

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE FUNDAÇÕES
ESTAQUEADAS EM MODELOS 1g**

MARCUS VINICIUS COSTA FERREIRA TAVARES

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE FUNDAÇÕES
ESTAQUEADAS EM MODELOS 1g

MARCUS VINICIUS COSTA FERREIRA TAVARES

ORIENTADOR: RENATO PINTO DA CUNHA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: GDM-214/2012
BRASÍLIA/DF: AGOSTO – 2012

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS
EM MODELOS 1g

MARCUS VINICIUS COSTA FERREIRA TAVARES

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM GEOTECNIA.

APROVADA POR:

Prof. Renato Pinto da Cunha, Ph.D. (UnB)
(Orientador)

Prof. Luis Fernando Martinez Ribeiro, D.Sc. (UnB).
(Examinador Interno)

Prof. Paulo José Rocha de Albuquerque, D.Sc. (Unicamp)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, AGOSTO DE 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

TAVARES, M. V. C. F. Avaliação Experimental de Fundações Estaqueadas em Modelos 1g. [Distrito Federal] 2012. xxiv, 155p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2012). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1. Avaliação experimental	2. Grupos de estacas
3. Rádiers estaqueados	4. Modelos 1g
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TAVARES, M. V. C. F. (2012). Avaliação Experimental de Fundações Estaqueadas em Modelos 1g. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Publicação E.DM-001A/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 155 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Marcus Vinicius Costa Ferreira Tavares

TÍTULO: Avaliação Experimental de Fundações Estaqueadas em Modelos 1g.

GRAU: Mestre ANO: 2012

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Marcus Vinicius Costa Ferreira Tavares
Avenida Cesar Marques, Nº 22, III Conjunto – Cohab Anil
65050-510 São Luís - MA - Brasil
e-mail: marcus.vcft@gmail.com

Dedicatória.

Dedico este trabalho à minha mãe Conceição, à minha irmã Carol, ao meu pai Tavares e a Joana, pelo amor e carinho incondicional.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que me proporcionou a graça da vida com saúde e força.

À minha mãe, Conceição, à irmã Carol e ao meu pai, sustentação de tudo na minha vida.

À minha noiva Joana Carvalho pelo companheirismo, carinho, compreensão, atenção e saudades.

Ao meu orientador Renato Pinto da Cunha pela disponibilidade, dedicação, comprometimento e incentivo na orientação deste trabalho.

Ao meu amigo e companheiro de luta Ary, não desistimos não.

Aos professores da Geotecnia, em especial, ao professor Márcio pela sabedoria e ter me proporcionado um eterno aprendizado, ao professor Ennio pela amizade e ensinamentos passados.

A CAPES pelo suporte financeiro.

A Cida pela parceria e por desempenhar muito bem suas atividades como secretária da Geotecnia contribuindo para o bom andamento das atividades diárias dos alunos e professores.

Aos amigos e companheiros geotécnicos da UnB, Ewerton, Robinson, Marcello, Hernan, Alex pelos momentos de parceria que aliviaram as saudades da minha terra e deram-me força para continuar o meu objetivo.

Aos amigos da UnB Iuri, Urubatan, Henrique pelo companheirismo e auxílio durante o mestrado.

Ao meu irmão Ramon: sem teu apoio nada disso seria possível. E por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para que esta conquista um dia pudesse se tornar uma realidade.

***“Você vê as coisas que existem e se pergunta por quê ?
Eu imagino coisas que não existem e me pergunto por quê não ?”***

George Bernard Shaw

RESUMO

A verticalização das cidades ocasionada pelo crescimento urbano, bem como a construção de estruturas de grande porte, gerou a procura de sistemas estruturais de fundação que suportassem os níveis de carregamento das obras atuais. O aprimoramento das metodologias construtivas viabilizou a execução de fundações estaqueadas. Entretanto, uma compreensão mais aprimorada sobre o comportamento desses sistemas leva os engenheiros a repensarem as hipóteses de transferência de cargas.

A ideia do radier estaqueado (radier + estacas) surge como uma alternativa extremamente viável, em termos econômicos, em face da utilização de sistemas convencionais de estaqueamento. Diferenciando-se em relação aos agrupamentos convencionais de estacas, o radier estaqueado não despreza a parcela complementar de capacidade de carga proveniente do contato do bloco, ou radier, com o solo. De forma semelhante aos demais grupos de fundações profundas, as estacas funcionam como redutores de recalques, além de contribuir também para a capacidade de carga total do sistema.

Buscando um melhor entendimento das fundações estaqueadas, lançou-se mão de uma modelagem reduzida simples como ferramenta para uma análise qualitativa das características do comportamento mecânico de um radier estaqueado sujeito a condições ideais. A comparação do comportamento das fundações estaqueadas proporcionará uma avaliação dos fatores de interação entre os elementos da fundação (radier e as estacas), bem como o comportamento carga-recalque destas.

O material utilizado como solo trata-se de uma areia seca lançada num cilindro de modelagem reduzida 1g, com altura de $0,60 \times 10^{-3}$ m e diâmetro de $1,15 \times 10^{-3}$ m compactada de modo a garantir um nível de compacidade adequado para instalação do modelo reduzido. O protótipo de fundação é composto por placas metálicas retangulares, que simulam os raders, e tubos metálicos vazados, e cortados transversalmente, com altura de $2,12 \times 10^{-1}$ m, e diâmetro externo de $1,28 \times 10^{-2}$ m e diâmetro interno de $0,92 \times 10^{-2}$ m, que simulam as estacas. Os incrementos de carga no modelo reduzido são efetuados com a utilização de um macaco hidráulico instalado adequadamente no cilindro de modelagem reduzida.

O arcabouço teórico utilizado na interpretação dos resultados para o comportamento carga-recalque é subsidiado no estudo introduzido por Poulos & Davis (1980) acrescido da metodologia simples de compartilhamento de cargas entre o radier e as estacas propostas por Randolph (1994). Os mecanismos de interação em radiers estaqueados adotados são os de Hain & Lee proposto em 1978.

ABSTRACT

The verticalization of cities caused by urban growth and the construction of large structures generated the demand for the structural foundation that could withstand the loading levels of current works. The improvement of methodologies enabled the implementation of constructive piled foundations. However, a more refined understanding of the behavior of these systems leads engineers to rethink the assumptions of load transfer.

The idea of piled raft (raft + piles) emerges as an extremely viable alternative in economic terms, due to the use of conventional piling. Differing slightly from the conventional grouping of piles, the raft piled does not neglect the complementary part of load capacity from the contact block, or raft, with the ground. Similar to other groups of deep foundations, the piles act as reducers of settlements, and also contribute to the total carrying capacity of the system.

Seeking a better understanding of the piled foundations, this work will use a small and simple 1g modeling as a tool for a qualitative analysis of the characteristics of the mechanical behavior of a piled raft subjected to ideal conditions. The comparison of the behavior of piled foundations provide an assessment of the interaction effects between the elements of the foundation (raft and piles), and the behavior of these load-settlement.

The material used as soil was a dry sand compacted in a cylinder mold modeling reduced at 1g condition with a height of $0,60 \times 10^{-3}$ m and a diameter of $1,15 \times 10^{-3}$ m, so as to ensure an adequate degree of compactness for installation of the reduced model. The prototype of the foundation is composed of rectangular metal plates, which simulates the raders, metal hollow pipes cut transversely, with a height of 2.12×10^{-1} m and outer diameter of 1.28×10^{-2} m internal diameter of 0.92×10^{-2} m, which simulate the piles. The increase in load on the scale model are performed using a hydraulic jack properly installed in the small scale system.

The theoretical framework used in interpreting the results for the load-settlement behavior is subsidized by the study introduced by Poulos & Davis (1980) plus the simple method of load sharing between the raft and the piles proposed by Randolph (1994). The mechanisms of interaction in piled rafts adopted are those of Hain and Lee proposed in 1978.

SUMÁRIO

1 - Introdução	1
1.1 - Generalidades.....	1
1.2 – Motivação e Justificativa.....	2
1.3 – Objetivos	3
1.3.1 – Objetivo Geral.....	3
1.3.2 – Objetivos Específicos.....	3
1.4 – Abrangência e Limitações.....	3
1.5 – Descrição e Organização da Dissertação	4
2 – Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 – Radiers.....	5
2.1.1 – Capacidade de Carga de Radiers.....	6
2.1.1.1 – Fórmula Geral de Terzaghi	6
2.2 – Comportamentos de Estacas Isoladas	9
2.2.1 – Capacidade de Carga de Estacas Isoladas	11
2.2.2 – Métodos para Previsão de Recalques em Estacas Isoladas	13
2.2.2.1 – Método de Poulos & Davis	13
2.2.2.2 – Método de Randolph & Wroth.....	15
2.3 – Mecanismos de Interação em Fundações Estaqueadas	18
2.4 – Grupos Estaqueados	21
2.4.1 – Efeito de Grupo na Capacidade de Carga em Agrupamentos de Estacas	22
2.4.2 – Efeito de Grupo sobre a Capacidade de Carga de Grupos de Estacas	23

2.4.3 – Efeito de Grupo em Termos de Recalques em Agrupamentos de Estacas.....	25
2.4.3.1 – Método do Radier Equivalente.....	26
2.4.3.2 – Método da Estaca Equivalente	27
2.5 – Radier Estaqueado.....	28
2.5.1 – Metodologia de Projeto	30
2.5.2 – Comportamento Carga-Recalque	33
2.6 – Modelagens Físicas	35
2.6.1 – Definição	37
2.6.2 – Processo de Execução de um Modelo Reduzido.....	37
2.6.3 – Classificação.....	39
2.6.4 – Semelhança em Modelos Reduzidos.....	39
2.6.4.1 – Semelhança Geométrica.....	40
2.6.4.2 – Semelhança Distorcida.....	40
2.6.5 – Testes em Modelos 1G.....	40
3 – Materiais e Métodos	42
3.1 – Equipamentos Utilizados nos Ensaios.....	42
3.1.1 – Tanque Rígido para os Ensaios	42
3.1.2 – Sistema Hidráulico	43
3.1.3 – Sistema de Aquisição dos Dados	43
3.1.4 – Medidores de Deslocamento Vertical	44
3.1.5 – Instrumentação Utilizada.....	45
3.1.5.1 – Célula de Carga	45

3.1.5.2 – Extensômetros	45
3.2 – Materiais Utilizados	48
3.2.1 – Radiers, Blocos e Cap	48
3.2.2 – Estacas	50
3.2.3 – Solo Utilizado no Ensaio	52
3.3 – Procedimento dos Ensaios Realizados	54
3.3.1 – Ensaios de Aferição.....	54
3.3.2 – Preparação do Solo de Fundação para os Modelos Reduzidos	56
3.3.3 – Programa de Ensaios nos Modelos Reduzidos.....	61
3.3.4 – Procedimento Executivo dos Ensaios com os Modelos Reduzidos	69
4 – Apresentação dos Resultados	75
4.1 – Ensaios de Placa	75
4.2 – Ensaios com as Estacas Isoladas	77
4.3 – Ensaios com Grupos de Estacas	79
4.4 – Ensaios com os Radiers Estaqueados.....	80
4.5 – Grupos de Estacas x Radiers Estaqueados	81
4.6 – Resultados da Instrumentação com a Profundidade das Estacas	83
5 – Análise dos Resultados.....	89
5.1 – Análise das Curvas do Tipo Carga-Recalque.....	89
5.2 – Análise das Estacas Instrumentadas	101
5.3 – Análise dos Grupos de Estacas.....	101
5.3.1 – Efeito de Grupo	101

5.3.2 – Taxa de Recalque do Grupo	103
5.4 – Análise do Radier Estaqueado.....	106
5.4.1 – Distribuição de Carga entre as Estacas e o Radier	106
5.4.2 – Eficiência dos Elementos	112
5.4.3 – Aumento da Capacidade de Carga do Radier Estaqueado	117
6 – Conclusões e Sugestões para Novas Pesquisas	121
6.1 – Conclusões	121
6.2 – Sugestões para Novas Pesquisas	122
Referências Bibliográficas	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Imagem ilustrativa de um radier (Melhado et al., 2002).	6
Figura 2.2. Hipótese de Terzaghi.	6
Figura 2.3. Solo arrastando fundação.....	7
Figura 2.4. Problema básico de estaca isolada carregada axialmente (modificado – Poulos, 1989).....	11
Figura 2.5. Estaca padrão submetida à carga de ruptura por compressão.....	11
Figura 2.6. Esquema para obtenção dos parâmetros utilizados na metodologia de Poulos & Davis (1980).....	14
Figura 2.7. Separação das camadas de solo pelo método de Randolph e Wroth (Velloso & Lopes, 2002).....	16
Figura 2.8. Mecanismos de interação em radiers estaqueados – modificado de Poulos (2001).	19
Figura 2.9. Distribuição de tensões no fuste e na base das estacas de um grupo.....	20
Figura 2.10. Massa de solo mobilizada por um carregamento: (a) bulbo de tensões para uma estaca isolada e (b) bulbo de tensões para um grupo de estacas.	22
Figura 2.11. Resultados de ensaios em modelos de grupos de estacas instrumentadas cravadas em areia (modificado – Vesic, 1969).	24
Figura 2.12. Mecanismos de ruptura em grupos de estacas: (a) ruptura da estaca; (b) ruptura da fileira de estacas e (c) ruptura por bloco.	25
Figura 2.13. Esquema de tensões impostas ao solo por uma estaca isolada e por um grupo de estacas (Tomlinson, 1994).....	25
Figura 2.14. Método do radier equivalente (modificado - Tomlinson, 1994).....	26
Figura 2.15. Método da estaca equivalente (modificado - Randolph, 1994).	27

Figura 2.16. Radier estaqueado em argila de frankfurt: (a) vista isométrica esquemática da fundação e superestrutura; (b) vista em planta (modificado - Sommer et al., 1985).	28
Figura 2.17. Formas de ruptura de uma sapata estaqueada (modificado – Phung, 1993).....	29
Figura 2.18. Curvas de carga – recalque para radiers estaqueados de acordo com as filosofias de projeto de Randolph (1994) – Poulos (2001).	32
Figura 2.19. Curva simplificada carga – recalque para análises preliminares – Poulos (2001).	34
Figura 2.20. Sequência de execução do modelo de teste (Reinhorn, 2008 – modificado).	38
Figura 2.21. Semelhança geométrica (Melo, 2011).	40
Figura 2.22. Semelhança distorcida (Melo, 2011).	40
Figura 3.1. Tanque rígido.	43
Figura 3.2. Sistema de aquisição de dados.	44
Figura 3.3. Relógio comparador utilizado para aferição de deslocamentos verticais.	44
Figura 3.4. Célula de carga empregada nos ensaios.	45
Figura 3.5. Extensômetros colados em uma das estacas.	46
Figura 3.6. Extensômetros utilizados.	46
Figura 3.7. Materiais utilizados na instrumentação.	47
Figura 3.8. Disposição dos equipamentos utilizados nos ensaios.	47
Figura 3.9. Placas quadrangulares de alumínio utilizadas como radiers e blocos.	48
Figura 3.10. Depressão côncava efetuada nas placas retangulares de alumínio para diminuir as excentricidades potenciais do carregamento.	49
Figura 3.11. Cap destinado aos ensaios com as estacas isoladas.	49
Figura 3.12. Tubos de alumínio simulando as estacas em escala reduzida.	50
Figura 3.13. Materiais utilizados para aumentar o atrito na interface solo-estaca.	51

Figura 3.14. Preparo do revestimento das estacas.....	51
Figura 3.15 Granulometria da areia utilizada como solo de fundação do modelo reduzido....	53
Figura 3.16. Resistência ao cisalhamento da areia fofa utilizada como solo de fundação do modelo reduzido.....	53
Figura 3.17. Ensaio de aferição das estacas utilizadas nos ensaios.....	55
Figura 3.18. Utilização de um bloco de alumínio para aferição das estacas.....	55
Figura 3.19. Dados do ensaio de aferição das estacas utilizadas.	56
Figura 3.20. Procedimento executivo do solo de sustentação das fundações em escala reduzida	57
Figura 3.21. Compactação da primeira das camadas de areia.....	58
Figura 3.22. Roteiro adotado na compactação das três camadas constituintes do solo de sustentação.	58
Figura 3.23. Retirada de uma das cápsulas de areia para controle da densidade natural.	59
Figura 3.24. Crescimento das densidades entre as camadas constituintes do solo de sustentação.	59
Figura 3.25. Procedimento de instalação dos protótipos.....	69
Figura 3.26. Realização de um dos ensaios com o modelo em escala reduzida.	70
Figura 3.27. Desenho esquemático da realização dos ensaios.	71
Figura 3.28. Fluxograma da campanha de ensaios efetuada na presente pesquisa.	71
Figura 3.29. Disposição das fundações ensaiadas no cilindro de modelagem reduzida.	73
Figura 3.30. Disposição das provas de carga com as estacas isoladas.....	74
Figura 4.1. Curva carga recalque para o bloco/radier isolado de 4, 9 e 16 estacas.....	76
Figura 4.2. Curva carga-recalque para as estacas ensaiadas isoladamente.	77

Figura 4.3. Curva carga-recalque para o comportamento médio das estacas ensaiadas isoladamente.....	78
Figura 4.4. Curva carga-recalque para os grupos de estacas ensaiados.....	80
Figura 4.5. Curva carga-recalque para os radiers estaqueados ensaiados.....	80
Figura 4.6. Comparativo entre as curvas carga-recalque do grupo com 4 estacas e o radier estaqueado com 4 estacas.....	81
Figura 4.7. Comparativo entre as curvas carga-recalque do grupo com 9 estacas e o radier estaqueado com 9 estacas.....	82
Figura 4.8. Comparativo entre as curvas carga-recalque do grupo com 16 estacas e o radier estaqueado com 16 estacas.....	83
Figura 5.1. Curva carga-recalque normalizada para cada estaca isolada.....	91
Figura 5.2. Gráfico de rigidez para o comportamento médio das estacas.....	91
Figura 5.3. Critério de ruptura da nbr 6122:2010 para o comportamento médio das estacas..	92
Figura 5.4. Gráfico do tipo $-\ln(1-p/p_u)$ em função do recalque para a estaca isolada.....	92
Figura 5.5. Resultados dos cálculos das metodologias de ruptura adotadas para as estacas isoladas.....	93
Figura 5.6. Curva do tipo carga-recalque normalizada para o comportamento médio das estacas.....	94
Figura 5.7. Curva carga-recalque com a carga de ruptura e recalque máximo para o comportamento médio das estacas isoladas.....	94
Figura 5.8. Curva carga-recalque do grupo com 4 estacas com a carga de ruptura e o recalque máximo adotado.....	95
Figura 5.9. Curva carga-recalque do grupo com 9 estacas com a carga de ruptura e o recalque máximo adotado.....	96
Figura 5.10. Curva carga-recalque do grupo com 16 estacas com a carga de ruptura e o recalque máximo adotado.....	96

Figura 5.11. Curva carga-recalque para o radier sem a presença de estacas (placa para 4 estacas).....	97
Figura 5.12. Curva carga-recalque para o radier sem a presença de estacas (placa para 9 estacas).....	97
Figura 5.13. Curva carga-recalque para o radier sem a presença de estacas (placa para 16 estacas).....	98
Figura 5.14. Curva carga-recalque para o capitel das estacas isoladas.....	98
Figura 5.15. Curva carga-recalque do radier estaqueado com 4 estacas com a carga de ruptura e o recalque máximo.	99
Figura 5.16. Curva carga-recalque do radier estaqueado com 9 estacas com a carga de ruptura e o recalque máximo.	99
Figura 5.17. Curva carga-recalque do radier estaqueado com 16 estacas com a carga de ruptura e o recalque máximo.....	100
Figura 5.18. Cargas para o recalque máximo das fundações em grupos de estacas.	102
Figura 5. 19. Determinação, no trecho elástico, do grupo com quatro estacas, e para as estacas isoladas, para a carga de trabalho de 43,33 n, e para carga média de 10,83 n, respectivamente.	103
Figura 5.20. Determinação, no trecho elástico, do grupo com nove estacas, e para as estacas isoladas, para a carga de trabalho de 133,33 n, e para carga média dE 14,81 N, respectivamente.....	104
Figura 5.21. Determinação, no trecho elástico, do grupo com dezesseis estacas, e para as estacas isoladas, para a carga de trabalho de 233,33 n, e para carga média de 14,58 n, respectivamente.....	104
Figura 5.22. Pontos de rg encontrados e pontos relatados por Mandolini (ADAPTADO DE Mandolini, Russo E Viggiani – 2005).....	105
Figura 5.23. Gráfico do tipo carga-recalque do radier e da estaca para o radier estaqueado com 4 estacas.....	107

