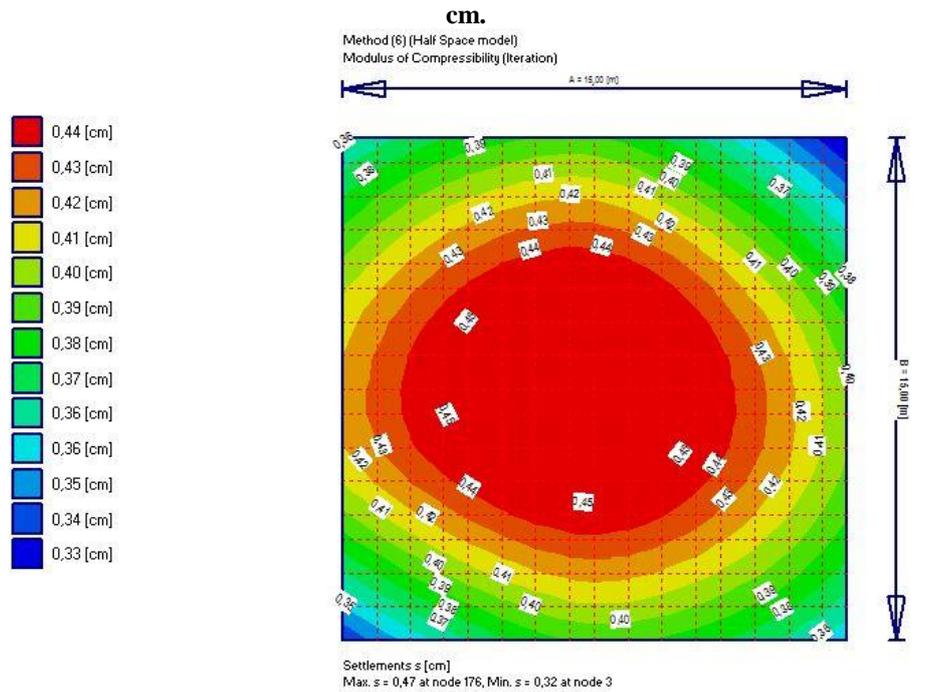
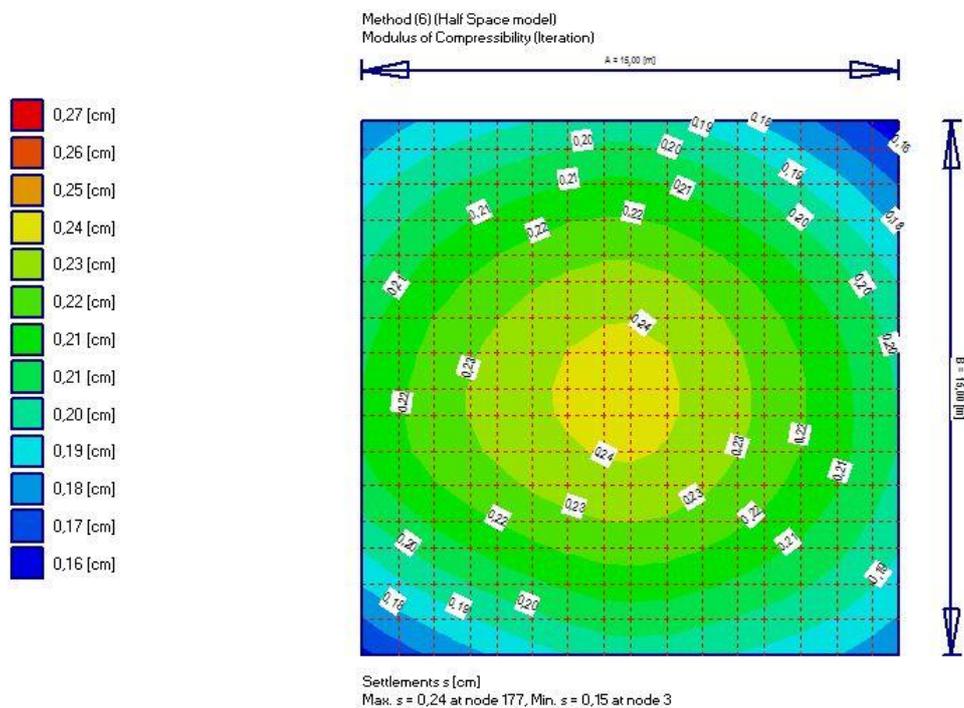


Figura 4.44. Areia fofa- M.E.=12 [MPa]; placa quadrada- sem estacas;  $e=0,9$  m;  $R_{\text{máx}}=2,17$  cm e  $R_{\text{min}}=1,81$ .



**Figura 4.45. Areia medianamente compacta- M.E.=60 [MPa]; placa quadrada- sem estacas; e=0,9 m; R,máx=0,44 cm e R, min=0,33 cm.**



**Figura 4.46. Areia compacta- M.E.=120 [MPa]; ; placa quadrada- sem estacas; e=0,9 m; R,máx=0,27 cm e R, min=0,16 cm**

De acordo com os resultados obtidos, os valores dos recalques médios ( $R_{\text{médio}} \times 100/B$ ) tendem a aumentar quando considerados o aumento da espessura do radier, com ou sem estacas, na forma quadrada ou retângular. Pode-se ainda concluir que a inclusão de estacas favorece a diminuição dos valores médios de recalque quando comparados a radiers sem estacas, Figura 4.47 à Figura 4.49.

Nota-se que os valores de recalques médios obtidos com o aumento da espessura do radier diminuem de 0,2 % para 0,04 % quando o módulo de elasticidade do solo aumenta de 12 MPa para 60 MPa. Quando observados mesmos valores no aumento da elasticidade do solo de 60 MPa para 120 MPa percebe-se o efeito inverso, de 0,04 % para 0,02 %, nos valores de recalques médios.

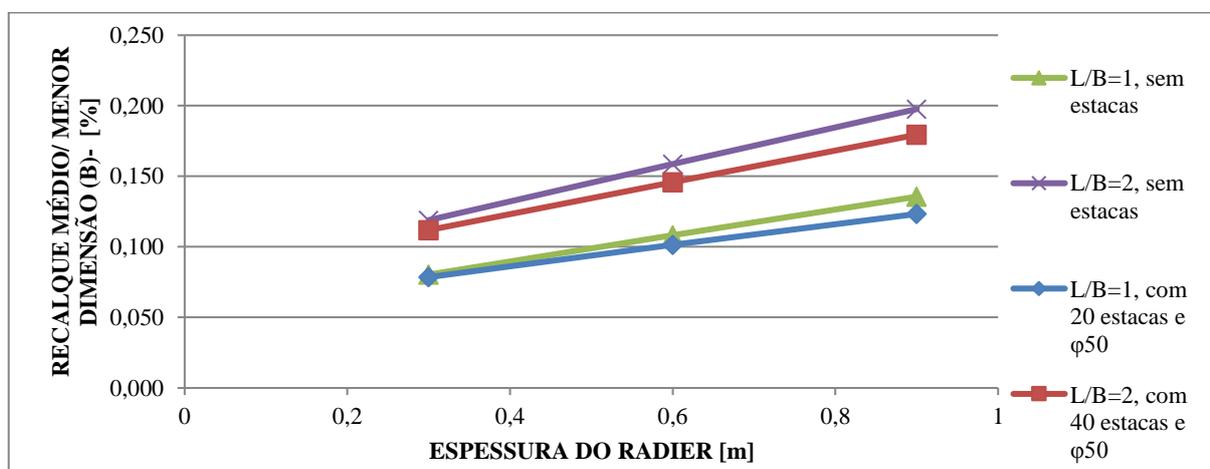


Figura 4.47. Recalque médio  $\times 100/B$  versus espessura do radier, para duas geometrias e areia fofa- M.E.=12 [Mpa].

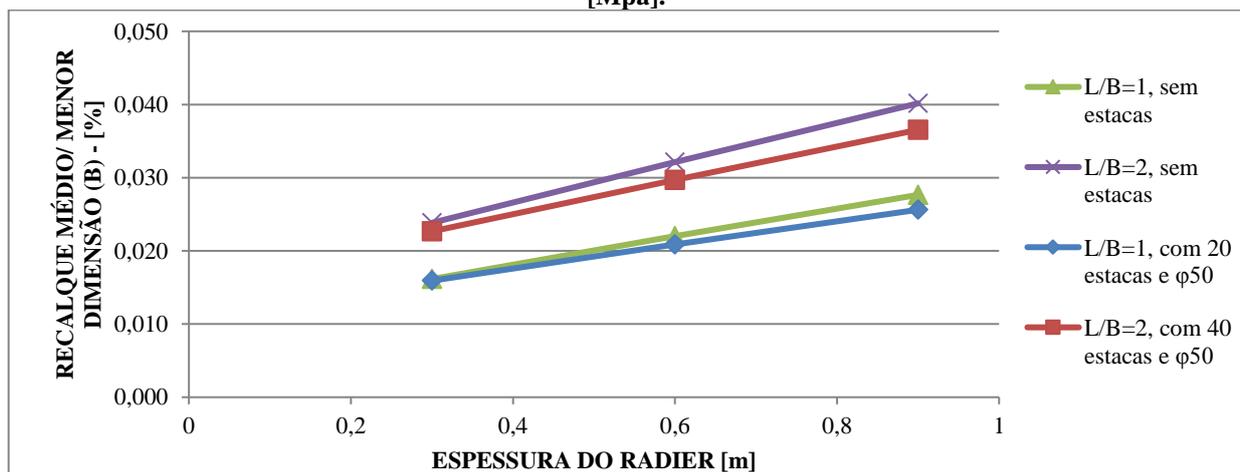


Figura 4.48. Recalque médio  $\times 100/B$  versus espessura do radier, para duas geometrias e areia medianamente compacta- M.E.=60 [MPa].

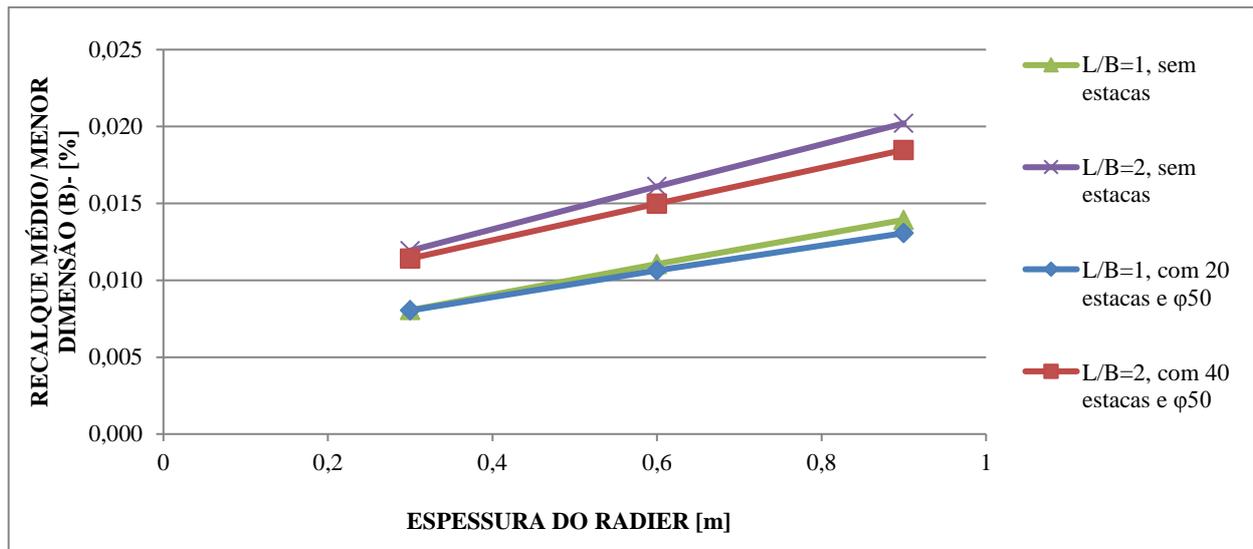


Figura 4.49. Recalque médio  $\times 100/B$  versus espessura do radier, para duas geometrias e areia compacta-  
M.E.=120 [Mpa].

### 4.3. Influência do diâmetro das estacas no recalque médio

O aumento do diâmetro das estacas contribui para um sutil aumento dos valores dos recalques médios da fundação, Figura 4.50 e Figura 4.51. Estima-se que a variação desses valores ocorre devido à alteração do peso próprio da estrutura da fundação que varia em função do aumento do diâmetro das estacas, Tabela 4.14.

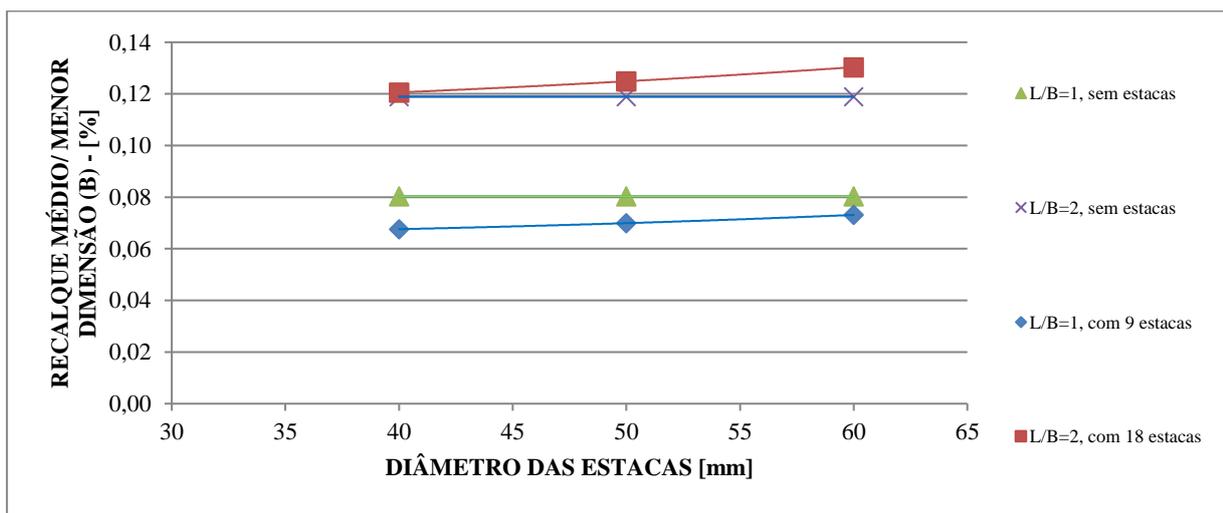


Figura 4.50. Recalque médio  $\times 100/B$  versus diâmetro da estaca; para duas geometrias;  $e=0,3$  m; e areia fofa-  
M.E.=12 [Mpa].

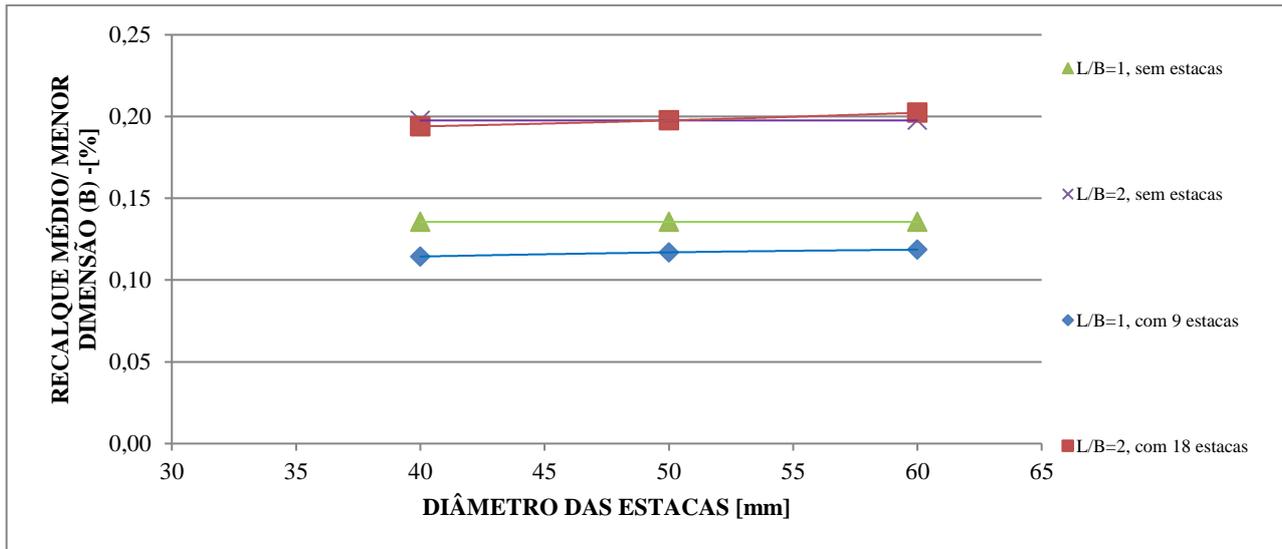


Figura 4.51. Recalque médio  $\times 100/B$  versus diâmetro da estaca; para duas geometrias;  $e=0,9$  m; areia fofa-  
M.E.=12 [Mpa].

O peso da estaca varia, em relação ao peso total da estrutura de fundação, entre 4,28% à 9,13% , em radiers com espessura de 0,9 m e com estacas de  $\phi 40$  e  $\phi 60$  respectivamente; e de 11,82% à 23,17% , em radiers com espessura de 0,3 m e com estacas de  $\phi 40$  e  $\phi 60$ , considerada ambas as geometrias,  $L/B=1$  ou  $L/B=2$ , Tabela 4.14.

Tabela 4.14. Relação entre diâmetro das estacas e o peso da estrutura de fundação.

Forma do radier	Quantidade de estacas [n]	Espessura do radier [m]	Diâmetro das estacas [m]	Peso das estacas em relação ao peso total da fundação [%]
Quadrada $L/B=1$	9	0,3	0,4	11,82
			0,6	23,17
		0,9	0,4	4,28
			0,6	9,13
Retângular $L/B=2$	18	0,3	0,4	11,82
			0,6	23,17
		0,9	0,4	4,28
			0,6	9,13

#### 4.4 Influência da quantidade das estacas no recalque médio

A inclusão de estacas pode favorecer tanto o aumento dos valores resultantes de recalque quanto à diminuição, a depender da quantidade de estacas inseridas.

Para os radiers sem estacas, com espessura ( $e$ ) de 0,3m e areia fora- M.E.=12 Mpa (Figura 4.52), o recalque máximo resultante é  $R$ , máx=1,36 cm e o mínimo  $R$ , min=0,88 cm e para estrutura com 9 estacas com diâmetro de  $\phi$ 0,5 m, também em areia fora- M.E.=12 Mpa, o recalque máximo resultante é  $R$ , máx=1,30 cm e o mínimo  $R$ , min=0,82 cm, conforme ilustra a Figura 4.53.

Ou seja, inclusão de 9 estacas, com  $\phi$  0,5 m, nos radiers quadrados ( $L/B=1$ ), permite uma sutil diminuição de recalques da estrutura de fundação, se comparado à estrutura sem estacas.

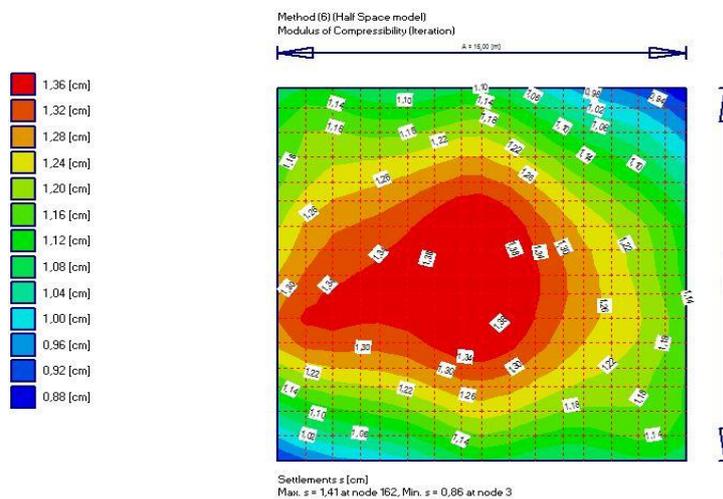


Figura 4.52. Sem estacas; areia fofa- M.E.=12 [MPa]; placa quadrada;  $e=0,3$  m;  $R$ , máx=1,36 cm e  $R$ , min=0,88 cm.