Figura 5.24. Gráfico do tipo carga-recalque do radier e da estaca para o radier estaqueado com 9 estacas.....	107
Figura 5.25. Gráfico do tipo carga-recalque do radier e da estaca para o radier estaqueado com 16 estacas.....	108
Figura 5.26. Distribuição da carga entre os elementos do radier estaqueado com 4 estacas.	108
Figura 5.27. Distribuição da carga entre os elementos do radier estaqueado com 9 estacas.	109
Figura 5.28. Distribuição da carga entre os elementos do radier estaqueado com 16 estacas.	109
Figura 5.29. Distribuição da carga de ruptura dos radiers estaqueados pela quantidade de estacas.....	110
Figura 5.30. Comparativo entre a distribuição de carga entre os elementos do radier estaqueado de 4 estacas (caso 15) com os dados de Soares (2011).	111
Figura 5.31. Comparativo entre a distribuição de carga entre os elementos do radier estaqueado de 4 estacas (caso 15) com os dados de Soares (2011) para a curva do tipo carga-recalque normalizada.....	112
Figura 5.32. Cálculo da eficiência $\alpha_{estacas}$ para o grupo de 4 estacas.....	115
Figura 5.33. Cálculo da eficiência $\alpha_{estacas}$ para o grupo de 9 estacas.....	116
Figura 5.34. Cálculo da eficiência $\alpha_{estacas}$ para o grupo de 16 estacas.....	116
Figura 5.35. Capacidades de carga do grupo e radier com 4 estacas.	117
Figura 5.36. Capacidades de carga do grupo e radier com 9 estacas.	118
Figura 5.37. Capacidades de carga do grupo e radier com 16 estacas.	118
Figura 5.38. Relação entre ζ_{pr} e r_m (adaptado de Conte et al. 2003).	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Coeficientes de capacidade de carga.....	8
Tabela 2.2. Fatores de forma.....	9
Tabela 2.3. Tipos de modelos em problemas geotécnicos (modificado – Gomes, 1993).....	39
Tabela 3.1. Propriedades geométricas e mecânicas da estaca em modelo reduzido.....	52
Tabela 3.2. Características da areia seca utilizada.....	54
Tabela 3.3. Densidades das camadas constituintes do solo de sustentação para cada ensaio..	60
Tabela 3.4 Ensaio e condições ensaiadas.....	62
Tabela 3.5 Casos utilizados na presente pesquisa.....	72
Tabela 4.1. Valores máximos de carga e deslocamento do ensaio de placa do bloco/radier isolado de 4, 9 e 16 estacas.....	76
Tabela 4.2. Valores máximos de carga e deslocamento dos ensaios de prova de carga para estacas isoladas.....	78
Tabela 4.3. Valores máximos de carga e deslocamento do comportamento médio dos ensaios de prova de carga para as estacas isoladas.....	79
Tabela 4.4. Valores máximos de carga e deslocamento do ensaio de prova de carga para os grupos com 4, 9 e 16 estacas.....	80
Tabela 4.5. Valores máximos de carga e deslocamento do ensaio de prova de carga com radiers estaqueados com 4, 9 e 16 estacas.....	81
Tabela 4.6. Valores de carga e deslocamento nas seções instrumentadas do ensaio de prova de carga com o grupo de 4 estacas (caso 13 – 4b4e0dc).....	84
Tabela 4.7. Valores de carga e deslocamento nas seções instrumentadas do ensaio de prova de carga com o grupo de 9 estacas (caso 21 – 9b9e0dc).....	84

Tabela 4.8. Valores de carga e deslocamento nas seções instrumentadas do ensaio de prova de carga com o grupo de 16 estacas (caso 36 – 16b16e0dc).....	85
Tabela 4.9. Valores de carga e deslocamento nas seções instrumentadas do ensaio de prova de carga com o radier estaqueado com 4 estacas (caso 15 – 4p4e0dc).....	86
Tabela 4.10. Valores de carga e deslocamento nas seções instrumentadas do ensaio de prova de carga com o radier estaqueado com 9 estacas (caso 22 – 9p9e0dc).....	87
Tabela 4.11. Valores de carga e deslocamento nas seções instrumentadas do ensaio de prova de carga com o radier estaqueado com 16 estacas (caso 37 – 16p16e0dc).....	88
Tabela 5.1. Parâmetros de entrada e carga de ruptura segundo Van der Veen (1953), modificado Aoki (1976) para o comportamento médio das estacas isoladas.	93
Tabela 5.2. Cargas de ruptura extrapoladas, cargas de recalque máximo e cargas admissíveis das fundações.	100
Tabela 5.3. Fator de eficiência (η) em grupo de estacas.	102
Tabela 5.4. Taxa de recalque (r_s) para os grupos de estacas.	105
Tabela 5.5. Fator de redução de grupo $r_g = r_s/n$	105
Tabela 5.6. Distribuição para a carga de ruptura entre o radier e o grupo de estacas.	110
Tabela 5.7. Relação de áreas entre grupo de estacas e radier.....	111
Tabela 5.8. Parcelas de cargas dos elementos combinados.....	113
Tabela 5.9. Eficiência do radier.	113
Tabela 5.10. Eficiência do grupo de estacas.	114
Tabela 5.11. Eficiência do grupo de estacas.	115
Tabela 5.12. Aumento da capacidade de carga das fundações (ζ_{PR}).....	119
Tabela 5.13. Relação entre ζ_{PR} -E R_M	119

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

c : coesão do solo;

N_c , N_q e N_γ : coeficientes de capacidade de carga;

S_c , S_q e S_γ : fatores de forma;

q : carga oriunda da tensão geo-estática do solo ($q = \gamma.H$);

γ : peso específico efetivo do solo na cota de apoio da sapata;

B : menor dimensão da sapata.

H : altura da coluna geostática

φ : ângulo

σ_r : tensão aplicada por uma sapata segundo Terzaghi

Q_r : capacidade de carga total da estaca;

W : peso próprio da estaca;

Q_p : capacidade de carga da ponta (de base);

Q_l : capacidade de carga de fuste (atrito lateral).

A_p : área da ponta da estaca (base);

q_p : resistência unitária da ponta;

U : perímetro da estaca;

q_l : resistência unitária do fuste;

L : comprimento da estaca;

z : eixo axial da estaca.

P : carga aplicada;

L : comprimento da estaca;

h : espessura da camada de solo;

d_b : diâmetro da estaca;

d : diâmetro da estaca;

E_p : módulo de elasticidade do material da estaca;

E_b : módulo de elasticidade da camada resistente de solo;

E_s : módulo de elasticidade do solo;

ν_s : coeficiente de Poisson do solo;

ν_b : coeficiente de Poisson da camada resistente de solo;

R_A : relação entre a área da estaca e sua área circunscrita;

I_F : é dado por $I_F = I_0 \times R_k \times R_h \times R_v$;

I_0 : fator de influência de recalque para estaca incompressível na massa semi-infinita, para ν_s igual 0,5;

R_k : fator de correção para compressibilidade da estaca;

R_h : fator de correção para profundidade finita da camada sobre uma base rígida;

R_v : fator de correção para coeficiente de Poisson do solo (ν_s);

E_s : módulo de elasticidade do solo;

d_b : diâmetro da estaca.

P_m : carga aplicada;

w_m : recalque médio;

w : recalque;

G_m : módulo de elasticidade transversal

r_0 : raio da estaca;

r_m : raio máximo

P_t : carga no topo da estaca aplicada;

w_t : recalque no topo da estaca;

G_l : módulo cisalhante do solo a uma profundidade Z

ρ_l : deslocamento sob carga unitária de uma estaca isolada idêntica às que formam o grupo;

P_k, P_l : cargas aplicadas no topo das estacas “k” e “l” respectivamente;

α_{kl} : fatores de interação entre as estacas “k” e “l”;

α_{cp} : fator de interação radier-estaca;

η : eficiência de um grupo de estacas;

δ = recalque do radier estaqueado;

δ_l = recalque de uma estaca sem “cap” sob carga unitária;

K_{pr} = rigidez do radier estaqueado;

K_r = rigidez do radier;

K_p = rigidez das estacas;

P_t = carga total atuante no radier estaqueado;

P_r = carga aplicada no radier;

X = proporção da carga aplicada pela estacas;

R_G = relação entre o recalque médio da fundação (radier estaqueado) e o recalque de uma estaca isolada, sem “cap”, sob carga total atuante no grupo;

R_C = razão entre o recalque de uma estaca com “cap” e outra similar sem o “cap”;

R'_G = razão entre o recalque médio de uma fundação (radier estaqueado) e o recalque de uma estaca, com “cap”, sob carga total atuante no grupo.

P_A = carga total que corresponde ao momento de total mobilização do conjunto de estacas;

δ_w = recalque do radier estaqueado, sob a carga P_w ;

λ = esbeltez;

$A_{efetiva}$ = área efetiva;

$L_{íntegra}$ = comprimento da estaca íntegra;

I_p = momento de inércia da seção transversal da estaca;

$D_{externo}$ = diâmetro externo da estaca;

$D_{interno}$ = diâmetro interno da estaca.

1 - Introdução

1.1 - Generalidades

A verticalização das cidades ocasionada pelo crescimento urbano, bem como a construção de estruturas de grande porte, gerou a procura de sistemas estruturais de fundação que suportassem os níveis de carregamento das obras atuais. O aprimoramento das metodologias construtivas viabilizou a execução de fundações estaqueadas. Entretanto, uma compreensão mais aprimorada sobre o comportamento desses sistemas leva os engenheiros a repensarem as hipóteses de transferência de cargas.

Tradicionalmente as fundações são classificadas em “rasas” ou “profundas” e, de uma forma geral, os projetistas buscam não associar diferentes tipos de fundações por possuírem formas distintas de transferência de carga ao solo. Entretanto, fatos como o uso de algumas estacas sob um radier, que podem melhorar o desempenho desta fundação quanto ao recalque, ou mesmo capacidade de carga, bem como a consideração do contato do bloco com o solo em um grupo de estacas/tubulões, chamaram a atenção de pesquisadores para as possíveis vantagens da associação de mais de um tipo de fundação para compor o elemento de fundação (Sales *et al.* 2000).

A ideia do radier estaqueado (radier + estacas) surge como uma alternativa extremamente viável, em termos econômicos, em face da utilização de sistemas convencionais de estaqueamento. Diferenciando-se em relação aos agrupamentos convencionais de estacas, o radier estaqueado não despreza a parcela complementar de capacidade de carga proveniente do contato do bloco, ou radier, com o solo. De forma semelhante aos demais grupos de fundações profundas, as estacas funcionam como redutores de recalques, além de contribuir também para a capacidade de carga total do sistema.

A construção de grandes edifícios na Europa, especialmente na Alemanha, utilizando este tipo de solução de fundação despertou o interesse de diversos projetistas e pesquisadores, especialmente por ter promovido uma grande economia em relação às formas tradicionais de fundação e ainda obtendo um ótimo desempenho quanto a capacidade de carga e recalques. Recentemente, o resgate do conceito de estacas como “elementos redutores de recalque”, e não apenas com a função de suportar carga, vem ganhando espaço entre as pesquisas na área de fundações (Cunha *et al.* 2000, Sales *et al.* 2000, Sousa, 2003). Novos métodos estão sendo

criados e testados explorando as vantagens da associação de um elemento superficial de fundação com um certo número “ótimo” de estacas (Cunha *et al.* 2001, Bezerra, 2003).

1.2 – Motivação e Justificativa

O estudo teórico da interação de uma estaca com um elemento superficial a ela ligado, “cap”, teve seu início com Poulos (1968) e prosseguiu com outros trabalhos, como o de Butterfield & Banerjee (1971) e Ottaviani (1975). Desde então alguns trabalhos vem relatando o desempenho de obras em que o emprego de sapatas estaqueadas foram utilizadas com sucesso. Isto tem implicado num crescente reconhecimento por parte de engenheiros de fundações de que projetos desta forma, em geral comandados pela análise de recalques, podem levar a soluções econômicas sem comprometer a segurança e o desempenho da fundação.

É interessante observar que quando o elemento estrutural de ligação do grupo de estacas (“cap”, radier ou bloco) está em firme contato com o solo, o comportamento do grupo de estacas também é influenciado por este elemento de ligação. Logo, o bloco passa também a exercer tensões sobre o solo de fundação, compartilhando com as estacas a divisão de cargas - que antes eram absorvidas somente pelas estacas no caso de grupos sem contato bloco/solo. Logo, quando o bloco se encontra em contato com o solo, há uma interação entre os elementos de fundação, proporcionando ao conjunto maior capacidade de suporte e de combate aos recalques. O contato bloco/solo em um grupo de estacas também traz vantagens em função da associação em um único sistema de mais de um tipo de fundação.

Nas últimas décadas, vários trabalhos foram publicados com ênfase no que, agora, se define como radier estaqueado (a exemplo, Ottaviani, 1975; Randolph, 1994; Mandolini & Viggiani, 1997; Poulos 1998; Cunha & Sales, 1998; Cunha *et al.*, 2000a e b, 2001; Sales *et al.*, 2005 e Cunha & Zhang, 2006). Segundo Janda *et al.* (2009), o termo radier estaqueado trata-se de um sistema de fundação em que os componentes estruturais (radier e estacas) interagem um com o outro, e com o solo circundante para sustentar as cargas verticais, horizontais e os momentos provenientes da superestrutura.

Algumas das principais vantagens deste tipo de fundação são:

- Redução do recalque diferencial no projeto de fundações e, eventualmente, dos

movimentos das fundações vizinhas;

- Aumento da capacidade de carga global das fundações.

Objetivando o melhor entendimento de radiers estaqueados, e grupos de estacas, e respeitando também as limitações financeiras da presente pesquisa, é lançado mão de uma modelagem reduzida, para uma análise qualitativa do comportamento destes tipos especiais de fundação. Alguns problemas relativos ao desempenho de determinados sistemas de fundações submetidos a solicitações variadas, e interagindo de maneira complexa com outros materiais, podem ser estudados com base na respectiva modelagem física. As potencialidades dos modelos físicos reduzidos têm sido enfatizados por longas datas (Rocha, 1957). A modelação física adotada nesta pesquisa será aquela que apresentar condições normais de gravidade.

1.3 – Objetivos

1.3.1 – Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar experimentalmente o comportamento das fundações estaqueadas em modelagem reduzida 1g.

1.3.2 – Objetivos específicos

- Avaliação da capacidade de carga de estacas isoladas, grupos e radier estaqueados com 4, 9 e 16 estacas;
- Comparação do ganho de capacidade de carga entre os grupos de estacas e os radiers estaqueados;
- Avaliação dos fatores de interação entre os elementos do sistema de fundação (radier + estacas);
- Avaliação dos fatores de segurança dos grupos de estacas e dos radiers estaqueados;

1.4 – Abrangência e Limitações

As análises deste trabalho estão caracterizadas de modo a se obter resultados sob a ótica qualitativa do comportamento das fundações estaqueadas estudadas (grupos de estacas e radiers estaqueados). O presente trabalho não visa, ainda, a extrapolação das considerações aqui presentes para a escala real, uma vez que o modelo reduzido adotado reproduz condições ideais de operação.

1.5 – Descrição e Organização da Dissertação

Para alcançar os objetivos propostos, esta dissertação está estruturada em seis capítulos. No primeiro capítulo, apresento uma abordagem geral da pesquisa, com a introdução do tema, a motivação deste estudo e os objetivos do mesmo.

O segundo capítulo mostra alguns conceitos fundamentais relacionados à área da pesquisa; uma descrição geral dos tipos de fundações aqui utilizadas e, além de apresentar a literatura que envolve os principais pesquisadores sobre o tema.

O terceiro capítulo relata o preparo do modelo reduzido, bem como a metodologia empregada nos ensaios.

O quarto capítulo apresenta todos os resultados obtidos a partir da metodologia descrita no terceiro capítulo, sem qualquer tipo de análise.

O quinto capítulo reporta aos resultados tratados, confrontando cada resposta com o carregamento considerado e avaliando as suas respectivas respostas, qualificando a segurança nas fundações em escala reduzida e comparando-se o comportamento entre os grupos de estacas e os radiers estaqueados.

O sexto e último capítulo destina-se às conclusões e recomendações, sintetizando toda a dissertação com comentários pertinentes para o fechamento da mesma, além disso, o que esperar com a contribuição deste trabalho.

2 – Revisão Bibliográfica

2.1 – Radiers

O radier é um tipo de estrutura de fundação superficial, executada em escala real em concreto armado ou protendido, que recebe todas as cargas através dos pilares ou alvenarias da edificação, distribuindo-as de forma uniformizada ao solo. Segundo o *American Concrete Institute* (1997), a fundação do tipo radier é uma laje continuamente suportada pelo solo, com carga total, quando uniformemente distribuída menor ou igual a 50% da capacidade de suporte admissível do solo. Esta laje pode ter sua espessura uniforme, ou variável, e pode conter ainda elementos de enrijecimento como nervuras ou vigas.

Segundo Almeida (2001), considerando, de forma geral, a situação atual da construção civil brasileira, pode ser dito que o radier recebe pouca atenção tanto durante a fase de projeto quanto durante a própria a fase de construção da obra. Como consequência, as recomendações que poderiam evitar alguns problemas são simplesmente ignoradas.

Os radiers são utilizados basicamente quando:

- (a) o solo possui baixa capacidade portante de carga;
- (b) deseja-se atingir uma uniformização dos recalques;
- (c) as áreas de sapatas se aproximam umas das outras, ou quando a área destas for maior que a metade da área de construção.

O fato do radier ser uma peça inteiriça pode lhe conferir uma elevada rigidez, o que acaba evitando grandes recalques diferenciais. Outra vantagem é que sua execução cria uma plataforma de trabalho para serviços posteriores, porém, como contrapartida, surge como imposição inevitável a execução de todos os serviços enterrados na área do radier, como as instalações sanitárias, (Melhado *et al.*, 2002). A Figura 2.1 representa uma imagem ilustrativa do esquema de um radier:

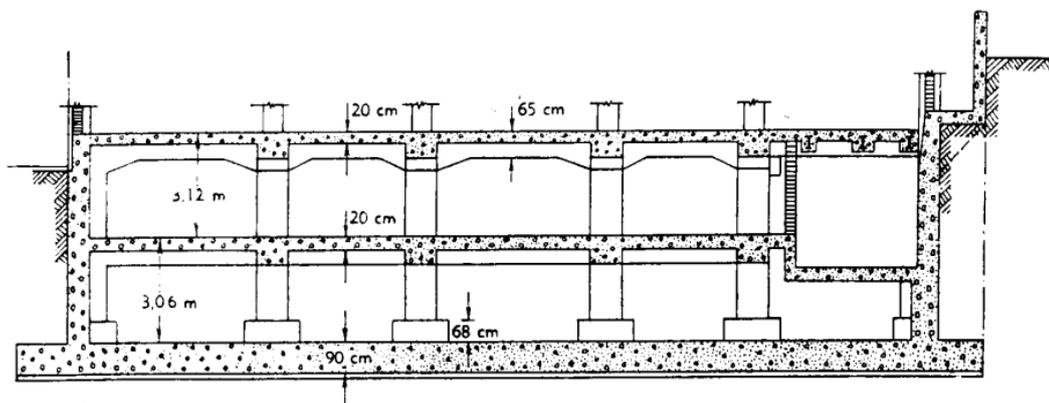


Figura 2.1 Imagem ilustrativa de um radier (Melhado *et al.*, 2002).

2.1.1 – Capacidade de Carga de Radiers

Existem várias formulações para o cálculo da capacidade de carga dos solos, e mesmo todas elas sendo bem aproximadas, estas metodologias de cálculo são de grande utilidade para o engenheiro de fundações, pois em geral conduz a resultados satisfatórios para o uso prático.

2.1.1.1 – Fórmula Geral de Terzaghi

Terzaghi, em 1943, propôs três fórmulas para a estimativa de carga de um solo, abordando os casos de sapatas corridas, quadradas e circulares, apoiadas numa pequena superfície de terreno, conforme a Figura 2.2.

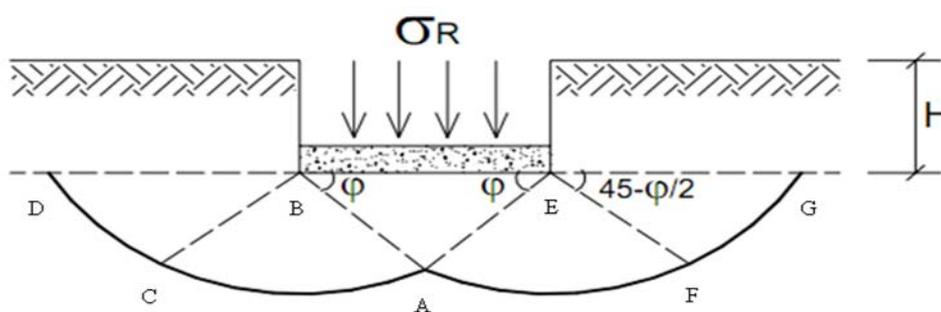


Figura 2.2. Hipótese de Terzaghi.

Nos solos de ruptura tipo **C1**, à medida que a carga (ou pressão) aumenta, o material resiste, deformando-se relativamente pouco, **vindo a ruptura acontecer quase que**

bruscamente. É como se toda a massa rompesse a um só tempo, generalizadamente. A pressão de ruptura é, nesse caso, bem definida, dado pelo valor p_r do gráfico. Quando atingida, os recalques tornam-se incessantes e é denominada por **ruptura generalizada**, sendo típica de solos pouco compressíveis (compactos ou rijos).

Nos solos de ruptura tipo **C2**, as deformações são sempre grandes e aceleradamente crescentes. **Não há uma ruptura definida.** É como se o processo de ruptura fosse dado paulatina e constantemente, desde o início do carregamento, em regiões localizadas e dispersas na massa do solo. A pressão de ruptura para este caso é dada por p_r que, segundo Terzaghi, corresponde ao ponto “a”, em que há uma mudança no gráfico, com passagem da curva inicial para um trecho aproximadamente retilíneo final. Este tipo de ruptura é denominado por **ruptura localizada**, sendo típica de solos muito compressíveis (fofos ou moles).