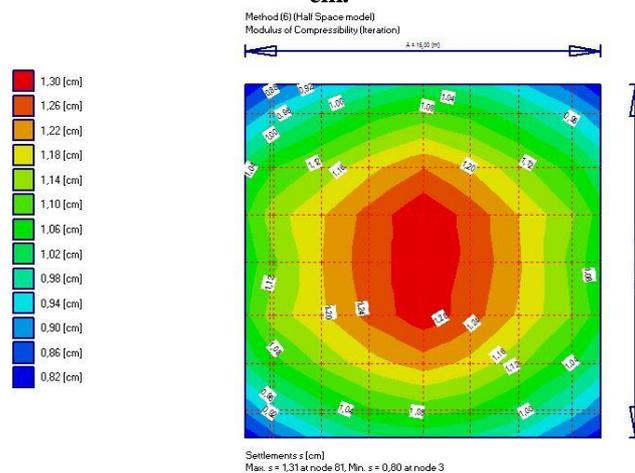
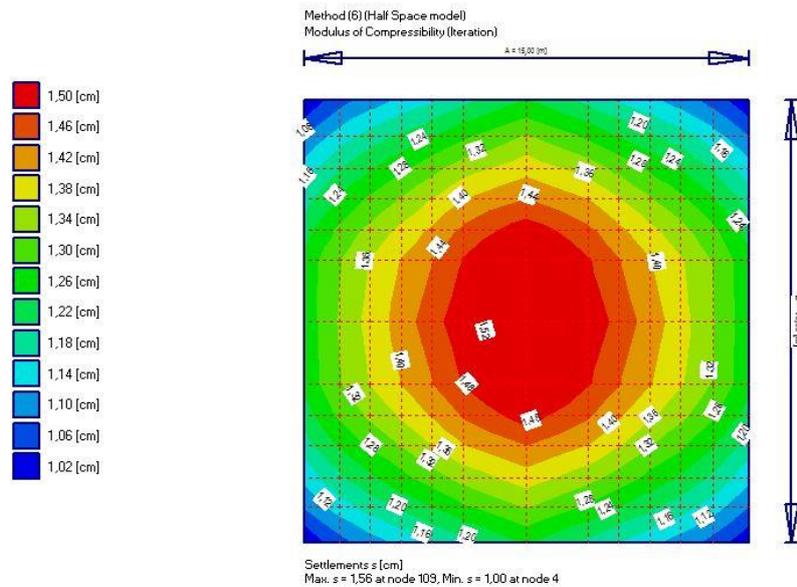


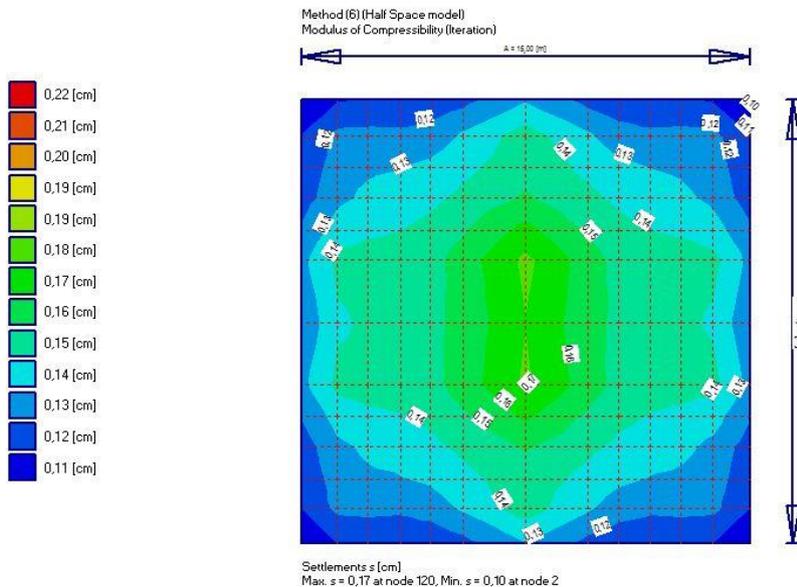
Figura 4.53. 9 estacas; areia fofa- M.E.=12 [MPa]; ; placa quadrada;  $\phi$  0,5 m; placa- quadrada ( $L/B=1$ );  $e=0,3$  m;  $R$ , máx=1,30 cm e  $R$ , min=0,82 cm.

Contudo, quando considerados a inclusão de 29 estacas, na mesma circunstância citada anteriormente, os valores resultantes de recalque tenderam a aumentar.

Para o radier quadrado, com  $L/B=1$ , a inclusão de 29 estacas com 0,5 m de diâmetro e espessura da placa de 0,3 m resultou, para um solo arenoso fofo de 12 Mpa, num recalque maior ( $R_{\text{máx}}=1,56$  cm) do que quando foram incluídas 9 estacas ( $R_{\text{máx}}=1,31$  cm). Ver Figura 4.54 e Figura 4.55.



**Figura 4.54. 29 estacas- areia fofa- M.E.=12 [MPa];  $R_{\text{máx}}=1,56$  cm e  $R_{\text{min}}=1,00$  cm.**



**Figura 4.55. 29 estacas- areia compacta- M.E.=120 [MPa];  $R_{\text{máx}}=0,17$  cm e  $R_{\text{min}}=0,10$  cm.**

Da mesma forma que ocorre com as fundações no formato L/B=1, o comportamento dos radiers estaqueados L/B=2 são semelhantes, considerando a inclusão de estacas.

Com a inclusão de 10 estacas os valores médios de recalque tendem a crescer. Com o acréscimo de mais 10 estacas estes valores ainda tendem a aumentar. Entretanto, o oposto acontece quando incluimos mais 20 estacas, os valores de recalque diminuem, tornando a crescer novamente com a inclusão de novas estacas.

Da Figura 4.64 à Figura 4.64 são apresentas as variações do valor do recalque médio em função da quantidade de estacas.

A) Para radiers de 0,3 m de espessura e diferentes módulos de elasticidade.

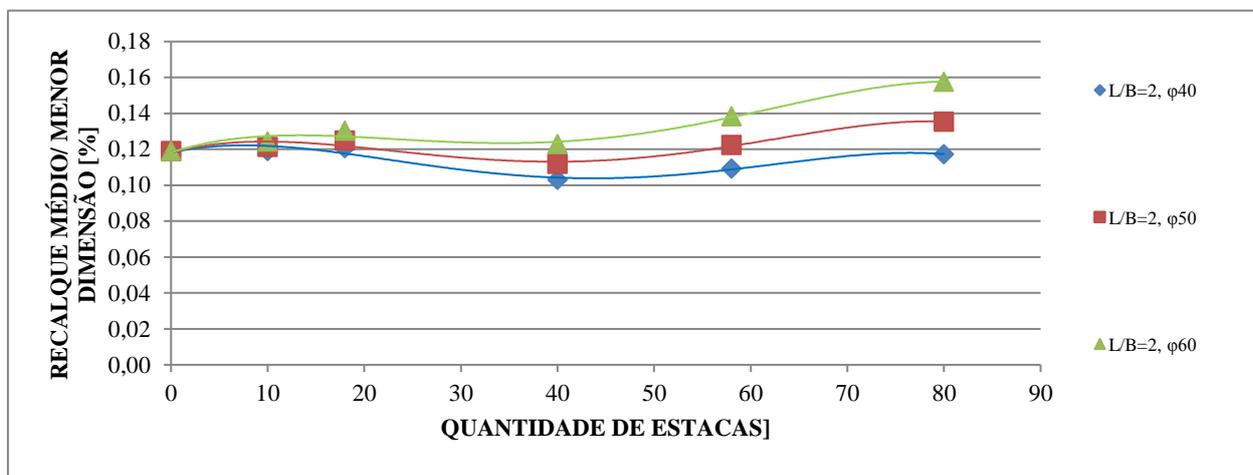


Figura4.56. Recalque percentual versus quantidade de estacas, para L/B=2, e=30 e areia fofa- M.E.=12 [Mpa].

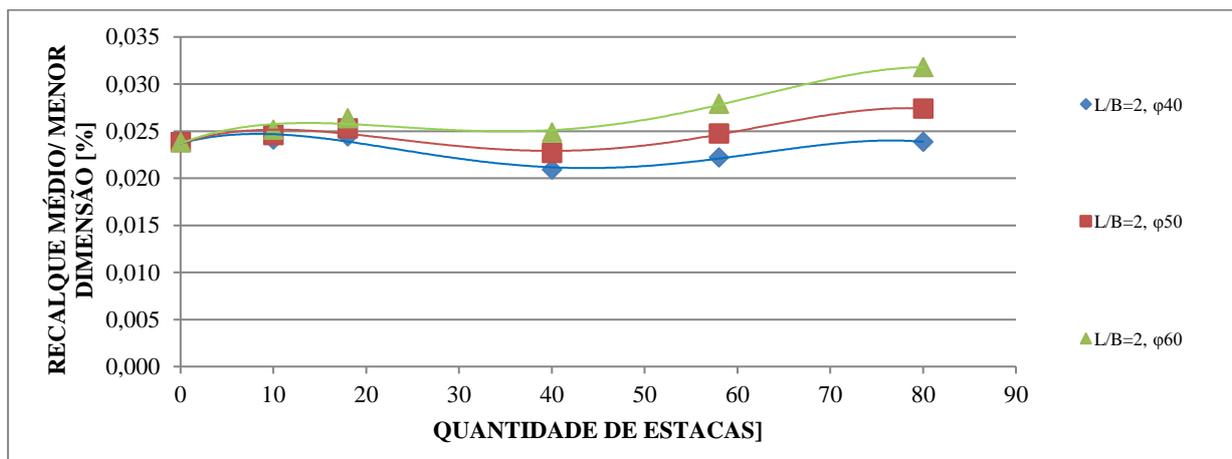


Figura 4.57. Recalque percentual versus quantidade de estacas, para L/B=2, e=30 e Areia medianamente compacta- M.E.=60 [MPa]

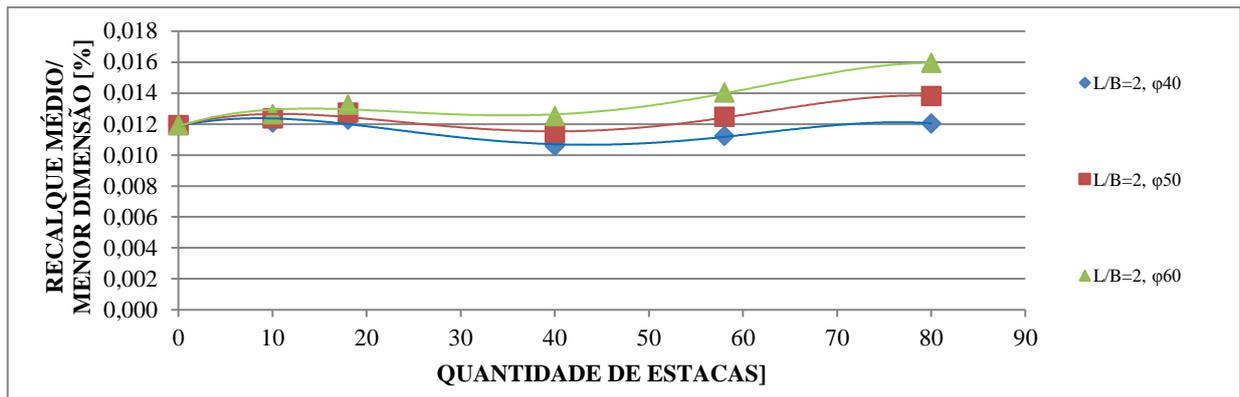


Figura 4.58. Recalque percentual *versus* quantidade de estacas, para L/B=2, e=30 e Areia compacta- M.E.=120 [MPa].

B) Para radiers de 0,6 m de espessura e diferentes módulos de elasticidade

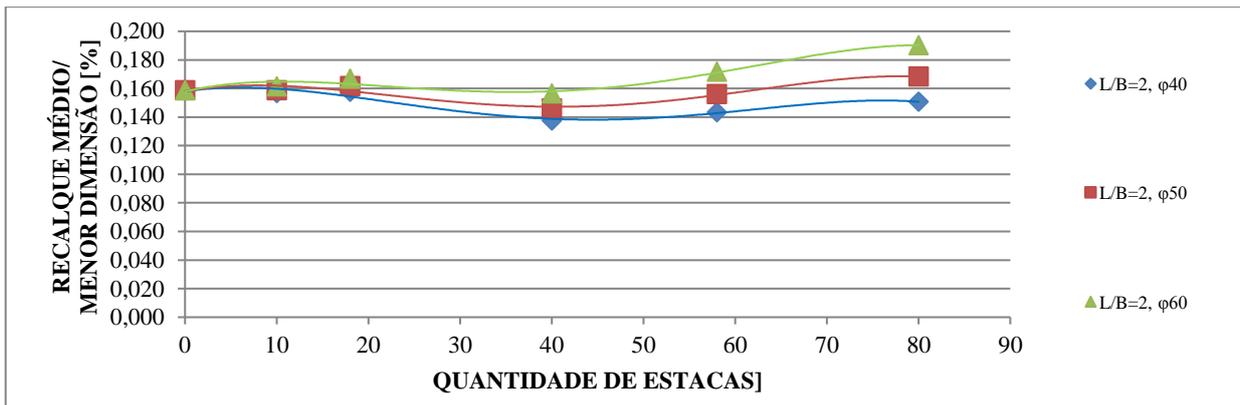


Figura 4.59. Recalque percentual *versus* quantidade de estacas, para L/B=2, e=60 e areia fofa- M.E.=12 [Mpa].

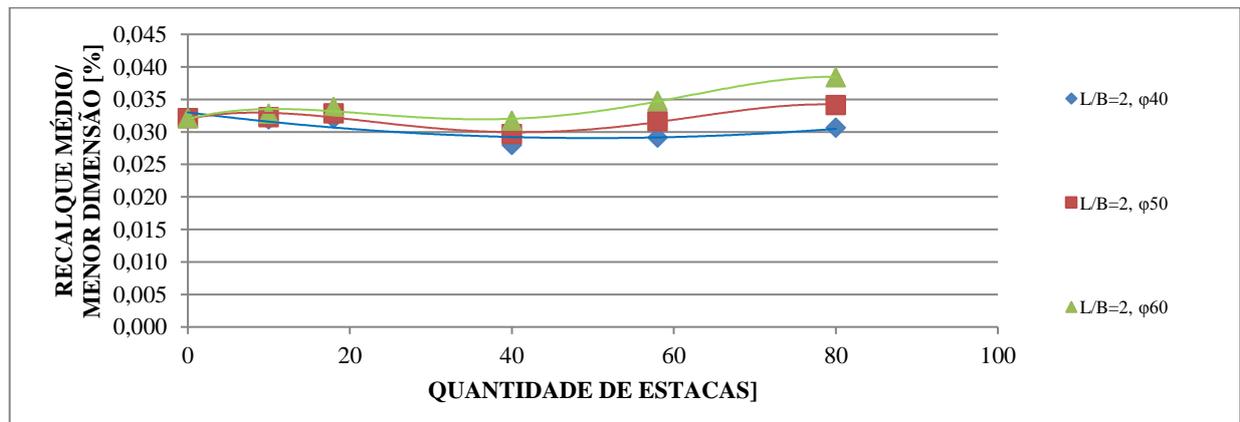


Figura 4.60. Recalque percentual *versus* quantidade de estacas, para L/B=2, e=60 e Areia medianamente compacta- M.E.=60 [MPa].

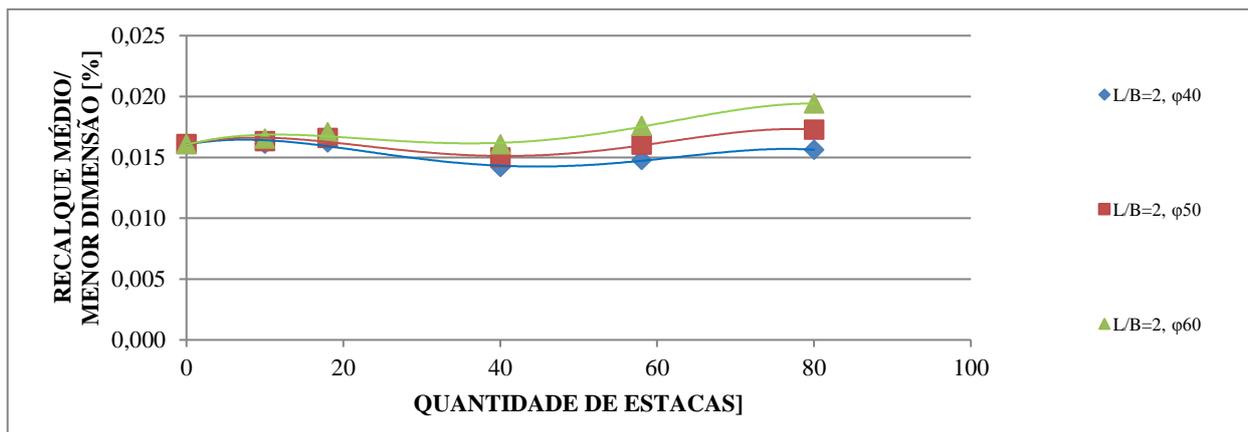


Figura 4.61. Recalque percentual *versus* quantidade de estacas, para  $L/B=2$ ,  $e=60$  e Areia compacta- M.E.=120 [MPa].

C) Para radiers de 0,9 m de espessura e diferentes módulos de elasticidade

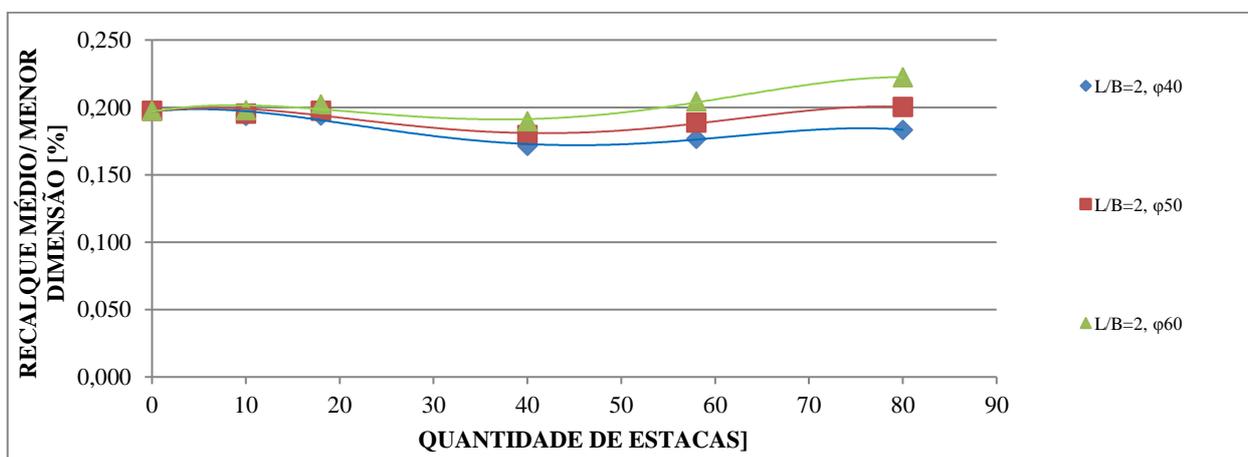


Figura 4.62. Recalque percentual *versus* quantidade de estacas, para  $L/B=2$ ,  $e=90$  e areia fofa- M.E.=12 [Mpa]

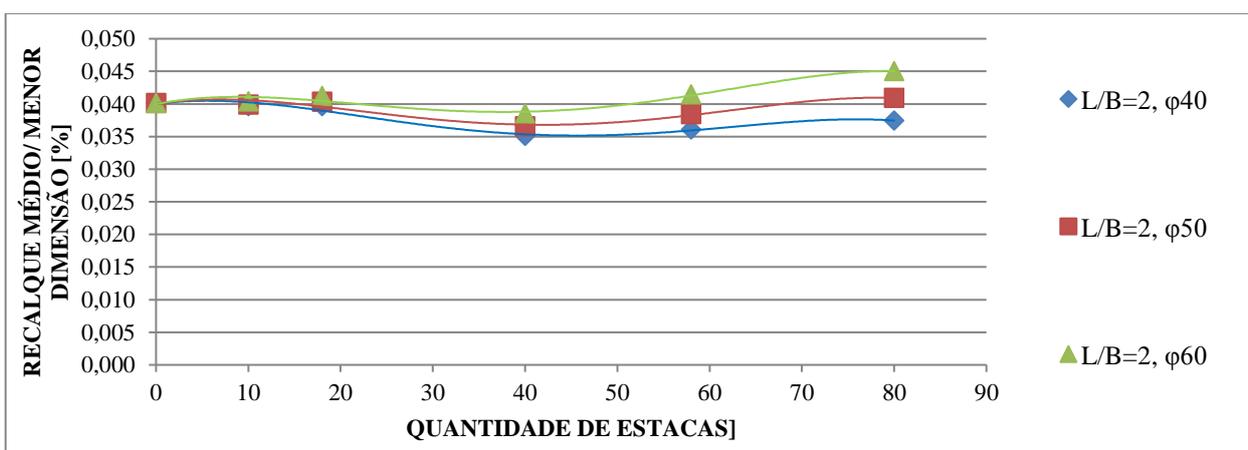


Figura 4.63. Recalque percentual *versus* quantidade de estacas, para  $L/B=2$ ,  $e=90$  e Areia medianamente compacta- M.E.=60 [MPa].

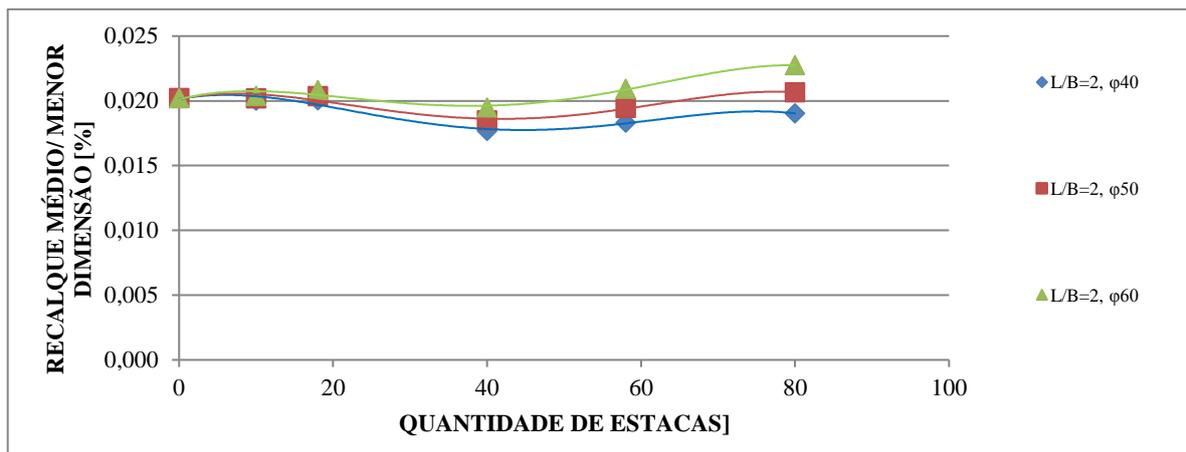


Figura 4.64. Recalque percentual *versus* quantidade de estacas, para L/B=2, e=90 e Areia compacta- M.E.=120 [MPa].