Quando a ruptura é atingida, o terreno desloca-se, arrastando consigo a fundação, como mostrado na figura 02. O solo passa, então, do estado “elástico” ao estado “plástico”. O deslizamento ao longo da superfície ABC é devido à ocorrência de tensões de cisalhamento (τ_a) maiores que a resistência ao cisalhamento do solo (τ_r), como já conceituado na unidade 04 e 05 destas notas de aula.

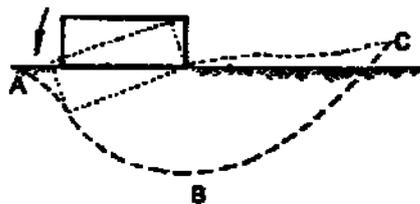


Figura 2.3 - Solo arrastando a fundação.

Terzaghi aplicou-os ao cálculo da capacidade de carga de um solo homogêneo que suporta uma fundação corrida e superficial.

Terzaghi chegou a uma equação através de algumas considerações:

- (a) o valor de a a ser aplicado “ σ_r ” depende do tipo e resistência do solo, da fundação utilizada e da profundidade de apoio da camada;
- (b) as várias regiões consideradas são:
 - ABE – zona em equilíbrio (solidarizada à base da fundação);

- ABC e AEF – zona em regime elástico;
- BCD e EFG – zona em regime plástico.

Mediante estas considerações, e com a introdução de fatores de correção para a metodologia levar em conta a forma da sapata, as equações de Terzaghi podem ser resumidas numa única mais geral, apresentada na Equação 2.1.

$$\sigma_r = c \cdot N_c \cdot S_c + q \cdot N_q \cdot S_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma \quad (2.1)$$

Onde:

c : coesão do solo;

N_c , N_q e N_γ : coeficientes de capacidade de carga;

S_c , S_q e S_γ : fatores de forma;

q : carga oriunda da tensão geo-estática do solo ($q = \gamma \cdot H$);

γ : peso específico efetivo do solo na cota de apoio da sapata;

B : menor dimensão da sapata.

Os coeficientes da capacidade de carga dependem do ângulo de atrito (ϕ) do solo e são apresentados a seguir na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Coeficientes de capacidade de carga.

Φ	Ruptura Geral			Ruptura Local		
	N_c	N_q	N_γ	N'_c	N'_q	N'_γ
0	5,7	1,0	0,0	5,7	1,0	0,0
5	7,3	1,6	0,5	6,7	1,4	0,2
10	9,6	2,7	1,2	8,0	1,9	0,5
15	12,9	4,4	2,5	9,7	2,7	0,9
20	17,7	7,4	5,0	11,8	3,9	1,7

Tabela 2.1 Coeficientes de capacidade de carga (continuação)

	Ruptura Geral			Ruptura Local		
	N_c	N_q	N_γ	N'_c	N'_q	N'_γ
25	25,1	12,7	9,7	14,8	5,6	3,2
30	37,2	22,5	19,7	19,0	8,3	5,7
34	52,6	36,5	35,0	23,7	11,7	9,0
35	57,8	41,4	42,4	25,2	12,6	10,1
40	95,7	81,3	100,4	34,9	20,5	18,8

Já os fatores de forma são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Fatores de forma.

Forma da sapata	Fatores de Forma		
	Sc	Sq	S γ
Corrida	1,0	1,0	1,0
Quadrada	1,3	1,0	0,8
Circular	1,3	1,0	0,6

2.2 – Comportamentos de Estacas Isoladas

As estacas vêm sendo utilizadas pela humanidade como fundações desde os tempos pré-históricos; seu comportamento, entretanto, está longe de ser completamente esclarecido, e um volume substancial de pesquisas foi desenvolvido com esse objetivo (Mandolini et al., 2005). O projeto de estacas é uma questão complexa que, apesar de uma boa formulação teórica de mecânica dos solos, se sustenta em considerações fortemente empíricas. Isto, na verdade, é uma consequência inevitável da variabilidade acentuada do comportamento de solo e das estacas, que é em parte devido a fatores aleatórios, mas também por conta das diferentes técnicas de instalação executiva (De Beer, 1988; Van Weele, 1988; Van Impe, 1991; Viggiani, 1989 e 1993).

Com o objetivo de melhorar o entendimento acerca de fundações estaqueadas, torna-se interessante uma prévia revisão a cerca dos mecanismos de transmissão de cargas para uma estaca isolada imersa em solo. Para o caso de um carregamento vertical, aplicado numa estaca isolada, parte desta carga é transferida ao solo através da resistência de fuste desenvolvida ao longo da área lateral do elemento; e a outra parte é transmitida ao solo através das tensões de compressão criadas na ponta da estaca. A parcela do carregamento que é transmitida na face lateral, bem como a parte resistida pela ponta, é variável das propriedades físico-mecânicas do solo, do diâmetro da estaca, do seu comprimento e da estratificação do solo.

Segundo Poulos (1989), nas últimas duas décadas, um número de métodos para uma interpretação analítica de estacas carregadas axialmente vêm sendo desenvolvidos; estes métodos podem ser agrupados em três categorias:

- (a) Métodos Analíticos Simplificados que envolvem a consideração de elementos horizontais independentes de solo e estaca (Randolph & Wroth, 1978);
- (b) Métodos de Elementos de Contorno empregando tanto funções de carga-transferência para representar a contribuição da interface estaca-solo (Coyle & Reese, 1966; Kraft *et al.*, 1981), como a teoria da elasticidade para representar o solo (Butterfield & Banerjee, 1971; Banerjee, 1978; Banerjee & Davies, 1978; Poulos & Davis, 1980);
- (c) Métodos de Elementos Finitos (Desai, 1974; Valliappan *et al.*, 1974; Balaam *et al.*, 1975; Ottaviani, 1975; Jardine *et al.*, 1986), onde a variedade dos modelos constitutivos do solo podem ser utilizados, bem como outros fatores como a heterogeneidade e anisotropia.

Os métodos de elementos finitos aplicados em estacas oferecem uma ferramenta analítica poderosa à engenharia, que não somente pode reproduzir o comportamento não-linear do solo, mas também a história completa da estaca, como seu próprio processo de instalação, a consolidação do solo adjacente à mesma e o carregamento em si do elemento. Apesar dessas análises serem extremamente valiosas no tocante sobre o melhor entendimento comportamental da estaca, não torna-se prático sua utilização na rotina diária, em virtude da sua respectiva complexidade e do número considerável de parâmetros geotécnicos requeridos.

Os métodos de elementos de contorno fornecem uma análise com poucas simplificações e uma complexidade excessiva. Uma tendência natural para simplificações nestas formulações é considerar separadamente o elemento estrutural (estaca) e o solo, para em seguida compatibilizar os dois através de condições impostas.

Na metodologia analítica simplificada, a estaca é dividida em vários elementos cujos centros coincidem com seu eixo vertical. A resposta da estaca ao carregamento consiste no somatório das contribuições de reação de cada elemento. A Figura 2.3 mostra a divisão de uma estaca isolada em vários elementos, as tensões atuantes nos elementos da estaca, as tensões no solo, a distribuição de rigidez do solo com a profundidade, a distribuição de carga para uma estaca sem resistência na ponta e a distribuição de tensões na interface solo-estaca.

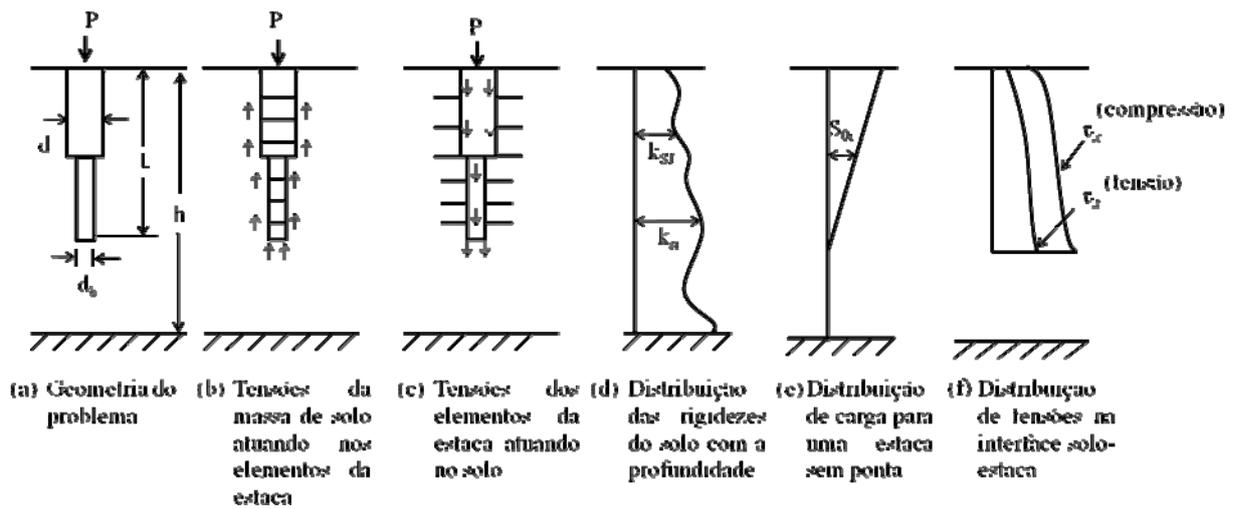


Figura 2.4. Problema básico de estaca isolada carregada axialmente: (a) geometria do problema; (b) tensões da massa de solo atuando nos elementos da estaca; (c) tensões dos elementos da estaca atuando no solo; (d) distribuição de rigidezes dos solo com a profundidade; (e) distribuição de carga para uma estaca sem ponta; (e) distribuição de tensões na interface solo-estaca (modificado – Poulos, 1989).

2.2.1 – Capacidade de Carga de Estacas Isoladas

Nos métodos estáticos, inicia-se a formulação do problema de uma estaca isolada carregada axialmente a partir do equilíbrio entre as cargas atuantes no sistema (peso próprio do elemento + a sobrecarga) e a resistência fornecida pelo solo, conforme apresentado na Figura 2.4.

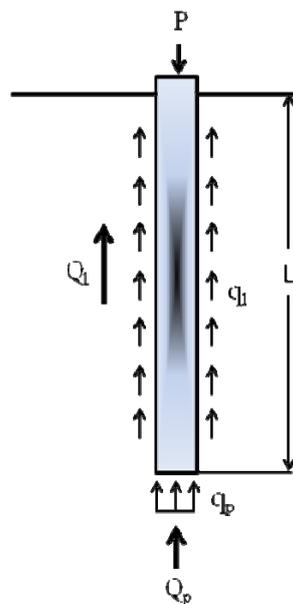


Figura 2.5. Estaca padrão submetida à carga de ruptura por compressão.

O equilíbrio é expresso através da equação abaixo:

$$Q_r + W = Q_p + Q_l \quad (2.2)$$

Onde:

Q_r : capacidade de carga total da estaca;

W : peso próprio da estaca;

Q_p : capacidade de carga da ponta (de base);

Q_l : capacidade de carga de fuste (atrito lateral).

Entretanto, na maioria absoluta dos casos, o peso próprio da estaca é desprezível por razão de sua pouca representatividade em relação às demais cargas atuantes no elemento estrutural. Desta forma, a Equação 2.2 pode ser reescrita introduzindo-se as resistências unitárias (q_p e q_l) da maneira abaixo:

$$Q_r = A_p q_p + U \int_0^L q_l dz \quad (2.3)$$

Onde:

A_p : área da ponta da estaca (base);

q_p : resistência unitária da ponta;

U : perímetro da estaca;

q_l : resistência unitária do fuste;

L : comprimento da estaca;

z : eixo axial da estaca.

A Equação 2.3 serve de premissa para todos os métodos de previsão de capacidade de carga de estacas. Evidentemente que o tipo de estaca e as características do terreno determinarão para cada caso qual parcela da capacidade de carga resultante prevalece mais; se a resistência de ponta, se o atrito lateral, ou ambos.

Para a determinação da resistência lateral (q_l) e da resistência de ponta (q_p) várias formulações foram desenvolvidas, e dentre elas pode-se citar as que utilizam a análise de tensões totais, tais como as contidas no trabalho de Meyerhof (1976), Fleming *et al.* (1985). A aplicação do método de tensões totais é dificultada pela estimativa da resistência não drenada ao cisalhamento do solo. Há também formulações que aplicam o método de análise de tensões

efetivas, que são empregadas com maior frequência em relação às análises de tensões totais, pela facilidade de estimativa na determinação dos parâmetros envolvidos. Uma discussão mais detalhada sobre este tipo de análise encontra-se no trabalho de O'Neill (1996).

2.2.2 – Métodos para Previsão de Recalques em Estacas Isoladas

Estima-se o recalque em estacas isoladas por diversos métodos e dentre eles se destacam:

- (a) o Método de Transferência de Carga, proposto por Coyle & Reese (1978), que foi utilizado nas décadas de 70 e 80, e está atualmente em desuso;
- (b) os Métodos Numéricos, que são utilizados em razão de sua praticidade e dos bons resultados obtidos. Os principais métodos são baseados no M.E.F. (Método de Elementos Finitos) e no M.E.C. (Método de Elementos de Contorno);
- (c) os Métodos Elásticos baseados na Teoria da Elasticidade, que são os mais empregados na previsão de recalques em estacas. Tais métodos consistem em se dividir a estaca em elementos e tentar encontrar a compatibilidade de deslocamento do solo e da estaca.

Os Métodos Elásticos do Poulos & Davis (1980) e Randolph & Wroth (1978) estão descritos a seguir e serão analisados nesta dissertação para previsão de recalques em estacas isoladas.

2.2.2.1 – Método de Poulos & Davis

Poulos & Davis (1980) desenvolveram para o cálculo de recalques um processo numérico, baseando-se na solução de Mindlin para calcular a ação da estaca sobre o solo. Nesse método, a estaca é dividida em elementos uniformemente carregados e os esforços atuam na superfície dos elementos das estacas. Para solucionar o problema é imposta a compatibilidade entre os deslocamentos da estaca e do solo adjacente. Os deslocamentos da estaca são obtidos considerando a compressibilidade da estaca sob carga axial e os do solo, através da equação de Mindlin. Com base no esquema da Figura 2.5 são definidos os parâmetros utilizados no cálculo do recalque das estacas.

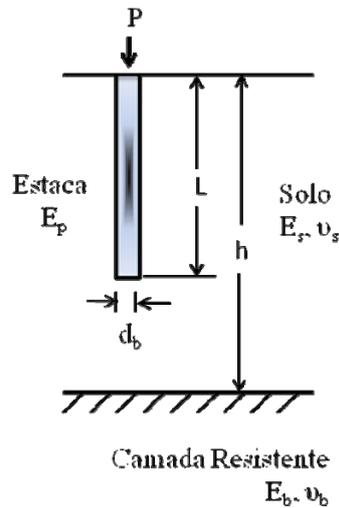


Figura 2.6. Esquema para obtenção dos parâmetros utilizados na metodologia de Poulos & Davis (1980).

Onde:

P : carga aplicada;

L : comprimento da estaca;

h : espessura da camada de solo;

d_b : diâmetro da estaca;

E_p : módulo de elasticidade do material da estaca;

E_b : módulo de elasticidade da camada resistente de solo;

E_s : módulo de elasticidade do solo;

ν_s : coeficiente de Poisson do solo;

ν_b : coeficiente de Poisson da camada resistente de solo;

Já a rigidez relativa do material da estaca (K_p) em relação ao solo é determinada pela Equação 2.4, descrita a seguir:

$$K_p = \frac{E_p}{E_s} \cdot R_A \quad (2.4)$$

Na qual:

R_A : relação entre a área da estaca e sua área circunscrita, tendo $R_A = 1$ para seção cheia.

Poulos & Davis (1980) relatam que o recalque no topo da estaca pode ser expresso, com precisão suficiente, em termos do recalque de uma estaca incompressível no semi-espaço, com fatores de correção para os efeitos da compressibilidade da estaca compressível,

e assim por diante. Para isso é feita a consideração de uma massa de solo homogênea e os parâmetros do solo, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, todas constantes. O valor do recalque é dado pela seguinte expressão:

$$\rho = \frac{P \cdot I_F}{E_s \cdot d_b} \quad (2.5)$$

Onde:

P : carga aplicada;

L : comprimento da estaca;

h : espessura da camada de solo;

I_F : é dado por $I_F = I_0 \times R_k \times R_h \times R_v$;

I_0 : fator de influência de recalque para estaca incompressível na massa semi-infinita, para ν_s igual 0,5;

R_k : fator de correção para compressibilidade da estaca;

R_h : fator de correção para profundidade finita da camada sobre uma base rígida;

R_v : fator de correção para coeficiente de Poisson do solo (ν_s);

E_s : módulo de elasticidade do solo;

d_b : diâmetro da estaca.

2.2.2.2 – Método de Randolph & Wroth

Segundo Randolph & Wroth (1978) as técnicas numéricas de análise e o método dos elementos finitos tem sido usados com algum sucesso para previsão de recalques. Entretanto, ambos tem suas limitações e não é claro como modificar as soluções obtidas para levar em conta não-homogeneidades ou a não-linearidade no comportamento do solo os quais podem ocorrer em qualquer campo em particular.

Um enfoque analítico tem levado ao desenvolvimento de uma solução fechada aproximada para o recalque de uma estaca sob uma carga dada e as equações resultantes representam um auxílio flexível ao projeto de tal modo que rápidas estimativas de deformação da estaca podem ser feitas sem recorrer ao computador.

Além disso, a análise indica os parâmetros de solo relevantes que precisam ser medidos, e demonstra a maneira a qual o “amolecimento” local próximo à estaca ou o efeito de um extrato fraco de solo a determinada profundidade abaixo da estaca podem ser levados

em conta (Nogueira, 2004). A Figura 2.6 ilustra o princípio da metodologia proposta por Randolph e Wroth em 1978.

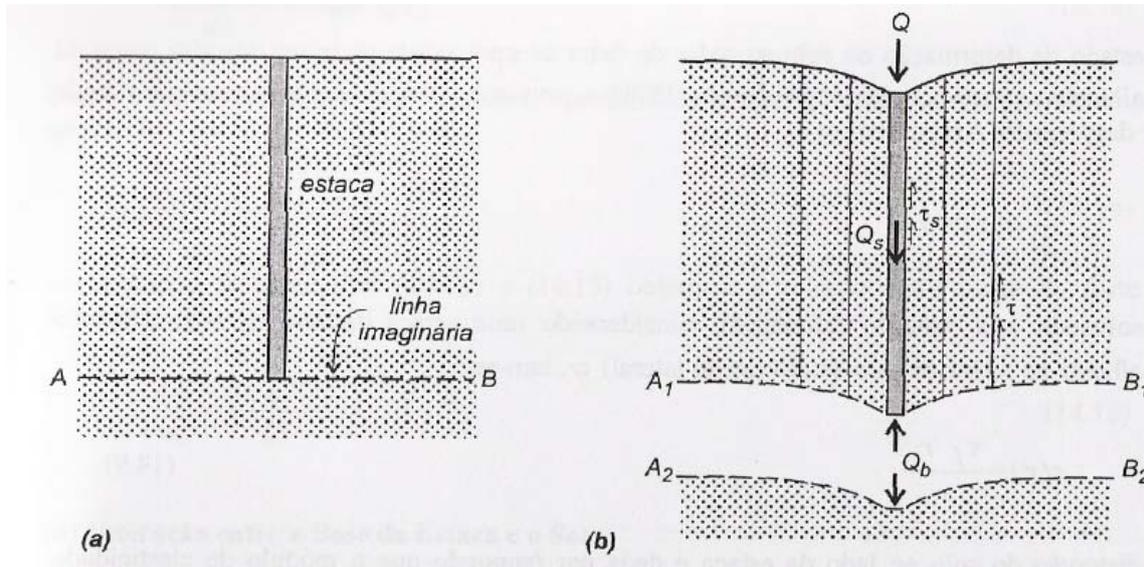


Figura 2.7. Separação das camadas de solo pelo Método de Randolph e Wroth: (a) estaca sem carregamento e (b) estaca carregada axialmente (Velloso & Lopes, 2002).

Considerando-se apenas a interação entre o fuste da estaca e o solo, obteve-se a Equação 2.6:

$$\frac{P_m}{W_m} = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot G_m}{\zeta} \quad (2.6)$$

Onde:

P_m : carga aplicada;

w_m : recalque;

L : comprimento da estaca;

G_m : módulo de elasticidade transversal, definido em função do módulo de elasticidade longitudinal e do coeficiente de Poisson, conforme equação logo abaixo;

$$G_m = \frac{E_m}{2 \cdot (1 - \nu)} \quad (2.7)$$

ζ : é dado pela equação abaixo;

$$\zeta = \ln \left(\frac{r_m}{r_0} \right) \quad (2.8)$$

Onde:

r_0 : raio da estaca;

r_m : raio máximo defindo por;

$$r_m = 2,5 \cdot L \cdot (1 - \nu) \quad (2.9)$$

Considerando agora somente a interação da base da estaca e o solo, obteve-se:

$$W_b = \frac{(1 - \nu) \cdot P_b}{4 \cdot r_0 \cdot G_b} \quad (2.10)$$

O índice “b” se refere ao solo abaixo da ponta da estaca. Considerando-se estaca rígida valem as Equações 2.11 e 2.12:

$$W = W_m + W_b \quad (2.11)$$

$$P = P_m + P_b \quad (2.12)$$

De onde vem a relação carga-recalque dada pela Equação 2.13, abaixo:

$$\frac{P}{W \cdot r_0} = \frac{4 \cdot G_b}{1 - \nu} + \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot G_m}{\zeta \cdot r_0} \quad (2.13)$$

A partir dessas equações, foram encontradas soluções para estacas compressíveis, solos com casos simples de heterogeneidade, aumento abrupto do módulo cisalhante (G) abaixo da ponta da estaca e estacas com base alargada, chegando à solução completa, fornecida pela Equação 2.14:

$$\frac{P_t}{G_1 \cdot r_m \cdot W_t} = \frac{\frac{4\eta}{(1-\nu) \cdot \xi} + \rho_R \cdot \frac{2\pi \cdot \text{tgh}(\mu L) \cdot L}{\zeta \cdot \mu L \cdot r_0}}{1 + \frac{1}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{4\eta}{(1-\nu) \cdot \xi} \cdot \frac{\text{tgh}(\mu L)}{\mu L} \cdot \frac{L}{r_0}} \quad (2.14)$$

Onde:

P_t : carga no topo da estaca aplicada;

w_t : recalque no topo da estaca;

G_l : módulo cisalhante do solo a uma profundidade $Z = L$;

r_m : $r_m = L \{0,25 + \xi [2,5\rho(1-\nu) - 0,25]\}$;

r_0 : raio da estaca;

L : comprimento da estaca;

η : r_b / r_0 , onde “ r_b ” é o raio da ponta da estaca;

ξ : G_l / G_b , onde “ G_b ” é o módulo cisalhante abaixo da ponta da estaca;

ρ_R : G_m / G_l , onde “ G_m ” é o módulo cisalhante médio do solo no trecho penetrado pela estaca;

λ : E_p / G_l , onde “ E_p ” é o módulo de elasticidade do material da estaca;

μL : é definido pela fórmula abaixo (entra na equação em radiano);

$$\mu L = \frac{L}{r_0} \cdot \sqrt{\frac{2}{\xi \cdot \lambda}} \text{(radiano)} \quad (2.15)$$

ζ : $\ln (r_m/r_0)$.

2.3 – Mecanismos de Interação em Fundações Estaqueadas

O estudo teórico da interação de uma estaca com um elemento superficial a ela ligado teve seu início nos estudos da década de 60, e prosseguiu com outros trabalhos, como o de Butterfield & Banerjee (1971) e Ottaviani (1975). Segundo Poulos (1989), o fator de interação é o incremento fracionário em deslocamento de uma estaca devido à presença de uma estaca vizinha carregada. Em outras palavras, isto nada mais é que a relação entre o recalque adicional causado numa estaca devido outra estaca próxima a esta, e que devido a continuidade do solo, arrasta a estaca vizinha, quando ambas estão sujeitas a carregamento.

A análise de interação entre duas estacas pode ser representada por:

$$\alpha_{kl} = \frac{\text{recalque adicional na estaca "k" devido à carga unitária aplicada na estaca "l"}}{\text{recalque da estaca "k" sob carga unitária}} \quad (2.16)$$

Entretanto para a análise de um radier estaqueado torna-se necessária a consideração de quatro outros mecanismos de interação desenvolvidos entre os elementos da fundação mista. A Figura 2.7 mostra os mecanismos de interação entre os elementos.

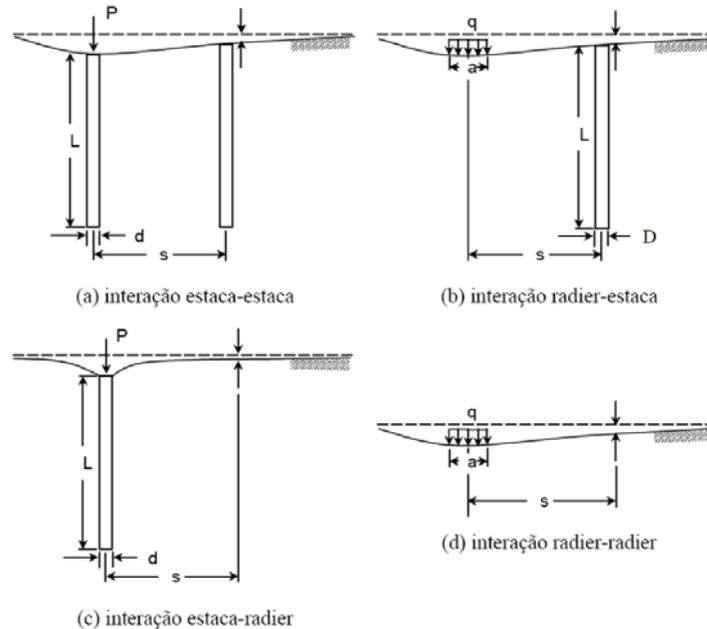


Figura 2.8. Mecanismos de interação em radiers estaqueados – modificado de Poulos (2001).

Segundo Cordeiro (2007), muitas variáveis podem influenciar os fatores de interação, afetando assim o comportamento do grupo como um todo. As variáveis imediatas são a heterogeneidade do solo, o fator de rigidez estaca-solo, o atrito lateral da estaca, além da resistência de ponta das estacas e do espaçamento entre as mesmas.

Kuwabara (1989) apresentou que a força de arraste máxima nas estacas de um grupo decresce significativamente à medida que o espaçamento entre as estacas decresce. O autor concluiu ainda que:

- A redução na força de arraste não depende consideravelmente da quantidade de estacas;
- O movimento superficial do solo necessário à mobilização do deslocamento total dentro do grupo da estaca pode ser maior do que o correspondente a uma estaca isolada;
- Para um grupo de estacas com bloco de coroamento rígido é possível que forças de tração se desenvolvam na parte superior das estacas externas.

Considerando um grupo constituído por uma quantidade “N” de estacas idênticas , Poulos & Davis (1980) sugeriu que o deslocamento de uma estaca “k” do grupo é dado pela seguinte equação:

$$\rho_k = \rho_l \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N P_l \alpha_{kl} + \rho_l P_k \quad (2.17)$$

Onde:

ρ_l : deslocamento sob carga unitária de uma estaca isolada idêntica às que formam o grupo;

P_k, P_l : cargas aplicadas no topo das estacas “k” e “l” respectivamente;

α_{kl} : fatores de interação entre as estacas “k” e “l”, espaçadas e conforme definido na equação 16.

Na Figura 2.8, a seguir, as estacas são divididas por uma certa quantidade de elementos uniformemente carregados, e o efeito proveniente da interação entre os dois elementos é avaliado pelo fator de interação. É importante frisar que tanto na equação 2.17, como na Figura 2.8, a relação tensão-deformação do solo e o comportamento da estaca é elástico-linear.

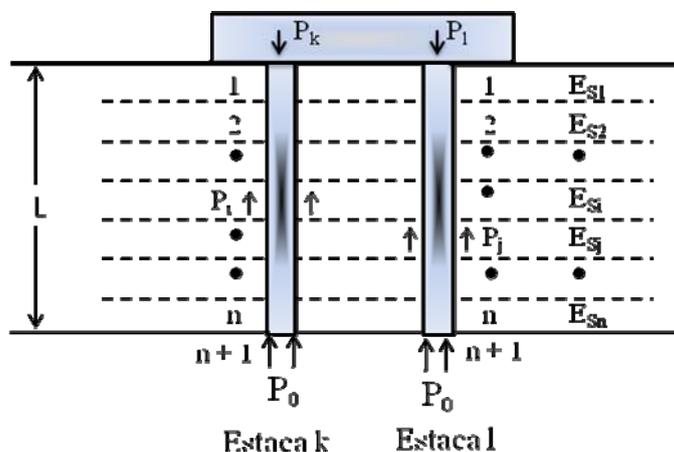


Figura 2.9. Distribuição de tensões no fuste e na base das estacas de um grupo.

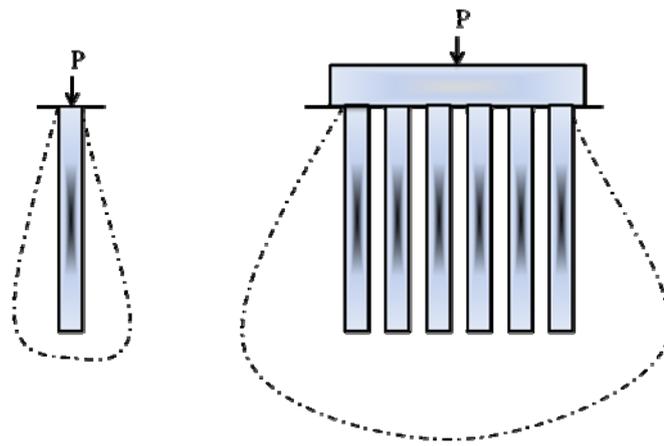
Em 1980, Akinmuru estudou em laboratório a capacidade de carga final do estaqueamento como resultado da combinação do tipo de estaca e do grupo. Abaixo seguem os principais resultados sobre o efeito do bloco de coroamento na capacidade de carga do sistema, contidos no trabalho citado:

- Na interação entre o bloco, o grupo de estacas e o solo (no caso de estacas flutuantes), a capacidade de carga última das estacas não é uma simples soma algébrica entre a capacidade do bloco e o grupo de estacas;
- Em areias e no caso de estacas flutuantes, estas têm maior capacidade de carga que a soma algébrica;
- Devido a interação, momentos são induzidos nas estacas, ocorrendo também um aumento do atrito lateral em cada estaca.

2.4 – Grupos Estaqueados

Frequentemente utilizam-se os grupos de estacas como elementos estruturais de fundação para obras civis como grandes edifícios, ou mesmo pontes. As estacas são usualmente projetadas em grupo, o que chama a atenção para o seu respectivo processo executivo, pois em solos arenosos, e para grupo de estacas cravadas, ocorrem mudanças permanentes e significativas nas tensões horizontais, e verticais, com a instalação das mesmas. O entendimento destas tensões torna-se fundamental para a compreensão do comportamento da interação entre o solo e a estaca (Freitas, 2010).

Esse agrupamento de estacas produz fenômenos de interação, cujo efeito é função do tipo de estaca e da natureza do terreno. Dessa forma, a capacidade de carga e o recalque do grupo não são produtos respectivamente do somatório algébrico da capacidade de carga das estacas e do recalque. Isto se deve a superposição de tensões entre as estacas próximas através do solo que as circunda. Na Figura 2.9, logo a seguir, é feita uma comparação da região de propagação de tensões entre as estacas de um grupo e uma isolada.



(a) Bulbo de tensões para estaca isolada (b) Bulbo de tensões para um grupo de estacas

Figura 2.10. Massa de solo mobilizada por um carregamento: (a) bulbo de tensões para uma estaca isolada e (b) bulbo de tensões para um grupo de estacas.

2.4.1 – Efeito de Grupo na Capacidade de Carga em Agrupamentos de Estacas

Segundo a NBR 6122:2010, define-se efeito de grupo de estacas ou tubulões como o processo de interação das diversas estacas, ou tubulões, que constituem uma fundação, ao transmitem ao solo os esforços que lhe são aplicados. Chan (2006) salienta ainda que a análise de um grupo de estacas se constitui num problema complexo de interação solo – estrutura, uma vez que o comportamento do grupo é influenciado por:

- o método de instalação (com deslocamento ou com substituição do solo);
- a forma predominante de transferência de carga (estaca flutuante ou de ponta);
- a natureza do maciço do solo de fundação;
- a geometria tri-dimensional da configuração do grupo;
- a rigidez do bloco de coroamento;
- a rigidez relativa do bloco, das estacas e do solo.

Segundo o trabalho de Velloso e Lopes (2002), o efeito de grupo costuma ser estudado separadamente em termos de capacidade de carga e recalque.

2.4.2 – Efeito de Grupo sobre a Capacidade de Carga de Grupos de Estacas

Tradicionalmente a capacidade de carga de um grupo de estacas é relacionada com o somatório da capacidade de carga das estacas individuais através da eficiência de grupo (η), definido como:

$$\eta = \frac{\text{capacidade de carga do grupo de estacas}}{\text{somatório da capacidade de carga das estacas individuais no grupo}} \quad (2.18)$$

Várias fórmulas empíricas foram propostas no passado, geralmente relacionando a eficiência do grupo (η) ao número de estacas e ao seu espaçamento. Chellis (1961) em seu estudo mostra uma variação sensível nos valores da eficiência para uma dada configuração de grupo para diferentes formulações empíricas. Fleming e Thorburn (1983) completa, ainda, que há uma falta de base teórica consistente e de dados em campo que fornecem suporte às formulações propostas, não sendo, portanto, recomendado o cálculo de fatores de eficiência de grupo de estacas através destas formulas.

Segundo Freitas (2010), um enfoque mais racional para se estimar a capacidade de carga do grupo se considera tanto a capacidade de carga das estacas individualmente como a capacidade de carga do grupo como se fosse um bloco, ou uma fileira de estacas, determinando-se assim o modo de ruptura mais crítico.

Os fatores de eficiência do grupo podem ser obtidos com base em observações feitas em modelo reduzido ou em ensaios de campo. O Canadian Foundation Engineering Manual, CGE (1992), recomenda que o efeito de interação do grupo não precisa ser considerado quando o espaçamento entre as estacas supera oito vezes o diâmetro da estaca modelo. Lambe e Whitman (1979) citam que no caso de areais compactas a cravação poderia reduzir a capacidade dos solos devido a dilatância, e o fator de eficiência (η), neste caso, poderia ser menor que a unidade.

Vesic (1969) comparou a capacidade de carga de grupos de estacas com a capacidade de carga de estacas isoladas. As eficiências foram avaliadas separadamente para as parcelas da capacidade de carga de ponta e de atrito, bem como para a capacidade de carga global sem bloco e com o bloco de coroamento. A Figura 2.10, logo em seguida, mostra sinteticamente os resultados obtidos por Vesic.

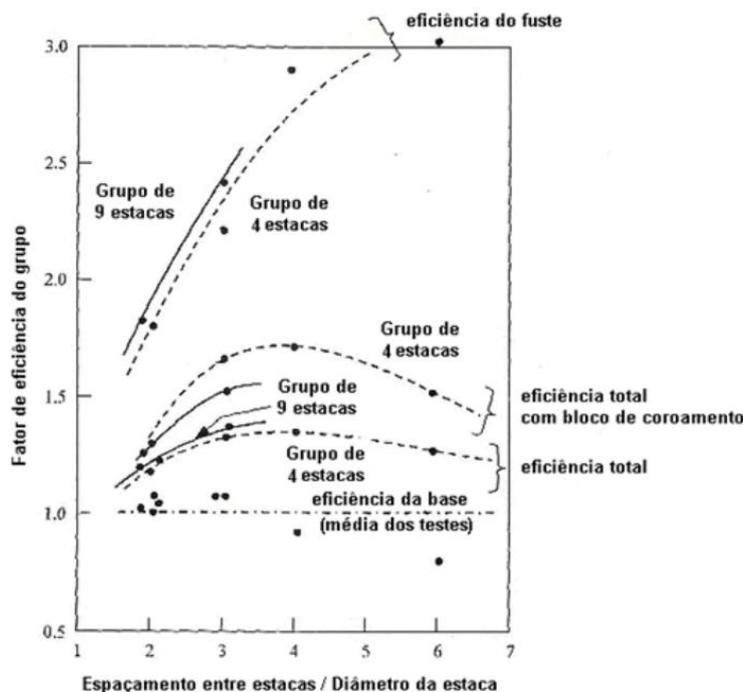


Figura 2.11. Resultados de ensaios em modelos de grupos de estacas instrumentadas cravadas em areia (modificado – Vesic, 1969).

Chan (2006) ressalta ser aceitável que, para espaçamentos usuais entre as estacas, a interação surge face à superposição do campo de tensões, e afeta somente a capacidade de carga por atrito lateral, sendo independente do topo de estaca e da natureza do solo. O mesmo autor reforça ainda que o comportamento de estacas cravadas pode ser afetado pelas tensões residuais originadas pelo processo de instalação das estacas. Ainda pelo autor, na prática, o processo de cravação das estacas afeta as tensões residuais das estacas vizinhas de forma diferente, nos ensaios em modelo reduzido, como resultado do efeito de escala, podendo compensar o efeito benéfico da densificação.

Segundo Fleming et al. (1992), na prática, se uma estaca isolada apresenta adequada margem de segurança à ruptura, não há risco de ruptura em bloco para grupos de estacas que trabalham a ponta em areias, sem uma camada mais fraca na subjacência. No caso de se predominar ponta e atrito em areias, deve-se verificar tanto a ruptura da estaca isolada como do grupo, como ilustra a Figura 2.10. A possibilidade de ruptura do bloco, ou da linha de estacas, deve ser verificada considerando-se a parcela de atrito e ponta na ruptura, de forma apropriada. A visualização destas possibilidades está apresentada na Figura 2.11.

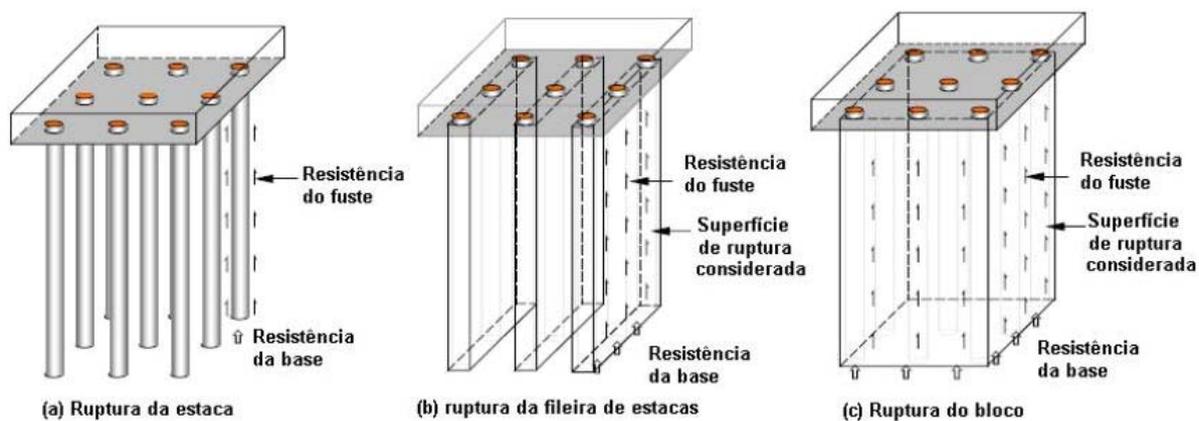


Figura 2.12. Mecanismos de ruptura em grupos de estacas: (a) ruptura da estaca; (b) ruptura da fileira de estacas e (c) ruptura por bloco.

2.4.3 – Efeito de Grupo em Termos de Recalques em Agrupamentos de Estacas

O recalque de um grupo de estacas sujeito a certa carga média por estaca é geralmente maior do que o da estaca isolada sob a mesma carga, como exemplifica a Figura 2.12, logo abaixo:

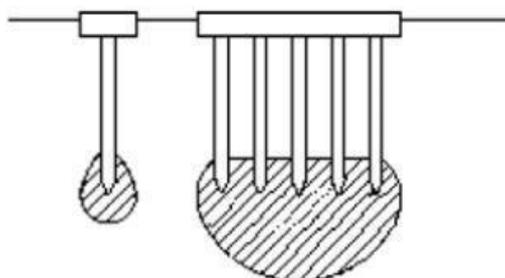


Figura 2.13. Esquema de tensões impostas ao solo por uma estaca isolada e por um grupo de estacas (Tomlinson, 1994).

A razão entre o recalque médio do grupo e o recalque da estaca isolada sob carga média por estaca do grupo é denominada relação (ou razão) de recalque, R_s . O'Neill (1983), conforme citado em Chan (2006), resume as relações de recalques observadas em ensaios de grupos de estacas em escala real assentes num maciço arenoso. O mesmo autor ainda verificou que os valores da relação de recalques são superiores a 1, exceto em estacas cravadas em areias fofas, face ao elevado aumento da rigidez do solo do grupo de estacas devido aos efeitos da compactação.

Dentre os vários enfoques propostos para avaliar o efeito do grupo em termos de recalque, destaca-se:

- Os métodos semi-empíricos;
- O método do radier equivalente;
- O método da estaca equivalente;
- Os métodos dos fatores de interação;
- Os métodos numéricos.

Várias formulações semi-empíricas que foram geradas a partir de observações em locais restritos, e merecem destaque as propostas para previsão de recalques em grupos de estacas de Skempton (1953) apud Vesic (1969), e Meyerhof (1976). Freitas (2010) aponta que tais fórmulas estão sujeitas a uma calibração dos seus resultados, uma vez que as mesmas foram concebidas em função de resultados experimentais pontuais, sem uma verificação capaz de permitir sua aplicação em outras situações. Por este motivo não são detalhadas no presente trabalho.