A inclusão de 18 estacas de 0,5 m de diâmetro nos radiers com L/B=2 e espessura de 0,3 m, não permitiu uma diminuição de recalques da estrutura de fundação, se comparado com a mesma estrutura sem estacas. Verifica-se, neste caso, que o acréscimo de 20,93% no peso total da estrutura influenciou os resultados do recalque. Com o aumento do módulo de elasticidade do solo os valores de recalque diminuem e a influência do peso da estrutura também, visto que, para areia fofa com M.E.=12 Mpa, o recalque máximo num radier sem estacas é de  $R_{m\acute{a}x}=2,06$  cm e no radier com 18 estacas, com 50 cm de diâmetro, é  $R_{m\acute{a}x}=2,18$  cm e para areia medianamente compacta M.E.=60 Mpa, o recalque máximo num radier sem estacas é de  $R_{m\acute{a}x}=0,43$  cm e no radier com 18 estacas, com 0,5 m de diâmetro, é  $R_{m\acute{a}x}=0,46$  cm, Figura 4.65 e Figura 4.66.

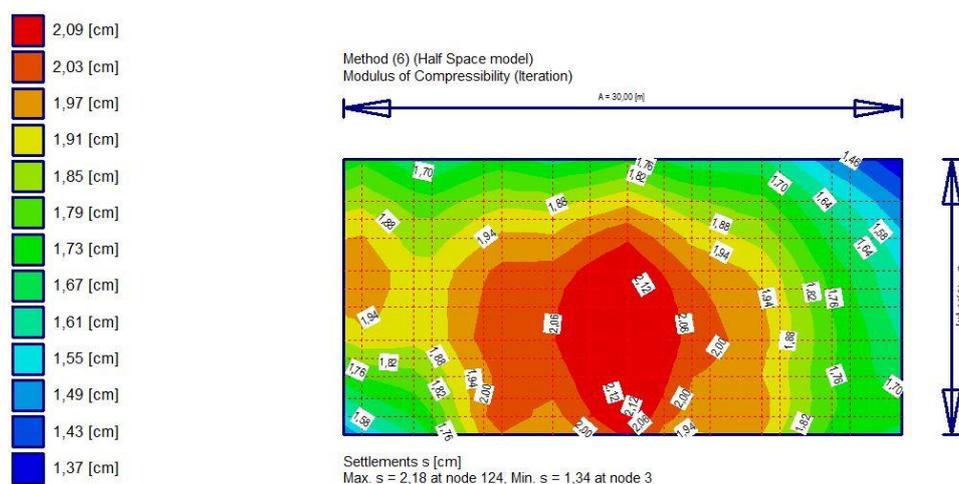
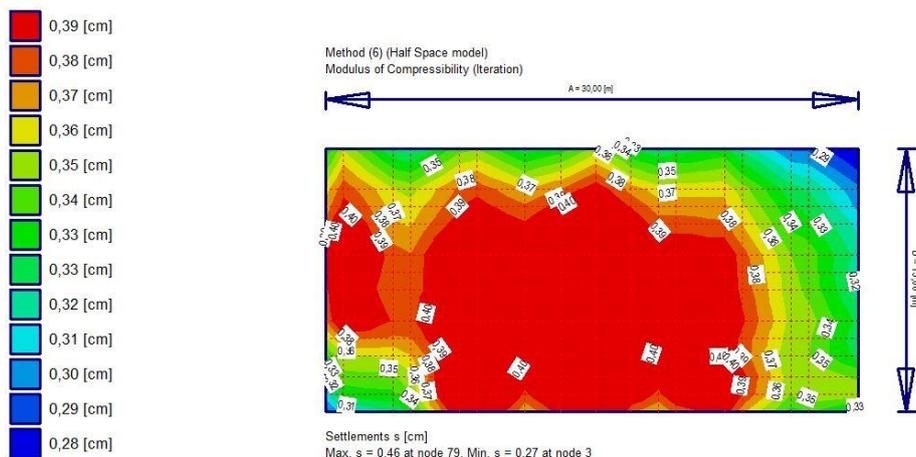
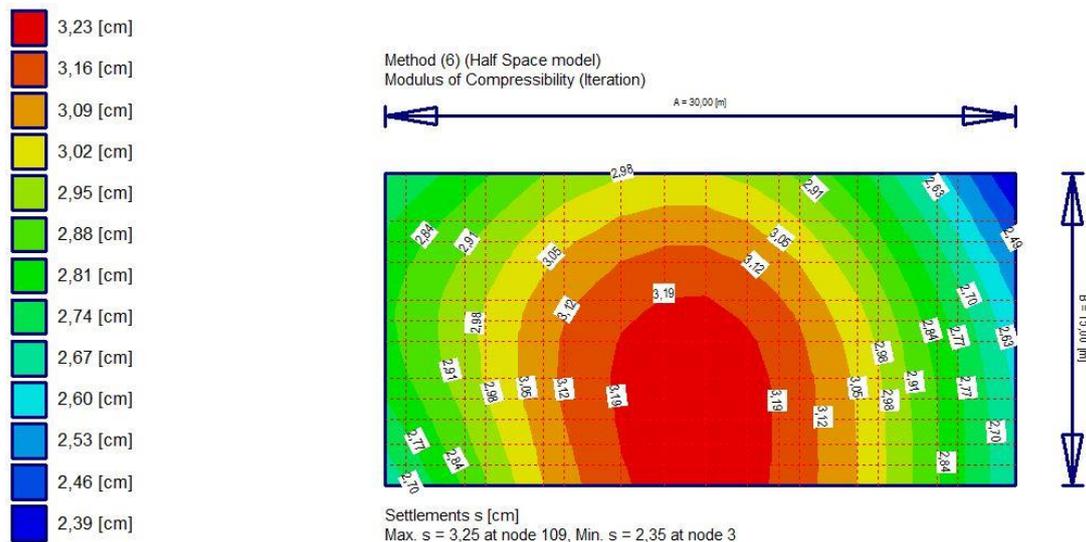


Figura 4.65. 18 estacas; e=0,3 m- areia fofa- M.E.=12 [MPa];  $R_{m\acute{a}x}=2,18$  cm e  $R_{min}=1,34$  cm.

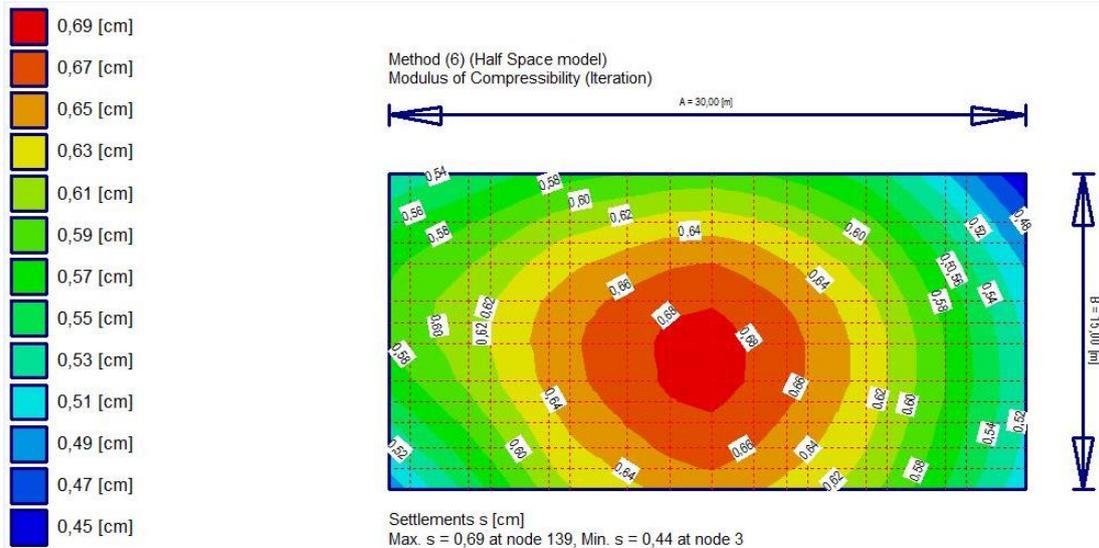


**Figura 4.66. 18 estacas; e=0,3 m- areia medianamente compacta- M.E.=60 [MPa]; R,máx=0,46 cm e R min=0,27 cm.**

Em um radier com 0,9 m de espessura, a inclusão de 18 estacas de 0,5 m de diâmetro nos radiers com  $L/B=2$ , diferentemente do que ocorreu com o radier de espessura de 0,3 m, permitiu uma diminuição de recalques da estrutura de fundação, se comparado com a mesma estrutura sem estacas. Contudo, o aumento da espessura demanda valores maiores de recalques totais. Em relação ao módulo de elasticidade do solo, como já previsto, aumento desses valores tende a diminuir os resultados dos recalques. O mesmo ocorre na fundação com a forma  $L/B=1$  (Figura 4.67 e Figura 4.68).

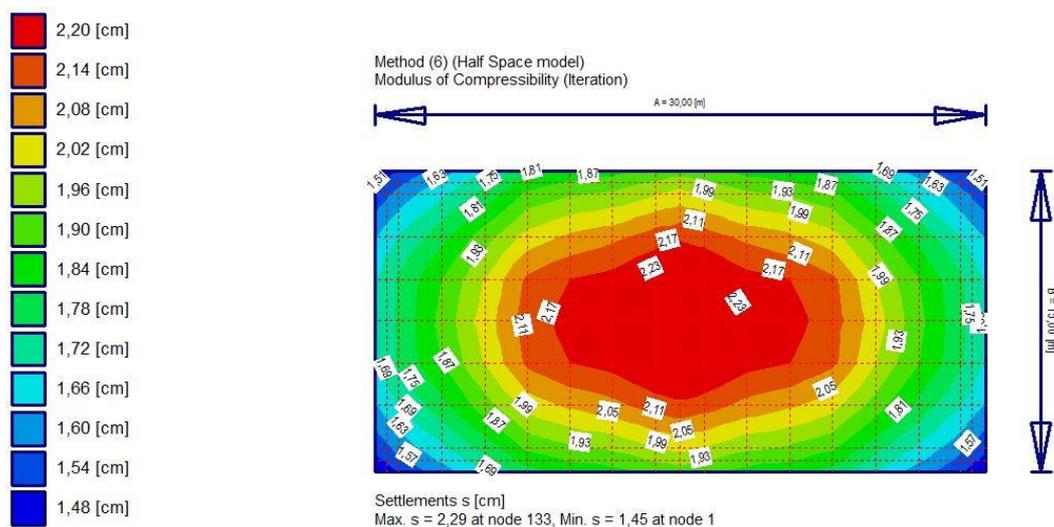


**Figura 4.67.18 estacas; e=0,9 m- areia fofa- M.E.=12 [MPa]; R,máx=3,25 cm e R,min=2,35 cm.**



**Figura 4.68. 18 estacas; e=0,9 m- areia medianamente compacta- M.E.=60 [MPa]; R,máx=0,69 cm e R,min=0,44 cm.**

Assim como para o radier quadrado, com  $L/B=1$ , no radier retangular com  $L/B=2$ , a inclusão de 58 estacas com 50 cm de diâmetro e espessura da placa de 0,3 m resultou, para um solo com o módulo de elasticidade de 12 Mpa, num recalque maior ( $R_{,máx}=2,29$  cm) do que quando foram incluídas 18 estacas ( $R_{,máx}=2,18$  cm). Ver Figura 4.69 e Figura 4.70.



**Figura 4.69. 58 estacas; e=0,3 m- areia fofa- M.E.=12 [MPa]; R,máx=2,29 cm e R,min=1,45 cm.**

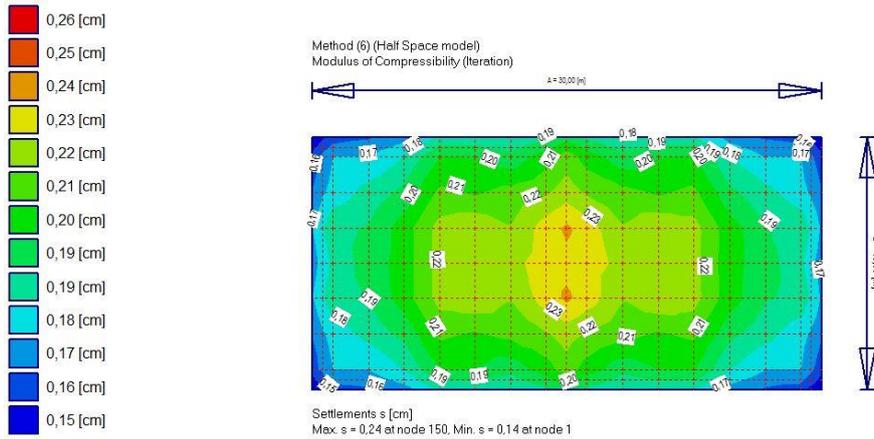


Figura 4.70. 58 estacas; e=0,3 m- areia compacta- M.E.=120 [MPa]; R,máx=0,24 cm e R min=0,14 cm

Com a espessura da placa de 0,9 m, para o radier retangular, com L/B=2, a inclusão de 58 estacas com 0,5 m de diâmetro resultou num aumento dos valores de recalques totais, diminuindo com o aumento do módulo de elasticidade do solo.

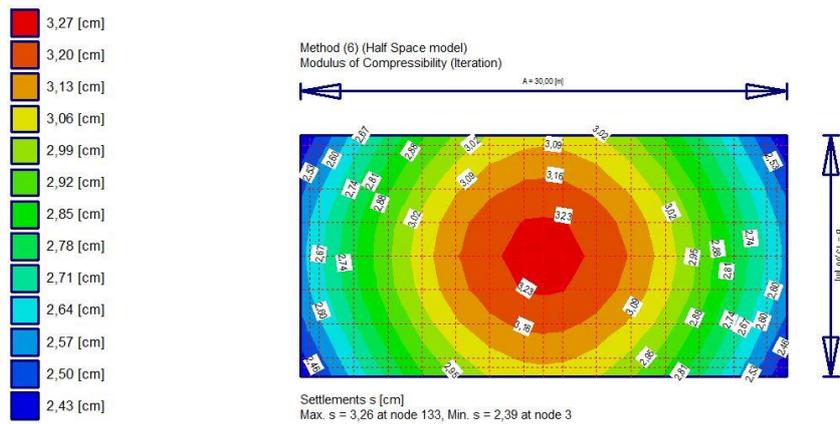


Figura 5.71. 58 estacas; e=0,9 m- areia fofa- M.E.=12 [MPa]; R,máx=3,26 cm e R,min=2,39 cm.

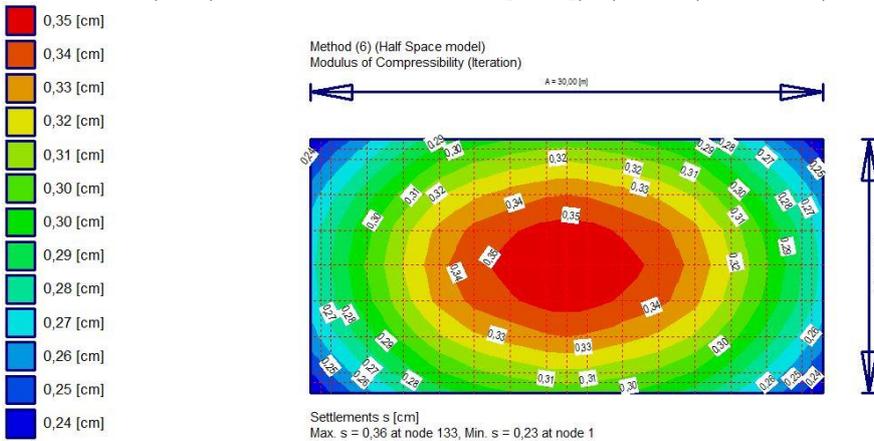


Figura 4.72. 58 estacas; e=0,9 m- areia compacta- M.E.=120 [MPa]; R,máx=0,36 cm e R min=0,23 cm.

#### 4.5. Influência da área das estacas em relação à área total do radier no recalque

A área ocupada pelas estacas em relação a área total do radier influencia diminuindo os valores médios percentuais de recalque quando o espaço ocupado pelas estacas são equivalentes a 9 estacas, para  $L/B=1$ , tornando a aumentar quando a área relativas de estacas aumentam, como pode ser visualizado da Figura 4.73 a Figura 4.75.

Nestes casos, recalque médio percentual tendeu a diminuir com a área relativa das estacas em torno de 0,5 % à 1,13% da área total (equivalente a 1,1 a 2,5 m<sup>2</sup>), ou seja, a área ocupada por 9 estacas para um radier com 225m<sup>2</sup>, e tendeu a aumentar com a área relativa das estacas em torno de 2,23 % a 5,03% da área total (equivalente a 5,0 e 11,3 m<sup>2</sup>), referente à área ocupada por 40 estacas para um radier com 0,3 m de espessura e 225m<sup>2</sup>. Ver Apêndice C.

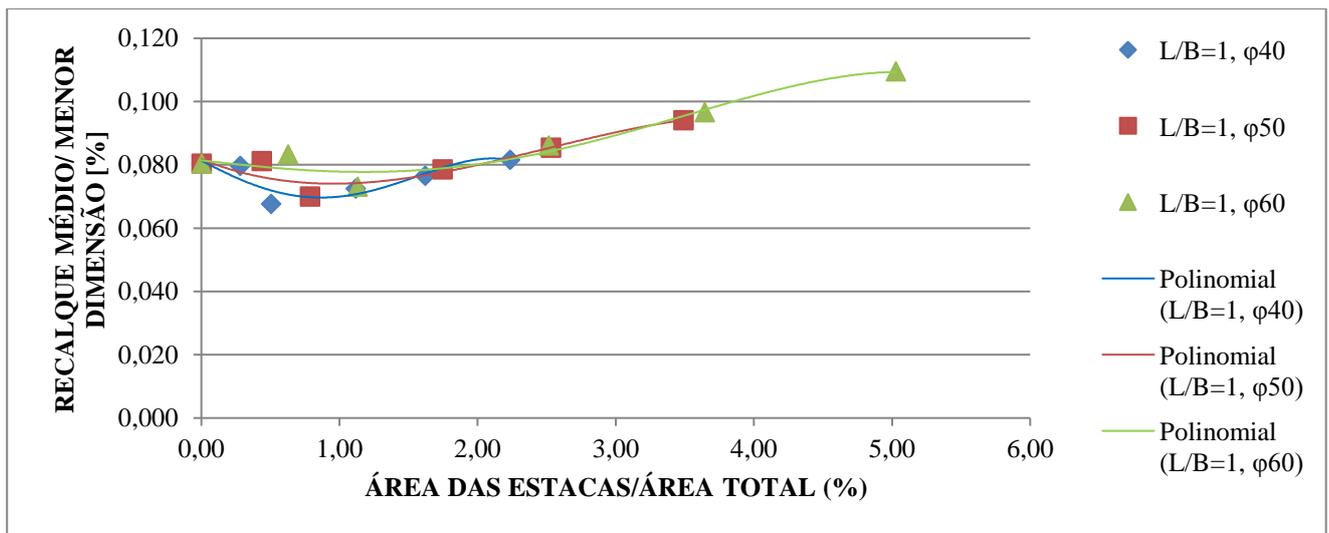


Figura 4.73. Recalque médio percentual versus área das estacas/área total [%], para  $L/B=1$ ,  $e=30$  [cm] e areia fofa-  $M.E.=12$  [MPa].