2.4.3.1 – Método do Radier Equivalente

Terzaghi e Peck (1967) apresentaram um procedimento simples para o cálculo de recalques em grupos de estacas. A princípio, o grupo de estacas é idealizado como um radier equivalente considerado totalmente flexível. A profundidade e dimensão do radier equivalente dependem do modo de transferência de carga, associado às características do terreno de fundação, conforme Figura 2.13.

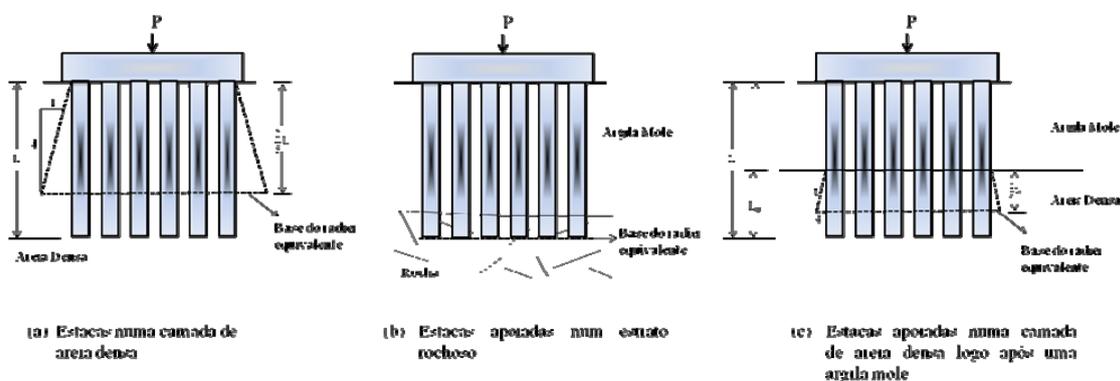


Figura 2.14. Método do radier equivalente: (a) estacas numa camada única de areia; (b) estacas atravessando uma camada de argila e apoiadas pela ponta num estrato rochoso; (c)

estacas atravessando uma camada de argila e apoiadas numa camada arenosa (modificado - Tomlinson, 1994).

O recalque do radier equivalente pode ser calculado utilizando-se a Teoria da Elasticidade, para solos granulares, e a Teoria do Adensamento, para solos argilosos. O recalque no topo é obtido a partir da soma do recalque do radier e da compressão elástica correspondente ao trecho do comprimento da estaca imediatamente acima do radier equivalente. Esta metodologia é geralmente adequada para cálculos rotineiros envolvendo grupos com a geometria simples, de forma a se obter uma primeira ordem de grandeza do recalque no grupo.

2.4.3.2 – Método da Estaca Equivalente

Poulos & Davis (1980) apresentaram um método no qual o comportamento do grupo é comparado ao de uma estaca equivalente, e o recalque médio é calculado a partir do recalque desta estaca resultante. A ilustração desta metodologia pode ser visualizada na Figura 2.14, logo a seguir.

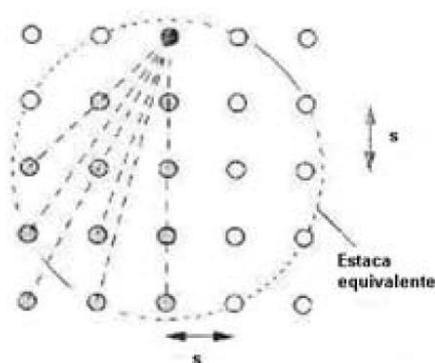


Figura 2.15. Método da estaca equivalente (modificado - Randolph, 1994).

O diâmetro desta estaca (d_{eq}) é dado pela equação (2.19). A estaca equivalente terá um módulo de Young equivalente, E_{eq} , dado pela equação (2.20), sendo E_s o módulo de Young do solo, E_p o da estaca e A_t a soma das áreas das seções das estacas do grupo. Randolph (1994) também indica o uso dessa metodologia para a estimativa de recalques de grupos de estacas pouco espaçadas.

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot A_s} \quad (2.19)$$

$$E_{eq} = E_s \cdot \left[1 + \left(\frac{A_t}{A_g} \right) \left(\frac{E_p}{E_s} - 1 \right) \right] \quad (2.20)$$

2.5 – Radier Estaqueado

Um número considerável de estruturas, especialmente edifícios altos (tall buildings), é fundado em radiers estaqueados (O'Neill et al., 1996; Poulos, 2001). A norma brasileira não apresenta ainda uma definição consensual a cerca do termo radier estaqueado, entretanto esta mesma norma aceita o projeto “não convencional” deste tipo de sistema de fundação, e este mesmo tipo de fundação vem sendo estudado e utilizado por diversas regiões do globo. A diferença primordial desta fundação em relação às demais fundações reside no fato de que as cargas são absorvidas tanto pelo radier, como pelas placas, considerando-se assim um fator de segurança adequado para cada caso. Basicamente um radier estaqueado é um sistema de fundações composto por três elementos portantes: as estacas, o radier e o solo. Em seguida uma imagem ilustrativa (Figura 2.15) de um prédio na Alemanha fundado em radier estaqueado.

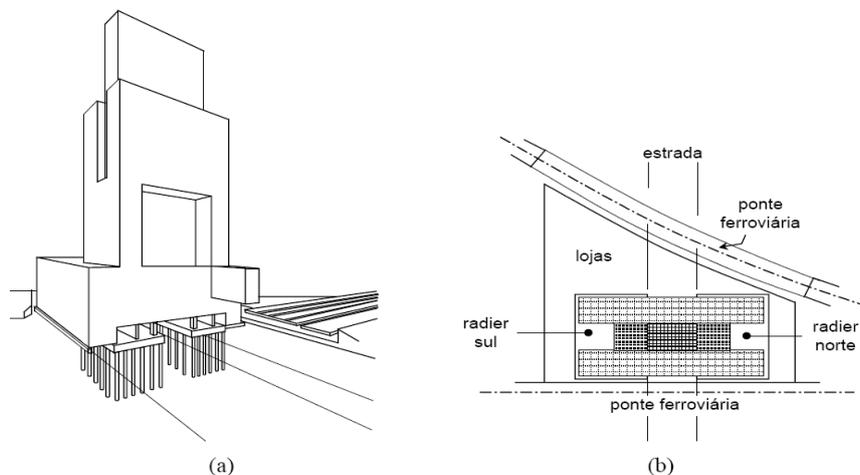


Figura 2.16. Radier estaqueado em argila de Frankfurt: (a) vista isométrica esquemática da fundação e superestrutura; (b) vista em planta (modificado - Sommer et al., 1985).

Comparando-se com as tradicionais fundações estaqueadas (grupos de estacas), onde a carga da superestrutura é transferida para o solo unicamente pelas estacas, as fundações do tipo radier estaqueado refletem uma abordagem de cálculo mais sofisticada, que é justificada economicamente sob o ponto de vista executivo (Cordeiro, 2007; Bezerra, 2003; Cunha *et al.*, 2007). Assim, a parcela de carga do radier é considerada, tornando a capacidade de carga do

conjunto no mínimo igual a capacidade de carga de estacas isoladas (Katzenbach & Turek, 2005).

Um dos primeiros estudos teóricos a considerar a contribuição do bloco apoiado no solo superficial num grupo de estacas foi o de Kishida & Meyerhof (1965), apud Sales (2000). A partir deste estudo, que analisou grupos de estacas em areias, sugeriram duas possíveis formas de ruptura:

- Para estacas pouco espaçadas haveria uma tendência de ruptura de todas as estacas em conjunto, como se fosse uma grande estaca única (um tubulão equivalente). Neste caso, a capacidade de carga do conjunto seria calculada como a capacidade de carga de um “tubulão equivalente”, acrescido da capacidade de carga do bloco superficial, considerando-se, somente, a área externa ao conjunto das estacas (conforme Figura. 2.16a);
- Para estacas espaçadas, a capacidade de carga da fundação seria a soma da capacidade de carga do grupo de estacas, levando-se em conta a sobrecarga ao nível da ponta das estacas provocada pelo bloco (vide Figura 2.16b).

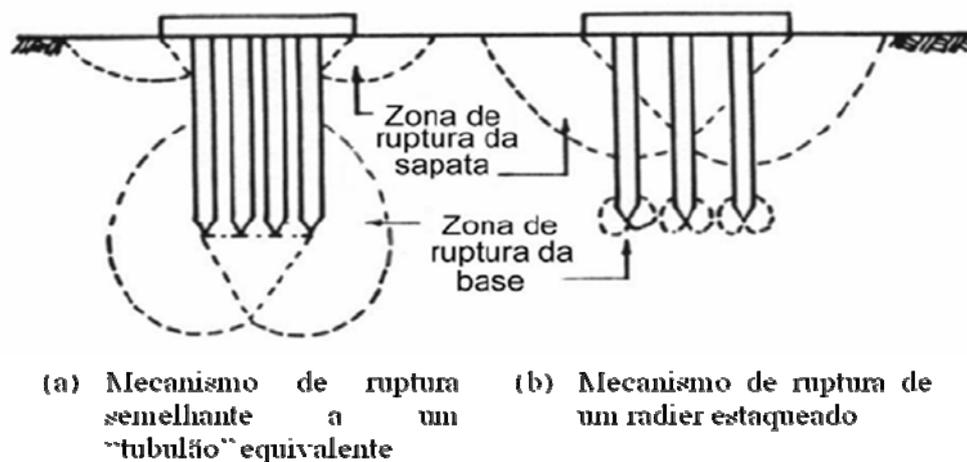


Figura 2.17. Formas de ruptura de uma sapata estacada (modificado – Phung, 1993)

Burland *et al* (1977), apud Mandolini & Viggiani (1997), salientou que existe uma quantidade de estacas necessária para que o sistema de fundamento suporte o peso do edifício, e consiga reduzir também a quantidade de recalques para um valor aceitável, trabalhando de forma otimizada.

A transferência das cargas aplicadas ao solo se faz através três maneiras: pela base do elemento estrutural (o radier em si) igualmente nas fundações superficiais, e também ao longo do fuste e da ponta do elemento vertical, tal qual em fundações profundas (Cordeiro, 2007).

O radier estaqueado é um tipo de solução adotada quando a capacidade de carga de suporte do terreno para fundações diretas apresenta uma qualidade razoável, mas o recalques totais, e diferenciais, para as cargas de projeto, atingem valores elevados. A introdução de algumas estacas sob o elemento horizontal (o radier) visa, portanto, a redução dos valores dos recalques para níveis aceitáveis, além de participar de forma solidária das reações de carga. Sendo assim, e conforme Russo & Viggiani (1998), Poulos (2001) e Mandolini (2003), as estacas, num radier estaqueado, funcionam basicamente como redutores de recalque.

Poulos (2001) apontou que o comportamento de radiers estaqueados é afetado por alguns fatores como: o número de estacas empregadas, a natureza do carregamento, a rigidez do radier e o nível de carga aplicada. A partir de um certo número de estacas, o incremento de mais elementos verticais não trará a melhor performance ao sistema (Mandolini, 2003). O comportamento ideal para o presente sistema de fundações é algo em que o radier trabalhe num limite aceitável de carga, e as estacas funcionem como elementos redutores de recalques.

2.5.1 – Metodologia de Projeto

Estacas podem ser incluídas numa fundação superficial por duas principais razões de projeto: fornecer uma capacidade de carga adequada ao sistema, ou com o intuito de reduzir os recalques para um nível aceitável.

O cotidiano de elaboração de fundações estaqueadas é baseado num pressuposto que o peso total da superestrutura é suportado pelas estacas. Uma abordagem diferente da padrão para projetos, envolvendo as estacas como redutores de recalques, foi publicada inicialmente por Burland et. al (1977), Padfield & Sharrock (1983), Hansbo & Jendenby (1983), Hansbo (1984). O conceito básico desses trabalhos é que a fundação admite unicamente um número mínimo de estacas, que é responsável pela redução dos recalques a um nível aceitável, e as cargas oriundas da estrutura são transmitidas através do sistema (uma parte via as estaca também, e outra via a área entre o radier e as estacas).

Estacas que trabalham que apresentam uma boa resistência de fuste são mais adequadas como redutoras de recalques, assim que a capacidade de carga do radier é mobilizada com pequenos recalques e, para a maioria dos solos, ela permanece constante, mesmo para recalques relativamente grandes (Giretti, 2009).

No caso de um radier com uma placa extremamente rígida, as estacas reduziram unicamente o recalque total; ao passo que numa placa flexível, a redução seria tanto nos recalques diferenciais ao longo da placa, como também no recalque total também. No último caso, o projeto é focado na distribuição das estacas ao longo de um plano e nos espaçamentos entre elas, o que diminui as deformações na placa. Entretanto, um número relativamente pequeno de estacas pode levar a problemas, como elevados momentos fletores, e a cisalhamentos no radier, além de uma concentração excessiva de esforços na cabeça das estacas (Horokoshi & Randolph, 1998; Russo & Viggiani, 1998; Viggiani, 2001; Poulos, 2001; Mandolini, 2003).

Inicialmente a utilização de estacas em fundações rasas possuía a finalidade restrita de reduzir os recalques, entretanto, agregada a esta finalidade as estacas trabalham conjuntamente com radier, aumentando a capacidade total do sistema, como dito anteriormente. Randolph (1994) definiu claramente três filosofias de projeto (conforme visualização na figura 2.17) para radiers estaqueados:

- Uma abordagem mais tradicional, onde as estacas são dimensionadas para suportar a maior parte do carregamento. A contribuição do radier é pequena na capacidade máxima total;
- “Creep Piling”, onde as estacas são projetadas para operar com uma carga de trabalho na qual é permitido certo grau de rastejo (creep). Resumidamente, esta abordagem é baseada na mobilização total das estacas;
- Controle de recalques diferenciais, onde as estacas são posicionadas estrategicamente como mecanismo de prevenção de recalques.

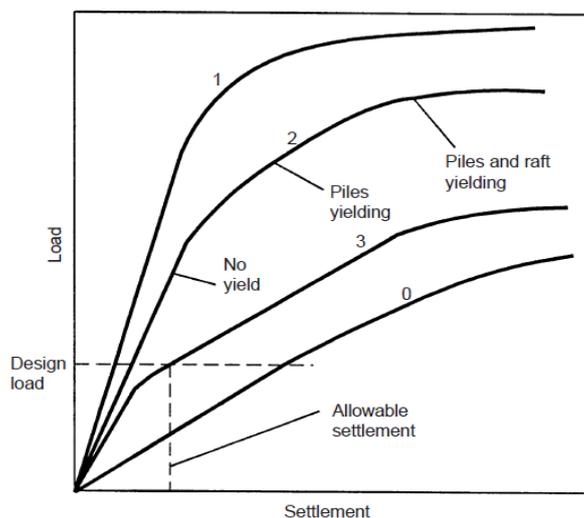


Figura 2.18. Curvas de carga – recalque para radiers estaqueados de acordo com as filosofias de projeto de Randolph (1994) – Poulos (2001).

Segundo Poulos (2001) a última das três filosofias (que é representada no gráfico anterior) conduz para uma fundação mais econômica, entretanto sua projeção requer alguns cuidados especiais. Mandolini (2003) apresentou algumas diretrizes para dar suporte aos engenheiros na seleção de um procedimento de projeto apropriado, que garante em termos ótimos, um comportamento satisfatório de segurança e de custo e que leva em consideração a capacidade última das estacas em função do tamanho do bloco. Depois de fixado o requisito de comportamento para a fundação, torna-se possível definir um valor crítico para a largura do radier e conseqüentemente selecionar um projeto apropriado.

Segundo Russo & Viggiani (1998), sistemas de fundações que possuem capacidade de carga suficiente para absorver os carregamentos aplicados com um razoável coeficiente de segurança utilizam as estacas essencialmente como redutores de recalques. Nessas situações a largura do radier é maior que o comprimento das estacas, entretanto esta regra não se aplica em relação às rigidezes dos elementos estruturais.

Padfield & Sharrock (1983) também discutiram um projeto econômico para o sistema de radier estaqueado que faz uso das estacas como redutores de recalque. Os autores sugeriram que uma resposta rígida deva ser considerada para as estacas centrais do radier, e uma resposta menos rígida, para aquelas presentes na periferia do elemento horizontal (radier).

A técnica para analisar o sistema não tem sido completamente determinada, e requer a consideração da interação do radier, do solo suporte, e do grupo de estacas (Cordeiro, 2007). Além disso, e ainda segundo Cordeiro (2007), desde que a rigidez da estrutura influencie a distribuição das cargas e os momentos transmitidos para o radier, o sistema completo que deveria ser analisado, consistiria do suporte estrutura radier grupo de estaca solo. Entretanto, é vantajoso inicialmente estudar o comportamento da configuração suporte radier/grupo de estaca/solo antes de considerar a complexidade a mais da interação da estrutura (Hain & Lee, 1978).

2.5.2 – Comportamento Carga-Recalque

Para estimativa do comportamento carga – recalque de um radier estaqueado pode-se, adotar um estudo introduzido por Poulos & Davis (1980) acrescido da metodologia simples de estimativa de compartilhamento de carga entre radier e estacas proposta por Randolph (1994). Portanto, a rigidez do conjunto (radier + estaca) pode ser estimada através da fórmula:

$$K_{pr} = \frac{K_p + K_r(1 - \alpha_{cp})}{1 - \alpha_{cp}^2 \cdot K_r \cdot K_p} \quad (2.21)$$

A rigidez do sistema é dada pela equação (2.21) até a capacidade de carga das estacas serem totalmente mobilizada. A razão entre a carga que vai para o radier em relação à carga total aplicada é dada por

:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{K_r(1 - \alpha_{cp})}{K_p + K_r(1 - \alpha_{cp})} = X \quad (2.22)$$

Trabalhando-se com as equações acima mencionadas, pode-se desenvolver uma curva carga-recalque tri-linear (apresentada no gráfico 2.18), que representa com clareza os estágios de carregamento da fundação estaqueada.

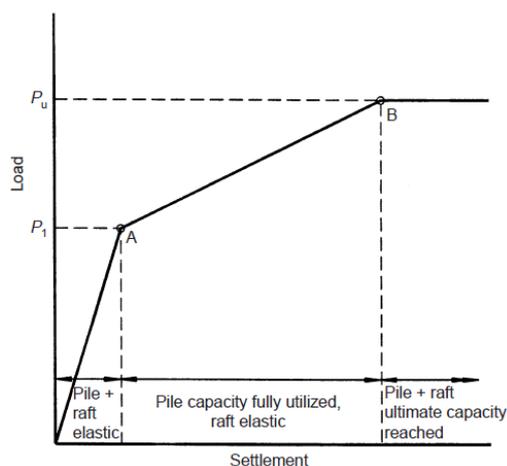


Figura 2.19. Curva simplificada carga – recalque para análises preliminares – Poulos (2001).

Num trabalho preliminar, Davis & Poulos (1972), baseando-se na solução elástica para o recalque de uma estaca com “cap”, criaram vários ábacos para estimar o fator de recalque R_G de um radier estaqueado, devendo-se utilizar as Equações 2.23 e 2.24:

$$\delta = R_G P_G \delta_1 \quad (2.23)$$

$$R_G = R_C R'_G \quad (2.24)$$

Onde:

δ = recalque do radier estaqueado;

δ_1 = recalque de uma estaca sem “cap” sob carga unitária;

P_G = carga total atuante no radier estaqueado;

R_G = relação entre o recalque médio da fundação (radier estaqueado) e o recalque de uma estaca isolada, sem “cap”, sob carga total atuante no grupo;

R_C = razão entre o recalque de uma estaca com “cap” e outra similar sem o “cap”;

R'_G = razão entre o recalque médio de uma fundação (radier estaqueado) e o recalque de uma estaca, com “cap”, sob carga total atuante no grupo.

- No trecho entre a origem e o ponto A, antes da total mobilização das estacas, o recalque seria estimado pela Equação 24;
- No trecho AB, após a total mobilização de todas as estacas, assume-se que toda a carga excedente ao valor “PA” seria absorvido pelo radier (ou cap), e, portanto, o recalque excedente ao valor “ δ_A ”, seria calculado como o de um radier isolado sem a presença das estacas. Este acréscimo de recalque ($\delta_B - \delta_A$) seria calculado por

qualquer equação elástica, dependendo da forma do radier. Por exemplo, para um radier quadrado de lado “B”;

$$\bullet \quad \delta_w = P_A R_G \delta_A + \frac{0,947(P_w - P_A)(1 - \nu^2)}{(BE_s)} \quad (2.25)$$

onde:

- P_w é a carga no radier, entre os valores P_A e P_B , aplicada ao radier estaqueado;
- P_A = carga total que corresponde ao momento de total mobilização do conjunto de estacas;
- δ_w = recalque do radier estaqueado, sob a carga P_w ;
- E_s = módulo elástico do solo;
- ν = coeficiente de Poisson do solo;
- B = largura do radier.

Entre as fórmulas para determinação do recalque, algumas delas utilizam-se das mesmas de grupo de estacas, pois se entende que as estacas são as que reagem mais intensivamente contra o recalque, como por exemplo:

- Skempton (1953);
- Meyerhof (1959);
- Randolph (em Fleming *et al.*, 1985);
- Poulos & Davis (1980).