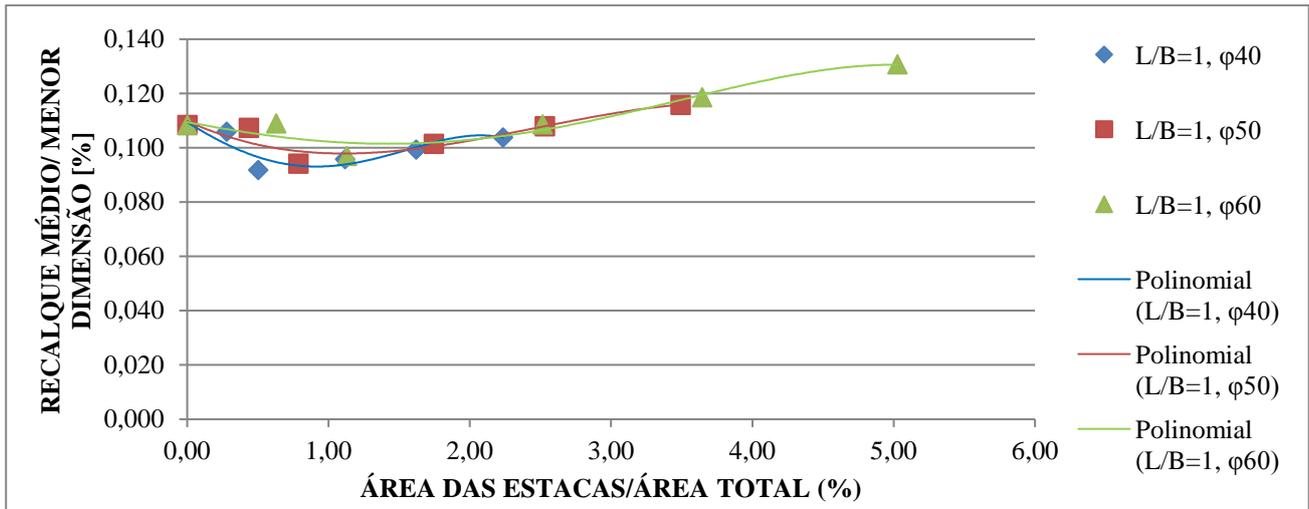


Figura 4.74. Recalque médio percentual versus área das estacas/área total [%], para L/B=1, e=60 [cm] e areia fofa- M.E.=12 [MPa].

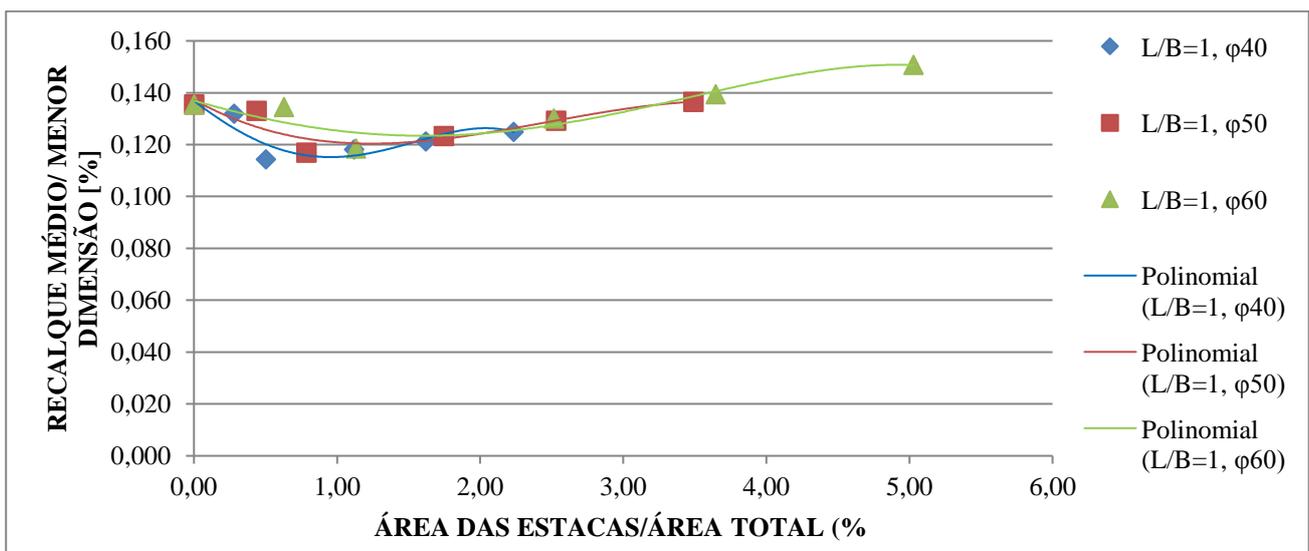


Figura 4.75. Recalque médio percentual versus área das estacas/área total [%], para L/B=1, e=90 [cm] e areia fofa- M.E.=12 [MPa].

Para L/B=2, solo com 12 MPa de módulo de elasticidade, os valores médios de recalque percentual observados também variam em função da área ocupada pelas estacas em relação a área total do radier das seguintes maneiras:

- O recalque médio percentual tende a diminuir com a área relativa das estacas em torno de 1,12 % a 2,51% da área total (5,0 a 11,3 m<sup>2</sup>), ou seja, a área ocupada por 40 estacas para um radier com 450m<sup>2</sup> e 0,3 m, 0,6 m e 0,9 m de espessura. Figura 4.76 a Figura 4.78.

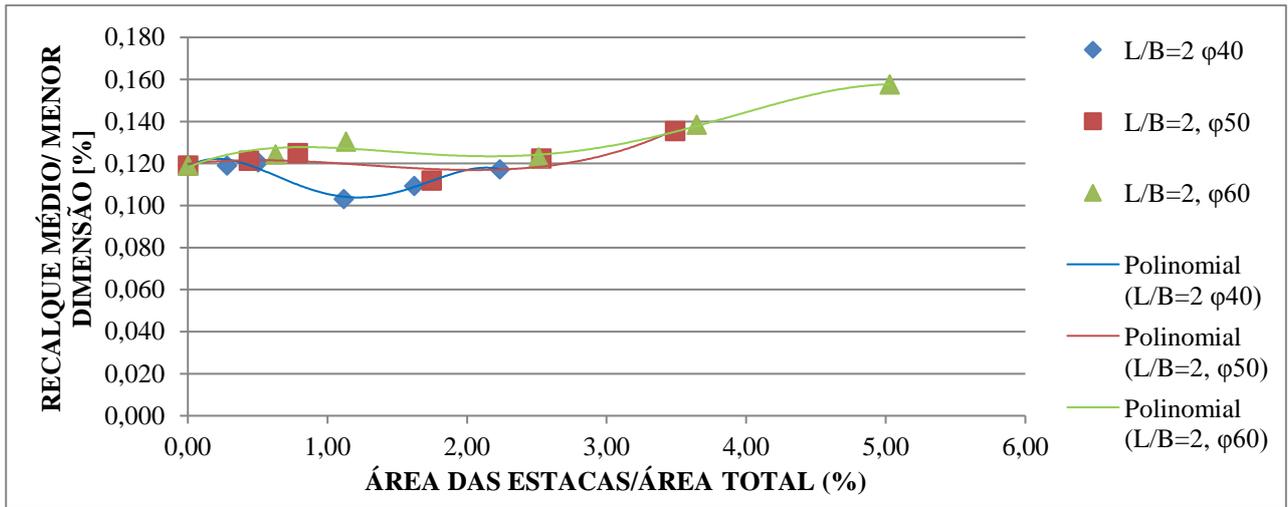


Figura 4.76. Recalque médio percentual versus área das estacas/área total [%], para L/B=2, e=30 [cm] e areia fofa- M.E.=12 [MPa].

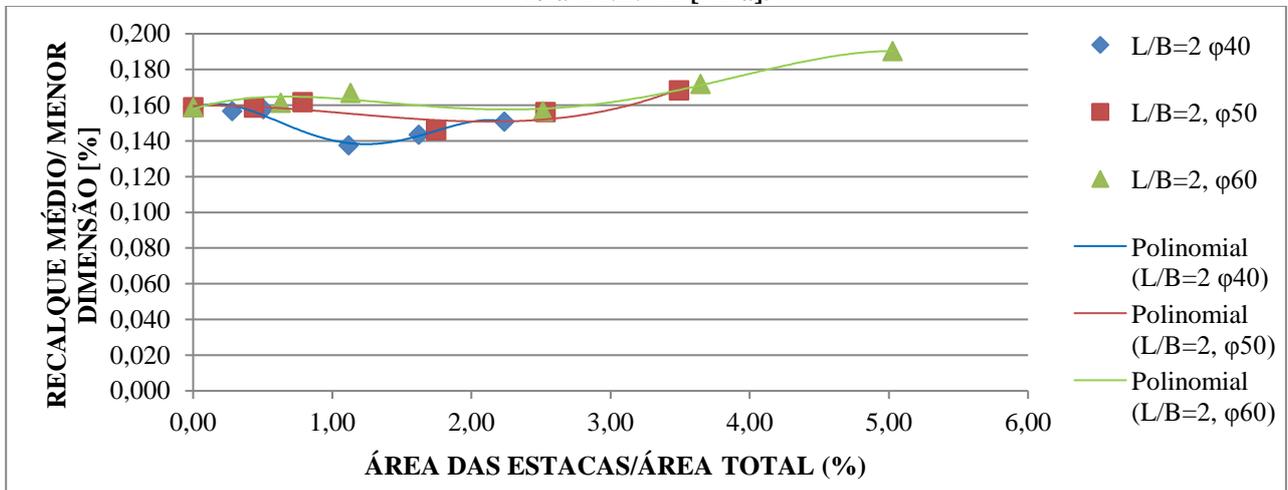


Figura 4.77. Recalque médio percentual versus área das estacas/área total [%], para L/B=2, e=60 [cm] e areia fofa- M.E.=12 [MPa].

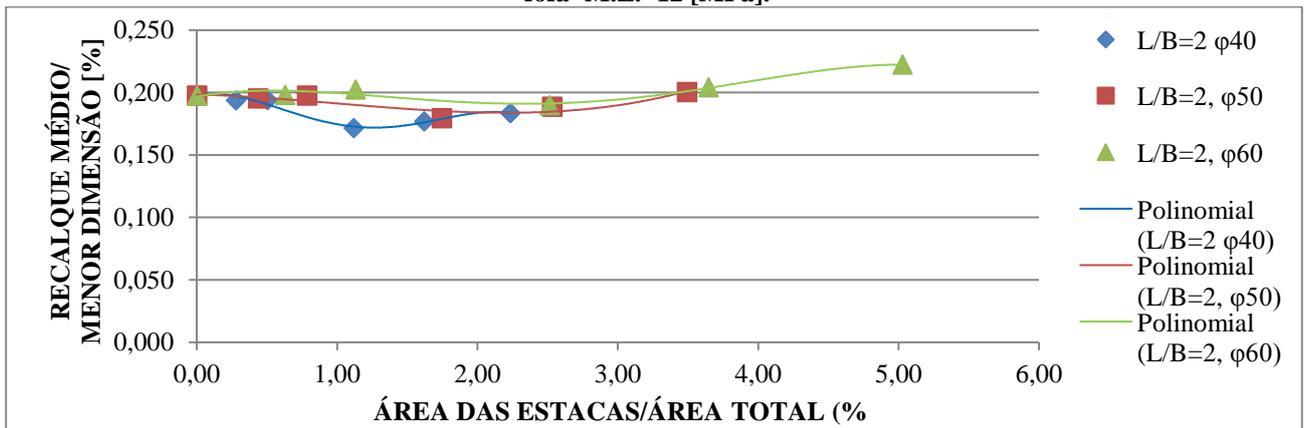


Figura 4.78. Recalque médio percentual versus área das estacas/área total [%], para L/B=21, e=90 [cm] e areia fofa- M.E.=12 [MPa].

#### 4.6. Influência das estacas na uniformização do recalque

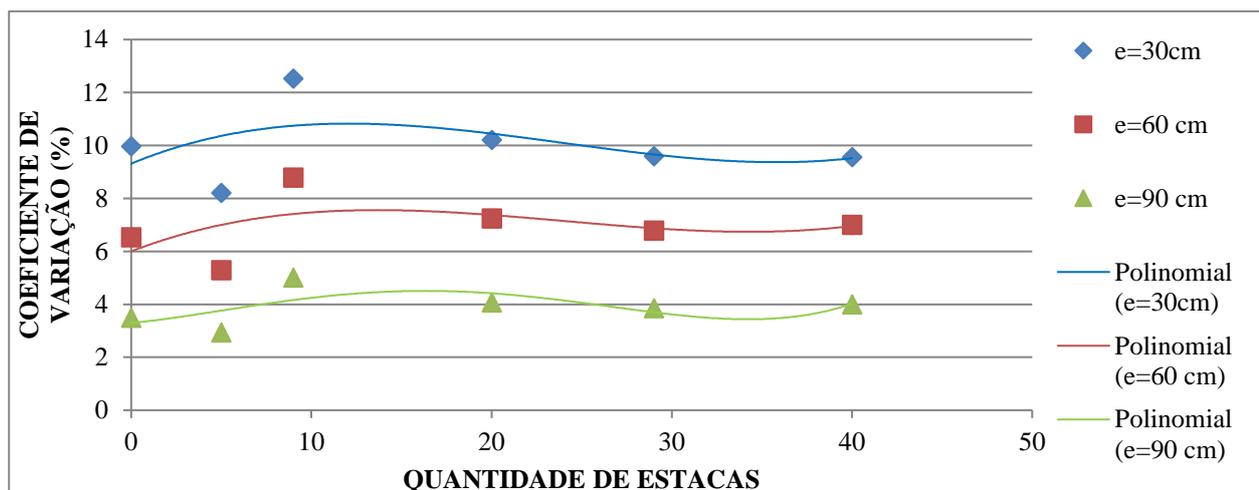
De acordo com os dados obtidos através da simulação no programa ELPLA e com o desenvolvimento de planilhas no EXCEL foi possível observar como a quantidade de estacas e as espessuras do radier influenciam na uniformização do recalque, através dos valores obtidos no coeficiente de variação percentual desses recalques – representado pela relação entre desvio padrão e o  $R_{\text{médio}} \times 100$ . Quanto menor for essa variação, melhor é o desempenho da fundação, visto que os valores dos recalques diferenciais são reduzidos.

Desta forma, observou-se que o comportamento dos radiers com quadrados,  $L/B=1$ , com diâmetro de estaca de 0,4 m, em solo composto de areia fofa com 12 MPa de módulo de elasticidade, apresentam números ótimos de estacas semelhantes para cada espessura de radier:

- Para radier com 0,3 m de espessura, o menor valor de coeficiente de variação percentual é atingido com 5 estacas (8,20%) e o maior valor de coeficiente de variação percentual com 9 estacas (12,52%);
- Para radier com 0,6 m de espessura, o menor valor de coeficiente de variação percentual é atingido com 5 estacas (5,28%) e o maior valor de coeficiente de variação percentual com 9 estacas (8,79%);
- Para radier com 0,9 m de espessura, o menor valor de coeficiente de variação percentual é atingido com 5 estacas (2,93%) e o maior valor de coeficiente de variação percentual com 9 estacas (5,01%).

Logo, nota-se que para qualquer espessura de radier analisada ( 0,3, 0,6 e 0,9 m), o recalque será mais uniforme com a quantidade de 5 estacas. Quando incluídas 9 estacas, os valores do coeficiente de variação apresentaram variação máxima, sugerindo a ocorrência de recalques diferenciais.

A variação da espessura do radier é o parâmetro com maior incidência na influência dos recalques totais, quando comparado à influência do número de estacas nestes recalques, como pode ser observado na Figura 4.79.



**Figura 4.79.** Coeficiente de variação (%) *versus* quantidade de estacas, para estacas com  $\phi 40$ ,  $L/B=1$  e areia fofa- M.E.=12 [MPa].

Os recalques diferenciais são reduzidos em maior escala quando se aumenta a espessura do radier do que quando é alterada a quantidade de estacas, visto que a diferença dos valores obtidos de coeficiente de variação percentual entre a quantidade máxima de estacas (40) e mínima (0) de estacas foi de 0,39%, para radiers com 0,3 m de espessura e 0,51% para radiers com 0,9 m de espessura, e quando analisados os valores de coeficiente de variação percentual obtidos entre as espessuras de radier mínima (0,3 m) e máxima (0,9 m), foi obtido o valor de 5,27% de diferença entre o menor valor de recalque das 2 espessuras e 7,51% de diferença entre o maior valor de recalque das 2 espessuras.

Os radiers com  $L/B=1$ , com diâmetro de estaca de 0,5 m, em areia fofa com 12 MPa de elasticidade também apresentam números ótimos de estacas semelhantes para cada espessura de radier:

- Para radier com 0,3 m de espessura, o menor valor de coeficiente de variação percentual é atingido com 5 estacas (8,21%) e o maior valor de coeficiente de variação percentual com 9 estacas (12,97%);
- Para radier com 0,6 m de espessura, o menor valor de coeficiente de variação percentual é atingido com 5 estacas (5,28%) e o maior valor de coeficiente de variação percentual com 9 estacas (8,78%);
- Para radier com 0,9 m de espessura, o menor valor de coeficiente de variação

percentual é atingido com 5 estacas (2,91%) e o maior valor de coeficiente de variação percentual com 9 estacas (5,07%).

Na Figura 4.80 é possível observar, que a variação da espessura do radier também é o parâmetro com maior incidência na influência dos recalques totais, quando comparado à influência do número de estacas nestes recalques. O radier com maior espessura (0,9 m) foi o que obteve o menor valor de coeficiente de variação percentual, de 2,91%, com 5 estacas de 0,5 m de diâmetro, num solo de areia fofa com 12 MPa de módulo de elasticidade.

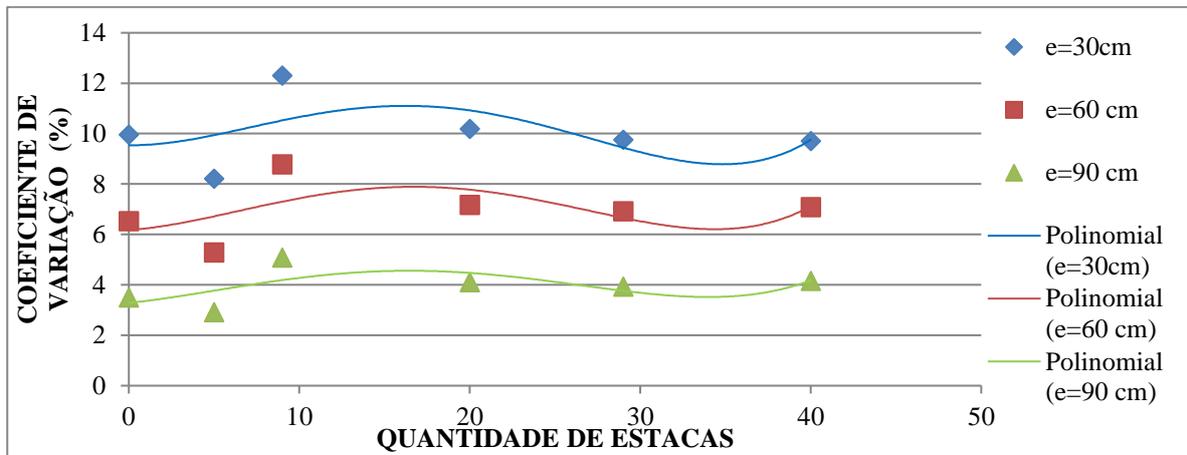


Figura 4.80. Coeficiente de variação (%) versus quantidade de estacas, para estacas com  $\phi 50$ ,  $L/B=1$  e areia fofa- M.E.=12 [MPa].

De maneira semelhante ao que ocorre com estacas de 0,4 m de diâmetro, os recalques diferenciais são reduzidos em maior escala quando se aumenta a espessura do radier do que quando é alterada a quantidade de estacas, considerando as mesmas com 0,5 m de diâmetro.

A diferença dos valores obtidos de coeficiente de variação percentual entre a quantidade máxima (40) e mínima (0) de estacas foi de 0,25%, para radiers com 0,3 m de espessura e 0,66% para radiers com 0,9 m de espessura. Quando analisados os valores de coeficiente de variação percentual obtidos entre as espessuras mínima (0,3 m) e máxima (0,9 m) do radier, foi obtido o valor de 5,30% de diferença entre o menor valor de recalque das 2 espessuras e 7,22% de diferença entre o maior valor de recalque das 2 espessuras.

Em relação aos radiers com  $L/B=1$ , com diâmetro de estaca de 0,6 m, em solo de areia fofa com 12 MPa de elasticidade observa-se que apresentam comportamento semelhante aos

apresentados anteriormente, com diâmetros de 0,4 m e 0,5 m, com números ótimos de estacas semelhantes para cada espessura de radier:

- Para radier com 0,3 m de espessura, o menor valor de coeficiente de variação percentual é atingido com 5 estacas (8,25%) e o maior valor de coeficiente de variação percentual com 9 estacas (12,033%);
- Para radier com 0,6 m de espessura, o menor valor de coeficiente de variação percentual é atingido com 5 estacas (5,26%) e o maior valor de coeficiente de variação percentual com 9 estacas (8,67%);
- Para radier com 0,9 m de espessura, o menor valor de coeficiente de variação percentual é atingido com 5 estacas (2,93%) e o maior valor de coeficiente de variação percentual com 9 estacas (5,23%).

Na Figura 4.81 é possível observar que, semelhantemente ao que ocorreu nos gráficos supracitados, o menor valor de coeficiente de variação percentual para o radier com 0,3 m de espessura ocorreu com 5 estacas e o máximo com 9 estacas, como sucedeu nos casos com estacas de 0,4 m e 0,5 m de diâmetros.