2.6 – Modelagens Físicas

A utilização de modelos em escala reduzida por construtores e engenheiros recorre de tempos antigos. No entanto, esses modelos, primariamente, serviam de auxílio para o planejamento e construção de algumas obras complexas, e não eram usados para prever deformações, deslocamentos e forças em protótipos. Seu respectivo uso como ferramenta prática no entendimento comportamental de estruturas geotécnicas é algo extremamente recente, e seu desenvolvimento foi fortemente influenciado pela análise de tensões experimentais.

O emprego de modelos reduzidos envolvendo investigações geotécnicas tem mostrado como uma boa alternativa na análise e previsão de fenômenos que ocorrem na natureza. Sendo assim, os modelos são empregados para fornecer informações necessárias para completar um projeto, aumentando, portanto, sua eficiência e precisão. Na construção de um modelo, e na transposição de seu desempenho para a estrutura real (protótipo), uma série de requisitos básicos deve ser satisfeita, visando assegurar a perfeita similaridade física entre um e outro. Este conjunto de condições, ou leis de similitude, pode ser sistematizado através da análise dimensional, e a partir do Teorema de Buckingham-Vaschy, no qual estabelece que a solução de um dado fenômeno físico pode ser expressa analiticamente em termos de uma relação envolvendo certo número de termos adimensionais e independentes entre si.

O método de previsão por meio de modelos físicos também apresenta limitações claras. Simplesmente não se pode pensar em se criar um modelo físico em escala reduzida enquanto não se identificarem claramente as grandezas que intervêm no fenômeno físico de que dependem as previsões a serem feitas. Segundo Motta (1972) há casos em que a única redução das dimensões geométricas faz aparecer forças que não se manifestam no sistema cujo comportamento se pretende prever.

De uma maneira geral, a modelagem física pode ser idealizada como um dispositivo de previsão em que o fenômeno real é reproduzido numa escala menor (Ribeiro, 2000). Uma reprodução em escala reduzida de uma determinada situação física pode ser satisfatoriamente válida quando certas condições de proporcionalidade forem atendidas, como a escala de projeção do modelo e a conservação das características mais relevantes do fenômeno, ou seja, a própria manutenção da semelhança.

Segundo Gomes (1993) as análises, por modelos geotécnicos reduzidos incorporam basicamente um dos seguintes objetivos:

- investigação direta do comportamento da estrutura real; neste caso, o modelo reduzido deve satisfazer integralmente as leis de similitude física (sendo chamado de modelos absolutos ou de similitude completa);
- investigação dos mecanismos de ruptura; neste caso, o protótipo (modelo reduzido) não precisa ser globalmente simulado (sendo chamado de modelos relativos ou de similitude restrita);

- aquisição de dados relativos ao problema geotécnico em estudo para aferição dos métodos de análises disponíveis (sendo chamados, como no caso anterior, de modelos relativos ou de similitude restrita).

2.6.1 – Definição

Um modelo reduzido pode ser entendido como a redução de uma estrutura complexa (um edifício, uma barragem ou uma ponte) conhecida como protótipo a uma estrutura relativamente mais simples, sem perder as características importantes do comportamento do protótipo (Reinhorn, 2008).

O uso de modelos reduzidos envolvendo investigações geotécnicas tem-se mostrado como uma boa alternativa na análise e previsão de fenômenos que ocorrem na natureza. Sendo assim, os modelos são empregados para fornecer informações necessárias para completar um projeto, aumentando, portanto, sua eficiência e precisão. Na construção de um modelo, e na transposição de seu desempenho para a estrutura real (protótipo), uma série de requisitos básicos deve ser satisfeitos, visando assegurar a perfeita similaridade física entre um e outro.

2.6.2 – Processo de Execução de um Modelo Reduzido

O sucesso de estudo de um modelo se caracteriza por um planejamento cuidadoso das diversas etapas do processo de execução do modelo. Um estudo experimental de uma estrutura de engenharia é em si um pequeno projeto de engenharia, e como em qualquer projeto de engenharia, precisa de uma seqüência lógica e criteriosa de eventos. O planejamento detalhado de um experimento é ainda mais essencial do que o planejamento de um cálculo analítico, porque o refinamento de um modelo estrutural a meio caminho através de um processo de execução é geralmente impossível (Harris, Sabnis, 1999).

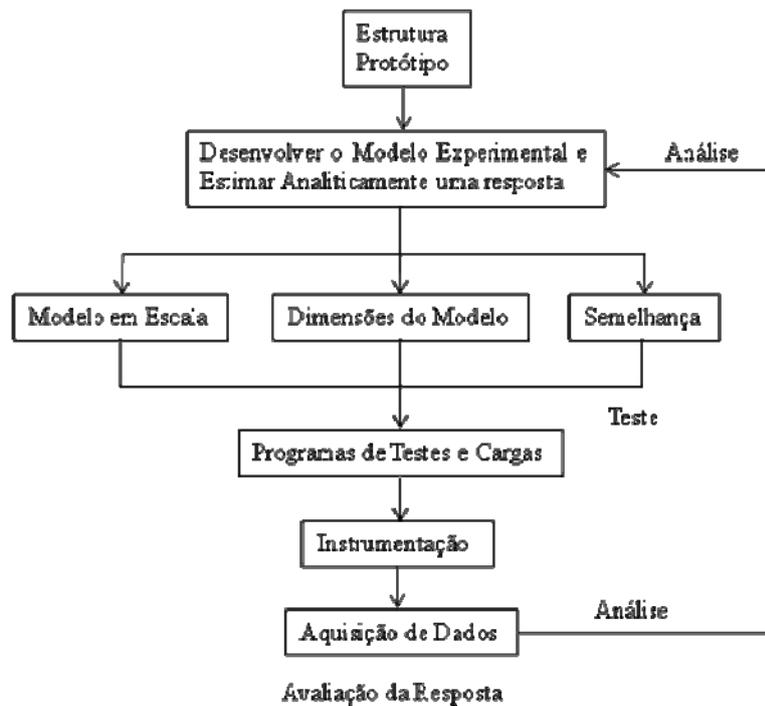


Figura 2.20. Sequência de execução do modelo de teste (Reinhorn, 2008 – modificado).

A seguir mostra-se a sequência de execução de um modelo físico:

1. Definir o objetivo dos testes experimentais (resposta desejada, mecanismo de falha, etc.);
2. Selecionar a escala, normalmente regida pelos recursos do laboratório (espaço, dispositivos de carregamento, etc.);
3. Seleção do tipo de material do modelo;
4. Condições de semelhança. Pode não obedecer a um modelo real;
5. Projeto do modelo e plano de fabricação;
6. Instalação de sensores para medir a resposta da estrutura;
7. Salvar e armazenar dados experimentais (aquisição de dados);
8. Observar a resposta e análise de dados, e ter um diário de todas as atividades experimentais.

2.6.3 – Classificação

Segundo Gomes (1993), uma classificação geral dos tipos de modelos físicos, passíveis de aplicação a problemas geotécnicos, em função da natureza das grandezas envolvidas, objetivos visados e infraestrutura disponível, pode ser apresentada pela Tabela a 2.3 seguir:

Tabela 2.3 – Tipos de modelos em problemas geotécnicos (modificado – Gomes, 1993)

Classe	Tipos de Modelos	Princípios Básicos
I	Modelos Absolutos ou de Similitude Completa.	Simulação plena de todas as grandezas intervenientes no fenômeno analisado.
II	Modelos Relativos ou de Similitude Restrita.	Simulação apenas das grandezas mais relevantes ao fenômeno analisado.
II.A		Mesmo material do protótipo e em condições similares (modelos de similitude imperfeita).
II.B		Mesmo material do protótipo e em diferentes estados iniciais.
II.C		Material equivalente ao usado no protótipo.
II.D		Simulação do campo gravitacional.
III	Modelos Distorcidos	Simulação obtida através da adoção de diferentes escalas para grandezas de mesma base dimensional.
IV	Modelos Analógicos	Simulação obtida através da correlação entre os fenômenos qualitativamente distintos, mas regidos por equações de mesma estrutura formal.

2.6.4 – Semelhança em Modelos Reduzidos

Um modelo reduzido para representar o protótipo torna-se necessário que haja semelhança. A princípio, todas as grandezas adimensionais, fatores de forma e funções devem ter o mesmo valor no modelo quanto no protótipo. Na maioria dos casos introduzem-se distorções, em virtude de se adotar no modelo escalas diferentes para grandezas de um mesmo tipo: segundo Souza (2003), as consequências dessas distorções devem ser cuidadosamente analisadas, para evitar equívocos na interpretação dos resultados. A seguir serão descritos dois tipos de modelos: os com semelhança geométrica e os com semelhança distorcida.

2.6.4.1 – Semelhança Geométrica

Trata-se do caso onde o modelo e protótipo possuem a mesma forma e comportamento geométrico, tal qual a figura abaixo:

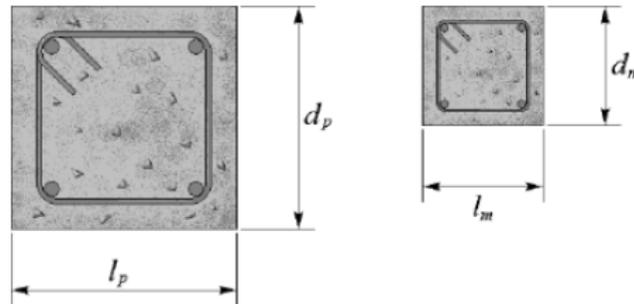


Figura 2.21. Semelhança geométrica (Melo, 2011).

2.6.4.2 – Semelhança Distorcida

O modelo é uma reprodução do protótipo, mas são usadas duas ou mais escalas diferentes. Por exemplo, uma escala é usada para a profundidade e a largura, e outra para altura (Liang & Reinhorn, 2008).

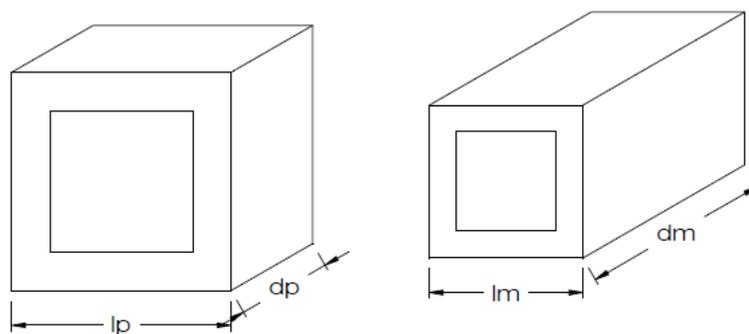


Figura 2.22. Semelhança distorcida (Melo, 2011).

2.6.5 – Testes em Modelos 1g

O estudo do comportamento de fundações estacadas em laboratório, sob a ação da gravidade normal (1g), via modelagem reduzida, apresenta uma série de limitações que

impedem a extrapolação dos resultados de ensaio para fundações reais. Basicamente estas restrições se devem ao pequeno nível de tensões impostas nos modelos (em virtude do uso de gravidade normal), as próprias dimensões das amostras e do modelo, amolgamento e etc. Entretanto, estas limitações não invalidam estes trabalhos, que podem ser considerados, sob o prisma qualitativo, como estudos altamente representativos do comportamento de fundações.

Segundo Sales (2000), em laboratório, quando não se trata de um estudo para um caso específico, a escolha do solo a ser utilizado torna-se algo extremamente difícil. Ainda segundo o autor, as areias permitem a execução de ensaios mais rápidos, mas geralmente apresentam ângulos de atritos maiores para valores baixos de tensões confinantes, e são mais sujeitas ao efeito da escala do ensaio, em função da própria dimensão dos grãos. Já no caso de areias densas, há a questão da dilatância para baixos níveis de tensão. A escolha pelo uso de uma argila, para ensaios em modelagem reduzida, leva a outros problemas como uma dificuldade maior no preparo da amostra e a própria instalação da fundação.

3 – Materiais e Métodos

Nesse capítulo são apresentadas as características físicas e mecânicas dos materiais utilizados na pesquisa visando a simulação do comportamento de um sistema de fundação estaqueado sujeito a cargas verticais. Além disso, são descritos os tipos de configuração para os ensaios executados e o procedimento seguido para a elaboração de cada ensaio.

3.1 – Equipamentos Utilizados nos Ensaios

Na pesquisa descrita nessa dissertação foram executados ensaios visando simular uma fundação estaqueada sujeita a cargas verticais, e axiais, desconsiderando o contato do bloco com o solo de sustentação, e com o respectivo contato. É importante destacar que todos os ensaios foram devidamente monitorados por meio de instrumentação em locais estratégicos nos elementos da fundação em modelo reduzido. Com isso pretendeu-se simular qualitativamente a estrutura em escala reduzida, lançando-se mão da metodologia e equipamentos de ensaio descritos a seguir.

3.1.1 – Tanque Rígido para os Ensaios

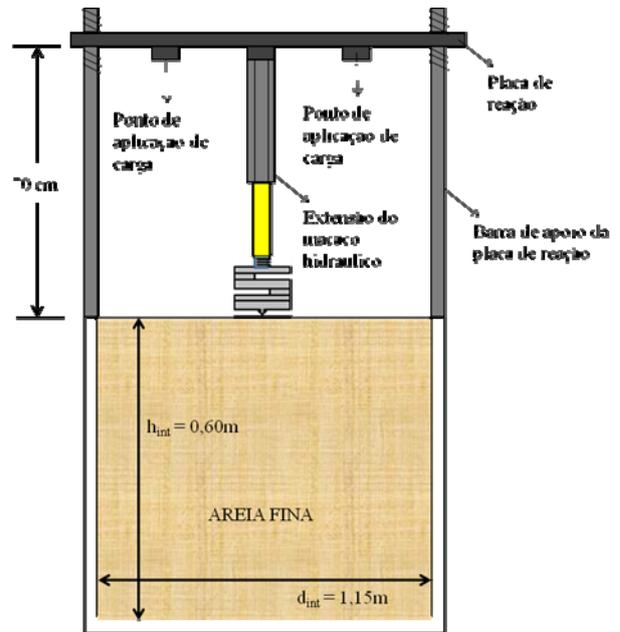
Os ensaios de carregamento vertical axial foram realizados em um tanque cilíndrico metálico rígido (conforme figura 3.1), o qual possuía as seguintes dimensões:

- diâmetro interno (d_{int}) de 1,15m;
- altura interna (h_{int}) de 0,60m.

Como parte da montagem, uma placa de aço com espessura de 25,4mm (uma polegada), e diâmetro de 1,20m foi acoplada ao tanque rígido, a uma altura de 0,70m funcionando como um sistema de reação para o cilindro hidráulico de aplicação de cargas.



(a) Foto ilustrativa do tanque rígido



(b) Desenho esquemático

Figura 3.1. Tanque rígido: (a) foto ilustrativa e (b) desenho esquemático.

3.1.2 – Sistema Hidráulico

Para executar os ensaios de carregamento vertical foi necessário um sistema hidráulico que permitisse a aplicação de uma carga axial estabelecida para simular as cargas, em condições específicas, a que uma fundação está sujeita. Esse sistema é formado basicamente pelos seguintes componentes:

- **Cilindro Hidráulico:** é o componente responsável pela aplicação da carga desejada no ensaio. A capacidade do cilindro utilizado é de 200kN;
- **Mangueira Hidráulica:** tem como função transportar o fluido desde o macaco hidráulico até o cilindro, sendo capaz de suportar uma pressão de 70 MPa.
- **Macaco Hidráulico:** é a parte do sistema responsável por fornecer a carga hidráulica necessária para os carregamentos aplicados.

3.1.3 – Sistema de Aquisição dos Dados

Para fazer as leituras das instrumentações empregadas nos ensaios foi utilizada a mesa leitora do modelo SM-60D, fabricada pela *Kyowa Electronic Instruments Company of Japan*,

com uma resolução de 0,00001%. A Figura 3.2 ilustra o sistema de aquisição de dados adotado na presente pesquisa.



Figura 3.2. Sistema de aquisição de dados: no canto superior esquerdo da mesa encontra-se a mesa leitora (SM-60D), ao centro na parte inferior o *Strain Meter* e no canto superior direito o relógio de carga.

3.1.4 – Medidores de Deslocamento Vertical

Na pesquisa utilizaram-se medidores analógicos de deslocamentos lineares (relógios comparadores da marca Mitutoyo), conforme Figura 3.3, para se obter os recalques da fundação em escala reduzida. Os relógios comparadores usados possuem a precisão de 0,01 mm e permitem um deslocamento de até 100 mm.



Figura 3.3. Relógio comparador utilizado para aferição de deslocamentos verticais.

3.1.5 – Instrumentação Utilizada

Todos os ensaios foram monitorados através de uma instrumentação apropriada, com a utilização de uma célula de carga, extensômetros na face interna das estacas e um medidor de deslocamento linear.

3.1.5.1 – Célula de Carga

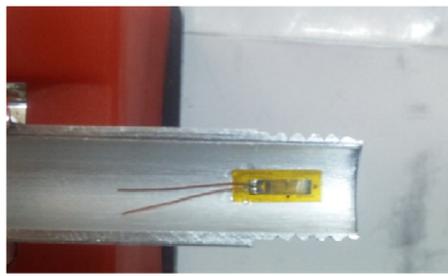
Em todos os ensaios foi utilizada uma célula de carga de 200 kN (conforme Figura 3.4), que serviu para aferição da carga aplicada na placa metálica de compactação do solo de fundação (a areia fina) e do modelo de fundação em pequena escala.



Figura 3.4. Célula de carga empregada nos ensaios.

3.1.5.2 – Extensômetros

Foram utilizados extensômetros do modelo PA-06-125BA-120L fabricados pela Excel Sensores, os quais foram colados 6 strain gages, na parte interna de cada estaca, sendo 3 em cada meia cana na posição vertical, diametralmente opostos, para a determinação do módulo de elasticidade (do elemento vertical) e da transferência da carga aplicada ao longo da estaca (conforme Figura 3.5). Os extensômetros foram fixados nas barras de alumínio com um adesivo do tipo CA, que são a base de cianoacrilato, comercialmente conhecido como *Super bonder*® 493.



(a) Extensômetro colado na base



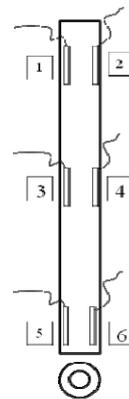
(b) Extensômetros colados no topo e no meio da estaca

Figura 3.5. Extensômetros colados em uma das estacas: (a) Extensômetro na base da estaca e (b) Extensômetro colado no topo e no meio da estaca.

A Figura 3.6 apresenta uma ilustração dos extensômetros utilizados e um desenho esquemático do posicionamento dos mesmos nas estacas.



(a) Extensômetros da empresa Excel Sensores Ltda



(b) Desenho esquemático da disposição dos extensômetros

Figura 3.6. Extensômetros utilizados: (a) Extensômetros apropriados para o material alumínio e (b) disposição dos extensômetros na estaca.

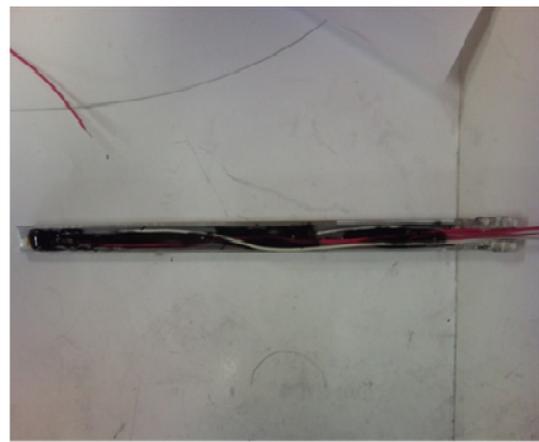
De modo se garantir uma melhor proteção do atrito solo-estaca, a instrumentação (colocação dos extensômetros) foi realizada pela parte interna das estacas, efetuando-se um lixamento prévio com a lixa nº 120 e em seguida, para o acabamento da superfície e diminuição dos sulcos que potencialmente poderiam aparecer, foi utilizada a lixa nº 320. Em seguida, aplicou-se o neutralizador e um condicionador sobre tal superfície, de modo a garantir uma melhor aderência. Para o isolamento dos cabos utilizados nos terminais dos extensômetros foram utilizadas resina de silicone (RK) e borracha de silicone (SK), ambas fabricadas pela EXCEL Sensores. A Figura 3.7 mostra os itens acima descritos, bem como a meia cana de uma estaca finalizada.



(a) Condicionador



(b) Resina de silicone



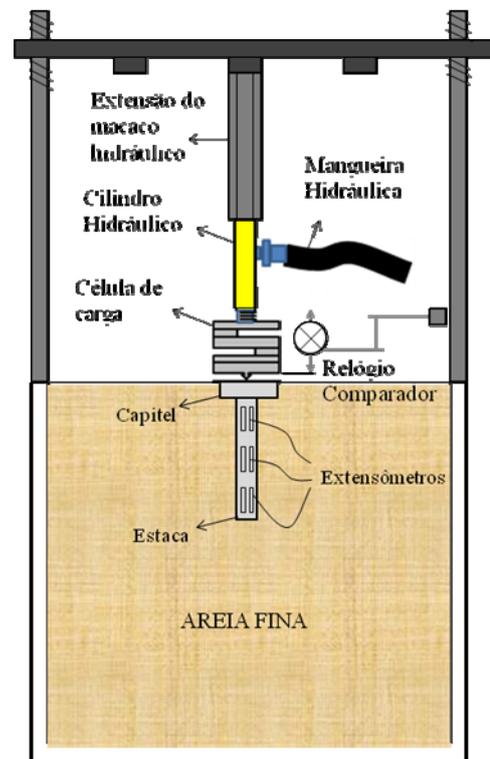
(c) Meia cana de uma estaca finalizada e isolada com a borracha de silicone

Figura 3.7. Materiais utilizados na instrumentação: (a) Condicionador aplicado para garantir a aderência; (b) Resina de silicone para isolamento e (c) Borracha de silicone aplicada na meia cana de uma estaca para isolamento.