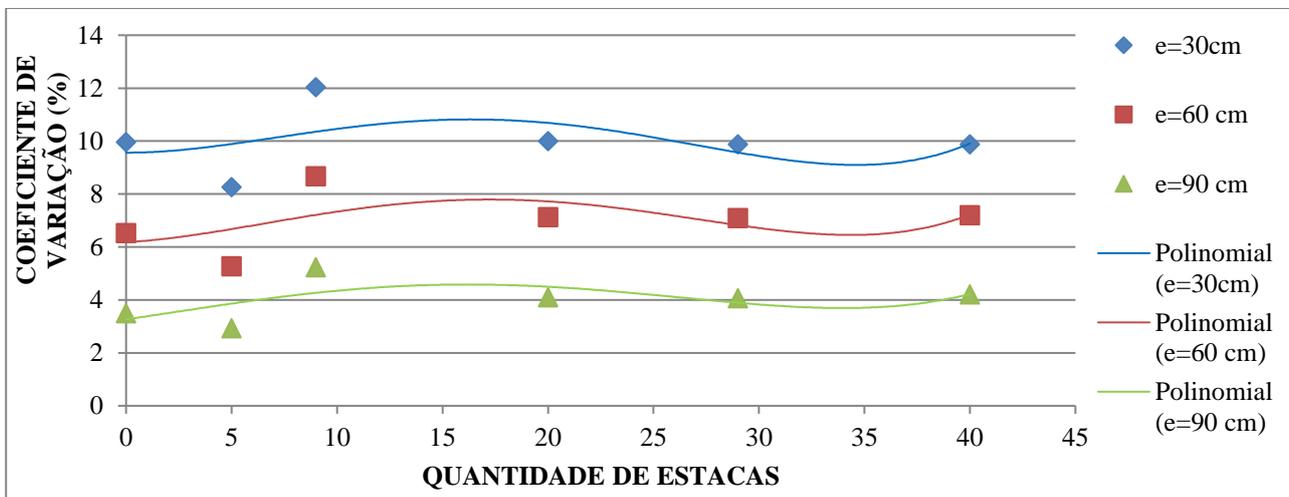


Figura 4.81. Coeficiente de variação (%) versus quantidade de estacas, para estacas com  $\phi 60$ ,  $L/B=1$  e areia fofa- M.E.=12 [MPa].

Constata-se ainda que variação da espessura do radier continua sendo o parâmetro com maior incidência na influência dos recalques totais, quando comparado à influência do número de estacas nestes recalques. O valor de coeficiente de variação percentual decresceu de 8,25%, para 5,26% e

2,93% para radiers com 0,3 m, 0,6 m e 0,9 m de espessura, respectivamente, com 5 estacas de 0,6 m de diâmetro, nas mesmas condições de solo enquanto que a quantidade de estacas favoreceu a diminuição de 0,09% entre 0 e 40 estacas para radiers com 0,3 m de espessura e 0,71% entre 0 e 40 estacas para radiers com 0,9 m de espessura.

Os radiers com retangulares,  $L/B=2$ , com diâmetros de estacas de 0,4 m, 0,5 m e 0,6 m, em solo com areia fofa com 12 MPa de elasticidade apresentam comportamentos semelhantes aos radiers quadrados,  $L/B=1$ , no que se refere à variação do coeficiente de variação em função da quantidade de estacas com diferentes diâmetros. Figura 4.82 a Figura 4.84.

Para radiers de 0,3 m de espessura e estacas com 0,4 m de diâmetro, tem-se o menor valor de coeficiente de variação percentual atingido com 18 estacas (8,73%) e o maior valor de coeficiente de variação percentual com 80 estacas (12,0%);

Para radiers com 0,6 m de espessura e estacas com 0,4 m de diâmetro, tem-se o menor valor de coeficiente de variação percentual atingido com 18 estacas (7,65%) e o maior valor de coeficiente de variação percentual com 80 estacas (10,97%);

Para radiers com 0,9 m de espessura e estacas com 0,4 m de diâmetro, tem-se o menor valor de coeficiente de variação percentual atingido com 18 estacas (6,53%) e o maior valor de coeficiente de variação percentual com 80 estacas (10,80%);

É possível observar, que a variação da espessura do radier também é o parâmetro com maior incidência na influência dos recalques totais, quando comparado à influência do número de estacas nestes recalques. Semelhantemente ao que ocorreu com  $L/B=1$ , o radier com maior espessura (0,9 m) foi o que obteve o menor valor de coeficiente de variação percentual, de 6,53%, com 18 estacas de 0,4m de diâmetro, num solo de areia fofa com 12 MPa de módulo de elasticidade.

A diferença dos valores obtidos de coeficiente de variação percentual entre a quantidade máxima (80) e mínima (0) de estacas foi de 2,08%, para radiers com 0,3 m de espessura e 1,92% para radiers com 0,9 m de espessura.

Quando analisados os valores de coeficiente de variação percentual obtidos entre as espessuras mínima (0,3 m) e máxima (0,9 m) do radier, foi obtido o valor de 2,71% de diferença entre o menor valor de recalque das 2 espessuras e 2,69% de diferença entre o maior valor de

recalque das 2 espessuras, ou seja, os recalques diferenciais são reduzidos em maior escala quando se aumenta a espessura do radier do que quando é alterada a quantidade de estacas.

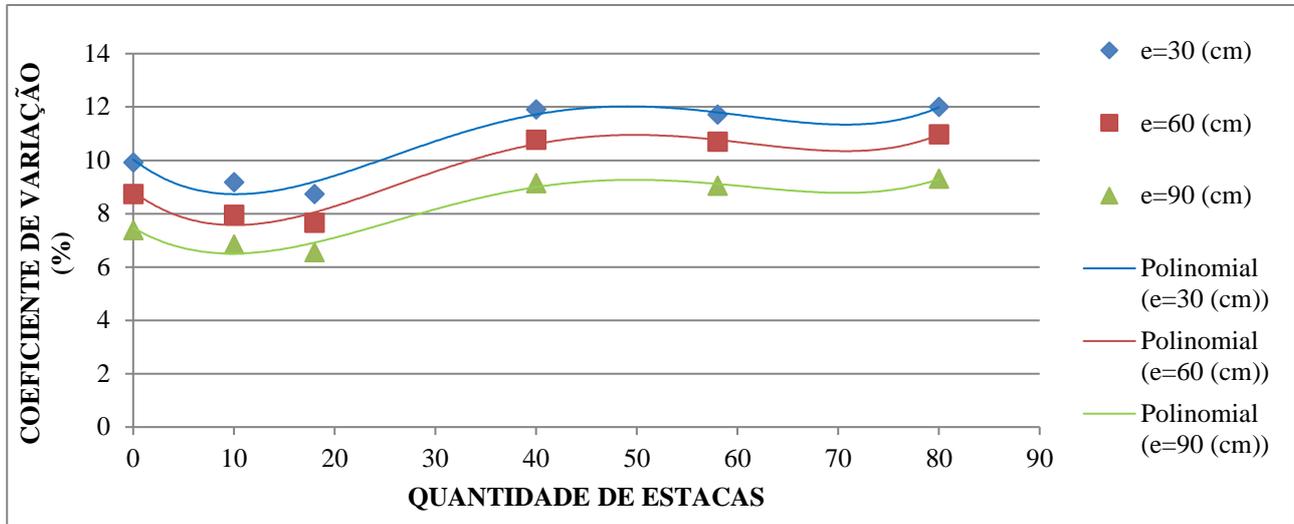


Figura 4.82. Coeficiente de variação (%) versus quantidade de estacas, para estacas com  $\phi 40$ ,  $L/B=2$  e areia fofa- M.E.=12 [MPa].

Para raders de 0,3 m de espessura e estacas com 0,5 m de diâmetro, tem-se o menor valor de coeficiente de variação percentual atingido com 18 estacas (8,82%) e o maior valor de coeficiente de variação percentual com 80 estacas (12,35%);

Para raders com 0,6 m de espessura e estacas com 0,5 m de diâmetro, tem-se o menor valor de coeficiente de variação percentual atingido com 18 estacas (7,67%) e o maior valor de coeficiente de variação percentual com 80 estacas (11,25%);

Para raders com 0,9 m de espessura e estacas com 0,5 m de diâmetro, tem-se o menor valor de coeficiente de variação percentual atingido com 18 estacas (6,61%) e o maior valor de coeficiente de variação percentual com 80 estacas (9,48%);

A variação da espessura do radier continua sendo o parâmetro com maior incidência na influência dos recalques totais, quando comparado à influência do número de estacas nestes recalques. Assim como ocorreu com  $L/B=1$ , o radier com maior espessura (0,9 m) foi o que obteve o menor valor de coeficiente de variação percentual, de 6,61%, com 18 estacas de 0,5 m de diâmetro, num solo com 12 MPa de módulo de elasticidade.

Os recalques diferenciais são reduzidos em maior escala quando se aumenta a espessura do radier do que quando é alterada a quantidade de estacas, visto que a diferença dos valores obtidos de coeficiente de variação percentual entre a quantidade máxima de estacas (80) e mínima (0) foi de 2,44%, para raders com 0,3 m de espessura e 2,09% para raders com 0,9 m de espessura. Quando analisados os valores de coeficiente de variação percentual obtidos entre as espessuras mínima do raders (0,3 m) e máxima (0,9 m), foi obtido o valor de 2,21% de diferença entre os menores valores de recalque das 2 espessuras e 2,88% de diferença entre os maiores valores de recalque das 2 espessuras.

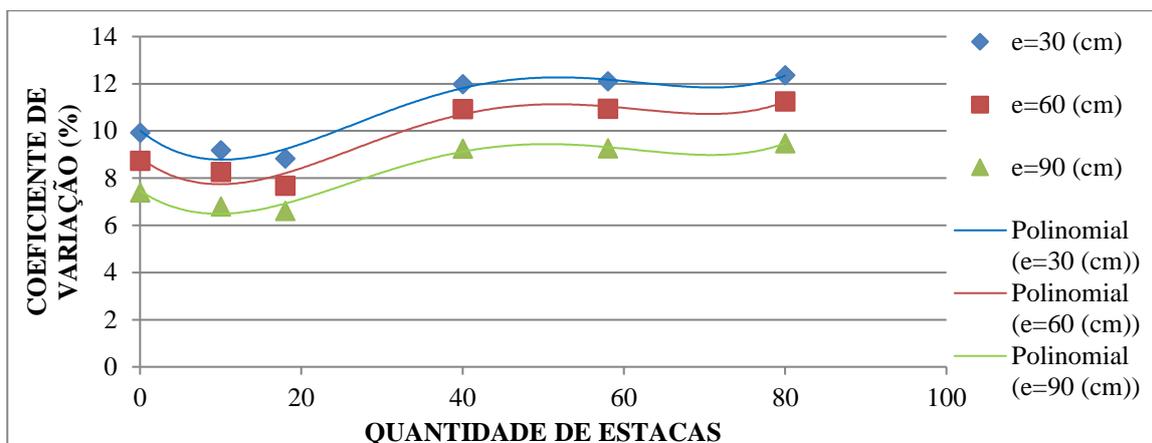


Figura 4.83. Coeficiente de variação (%) versus quantidade de estacas, para estacas com  $\phi 50$ ,  $L/B=2$  e areia fofa- M.E.=12 [MPa].

Em raders de 0,3 m de espessura e estacas com 0,6 m de diâmetro, tem-se o menor valor de coeficiente de variação percentual atingido com 18 estacas (8,95%) e o maior valor de coeficiente de variação percentual com 80 estacas (12,73%);

Em raders com 0,6 m de espessura e estacas com 0,6 m de diâmetro, tem-se o menor valor de coeficiente de variação percentual atingido com 18 estacas (7,79%) e o maior valor de coeficiente de variação percentual com 80 estacas (11,42%);

Em raders com 0,9 m de espessura e estacas com 0,6 m de diâmetro, tem-se o menor valor de coeficiente de variação percentual atingido com 18 estacas (6,62%) e o maior valor de coeficiente de variação percentual com 80 estacas (9,63%);

A variação da espessura do radier continua sendo o parâmetro com maior incidência na influência dos recalques totais, quando comparado à influência do número de estacas nestes

recalques. Da mesma forma que ocorreu com  $L/B=1$ , o radier com maior espessura (0,9 m) foi o que obteve o menor valor de coeficiente de variação percentual, de 6,62%, com 18 estacas de 0,6 m de diâmetro, num solo de areia fofa com 12 MPa de módulo de elasticidade.

Constata-se ainda que variação da espessura do radier continua sendo o parâmetro com maior incidência na influência dos recalques totais, quando comparado à influência do número de estacas nestes recalques. O valor de coeficiente de variação percentual decresceu de 8,95%, para 7,79% e 6,62% para radiers com 0,3 m, 0,6 m e 0,9 m de espessura, respectivamente, com 18 estacas de 0,6 m de diâmetro, nas mesmas condições de solo enquanto que a quantidade de estacas favoreceu a diminuição de 2,81% entre 0 e 40 estacas para radiers com 0,3 m de espessura e 2,23% entre 0 e 40 estacas para radiers com 0,9 m de espessura.

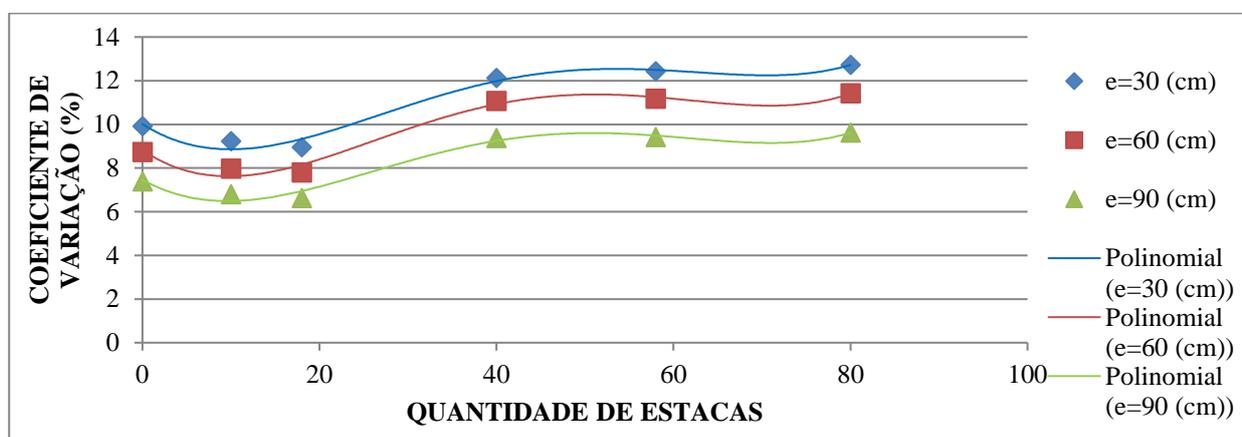


Figura 4.84. Coeficiente de variação (%) versus quantidade de estacas, para estacas com  $\phi 60$ ,  $L/B=2$  e areia fofa- M.E.=12 [MPa].

## CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 Conclusões

Conforme os resultados apresentados no capítulo anterior, os recalques médios resultantes das análises das combinações sob a influência da variação do módulo de elasticidade do solo apresentaram diminuição no valor em função do aumento do módulo de elasticidade do solo. Este dado já estava previsto na literatura, visto que o aumento da rigidez do solo representa maior resistência do solo às deformações.

Considerando as duas geometrias adotadas  $L/B=1$  e  $L/B=2$ , percebeu-se ainda que, em ambos os casos, a variação dos valores de recalques médios é maior quando é aumentado o módulo de elasticidade do solo de areia fofa com 12 MPa para solo de areia medianamente compacta com 60 MPa (diminuem de 0,12 cm para 0,02 cm) do que observados quando aumentamos do solo de areia medianamente compacta com 60 MPa para 120 MPa (diminuem de 0,02 cm para 0,01 cm). Tais valores demonstram que a diminuição dos recalques médios percentuais não ocorre na mesma proporção que o módulo de elasticidade do solo aumenta.

O peso próprio da infraestrutura, que sofre alterações em virtude tanto do aumento da espessura e do tamanho do radier, bem como da quantidade e espessura das estacas, influencia diretamente os valores de recalque, sendo maior quanto mais pesada for a estrutura de fundação.

Ao considerar um solo de areia fofa com 12 MPa de módulo de elasticidade e as espessuras de radiers de 0,3, 0,6 e 0,9 m, observa-se que a área ocupada pelas estacas em relação a área total do radier influencia diminuindo ou aumentando os valores médios de recalque. Para radier quadrado,  $L/B=1$ , os valores médios de recalque diminuem quando incluídas até 9 estacas e, para radiers retangulares,  $L/B=2$ , quando incluídas até 40 estacas. Estes valores de recalque médio tendem a aumentar com a inclusão de novas estacas.

Os valores dos recalques médios tendem a aumentar quando considerados o aumento da espessura do radier. Os resultados obtidos e analisados sob a forma de coeficiente de variação

também permitiu a conclusão de que a espessura do radier é o parâmetro que exerce maior influência na redução dos recalques diferenciais

O diâmetro das estacas não proporcionaram diferenças relevantes nos valores do coeficiente de variação obtidos das análises dos raders, ou seja, o diâmetro das estacas nos recalques dos raders não deve ser considerado como fator preponderante no desenvolvimento do projeto de fundação.

A quantidade de estacas apresentaram, para raders quadrados, com  $L/B=1$ , valores ótimos na redução dos recalques diferenciais semelhantes em quaisquer que sejam as espessuras de radier apresentadas (0,3 m, 0,6 m ou 0,9 m). Vale salientar que a ausência de estacas apresentaram valores de coeficiente de variação semelhantes aos raders com 40 estacas (Apêndice C), mostrando que o acréscimo na quantidade de estacas pode não favorecer a diminuição dos recalques diferenciais e sim um aumento nos custos da obra.

## **5.2 Sugestões para futuras pesquisas**

Considerando os resultados apresentados e em virtude da demanda da área do estudo, recomenda-se para trabalhos futuros, um desenvolvimento de estudo paramétrico, tendo como base a reprodução dos modelos abordados neste trabalho, e, por referência, um solo argiloso, estratificado, com sondagens reais, abrangendo uma análise dos recalques diferenciais e distorções angulares dos mesmos a partir da observação dos coeficientes de variação obtidos. Todavia, cabe ressaltar que as constantes elásticas utilizadas para simular a deformação do solo, negligenciam a interação entre molas adjacentes. Portanto, erros tendenciam para solos moles.

O desenvolvimento de um estudo comparativo entre raders e raders protendidos é relevante, visto que com a protensão ocorre aumento da capacidade de carga do radier, podendo reduzir a sua espessura e, conseqüentemente, o peso próprio da estrutura de fundação. Destarte, já explicitado no decorrer deste trabalho, reduziria os valores dos recalques resultantes.

Entende-se que no estudo da viabilidade econômica entre a utilização de um radier sem estacas ou de um radier estacado corrobora em auxiliar profissionais inerentes a área, entre eles, projetista e construtor na realização de uma escolha racional, segura e adequada na solução de fundação a ser adotada.

O espaçamento e o posicionamento entre estacas são itens considerados indutores no resultado dos recalques, conforme reitera Kishida e Meyerhof (1965), assim como o comprimento das estacas. Desta forma, sugere-se o desenvolvimento de futuras pesquisas abrangendo estes itens como fatores e indicadores influenciáveis nos valores de recalques totais e diferenciais.

## REFERÊNCIAS

ABBAS, J.M.; CHIK, Z. H.; TAHA, M. R.. **Influence of Pile Cap Thickness on the Axial Response of Pile Group**. International Conference on Construction and Building Technology. [S.l.], ICCBT, pp. 63-72, 2008.

AMERICA CONCRETE INSTITUTE, **Guide to Design of Slabs-on-Ground**, ACI 360R-10, Farmington Hill, 72 p., 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Forças devidas ao vento em edificações**. NBR 6123. Rio de Janeiro, 1988.

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

BACELAR, Cleide Jeane Ribeiro; ROCHA FILHO, Pedricto; ROMANEL, Celso. **Análises de Recalque em Radiers Estaqueados**. Rio de Janeiro. 193p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2003.

BEZERRA, J. E. (2003). **Estudo do Comportamento de Fundações em Radier Estaqueado: Conceitos e Aplicações**. Dissertação de Mestrado, Publicação nº G.DM-104/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília, DF, 193 p, 2003.

BURLAND, J.B. **Shaft friction on piles in clay-a simple fundamental approach**. Ground Eng., 6(3): 30-42. 1973.

BURMISTER, Donald M. (1943). **Theory of Stress and Displacements in Layered Systems and Application to Design of Airport Runways**. Proceedings, Highway Research Board .

CASTILHO, D. Y. A., **Uso da Técnica de Radier Estaqueado para Pequenos Edifícios Assentes sobre Solo Colapsível**. Dissertação de Mestrado, Publicação nº G.DM-223/03,

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 154 p, 2013.

CAUDURU, E.L. **Execução de Radiers Protendidos**. Trabalho apresentado no 42º Congresso Brasileiro do Concreto. Fortaleza. 2000.

DÓRIA, Luís Eduardo Santos. **Projeto de estrutura de fundação em concreto do tipo radier**. Monografia (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

FELLENNIUS, B. H. **From Strain Measurements to Load in an Instrumented Pile**. Geotechnical News Magazine. 19(1): 35-38, 2001.

GARCIA, Jean Rodrigo. **Análise experimental e numérica de radiers estaqueados executados em solo da região de Campinas/SP**. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2015.

GUSMÃO, A. D.; GUSMÃO FILHO, J. A.; OLIVEIRA, J. T. R.; MAIA, G. B. **Geotecnia no Nordeste**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2005.

GUSMÃO FILHO, J.A. **Fundações: Do conhecimento geológico a prática da engenharia**. 1. ed. Recife: Ed. Universitária/UFPE, 345 p., 1998.

HACHICH, W., FALCONI, F.F., SAES, J.L., Frota, R.G..Q, Carvalho, C.S., Niyama, S. (1998). **Fundações Teoria e Prática**: Editora PINI – São Paulo, 751p.

JANDA, T., CUNHA, R. P., KUKLIK, P. e ANJOS, G.M. **Three dimensional finite element analysis and back-analysis of CDA standard pile groups and piled rafts founded on tropical soil**. *Soil and Rocks*, v. 32, n. 1, p. 3-18. 2009.

KANY, M., El GENDY, M., El GENDY, A. **ELPLA 8.0: Analysis of slab foundation**. Zindorf. Germany, 2002.

KISHIDA, H.; MEYERHOF, G. G. **Bearing capacity of pile groups under eccentric loads in sands**. Proc. 7th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, v.11. 1965.

MANDOLINI A. **Design of piled rafts foundations: practice and development**. Proc. 4th Int, Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Millpress, Rotterdam, 59-80, 2003.

MANDOLINI, A., RUSSO, G. e VIGGIANI, C. **Piled foundations: Experimental investigations, analysis and design**. State-of-the-Art Rep. Proc. 16th ICSMGE, Osaka, Japan, v. 1, p.177–213, 2005.

MANDOLINI A. **Piled raft concept and its rational use in foundation design**. Department of Civil Engineering, Second University of Napoli, Italy. 2012.

MANDOLINI, A.; DI LAORA, R.; MASCARUCCI, Y. **Rational Design of Piled Raft**. Proc. 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST (57): 45 – 52, 2013.

MARANGON, M. **Parâmetros do solo para cálculo de fundações**. Notas de aula, site: <http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/GF03-Par%C3%A2metros-dos-Solos-para-C%C3%A1lculo-de-Funda%C3%A7%C3%B5es.pdf>, acessado em 15 de janeiro de 2017.

NAJJAR, Y. M. **Pile group foundation: A parametric study**. *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Balkema, Rotterdam, 2373-2378. 1994.

OLIVEIRA, J. T. R. **Notas de aula da disciplina Mecânicas do solo**. Recife, Universidade Católica de Pernambuco, 2013.

OLIVEIRA, M.S., ROCHA, F.M.A., FERREIRA, S.R.M., OLIVEIRA, J.T.R. **Identificação e Classificação de Perfis Típicos de Solos na Planície do Recife**. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, 2016.

PEREIRA, Hugo A. da S. Mendonça; VIANA da FONSECA, António. **Análise comparada do comportamento de ensoleiramentos estaqueados e grupos de estacas correspondentes.** Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Portugal, 2016.

PEZO, O. B.. **Análises numéricas de provas de carga em radier estaqueado utilizando o método dos elementos finitos.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), CTG, Recife, PE, 2013.

PFALTZGRAFF, P. A. dos S. (ccord). **Sistema de Informações Geoambientais da Região Metropolitana do Recife.** Recife: CPRM, 2003.

POULOS, H. G. **Analysis of the settlement of piles groups.** Géotechnique, v.18, n.4, p.449-471, 1968.

POULOS H.G., CARTER J.P., SMALL J.C. **Foundations and retaining structures – Research and practice.** Proc. XV Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Istanbul, 4, 2527-2606, 2001

RANDOLPH, M. F. **Design methods for pile groups and piled rafts.** XIII ICSMFE, New Delhi 5, 61±82, 1994.

SALES, M. M. **Análise do Comportamento de Sapatas Estaqueadas.** Tese de Doutorado, Publicação G.TD/002A, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 229p, 2000.

SMALL, J., POULOS, H. **A method of analysis of piled rafts.** 10th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, Australia: Carillon Conference Management for the Australian Geomechanics Society. 2007.

TERZAGHI, K; PECK, R. B. **Soil Mechanics in Engineering Practice.** 2. Ed. New York: John Willey & Sons. 1967.

SOUZA, F. A., **Utilização de radier estaqueado em obras especiais e edifícios altos.** VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, RJ, 2014.

SOUZA, Fábio Albino de. **LIVRO-RADIER.** Capítulo 1. Disponível em: <<https://www.catarse.me/livro-radier>>. Acesso em: 21 de julho de 2017.

VELOSO, D.; LOPES, F.R. **Fundações: Critérios de Projeto – Fundações Superficiais.** Nova Edição – Ed. Oficina de Textos. São Paulo, 2004.

VIGGIANI, C. MANDOLINI, A. RUSSO, G. **Piles and Pile Foundations.** Editora: Spon Press – New York – USA. 278p. 2012.

## APÊNDICE

### A

Apresentação dos modelos das estruturas analisadas com a distribuição dos pilares e posicionamento das estacas.

Do Modelo 1 ao Modelo 5 são ilustrados os radiers com a forma  $L/B=1$ , dos quais se variou:

- Espessuras do radier (e): 0,3 m, 0,6 m e 0,9 m;
- Quantidade de estacas (n): 0, 5, 9, 20, 29 e 40.
- Diâmetro das estacas ( $\phi$ ): 400mm, 500mm e 600mm.

Do Modelo 6 ao Modelo 10 são ilustrados os radiers com a forma  $L/B=2$ , dos quais variou-se os mesmos parâmetros da forma  $L/B=1$ , alterando apenas:

- Quantidade de estacas (n): 0, 10, 18, 40, 58 e 80.

➤ Modelo 1

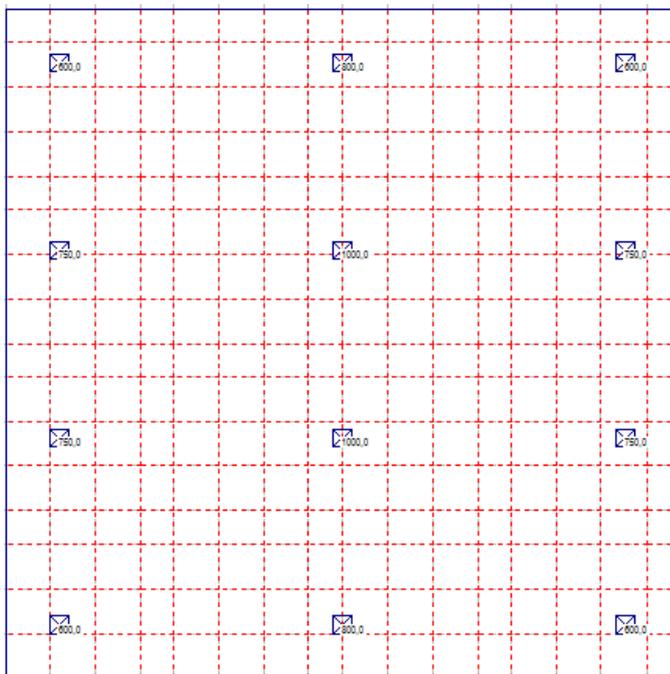
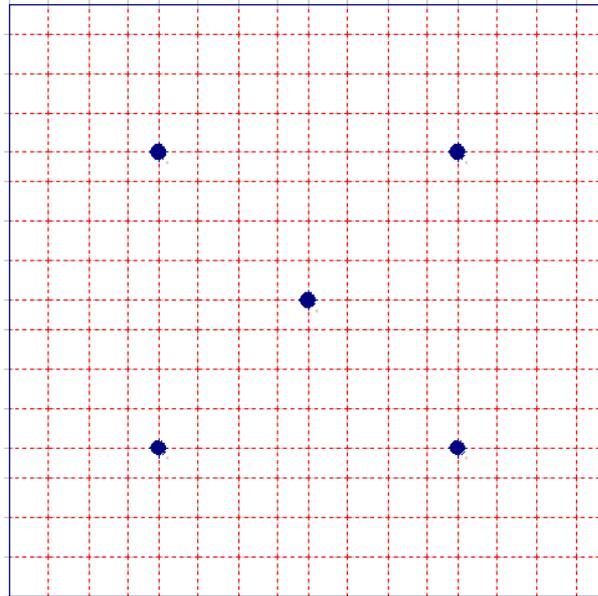


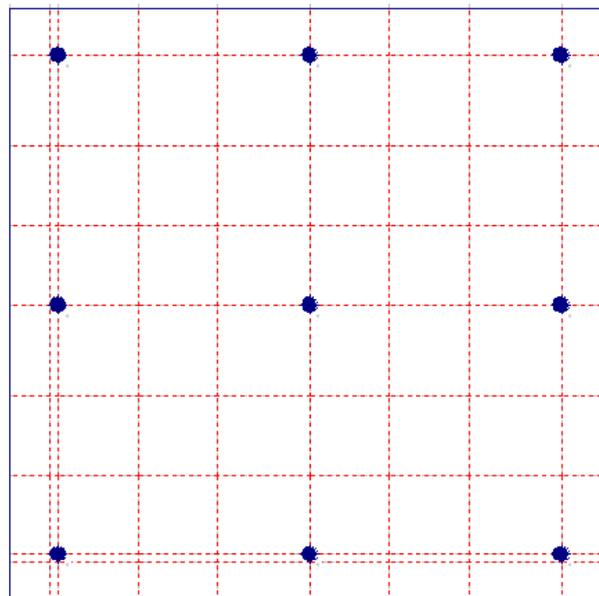
Figura 85. Planta baixa  $L/B=1$ , posicionamento dos pilares, sem estacas.

➤ Modelo 2:



**Figura 86. Planta baixa L/B=1 com 5 estacas.**

➤ Modelo 3:



**Figura 87. Planta baixa L/B=1 com 9 estacas**

➤ Modelo 4:

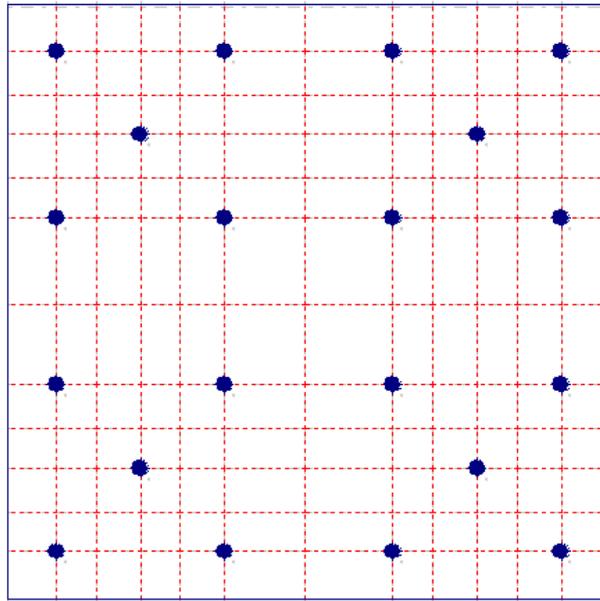


Figura 88. Planta baixa  $L/B=1$  com 20 estacas.

➤ Modelo 5:

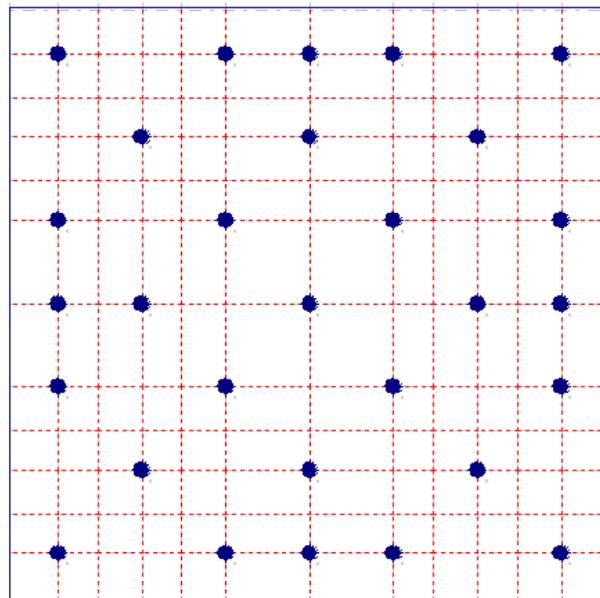


Figura 89. Planta baixa  $L/B=1$  com 29 estacas.

➤ Modelo 6:

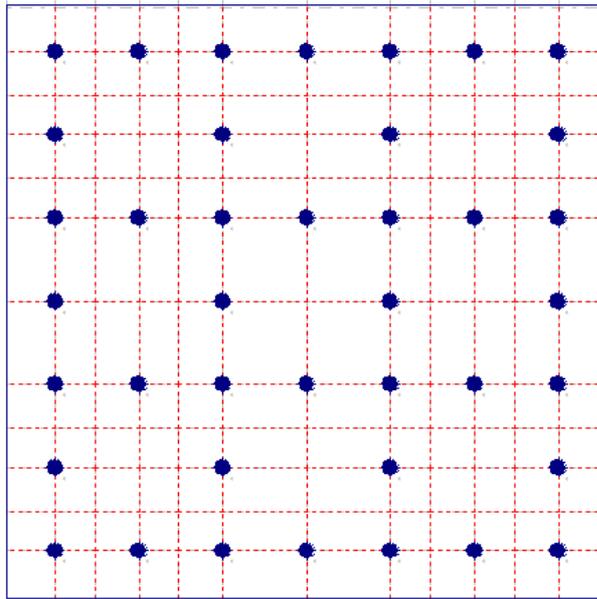


Figura 90. Planta baixa L/B=1 com 40 estacas.

➤ Modelo 7:

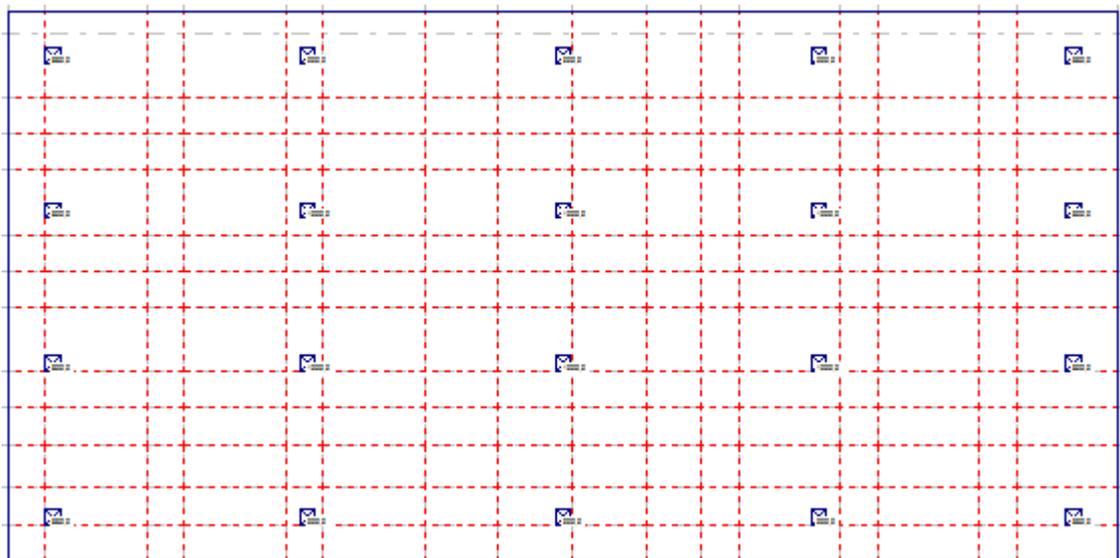


Figura 91. Planta baixa L/B=2, posicionamento dos pilares, sem estacas.

➤ Modelo 8:

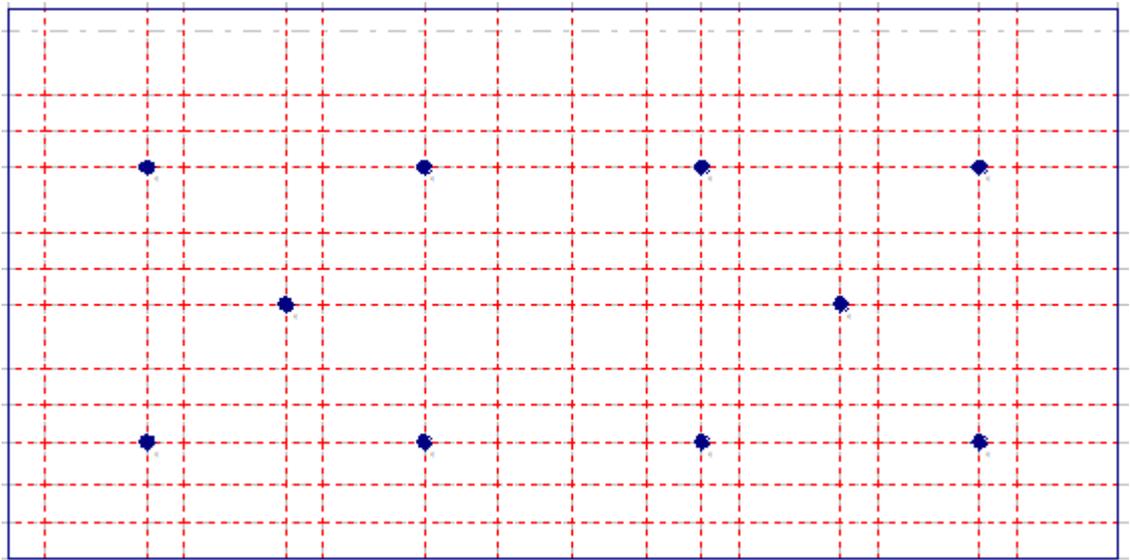


Figura 92. Planta baixa  $L/B=2$  com 10 estacas.

➤ Modelo 9:

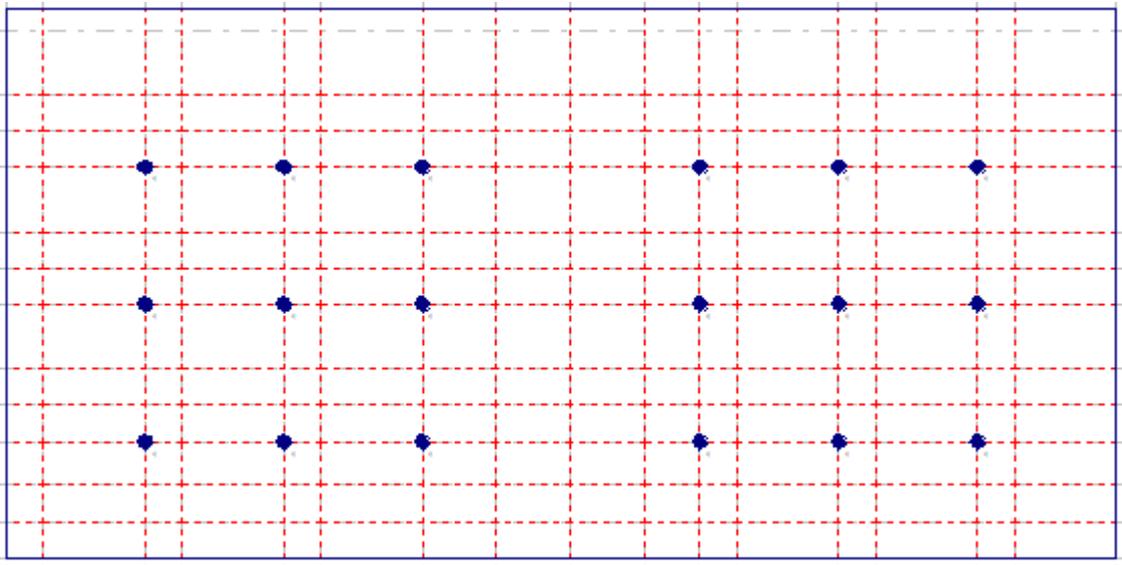


Figura 93. Planta baixa  $L/B=2$  com 18 estacas.

➤ Modelo 10:

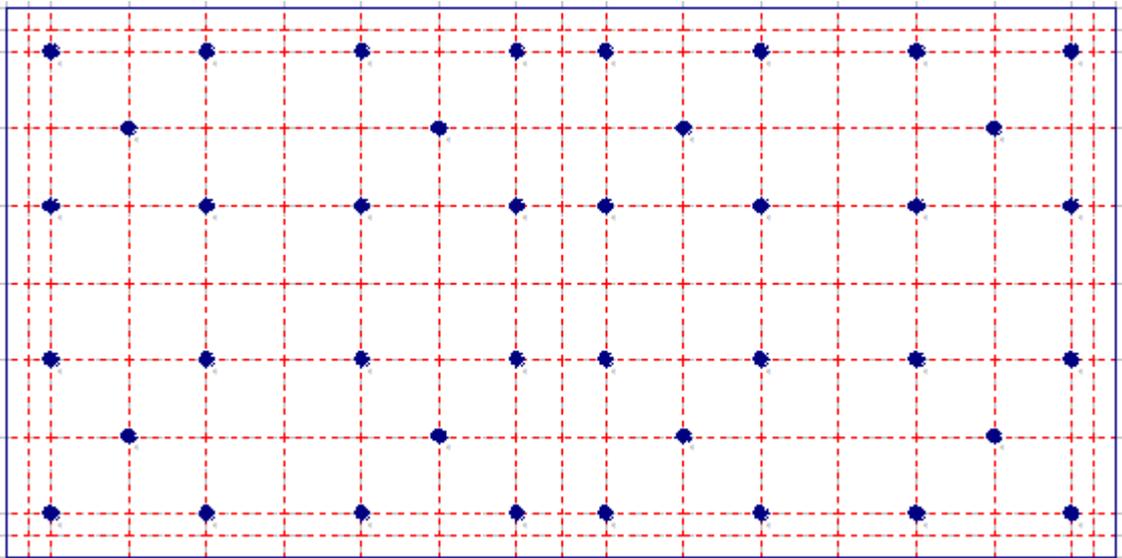


Figura 94. Planta baixa  $L/B=2$  com 40 estacas.