Na Figura 3.8 é apresentado um esquema da disposição dos equipamentos utilizados nos ensaios.



(a) Foto ilustrativa da disposição dos equipamentos



(b) Desenho esquemático

Figura 3.8. Disposição dos equipamentos utilizados nos ensaios.

3.2 – Materiais Utilizados

O modelo reduzido de fundação da presente dissertação foi confeccionado por placas retangulares e tubos de alumínio. O solo de sustentação da fundação em escala reduzida trata-se de uma areia fina a média ($D_{50} = 0,22$ mm). Estes materiais são descritos a seguir.

3.2.1 – Radiers, Blocos e Cap

Para simular os blocos, radiers e o cap foram utilizadas placas regulares de alumínio com mesmo módulo de elasticidade das estacas, largura de 80 mm para grupo de 4 estacas; 107 mm para o agrupamento com 9 estacas; 142 mm para o agrupamento de 16 estacas, e espessura de 127 mm para ambas as placas. Os radiers não foram instrumentados em virtude de suas rigidezes serem superiores a do solo. Sendo assim, as deformações da placa serão consideradas desprezíveis, adotando-se um deslocamento uniforme. A seguir são apresentadas figuras ilustrativas das respectivas placas utilizadas como blocos (e radiers), e dos espaçamentos adotados.

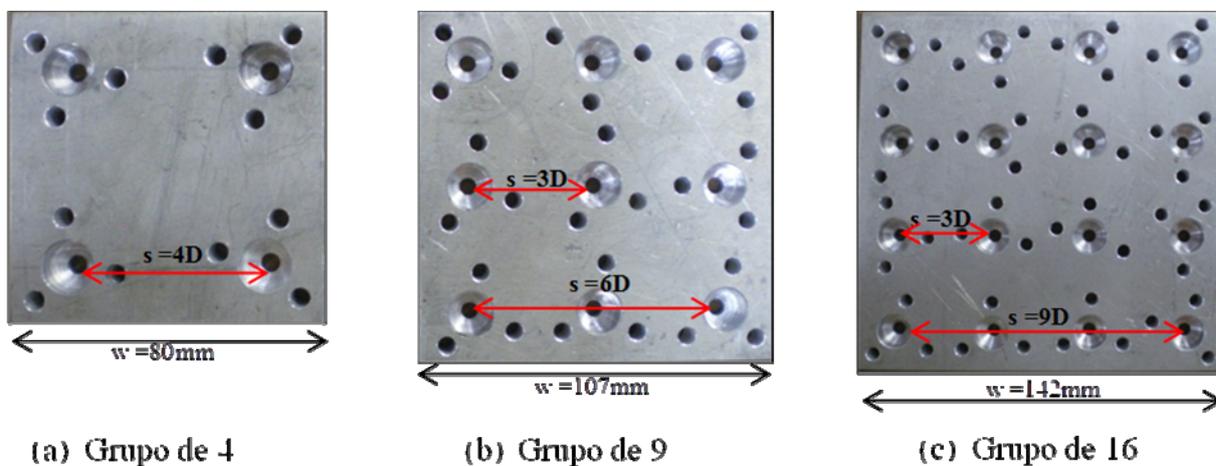


Figura 3.9. Placas quadrangulares de alumínio utilizadas como radiers e blocos: (a) Grupo com 4 estacas; (b) grupo com 9 estacas e (c) Grupo com 16 estacas.

Os furos efetuados na parte superior das placas de alumínio possuem a finalidade de permitir a passagem dos cabos dos extensômetros para o sistema de aquisição de dados. Ainda na parte superior das placas retangulares, foi elaborada uma depressão côncava cujo objetivo foi garantir a verticalidade do carregamento, uma vez que possíveis momentos poderiam surgir a partir de qualquer excentricidade entre a extremidade de aplicação de carga do

cilindro hidráulico e o bloco/radier em escala reduzida. Este sulco pode ser verificado na Figura 3.10, logo a seguir.

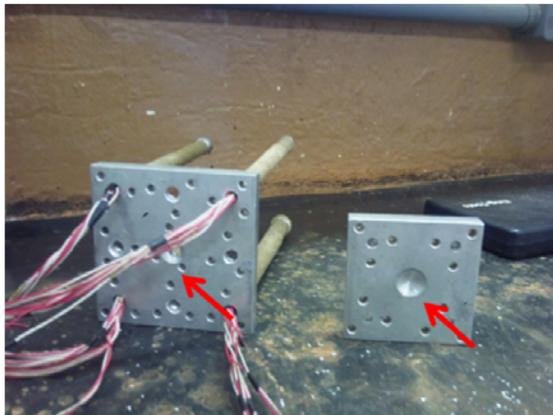


Figura 3.10. Depressão côncava efetuada nas placas retangulares de alumínio para diminuir as excentricidades potenciais do carregamento.

Na parte inferior dos blocos/radiers em escala reduzida foram elaborados roscas nos furos destinados aos topos das estacas (que também são rosqueadas). Tal iniciativa também visou a redução de momentos potencialmente provenientes de alguma excentricidade de carregamento, uma vez que encaixe perfeito entre o nicho da placa e o topo da estaca dificilmente seria alcançado com os serviços de tornearia. Além das placas destinadas ao grupo de 4, 9 e 16 estacas foi elaborado um capitel - cap (também em alumínio, e com o mesmo módulo das placas anteriores) para a elaboração dos ensaios com as estacas isoladas. Estes ensaios visam a aferição da capacidade de carga isolada das estacas que irão compor os grupos de fundações. A Figura 3.11 ilustra o cap utilizado.

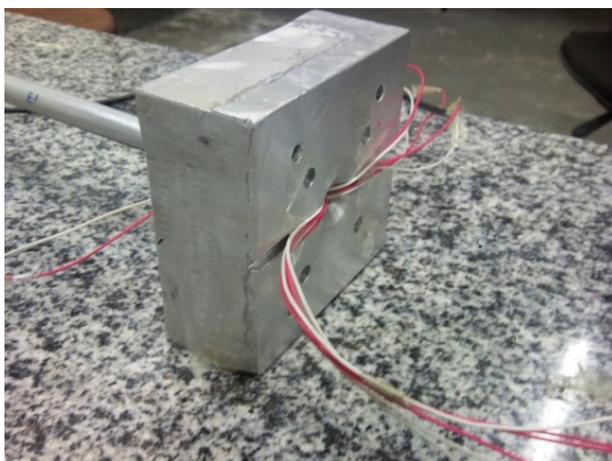
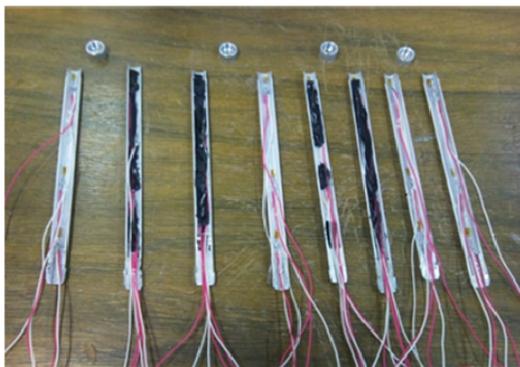


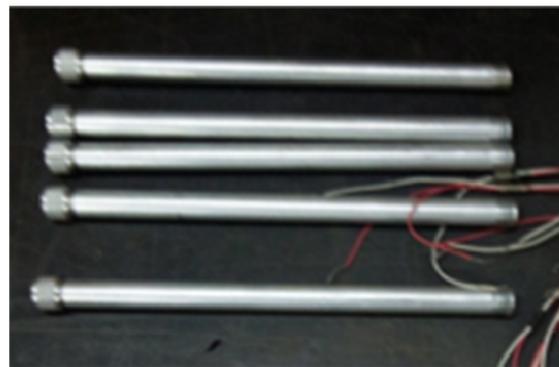
Figura 3.11. Cap destinado aos ensaios com as estacas isoladas.

3.2.2 – Estacas

Nos ensaios foram utilizados pequenos tubos vazados de alumínio partidos ao meio no sentido longitudinal para simulação das estacas. A justificativa para tal divisão dos tubos, reside no fato de que toda a instrumentação foi efetuada pela parte interna das estacas, e um corte formando duas meia-canas possibilitaria a instalação adequada dos extensômetros nos tubos. As características das pequenas estacas de alumínio são: comprimento de 232 mm; diâmetro externo de 12,8 mm; diâmetro interno de 9,2 mm; módulo de elasticidade de 64 GPa e rigidez axial (EA/L) de 18,14 MN. As estacas foram rosqueadas nas duas extremidades: no topo, a rosca efetuada se cavilha com a tarraxa inferior presente na placa retangular que funciona como bloco/radier; e na base uma rosca veda o tubo para funcionar como a ponta de uma estaca. A Figura 3.12 ilustra as estacas em escala reduzida.



(a) 4 estacas longitudinalmente partidas



(b) 5 estacas com a rosca de vedação na base

Figura 3.12. Tubos de alumínio simulando as estacas em escala reduzida: (a) As meias-canas instrumentadas e (b) Estacas com a rosca de vedação na extremidade inferior.

A relação entre o diâmetro da estaca com o diâmetro médio do grão da partícula de areia é 58. Essa consideração é ainda suficiente para minimizar o efeito de escala do tamanho do grão sobre o comportamento da interface estaca-solo (Garnier e König, 1998; Foray *et al.*, 1998; Fioravante, 2002 e Garnier, 2002).

Após a instalação dos extensômetros em cada meia cana, a superfície lateral exterior de cada metade das estacas foi lixada (com a lixa n° 120). Após o lixamento das faces externas das estacas, aplicou-se araldite nas mesmas e pluviou-se areia de forma a criar um

revestimento mais rugoso nos elementos verticais (estacas). A areia utilizada na pluviação sobre o araldite é a mesma do solo de sustentação da fundação em escala reduzida usada em todos os ensaios. Além do aumento no atrito lateral dos tubos, este procedimento aproximou o ângulo de atrito da interface estaca/solo com o da areia utilizada nos ensaios. A Figura 3.13 ilustra os materiais descritos anteriormente.



Figura 3.13. Materiais utilizados para aumentar o atrito na interface solo-estaca.

As estacas com o uso de araldite (e pluviadas com areia) foram ensaiadas após 4 horas e 15 minutos de sua aplicação devido ao endurecimento da mistura, conforme orientação do fabricante. A Figura 3.14 ilustra a colocação do revestimento com areia e araldite.



(a) Estaca revestida com araldite e envolta com areia



(b) Estaca com revestimento finalizado e pronta para ensaio

Figura 3.14. Preparo do revestimento das estacas: (a) Estaca envolta com areia e (b) Estaca finalizada e pronta para ensaio.

Ressalta-se que após a aplicação do araldite com a areia pluviada, o diâmetro final da estaca foi regularizado: em outras palavras, a diferença entre os diâmetros da rosca e da estaca pode ser desconsiderada.

A Tabela 3.1 apresenta o resumo das características geométricas e mecânicas das estacas com o revestimento em araldite e areia, e sem o mesmo.

Tabela 3.1 Propriedades geométricas e mecânicas da estaca em modelo reduzido.

Propriedades do Modelo s/ Revestimento			Propriedades do Modelo c/ Revestimento		
$L_{\text{íntegra}} =$	214,8	mm	$L_{\text{íntegra}} =$	214,8	mm
$D_{\text{externo}} =$	12,8	mm	$D_{\text{externo}} =$	14,7	mm
$D_{\text{interno}} =$	9,24	mm	$D_{\text{interno}} =$	9,24	Mm
$A_{\text{efetiva}} =$	$6,06 \times 10^3$	mm^2	$A_{\text{efetiva}} =$	$1,03 \times 10^4$	mm^2
Esbeltez, $\lambda =$	1,68		Esbeltez, $\lambda =$	1,46	
$D_p/D_{20} =$	580,00		$D_p/D_{20} =$	669,00	
$E_p =$	$6,43 \times 10^4$	MPa (MN/m ²)	$E_p =$	$6,43 \times 10^4$	MPa (MN/m ²)
$I_p =$	$1,88 \times 10^7$	mm^4	$I_p =$	$3,88 \times 10^7$	mm^4
Rigidez Estrutural, $E_p \times I_p =$	$1,21 \times 10^3$	KNm ²	Rigidez Estrutural, $E_p \times I_p =$	$2,49 \times 10^3$	KNm ²
Rigidez Axial, ($E_p \times A_{\text{efetiva}}/L_{\text{íntegra}} =$	1.814,4	MN/m	Rigidez Axial, ($E_p \times A_{\text{efetiva}}/L_{\text{íntegra}} =$	3.079,6	MN/m
Rigidez, $E_p \times A_{\text{efetiva}} =$	389,62	MN	Rigidez, $E_p \times A_{\text{efetiva}} =$	661,31	MN
Coefficiente de Poisson, $\nu =$	0,34		Coefficiente de Poisson, $\nu =$	0,34	
$R_A (A_{\text{efetiva}}/\pi d^4/4) =$	0,47		$R_A (A_{\text{efetiva}}/\pi d^4/4) =$	0,61	
$A_{\text{externa}} =$	$1,28 \times 10^4$	mm^2	$A_{\text{externa}} =$	$1,70 \times 10^4$	mm^2
$L_{\text{íntegra}}/D_{\text{externo}} =$	1,68		$L_{\text{íntegra}}/D_{\text{externo}} =$	1,46	
$H/L_{\text{íntegra}} =$	3 ou 35D		$H/L_{\text{íntegra}} =$	2,1 ou 30D	

3.2.3 – Solo Utilizado no Ensaio

Para a elaboração desta pesquisa foi utilizada uma areia fina e seca de uma pesquisa em escala reduzida sobre estacas defeituosas, em andamento, no Grupo de Fundações, Ensaios de Campo e Estruturas de Contenção da UnB. A opção pela utilização do material seco foi adotada no sentido de evitar-se a variação da similitude com a umidade. Foram realizados ensaios de granulometria e resistência ao cisalhamento para a caracterização mecânica do material. A escolha da areia utilizada foi efetuada de tal forma a diminuir o efeito de escala entre o diâmetro das estacas utilizadas e o diâmetro médio dos grãos de areia. As Figuras 3.15 e 3.16 apresentam os resultados dos ensaios de caracterização realizados.

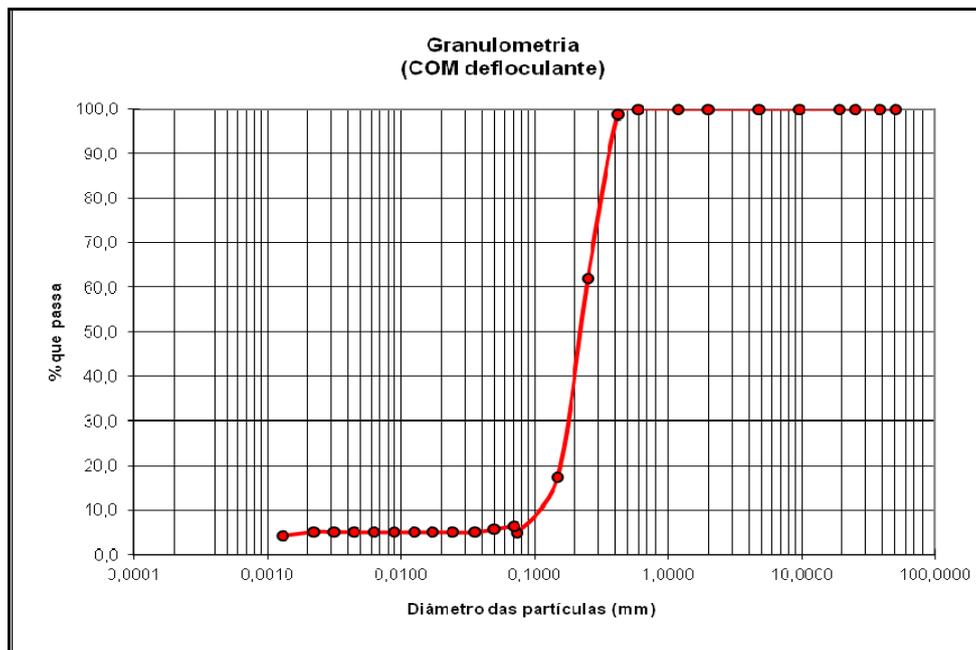


Figura 3.15 Granulometria da areia utilizada como solo de fundação do modelo reduzido.

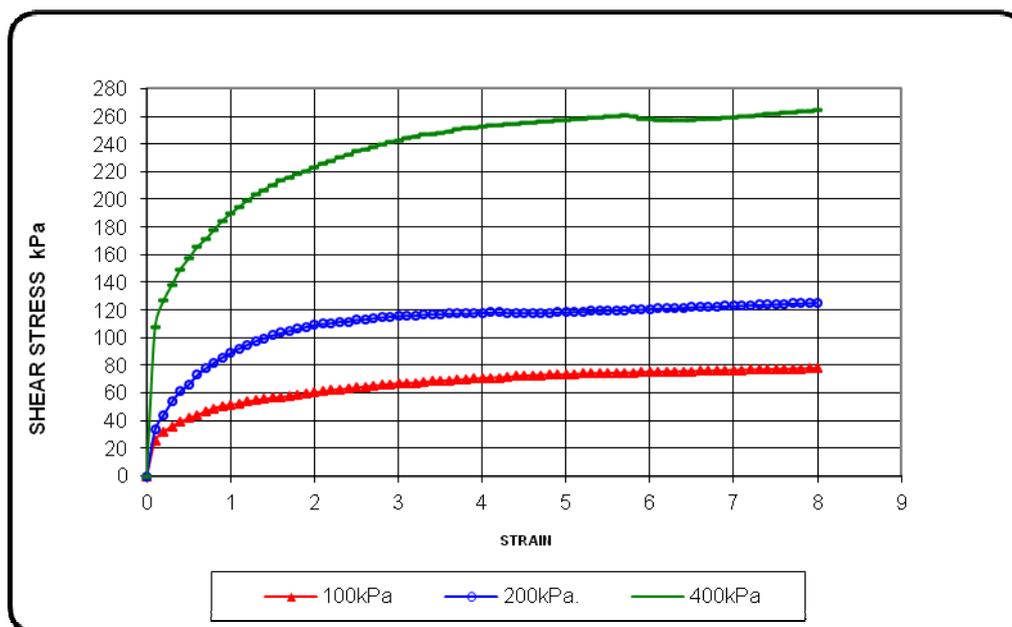


Figura 3.16. Resistência ao cisalhamento da areia fofa utilizada como solo de fundação do modelo reduzido.

Os ensaios de caracterização seguiram as normas NBR 6502:95 (Solos e Rochas), NBR 6457:86 (Amostra de Solo e Preparação para ensaios de compactação e caracterização), NBR 7181:84 (Solos – Análise Granulométrica) e NBR 6504:84 (Determinação de Massa Específica). A Tabela 3.2 apresenta as propriedades da areia utilizada.

Tabela 3.2 Características da areia seca utilizada.

Propriedade	Valores
Densidade máxima seca, $\rho_{dmáx}$ (kN/m ³)	17,0
Tamanho efetivo do grão, D_{50} (mm)	0,22
Índice de Vazios máximo, $e_{máx}$	0,75
Índice de Vazios, e	0,64
Índice de Vazios mínimo, $e_{mín}$	0,45
Compacidade Relativa, CR	0,373
Coeficiente de uniformidade, C_U	2,08
Coeficiente de Curvatura, CC	1,08
Peso específico seco, γ_d (kN/m ³)	16,3
Densidade dos Grãos, G_S	2,67
Ângulo de atrito interno, φ'	32°

3.3 – Procedimento dos Ensaios Realizados

Na pesquisa foram realizados 19 ensaios de carregamento vertical nos protótipos que simulam as fundações (grupos de estacas e radiers estaqueados) em escala reduzida. Os ensaios foram efetuados até a ruptura geotécnica dos modelos, com incrementos de carga iguais, onde em cada estágio o carregamento era mantido até a estabilização dos deslocamentos (Critério de Estabilização). Preliminarmente a execução dos experimentos com carregamentos efetuou-se os ensaios de aferição nas estacas com o objetivo de aferir-se a aplicação de carga com o sistema de leitura. A seguir serão descritos detalhadamente o procedimento adotado nos ensaios da presente pesquisa.

3.3.1 – Ensaio de Aferição

Como exposto anteriormente, esta campanha de ensaios inicial teve como finalidade a calibração entre o sistema de aplicação de cargas com o sistema de leituras. Além deste objetivo, esta fase da pesquisa visou, também, avaliar as principais influências nos procedimentos de ensaio. Os ensaios de aferição foram realizados com o auxílio de uma prensa manual, onde os carregamentos foram aplicados sobre um anel de rigidez conhecida em contato com o elemento a ser calibrado, e foram efetuadas leituras que permitiram o

confronto entre a carga aplicada e a carga lida digital e analógicamente. A Figura 3.17 ilustra o ensaio de aferição.