➤ Modelo 11:

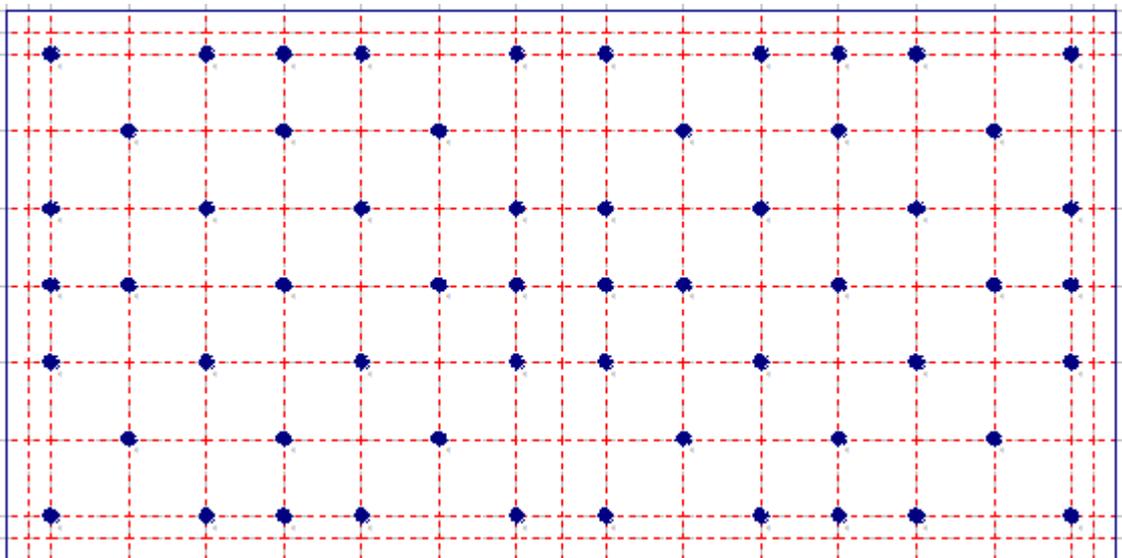


Figura 95. Planta baixa  $L/B=2$  com 58 estacas.

Modelo 12:

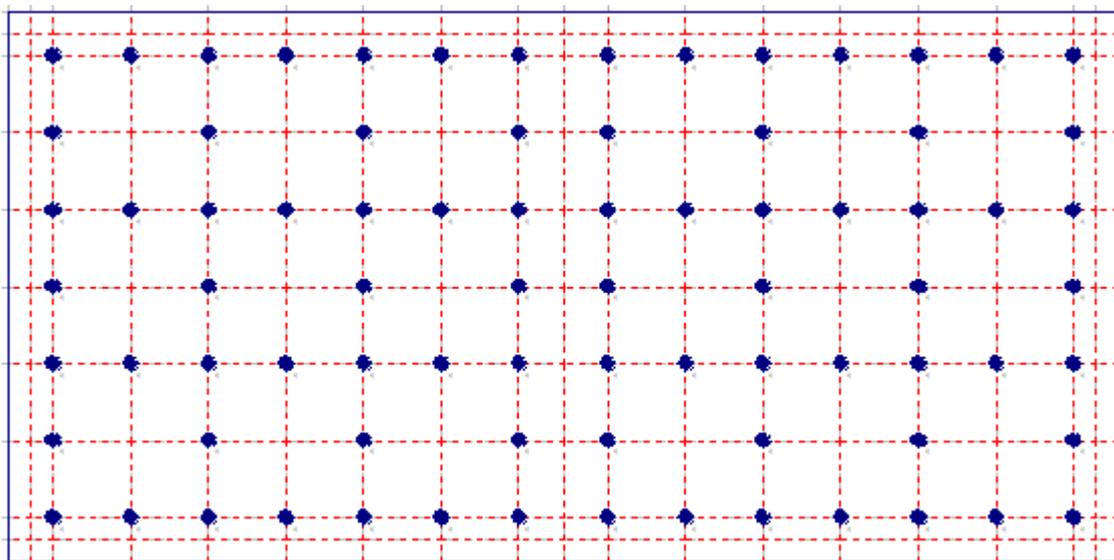


Figura 96. Planta baixa  $L/B=2$  com 80 estacas.

**B**

Tabelas das combinações realizadas no programa computacional ELPLA 10.1 e o valor do recalque médio obtido como resultado de cada combinação.

**Tabela 15. Combinações desenvolvidas para análise.**

COMBINAÇÃO total	COMBINAÇÃO	ESPESSURA DA PLACA [cm]	FORMA DA PLACA	NÚMERO DE ESTACAS	DIÂMETRO DA ESTACA [cm]	MÓDULO DE ELASTICIDADE DO SOLO [Mpa]	RECALQUE MÉDIO [cm]
1	1	30	Q	0	0	12	1,205
2	2	30	Q	0	0	60	0,242
3	3	30	Q	0	0	120	0,121
4	4	30	Q	5	40	12	1,195
5	5	30	Q	5	40	60	0,244
6	6	30	Q	5	40	120	0,122
7	7	30	Q	5	50	12	1,218
8	8	30	Q	5	50	60	0,248
9	9	30	Q	5	50	120	0,125
10	10	30	Q	5	60	12	1,248
11	11	30	Q	5	60	60	0,254
12	12	30	Q	5	60	120	0,128
13	13	30	Q	9	40	12	1,014
14	14	30	Q	9	40	60	0,208
15	15	30	Q	9	40	120	0,106
16	16	30	Q	9	50	12	1,049
17	17	30	Q	9	50	60	0,215
18	18	30	Q	9	50	120	0,109
19	19	30	Q	9	60	12	1,097
20	20	30	Q	9	60	60	0,224
21	21	30	Q	9	60	120	0,113
22	22	30	Q	20	40	12	1,088
23	23	30	Q	20	40	60	0,222
24	24	30	Q	20	40	120	0,112
25	25	30	Q	20	50	12	1,178
26	26	30	Q	20	50	60	0,239
27	27	30	Q	20	50	120	0,121
28	28	30	Q	20	60	12	1,291
29	29	30	Q	20	60	60	0,262
30	30	30	Q	20	60	120	0,132
31	31	30	Q	29	40	12	1,147
32	32	30	Q	29	40	60	0,234
33	33	30	Q	29	40	120	0,119
34	34	30	Q	29	50	12	1,281
35	35	30	Q	29	50	60	0,260

COMBINAÇÃO total	COMBINAÇÃO	ESPESSURA DA PLACA [cm]	FORMA DA PLACA	NÚMERO DE ESTACAS	DIÂMETRO DA ESTACA [cm]	MÓDULO DE ELASTICIDADE DO SOLO [Mpa]	RECALQUE MÉDIO [cm]
36	36	30	Q	29	50	120	0,131
37	37	30	Q	29	60	12	1,449
38	38	30	Q	29	60	60	0,293
39	39	30	Q	29	60	120	0,148
40	40	30	Q	40	40	12	1,224
41	41	30	Q	40	40	60	0,249
42	42	30	Q	40	40	120	0,127
43	43	30	Q	40	50	12	1,412
44	44	30	Q	40	50	60	0,287
45	45	30	Q	40	50	120	0,145
46	46	30	Q	40	60	12	1,642
47	47	30	Q	40	60	60	0,332
48	48	30	Q	40	60	120	0,167
49	49	30	R	0	0	12	1,784
50	50	30	R	0	0	60	0,358
51	51	30	R	0	0	120	0,179
52	52	30	R	10	40	12	1,786
53	53	30	R	10	40	60	0,362
54	54	30	R	10	40	120	0,181
55	55	30	R	10	50	12	1,820
56	56	30	R	10	50	60	0,369
57	57	30	R	10	50	120	0,186
58	58	30	R	10	60	12	1,864
59	59	30	R	10	60	60	0,377
60	60	30	R	10	60	120	0,190
61	61	30	R	18	40	12	1,809
62	62	30	R	18	40	60	0,367
63	63	30	R	18	40	120	0,184
64	64	30	R	18	50	12	1,873
65	65	30	R	18	50	60	0,379
66	66	30	R	18	50	120	0,191
67	67	30	R	18	60	12	1,955
68	68	30	R	18	60	60	0,395
69	69	30	R	18	60	120	0,199
70	70	30	R	40	40	12	1,545
71	71	30	R	40	40	60	0,314
72	72	30	R	40	40	120	0,159
73	73	30	R	40	50	12	1,678
74	74	30	R	40	50	60	0,340
75	75	30	R	40	50	120	0,171
76	76	30	R	40	60	12	1,843
77	77	30	R	40	60	60	0,373

COMBINAÇÃO total	COMBINAÇÃO	ESPESSURA DA PLACA [cm]	FORMA DA PLACA	NÚMERO DE ESTACAS	DIÂMETRO DA ESTACA [cm]	MÓDULO DE ELASTICIDADE DO SOLO [Mpa]	RECALQUE MÉDIO [cm]
78	78	30	R	40	60	120	0,188
79	79	30	R	58	40	12	1,639
80	80	30	R	58	40	60	0,333
81	81	30	R	58	40	120	0,168
82	82	30	R	58	50	12	1,834
83	83	30	R	58	50	60	0,371
84	84	30	R	58	50	120	0,187
85	85	30	R	58	60	12	2,076
86	86	30	R	58	60	60	0,418
87	87	30	R	58	60	120	0,211
88	88	30	R	80	40	12	1,758
89	89	30	R	80	40	60	0,358
90	90	30	R	80	40	120	0,181
91	91	30	R	80	50	12	2,031
92	92	30	R	80	50	60	0,411
93	93	30	R	80	50	120	0,207
94	94	30	R	80	60	12	2,364
95	95	30	R	80	60	60	0,477
96	96	30	R	80	60	120	0,239
97	1	60	Q	0	0	12	1,625
98	2	60	Q	0	0	60	0,330
99	3	60	Q	0	0	120	0,166
100	4	60	Q	5	40	12	1,589
101	5	60	Q	5	40	60	0,325
102	6	60	Q	5	40	120	0,164
103	7	60	Q	5	50	12	1,609
104	8	60	Q	5	50	60	0,329
105	9	60	Q	5	50	120	0,166
106	10	60	Q	5	60	12	1,635
107	11	60	Q	5	60	60	0,334
108	12	60	Q	5	60	120	0,169
109	13	60	Q	9	40	12	1,377
110	14	60	Q	9	40	60	0,285
111	15	60	Q	9	40	120	0,145
112	16	60	Q	9	50	12	1,413
113	17	60	Q	9	50	60	0,290
114	18	60	Q	9	50	120	0,148
115	19	60	Q	9	60	12	1,454
116	20	60	Q	9	60	60	0,299
117	21	60	Q	9	60	120	0,151
118	22	60	Q	20	40	12	1,437
119	23	60	Q	20	40	60	0,298

COMBINAÇÃO total	COMBINAÇÃO	ESPESSURA DA PLACA [cm]	FORMA DA PLACA	NÚMERO DE ESTACAS	DIÂMETRO DA ESTACA [cm]	MÓDULO DE ELASTICIDADE DO SOLO [Mpa]	RECALQUE MÉDIO [cm]
120	24	60	Q	20	40	120	0,152
121	25	60	Q	20	50	12	1,521
122	26	60	Q	20	50	60	0,313
123	27	60	Q	20	50	120	0,160
124	28	60	Q	20	60	12	1,629
125	29	60	Q	20	60	60	0,335
126	30	60	Q	20	60	120	0,170
127	31	60	Q	29	40	12	1,490
128	32	60	Q	29	40	60	0,309
129	33	60	Q	29	40	120	0,157
130	34	60	Q	29	50	12	1,619
131	35	60	Q	29	50	60	0,332
132	36	60	Q	29	50	120	0,169
133	37	60	Q	29	60	12	1,779
134	38	60	Q	29	60	60	0,363
135	39	60	Q	29	60	120	0,184
136	40	60	Q	40	40	12	1,557
137	41	60	Q	40	40	60	0,320
138	42	60	Q	40	40	120	0,163
139	43	60	Q	40	50	12	1,737
140	44	60	Q	40	50	60	0,357
141	45	60	Q	40	50	120	0,181
142	46	60	Q	40	60	12	1,961
143	47	60	Q	40	60	60	0,401
144	48	60	Q	40	60	120	0,203
145	49	60	R	0	0	12	2,381
146	50	60	R	0	0	60	0,482
147	51	60	R	0	0	120	0,242
148	52	60	R	10	40	12	2,350
149	53	60	R	10	40	60	0,479
150	54	60	R	10	40	120	0,242
151	55	60	R	10	50	12	2,380
152	56	60	R	10	50	60	0,484
153	57	60	R	10	50	120	0,245
154	58	60	R	10	60	12	2,420
155	59	60	R	10	60	60	0,493
156	60	60	R	10	60	120	0,248
157	61	60	R	18	40	12	2,364
158	62	60	R	18	40	60	0,482
159	63	60	R	18	40	120	0,243
160	64	60	R	18	50	12	2,424
161	65	60	R	18	50	60	0,493

COMBINAÇÃO total	COMBINAÇÃO	ESPESSURA DA PLACA [cm]	FORMA DA PLACA	NÚMERO DE ESTACAS	DIÂMETRO DA ESTACA [cm]	MÓDULO DE ELASTICIDADE DO SOLO [Mpa]	RECALQUE MÉDIO [cm]
162	66	60	R	18	50	120	0,249
163	67	60	R	18	60	12	2,501
164	68	60	R	18	60	60	0,508
165	69	60	R	18	60	120	0,256
166	70	60	R	40	40	12	2,061
167	71	60	R	40	40	60	0,420
168	72	60	R	40	40	120	0,213
169	73	60	R	40	50	12	2,188
170	74	60	R	40	50	60	0,445
171	75	60	R	40	50	120	0,225
172	76	60	R	40	60	12	2,349
173	77	60	R	40	60	60	0,476
174	78	60	R	40	60	120	0,241
175	79	60	R	58	40	12	2,150
176	80	60	R	58	40	60	0,437
177	81	60	R	58	40	120	0,222
178	82	60	R	58	50	12	2,340
179	83	60	R	58	50	60	0,474
180	84	60	R	58	50	120	0,241
181	85	60	R	58	60	12	2,576
182	86	60	R	58	60	60	0,522
183	87	60	R	58	60	120	0,264
184	88	60	R	80	40	12	2,260
185	89	60	R	80	40	60	0,460
186	90	60	R	80	40	120	0,234
187	91	60	R	80	50	12	2,524
188	92	60	R	80	50	60	0,513
189	93	60	R	80	50	120	0,259
190	94	60	R	80	60	12	2,854
191	95	60	R	80	60	60	0,577
192	96	60	R	80	60	120	0,291
193	1	90	Q	0	0	12	2,033
194	2	90	Q	0	0	60	0,415
195	3	90	Q	0	0	120	0,209
196	4	90	Q	5	40	12	1,979
197	5	90	Q	5	40	60	0,406
198	6	90	Q	5	40	120	0,205
199	7	90	Q	5	50	12	1,995
200	8	90	Q	5	50	60	0,408
201	9	90	Q	5	50	120	0,207
202	10	90	Q	5	60	12	2,017
203	11	90	Q	5	60	60	0,413

COMBINAÇÃO total	COMBINAÇÃO	ESPESSURA DA PLACA [cm]	FORMA DA PLACA	NÚMERO DE ESTACAS	DIÂMETRO DA ESTACA [cm]	MÓDULO DE ELASTICIDADE DO SOLO [Mpa]	RECALQUE MÉDIO [cm]
204	12	90	Q	5	60	120	0,209
205	13	90	Q	9	40	12	1,716
206	14	90	Q	9	40	60	0,361
207	15	90	Q	9	40	120	0,184
208	16	90	Q	9	50	12	1,754
209	17	90	Q	9	50	60	0,366
210	18	90	Q	9	50	120	0,186
211	19	90	Q	9	60	12	1,779
212	20	90	Q	9	60	60	0,370
213	21	90	Q	9	60	120	0,189
214	22	90	Q	20	40	12	1,772
215	23	90	Q	20	40	60	0,370
216	24	90	Q	20	40	120	0,189
217	25	90	Q	20	50	12	1,850
218	26	90	Q	20	50	60	0,384
219	27	90	Q	20	50	120	0,196
220	28	90	Q	20	60	12	1,951
221	29	90	Q	20	60	60	0,404
222	30	90	Q	20	60	120	0,206
223	31	90	Q	29	40	12	1,818
224	32	90	Q	29	40	60	0,378
225	33	90	Q	29	40	120	0,193
226	34	90	Q	29	50	12	1,938
227	35	90	Q	29	50	60	0,400
228	36	90	Q	29	50	120	0,204
229	37	90	Q	29	60	12	2,092
230	38	90	Q	29	60	60	0,430
231	39	90	Q	29	60	120	0,219
232	40	90	Q	40	40	12	1,875
233	41	90	Q	40	40	60	0,390
234	42	90	Q	40	40	120	0,199
235	43	90	Q	40	50	12	2,047
236	44	90	Q	40	50	60	0,422
237	45	90	Q	40	50	120	0,215
238	46	90	Q	40	60	12	2,262
239	47	90	Q	40	60	60	0,465
240	48	90	Q	40	60	120	0,237
241	49	90	R	0	40	12	2,964
242	50	90	R	0	40	60	0,602
243	51	90	R	0	40	120	0,303
244	52	90	R	10	40	12	2,907
245	53	90	R	10	40	60	0,594

COMBINAÇÃO total	COMBINAÇÃO	ESPESSURA DA PLACA [cm]	FORMA DA PLACA	NÚMERO DE ESTACAS	DIÂMETRO DA ESTACA [cm]	MÓDULO DE ELASTICIDADE DO SOLO [Mpa]	RECALQUE MÉDIO [cm]
246	54	90	R	10	40	120	0,300
247	55	90	R	10	50	12	2,930
248	56	90	R	10	50	60	0,599
249	57	90	R	10	50	120	0,303
250	58	90	R	10	60	12	2,969
251	59	90	R	10	60	60	0,605
252	60	90	R	10	60	120	0,306
253	61	90	R	18	40	12	2,910
254	62	90	R	18	40	60	0,595
255	63	90	R	18	40	120	0,301
256	64	90	R	18	50	12	2,965
257	65	90	R	18	50	60	0,605
258	66	90	R	18	50	120	0,305
259	67	90	R	18	60	12	3,035
260	68	90	R	18	60	60	0,618
261	69	90	R	18	60	120	0,312
262	70	90	R	40	40	12	2,571
263	71	90	R	40	40	60	0,526
264	72	90	R	40	40	120	0,265
265	73	90	R	40	50	12	2,692
266	74	90	R	40	50	60	0,548
267	75	90	R	40	50	120	0,277
268	76	90	R	40	60	12	2,847
269	77	90	R	40	60	60	0,578
270	78	90	R	40	60	120	0,292
271	79	90	R	58	40	12	2,651
272	80	90	R	58	40	60	0,541
273	81	90	R	58	40	120	0,275
274	82	90	R	58	50	12	2,830
275	83	90	R	58	50	60	0,576
276	84	90	R	58	50	120	0,292
277	85	90	R	58	60	12	3,065
278	86	90	R	58	60	60	0,622
279	87	90	R	58	60	120	0,314
280	88	90	R	80	40	12	2,750
281	89	90	R	80	40	60	0,561
282	90	90	R	80	40	120	0,285
283	91	90	R	80	50	12	3,006
284	92	90	R	80	50	60	0,613
285	93	90	R	80	50	120	0,310
286	94	90	R	80	60	12	3,335
287	95	90	R	80	60	60	0,675

COMBINAÇÃO total	COMBINAÇÃO	ESPESSURA DA PLACA [cm]	FORMA DA PLACA	NÚMERO DE ESTACAS	DIÂMETRO DA ESTACA [cm]	MÓDULO DE ELASTICIDADE DO SOLO [Mpa]	RECALQUE MÉDIO [cm]
288	96	90	R	80	60	120	0,341

## C

Tabelas das combinações realizadas para obtenção das áreas relativas das estacas em relação à área total do radier, para as combinações com 12MPa de módulo de elasticidade do solo (M.E.), diâmetros das estacas  $\phi 40$ ,  $\phi 50$  e  $\phi 60$  (cm), espessuras de 0,3 m, 0,6 m e 0,9 m e para as formas  $L/B=1$  e  $L/B=2$ .

**Tabela 16. Área relativa das estacas versus recalque médio percentual para  $L/B=1$ , M.E.=12MPa e  $e=0,3$  m.**

L/B=1						DIMENSÃO (m)		15		15		ÁREA TOTAL (m <sup>2</sup> )			225
M.E. [Mpa]	E.R. [cm]	N.e.	$\phi 40$	$\phi 50$	$\phi 60$	Área das estacas $\phi 40$ (m <sup>2</sup> )	Área das estacas $\phi 50$ (m <sup>2</sup> )	Área das estacas $\phi 60$ (m <sup>2</sup> )	Área relativa $\phi 40$ (%)	Área relativa $\phi 50$ (%)	Área relativa $\phi 60$ (%)	L/B=1, $\phi 40$	L/B=1, $\phi 50$	L/B=1, $\phi 60$	
			0,4	0,5	0,6							RECALQUE MÉD. PERCENTUAL			
12	30	0	1,20	1,20	1,20	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,080	0,080	0,080	
		5	1,19	1,22	1,25	0,6	1,0	1,4	0,28	0,44	0,63	0,080	0,081	0,083	
		9	1,01	1,05	1,10	1,1	1,8	2,5	0,50	0,79	1,13	0,068	0,070	0,073	
		20	1,09	1,18	1,29	2,5	3,9	5,7	1,12	1,75	2,51	0,073	0,079	0,086	
		29	1,15	1,28	1,45	3,6	5,7	8,2	1,62	2,53	3,64	0,076	0,085	0,097	
		40	1,22	1,41	1,64	5,0	7,9	11,3	2,23	3,49	5,03	0,082	0,094	0,109	

**Tabela 17. Área relativa das estacas versus recalque médio percentual para  $L/B=1$ , M.E.=12MPa e  $e=0,6$  m.**

L/B=1						DIMENSÃO (m)		15		15		ÁREA TOTAL (m <sup>2</sup> )			225
M.E. [Mpa]	E.R. [cm]	N.e.	$\phi 40$	$\phi 50$	$\phi 60$	Área das estacas $\phi 40$ (m <sup>2</sup> )	Área das estacas $\phi 50$ (m <sup>2</sup> )	Área das estacas $\phi 60$ (m <sup>2</sup> )	Área relativa $\phi 40$ (%)	Área relativa $\phi 50$ (%)	Área relativa $\phi 60$ (%)	L/B=1, $\phi 40$	L/B=1, $\phi 50$	L/B=1, $\phi 60$	
			0,4	0,5	0,6							RECALQUE MÉD. PERCENTUAL			
12	60	0	1,62	1,62	1,62	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,108	0,108	0,108	
		5	1,59	1,61	1,63	0,6	1,0	1,4	0,28	0,44	0,63	0,106	0,107	0,109	
		9	1,38	1,41	1,45	1,1	1,8	2,5	0,50	0,79	1,13	0,092	0,094	0,097	
		20	1,44	1,52	1,63	2,5	3,9	5,7	1,12	1,75	2,51	0,096	0,101	0,109	
		29	1,49	1,62	1,78	3,6	5,7	8,2	1,62	2,53	3,64	0,099	0,108	0,119	
		40	1,56	1,74	1,96	5,0	7,9	11,3	2,23	3,49	5,03	0,104	0,116	0,131	

**Tabela 18. Área relativa das estacas versus recalque médio percentual para L/B=1, M.E.=12MPa e e=0,9 m.**

L/B=1						DIMENSÃO (m)		15		15		ÁREA TOTAL (m <sup>2</sup> )			225
M.E. [Mpa]	E.R. [cm]	N.e.	φ40	φ50	φ60	Área das estacas φ40 (m <sup>2</sup> )	Área das estacas φ50 (m <sup>2</sup> )	Área das estacas φ60 (m <sup>2</sup> )	Área relativa φ40 (%)	Área relativa φ50 (%)	Área relativa φ60 (%)	L/B=1, φ40	L/B=1, φ50	L/B=1, φ60	
			0,4	0,5	0,6										RECALQUE MÉD. PERCENTUAL
12	90	0	2,03	2,03	2,03	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,136	0,136	0,136	
		5	1,98	2,00	2,02	0,6	1,0	1,4	0,28	0,44	0,63	0,132	0,133	0,134	
		9	1,72	1,75	1,78	1,1	1,8	2,5	0,50	0,79	1,13	0,114	0,117	0,119	
		20	1,77	1,85	1,95	2,5	3,9	5,7	1,12	1,75	2,51	0,118	0,123	0,130	
		29	1,82	1,94	2,09	3,6	5,7	8,2	1,62	2,53	3,64	0,121	0,129	0,139	
		40	1,87	2,05	2,26	5,0	7,9	11,3	2,23	3,49	5,03	0,125	0,136	0,151	

**Tabela 19. Área relativa das estacas versus recalque médio percentual para L/B=2, M.E.=12MPa e e=0,3 m.**

L/B=2						DIMENSÃO (m)		15		30		ÁREA TOTAL (m <sup>2</sup> )			450
M.E. [Mpa]	E.R. [cm]	N.e.	φ40	φ50	φ60	Área das estacas φ40 (m <sup>2</sup> )	Área das estacas φ50 (m <sup>2</sup> )	Área das estacas φ60 (m <sup>2</sup> )	Área relativa φ40 (%)	Área relativa φ50 (%)	Área relativa φ60 (%)	L/B=1, φ40	L/B=1, φ50	L/B=1, φ60	
			0,4	0,5	0,6										RECALQUE MÉD. PERCENTUAL
12	30	0	1,78	1,78	1,78	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,119	0,119	0,119	
		10	1,79	1,82	1,86	1,3	2,0	2,8	0,28	0,44	0,63	0,119	0,121	0,124	
		18	1,81	1,87	1,96	2,3	3,5	5,1	0,50	0,79	1,13	0,121	0,125	0,130	
		40	1,55	1,68	1,84	5,0	7,9	11,3	1,12	1,75	2,51	0,103	0,112	0,123	
		58	1,64	1,83	2,08	7,3	11,4	16,4	1,62	2,53	3,64	0,109	0,122	0,138	
		80	1,76	2,03	2,36	10,1	15,7	22,6	2,23	3,49	5,03	0,117	0,135	0,158	

**Tabela 20. Área relativa das estacas versus recalque médio percentual para L/B=2, M.E.=12MPa e e=0,6 m.**

L/B=2						DIMENSÃO (m)		15		30		ÁREA TOTAL (m <sup>2</sup> )			450
M.E. [Mpa]	E.R. [cm]	N.e.	φ40	φ50	φ60	Área das estacas φ40 (m <sup>2</sup> )	Área das estacas φ50 (m <sup>2</sup> )	Área das estacas φ60 (m <sup>2</sup> )	Área relativa φ40 (%)	Área relativa φ50 (%)	Área relativa φ60 (%)	L/B=1, φ40	L/B=1, φ50	L/B=1, φ60	
			0,4	0,5	0,6										RECALQUE MÉD. PERCENTUAL
12	60	0	2,38	2,38	2,38	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,159	0,159	0,159	
		10	2,35	2,38	2,42	1,3	2,0	2,8	0,28	0,44	0,63	0,157	0,159	0,161	
		18	2,36	2,42	2,50	2,3	3,5	5,1	0,50	0,79	1,13	0,158	0,162	0,167	
		40	2,06	2,19	2,35	5,0	7,9	11,3	1,12	1,75	2,51	0,137	0,146	0,157	
		58	2,15	2,34	2,58	7,3	11,4	16,4	1,62	2,53	3,64	0,143	0,156	0,172	
		80	2,26	2,52	2,85	10,1	15,7	22,6	2,23	3,49	5,03	0,151	0,168	0,190	

**Tabela 21. Área relativa das estacas versus recalque médio percentual para L/B=2, M.E.=12MPa e e=0,9 m.**

L/B=2						DIMENSÃO (m)		15		30		ÁREA TOTAL (m <sup>2</sup> )		
M.E. [Mpa]	E.R. [cm]	N.e.	φ40	φ50	φ60	Área das estacas φ40 (m <sup>2</sup> )	Área das estacas φ50 (m <sup>2</sup> )	Área das estacas φ60 (m <sup>2</sup> )	Área relativa φ40 (%)	Área relativa φ50 (%)	Área relativa φ60 (%)	L/B=1, φ40	L/B=1, φ50	L/B=1, φ60
			0,4	0,5	0,6							RECALQUE MÉD. PERCENTUAL		
12	90	0	2,96	2,96	2,96	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,198	0,198	0,198
		10	2,91	2,93	2,97	1,3	2,0	2,8	0,28	0,44	0,63	0,194	0,195	0,198
		18	2,91	2,96	3,04	2,3	3,5	5,1	0,50	0,79	1,13	0,194	0,198	0,202
		40	2,57	2,69	2,85	5,0	7,9	11,3	1,12	1,75	2,51	0,171	0,179	0,190
		58	2,65	2,83	3,06	7,3	11,4	16,4	1,62	2,53	3,64	0,177	0,189	0,204
		80	2,75	3,01	3,34	10,1	15,7	22,6	2,23	3,49	5,03	0,183	0,200	0,222

## D

Tabelas das combinações realizadas para obtenção dos valores de coeficientes de variação, para as combinações com 12MPa de módulo de elasticidade do solo (M.E.), diâmetros das estacas  $\phi 40$ ,  $\phi 50$  e  $\phi 60$  (cm), espessuras de 0,3 m, 0,6 m e 0,9 m e para as formas  $L/B=1$  e  $L/B=2$ .

**Tabela 22. Coeficiente de variação percentual para  $L/B=1$ , M.E.=12MPa, e=0,3 m e  $\phi 40$ .**

Com b.	Form a	Espes	M. E	$\phi$ est.	Nº est.	Rec máx (cm)	Recalq méd (cm)	Recal mín (cm)	DP (cm)	Coef var (%)
1	L/B=1	e=0,3 m	12	40	0	1,41	1,205	0,86	0,12	9,9585
7					5	1,36	1,195	0,9	0,098	8,2008
16					9	1,28	1,014	0,77	0,127	12,5247
25					20	1,35	1,088	0,85	0,111	10,2022
34					29	1,4	1,147	0,9	0,11	9,5902
43					40	1,49	1,224	0,97	0,117	9,5588

**Tabela 23. Coeficiente de variação percentual para  $L/B=1$ , M.E.=12MPa, e=0,6 m e  $\phi 40$ .**

Com b.	Form a	Espes	M. E	$\phi$ est.	Nº est.	Rec máx (cm)	Recalq méd (cm)	Recal mín (cm)	DP (cm)	Coef var (%)
1	L/B=1	e=0,6 m	12	40	0	1,8	1,625	1,29	0,106	6,5231
7					5	1,72	1,589	1,31	0,084	5,2863
16					9	1,62	1,377	1,14	0,121	8,7872
25					20	1,65	1,437	1,2	0,104	7,2373
34					29	1,7	1,49	1,26	0,101	6,7785
43					40	1,78	1,557	1,31	0,109	7,0006

**Tabela 24. Coeficiente de variação percentual para  $L/B=1$ , M.E.=12MPa, e=0,9 m e  $\phi 40$ .**

Com b.	Form a	Espes	M. E	$\phi$ est.	Nº est.	Rec máx (cm)	Recalq méd (cm)	Recal mín (cm)	DP (cm)	Coef var (%)
1	L/B=1	e=0,9 m	12	40	0	2,14	2,033	1,79	0,071	3,4924
7					5	2,07	1,979	1,78	0,058	2,9308
16					9	1,88	1,716	1,53	0,086	5,0117
25					20	1,92	1,772	1,6	0,072	4,0632
34					29	1,96	1,818	1,95	0,07	3,8504
43					40	2,03	1,875	1,07	0,075	4,0000

**Tabela 25. Coeficiente de variação percentual para L/B=2, M.E.=12MPa, e=0,3 m e  $\phi$ 40.**

Com b.	Form a	Espes	M. E	$\phi$ est.	Nº est.	Rec máx (cm)	Recalq méd (cm)	Recal mín (cm)	DP (cm)	Coef var (%)
49	L/B=2	e=0,3 m	12	40	0	2,04	1,784	1,21	0,177	9,9215
55					10	2,06	1,786	1,26	0,164	9,1825
64					18	2,1	1,809	1,3	0,158	8,7341
73					40	1,92	1,545	1,23	0,184	11,9094
82					58	2,03	1,639	1,31	0,192	11,7145
91					80	2,19	1,758	1,4	0,211	12,0023

**Tabela 26. Coeficiente de variação percentual para L/B=2, M.E.=12MPa, e=0,6 m e  $\phi$ 40.**

Com b.	Form a	Espes	M. E	$\phi$ est.	Nº est.	Rec máx (cm)	Recalq méd (cm)	Recal mín (cm)	DP (cm)	Coef var (%)
49	L/B=2	e=0,6 m	12	40	0	2,68	2,381	1,67	0,208	8,7358
55					10	2,63	2,35	1,72	0,187	7,9574
64					18	2,65	2,364	1,76	0,181	7,6565
73					40	2,47	2,061	1,67	0,222	10,7715
82					58	2,57	2,15	1,75	0,23	10,6977
91					80	2,72	2,26	1,83	0,248	10,9735

**Tabela 27. Coeficiente de variação percentual para L/B=2, M.E.=12MPa, e=0,9 m e  $\phi$ 40.**

Com b.	Form a	Espes	M. E	$\phi$ est.	Nº est.	Rec máx (cm)	Recalq méd (cm)	Recal mín (cm)	DP (cm)	Coef var (%)
1	L/B=2	e=0,9 m	12	40	0	1,41	1,205	0,86	0,12	9,9585
7					5	1,36	1,195	0,9	0,098	8,2008
16					9	1,28	1,014	0,77	0,127	12,5247
25					20	1,35	1,088	0,85	0,111	10,2022
34					29	1,4	1,147	0,9	0,11	9,5902
43					40	1,49	1,224	0,97	0,117	9,5588

**Tabela 28. Coeficiente de variação percentual para L/B=1, M.E.=12MPa, e=0,3 m e  $\phi$ 50.**

Comb .	Forma	Espes	M.E	$\phi$ est.	Nº est.	Rec máx (cm)	Recalq méd (cm)	Recal mín (cm)	DP (cm)
1	L/B=1	e=0,3 m	12	50	0	1,41	1,205	0,86	0,12
7					5	1,38	1,218	0,92	0,1
16					9	1,31	1,049	0,8	0,129
25					20	1,46	1,178	0,92	0,12
34					29	1,56	1,281	1	0,125
43					40	1,72	1,412	1,11	0,137

**Tabela 29. Coeficiente de variação percentual para L/B=1, M.E.=12MPa, e=0,6 m e  $\phi$ 50.**

Com b.	Form a	Espes.	M E	$\phi$ est.	Nº est.	Rec máx (cm)	Rec méd (cm)	Rec mín (cm)	DP (cm)	Coef var (%)
1	L/B=1	e=0,6 m	12	50	0	1,8	1,625	1,29	0,106	6,52308
7					5	1,74	1,609	1,33	0,085	5,28278
16					9	1,66	1,413	1,17	0,124	8,77565
25					20	1,75	1,521	1,27	0,109	7,16634
34					29	1,85	1,619	1,33	0,112	6,91785
43					40	1,99	1,737	1,46	0,123	7,08117

**Tabela 30. Coeficiente de variação percentual para L/B=1, M.E.=12MPa, e=0,9 m e  $\phi$ 50.**

Com b.	Form a	Espes	M. E	$\phi$ est.	Nº est.	Rec máx (cm)	Recalq méd (cm)	Recal mín (cm)	DP (cm)	Coef var (%)
1	L/B=1	e=0,9 m	12	50	0	2,14	2,033	1,79	0,071	3,49238
7					5	2,08	1,995	1,79	0,058	2,90727
16					9	1,93	1,754	1,56	0,089	5,07412
25					20	2	1,85	1,67	0,076	4,10811
34					29	2,09	1,938	1,76	0,076	3,92157
43					40	2,22	2,047	1,85	0,085	4,15242

**Tabela 31. Coeficiente de variação percentual para L/B=2, M.E.=12MPa, e=0,3 m e  $\phi$ 50.**

Com b.	Form a	Espes	M. E	$\phi$ est.	Nº est.	Rec máx (cm)	Recalq méd (cm)	Recal mín (cm)	DP (cm)	Coef var (%)
49	L/B=2	e=0,3 m	12	50	0	2,04	1,784	1,21	0,177	9,92152
55					10	2,1	1,82	1,29	0,167	9,17582
64					18	2,18	1,87	1,34	0,165	8,82353
73					40	2,09	1,678	1,33	0,201	11,97855
82					58	2,29	1,834	1,45	0,222	12,10469
91					80	2,54	2,031	1,6	0,251	12,35844

**Tabela 32. Coeficiente de variação percentual para L/B=2, M.E.=12MPa, e=0,6 m e  $\phi$ 50.**

Com b.	Form a	Espes	M. E	$\phi$ est.	Nº est.	Rec máx (cm)	Recalq méd (cm)	Recal mín (cm)	DP (cm)	Coef var (%)
49	L/B=2	e=0,6 m	12	50	0	2,68	2,381	1,67	0,208	8,73583
55					10	2,67	2,3	1,75	0,19	8,26087
64					18	2,72	2,424	1,81	0,186	7,67327
73					40	2,63	2,188	1,77	0,239	10,92322
82					58	2,81	2,34	1,89	0,256	10,94017
91					80	3,04	2,524	2,03	0,284	11,25198

**Tabela 33. Coeficiente de variação percentual para L/B=2, M.E.=12MPa, e=0,9 m e  $\phi$ 50.**

Com b.	Form a	Espes	M. E	$\phi$ est.	Nº est.	Rec máx (cm)	Recalq méd (cm)	Recal mín (cm)	DP (cm)	Coef var (%)
49	L/B=2	e=0,9 m	12	50	0	3,27	2,964	2,24	0,219	7,38866
55					10	3,21	2,93	2,29	0,199	6,79181
64					18	3,25	2,965	2,35	0,196	6,61046
73					40	3,1	2,692	2,27	0,249	9,24963
82					58	3,26	2,83	2,39	0,262	9,25795
91					80	3,47	3,006	2,52	0,285	9,48104

**Tabela 34. Coeficiente de variação percentual para L/B=1, M.E.=12MPa, e=0,3 m e  $\phi$ 60.**

Com b.	Form a	Espes	M. E	$\phi$ est.	Nº est.	Rec máx (cm)	Recalq méd (cm)	Recal mín (cm)	DP (cm)	Coef var (%)
1	L/B=1	e=0,3 m	12	60	0	1,41	1,205	0,86	0,12	9,958506
10					5	1,42	1,248	0,94	0,103	8,253205
19					9	1,37	1,097	0,85	0,132	12,032817
28					20	1,59	1,291	1,01	0,129	9,992254
37					29	1,76	1,449	1,13	0,143	9,868875
46					40	2	1,642	1,29	0,162	9,866017

**Tabela 35. Coeficiente de variação percentual para L/B=1, M.E.=12MPa, e=0,6 m e  $\phi$ 60.**

Com b.	Form a	Espes	M. E	$\phi$ est.	Nº est.	Rec máx (cm)	Recalq méd (cm)	Recal mín (cm)	DP (cm)	Coef var (%)
1	L/B=1	e=0,6 m	12	60	0	1,8	1,625	1,229	0,106	6,523077
10					5	1,77	1,635	1,35	0,086	5,259939
19					9	1,7	1,454	1,21	0,126	8,665750
28					20	1,87	1,629	1,36	0,116	7,120933
37					29	2,04	1,779	1,49	0,126	7,082631
46					40	2,25	1,961	1,64	0,141	7,190209

**Tabela 36. Coeficiente de variação percentual para L/B=1, M.E.=12MPa, e=0,9 m e  $\phi$ 60.**

Com b.	Form a	Espes	M. E	$\phi$ est.	Nº est.	Rec máx (cm)	Recalq méd (cm)	Recal mín (cm)	DP (cm)	Coef var (%)
1	L/B=1	e=0,9 m	12	60	0	2,14	2,033	1,79	0,071	3,492376
10					5	2,1	2,017	1,81	0,059	2,925136
19					9	1,96	1,779	1,57	0,093	5,227656
28					20	2,11	1,951	1,76	0,08	4,100461
37					29	2,26	2,092	1,89	0,085	4,063098
46					40	2,45	2,263	2,04	0,095	4,197967

**Tabela 37. Coeficiente de variação percentual para L/B=2, M.E.=12MPa, e=0,3 m e  $\phi$ 60.**

Com b.	Form a	Espes	M. E	$\phi$ est.	Nº est.	Rec máx (cm)	Recalq méd (cm)	Recal mín (cm)	DP (cm)	Coef var (%)
49	L/B=2	e=0,3 m	12	60	0	2,04	1,784	1,21	0,177	9,921525
58					10	2,16	1,864	1,32	0,172	9,227468
67					18	2,27	1,955	1,4	0,175	8,951407
76					40	2,3	1,846	1,45	0,224	12,134345
85					58	2,6	2,076	1,62	0,258	12,427746
94					80	2,96	2,364	1,84	0,301	12,732657

**Tabela 38. Coeficiente de variação percentual para L/B=2, M.E.=12MPa, e=0,6 m e  $\phi$ 60.**

Com b.	Form a	Espes	M. E	$\phi$ est.	Nº est.	Rec máx (cm)	Recalq méd (cm)	Recal mín (cm)	DP (cm)	Coef var (%)
49	L/B=2	e=0,6 m	12	60	0	2,68	2,381	1,67	0,208	8,735825
58					10	2,71	2,42	1,78	0,193	7,975207
67					18	2,81	2,501	1,86	0,195	7,796881
76					40	2,82	2,349	1,89	0,26	11,068540
85					58	3,1	2,576	2,07	0,288	11,180124
94					80	3,45	2,854	2,28	0,326	11,422565

**Tabela 39. Coeficiente de variação percentual para L/B=2, M.E.=12MPa, e=0,9 m e  $\phi$ 60.**

Com b.	Form a	Espes	M. E	$\phi$ est.	Nº est.	Rec máx (cm)	Recalq méd (cm)	Recal mín (cm)	DP (cm)	Coef var (%)
49	L/B=2	e=0,9 m	12	60	0	3,27	2,964	2,24	0,219	7,388664
58					10	3,25	2,969	2,32	0,202	6,803638
67					18	3,32	3,035	2,4	0,201	6,622735
76					40	3,28	2,847	2,3	0,267	9,378293
85					58	3,54	3,065	2,58	0,289	9,429038
94					80	3,86	3,335	2,79	0,321	9,625187