Figura 3.17. Ensaio de aferição das estacas utilizadas nos ensaios.

Cada estaca instrumentada foi calibrada, e estes testes foram repetidos duas vezes para verificar a repetibilidade e a presença, ou não, de histerese significativa. Para os ensaios de aferição foram utilizados blocos de alumínio no topo das estacas, conforme Figura 3.18. Os dados dessa aferição seguem na Figura 3.19.



Figura 3.18. Utilização de um bloco de alumínio para aferição das estacas.

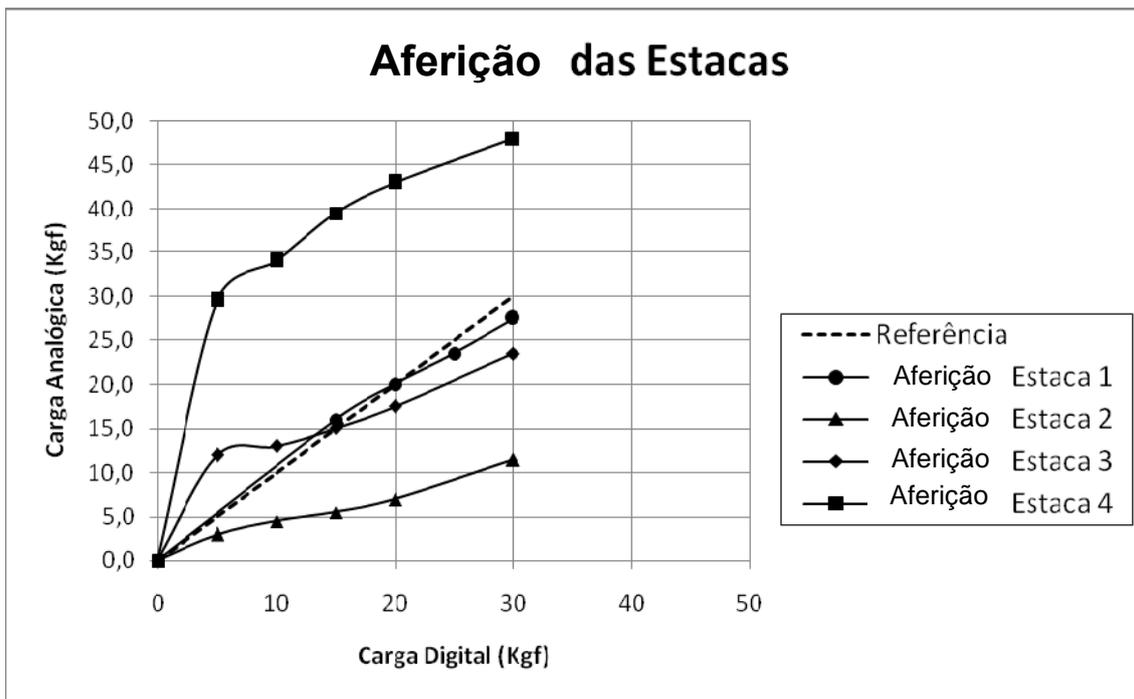


Figura 3.19. Dados do ensaio de aferição das estacas utilizadas.

Os ensaios de aferição foram procedidos com as estacas 4 e 2 sem a presença de araldite, enquanto que as estacas 1 e 3 possuíam revestimento (araldite + areia). A discrepância entre os resultados da carga digital e da analógica, nas estacas sem a presença do araldite, deve-se a flambagem das duas meias canas que formam as respectivas estacas aliado a conformação das duas meias canas nas roscas (conforme Figura 3.12). O araldite presente nas estacas 1 e 3 contribuiu, portanto, para diminuir, sensivelmente, a encurvadura dos elementos que compõem as estacas. Os modelos de estacas adotados na presente pesquisa foram os das estacas 1 e 3 respectivamente, ou seja todas as estacas ensaiadas foram revestidas com araldite e areia.

3.3.2 – Preparação do Solo de Fundação para os Modelos Reduzidos

Dado que o objeto do trabalho se consistiu em representar fundações em escala reduzida assentes numa areia (de fina a média), foram utilizados 665 kg do material descrito no item 3.2.3 (massa esta, calculada a partir do volume do tanque rígido utilizado nos ensaios). O solo foi depositado sequencialmente, a uma altura de queda de 1,00m em relação ao nível do chão do laboratório de Geotecnia, no tanque rígido para ensaios, e em três camadas: a primeira com 10 cm de altura e com uma massa de 165 kg; a segunda, e terceira,

camadas com 20cm de altura e 250kg. A Figura 3.20 mostra a preparação e o controle das camadas de areia.



(a) Retirada do solo da baía de estoque



(b) Controle da quantidade de material por camada



(c) Lançamento do material na camada



(d) Nivelamento do material lançado

Figura 3.20. Procedimento executivo do solo de sustentação das fundações em escala reduzida: (a) Retirada do material na baía de estoque; (b) Controle através de uma balança analógica da quantidade de material por camada; (c) Lançamento da areia por camada e (d) Nivelamento da camada de areia.

Para a compactação de cada camada de areia foi utilizada uma placa de aço com a massa de 40 kg e 60 cm de diâmetro até nível de carga no valor de 9 kN, em quatro pontos distintos do tanque (conforme Figura 3.21). O roteiro adotado para compactação de cada uma das três camadas constituintes do solo de sustentação é apresentada na Figura 3.22. Conforme última imagem citada, a camada é compactada em 4 etapas: o primeiro quadrante é compactado com os ciclos de cargas anteriormente descritos, sendo em seguida compactado os quadrantes 2, 3 e 4 respectivamente. Durante o processo de preparação do solo foram espalhadas cápsulas nas camadas para o controle da densidade natural (vide Figura 3.23).



Figura 3.21. Compactação da primeira das camadas de areia.

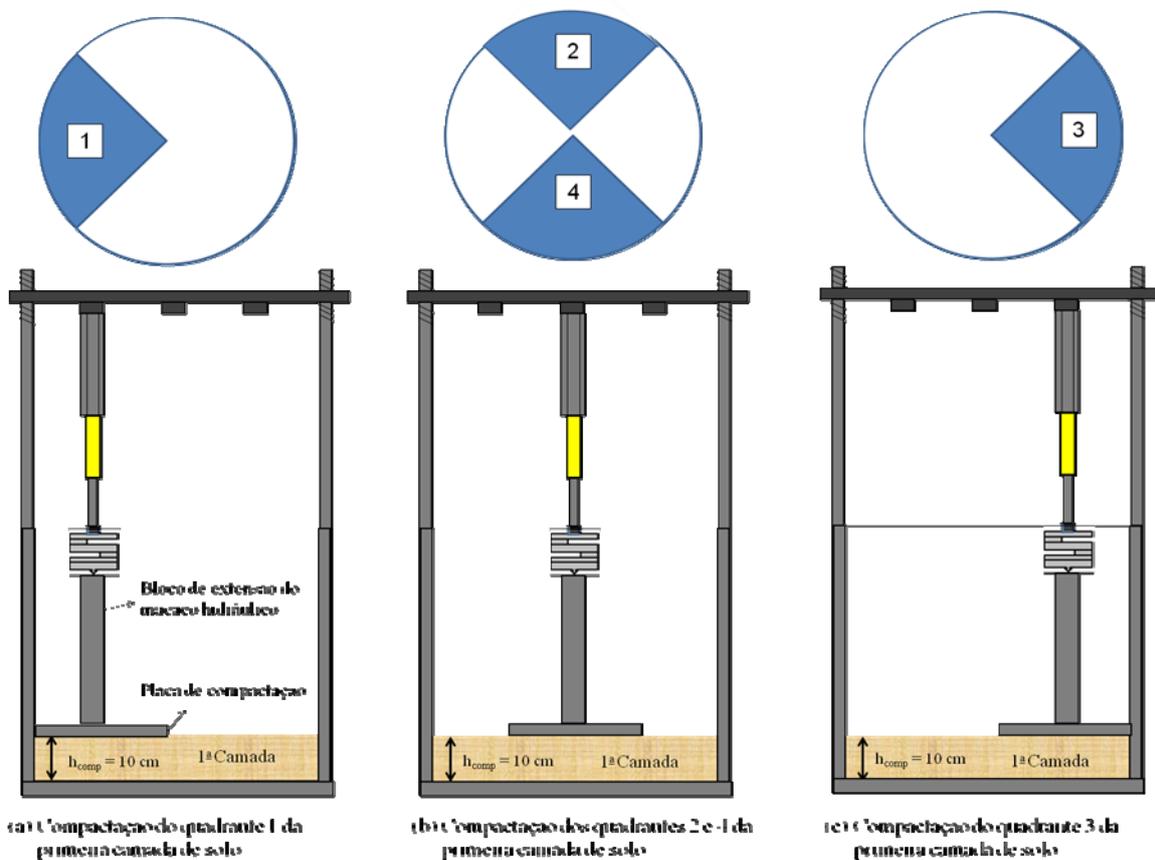


Figura 3.22. Roteiro adotado na compactação das três camadas constituintes do solo de sustentação: (a) compactação do quadrante 1; (b) compactação dos quadrantes 2, e do 4; (c) compactação do quadrante 3.

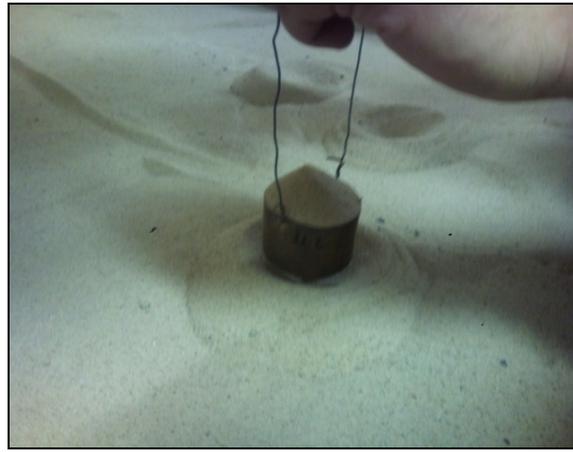


Figura 3.23. Retirada de uma das cápsulas de areia para controle da densidade natural.

Em virtude de falhas mecânicas no sistema de reação utilizado, falta de rigidez adequada no fundo do tanque rígido, uma espessura menor da camada 1 (10 cm menor que a camada 2 e 3) e de erros experimentais intrínsecos à dinâmica de preparação dos ensaios, não se alcançou a repetibilidade de densidades nas camadas constituintes do solo de sustentação desejada. O crescimento médio das densidades entre as camadas de todos os ensaios foi da ordem de 16,24% da camada 3 para a 2; e de 6,90% da camada 2 para a 1 (ou seja, de 24,54% da camada 3 para a 1), conforme Figura 3.24, logo a seguir. A Tabela 3.3 exemplifica as densidades alcançadas em cada camada do solo de sustentação para cada ensaio realizado.

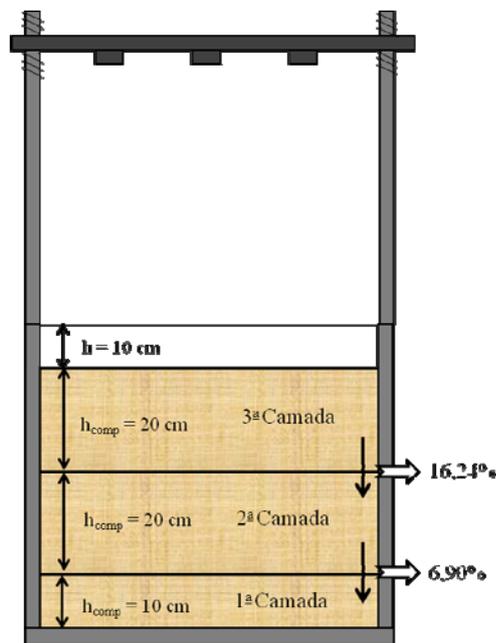


Figura 3.24. Crescimento das densidades entre as camadas constituintes do solo de sustentação.

Tabela 3.3. Densidades das camadas constituintes do solo de sustentação para cada ensaio.

Ensaio	Fundação	Caso	Nomenclatura	Camada	Densidade (g/cm ³)	Δ entre camadas (%)	Densidade Média (g/cm ³)
Ensaio de Placa	Capitel	Caso 10	1P0E0DC	3	1,39	-	1,55
				2	1,59	14,39	
				1	1,68	5,66	
	Placa/Radier com 4 estacas	Caso 12	4P0E0DC	3	1,47	-	1,68
				2	1,72	17,01	
				1	1,86	8,14	
	Placa/Radier com 9 estacas	Caso 20	9P0E0DC	3	1,48	-	1,69
				2	1,73	16,89	
				1	1,86	7,51	
	Placa/Radier com 16 estacas	Caso 35	16P0E0DC	3	1,5	-	1,70
				2	1,75	16,67	
				1	1,86	6,29	
Média das Provas de Cargas nas Estacas Isoladas	Estacas Isoladas	Caso 9	1P1E0DC	3	1,39	-	1,60
				2	1,64	17,99	
				1	1,77	7,93	
Prova de Carga em Grupos Estaqueados	Grupo com 4 estacas	Caso 13	4B4E0DC	3	1,47	-	1,68
				2	1,72	17,01	
				1	1,86	8,14	
	Grupo com 9 estacas	Caso 21	9B9E0DC	3	1,48	-	1,69
				2	1,73	16,89	
				1	1,86	7,51	
	Grupo com 16 estacas	Caso 36	16B16E0DC	3	1,5	-	1,70
				2	1,75	16,67	
				1	1,86	6,29	
Prova de Carga em Radiers Estaqueados	Radier estaqueado com 4 estacas	Caso 15	4P4E0DC	3	1,47	-	1,68
				2	1,72	17,01	
				1	1,86	8,14	
	Radier estaqueado com 9 estacas	Caso 22	9P9E0DC	3	1,48	-	1,69
				2	1,73	16,89	
				1	1,86	7,51	
	Radier estaqueado com 16 estacas	Caso 37	16P16E0DC	3	1,5	-	1,70
				2	1,75	16,67	
				1	1,86	6,29	

Ressalta-se ainda que o Caso 9, correspondente ao ensaio cuja nomenclatura é 1P1E0DC, trata-se na verdade da média dos resultados dos ensaios realizados com 4 estacas isoladamente, conforme pode ser visualizado no Capítulo 4 (Figura 4.2).

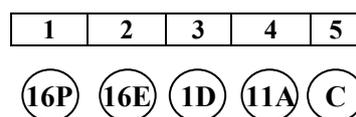
3.3.3 – Programa de Ensaios nos Modelos Reduzidos

O programa de ensaios da presente pesquisa trata-se, na verdade, de uma sub-divisão de um Programa Geral de Ensaios em Escala Reduzida do Grupo de Pesquisa em Fundações e Estruturas de Contenção do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB (Cordeiro, 2012 – em andamento). A seguir, será apresentado o Programa Geral de Ensaios, no qual alguns casos serão tratados neste trabalho.

O Programa de Ensaios Geral foi composto de 48 casos estudados, sendo que estes estão divididos em cinco grupos de análise (A1, A2, A3, A4 e A5) para três tipos de solos de sustentação (solo com a utilização somente de chuva de areia – CA, solo com a utilização de vibradores – V e solo compactado com uma placa de aço – C) dos modelos reduzidos e dois tipos de estaca em alumínio (E_{m1} e E_{m2}) em escala reduzida. Os casos ensaiados consistem entre os elementos a seguir:

- 1 capitel (descrito no item 3.2.1) para realização de ensaios com estacas isoladas;
- 3 placas em alumínio (descritas no item 3.2.1) que simulam respectivamente os blocos/radiers com 4, 9 e 16 estacas;
- 16 estacas (descritas no item 3.2.2).

Foi elaborado um sistema de nomenclatura para cada ensaio realizado, onde:



- 1: Os dois primeiros caracteres representam se há, ou não, contato da placa com o solo (para o caso de existir atribui-se a letra P, quando não ocorrer o contato adota-se a letra B e para o caso isolado da estaca isolada sem o capitel – SB) e o tamanho do bloco em relação à quantidade máxima de estacas daquele grupo (representado pelo número antecedente a letra);
- 2: A terceira e quarta casa indicam o número de estacas utilizadas naquele ensaio;
- 3: A quinta e sexta casa indicam a quantidade de estacas danificadas (que não é o caso da presente dissertação);
- 4: A sétima e oitava posição indicam a posição da estaca danificada, e qual o tipo de dano (que não é caso da presente dissertação), e;

- 5: A nona posição indica o tipo de confinamento do solo (se o mesmo foi efetuado através de chuva de areia – CA, ou via vibradores – V ou através da compactação com uma placa de aço – C).

No Programa Geral de Ensaios em Escala Reduzida foram realizados experimentos considerando grupos de fundações, e radiers estaqueados (caso em que se considera o contato da placa com o solo), com estacas defeituosas. Entre os defeitos foram adotados os casos:

- Existência de solo mole na base de uma estaca (este caso recebe a denominação de “SM” segundo a nomenclatura anteriormente exposta);
- Presença de uma estaca que sofre uma ruptura lenta (RL);
- Ocorrência de uma estaca que sofre uma ruptura rápida (RR);
- Presença de uma estaca curta no grupo, ou no radier estaqueado (C);
- Ausência de uma estaca no grupo, ou no radier estaqueado (A).

Os casos ensaiados com estacas sujeitas à algum tipo de defeito, ou dano, não fazem parte do escopo do presente trabalho, pertencendo a uma outra pesquisa do Grupo de Pesquisa em Fundações e Estruturas de Contenção. Como já mencionado anteriormente, a Tabela 3.4 apresenta todos os casos ensaiados com suas respectivas nomenclaturas, ensaios utilizados no presente trabalho, tipo de análise a serem efetuadas, modelo de solo e uma descrição sucinta do procedimento.

Tabela 3.4 Ensaios e condições ensaiadas.

Tipo de Ensaio	Nomenclatura	Análise	Modelo de Solo	Descrição
Caso 1:	SB1E0DCA	A1	S _{M1}	Sem capitel (SB), estaca isolada (1E), sem dano (0D) em solo do tipo “chuva de areia” (CA);
Caso 2:	SB1E0DV	A1	S _{M1}	Sem Bloco (SB), uma estaca (1E), sem dano (0D) em solo vibrado (V);
Caso 3:	4P0E0DV	A2	S _{M1}	Placa de 4 estacas (4P), sem estacas (0E), sem dano (0D) em solo vibrado;
Caso 4:	4P4E0DV	A2	S _{M1}	Placa de 4 estacas (4P), com 4 estacas (4E), sem dano (0D) em solo vibrado;
Caso 5:	4P4E1D4RLV	A2	S _{M1}	Placa de 4 estacas (4P), com 4 estacas (4E), com uma estaca danificada (1D) com a estaca 4 em ruptura lenta (4RL) em solo vibrado;

Tabela 3.4 Ensaio e condições ensaiadas (continuação)

Tipo de Ensaio	Nomenclatura	Análise	Modelo do Solo	Descrição
Caso 6:	4P4E1D4RRV	A2	S _{M2}	Placa de 4 estacas (4P), com 4 estacas (4E), com uma estaca danificada (1D) com estaca 4 em ruptura rápida (4RR) em solo vibrado;
Caso 7:	4P4E1D4SMV	A2	S _{M2}	Placa de 4 estacas (4P), com 4 estacas (4E), com uma estaca danificada (1D) com a estaca 4 sobre solo mole (SM) em solo vibrado;
Caso 8:	4P3E0DV	A1	S _{M2}	Placa de 4 estacas (4P), com 3 estacas (3E), com uma estaca ausente (0D) em solo vibrado;
Caso 9:	1P1E0DC	A1	S _{M3}	Placa de 1 estaca (1P), com uma estaca (1E), sem dano (0D) em solo compactado (x4)
Caso 10:	1P0E0DC	A1	S _{M3}	Placa de 1 estaca (1P), sem estaca (0E), sem dano (0D) em solo compactado;
Caso 11:	1P1E1DCC	A1	S _{M3}	Placa de 1 estaca (1P), com uma estaca (1E), com uma estaca danificada (1D), estaca curta (50% do comprimento – (C) em solo compactado;
Caso 12:	4P0E0DC	A3	S _{M3}	Placa de 4 estacas (4P), sem estacas (0E), sem dano (0D) em solo compactado.
Caso 13:	4B4E0DC	A3	S _{M3}	Bloco sem contato com o solo de 4 estacas (4B) com 4 estacas (4E), sem dano (0D) em solo compactado (C);
Caso 14:	4B4E0DC	A3	S _{M3}	Bloco sem contato com o solo de 4 estacas (4B) com 4 estacas (4E), sem dano (0D) em solo compactado (C);
Caso 15:	4P4E0DC	A3	S _{M3}	Placa em contato com o solo de 4 estacas (4P) com 4 estacas (4E), sem dano (0D) em solo compactado(C)

Tabela 3.4 Ensaio e condições ensaiadas (continuação)

Tipo de Ensaio	Nomenclatura	Análise	Modelo de Solo	Descrição
Caso 16:	4B4E1D4CC	A3	S _{M2}	Bloco de 4 estacas (4B), sem contato com o solo, com 4 estacas (4E), com uma estaca danificada (1D), estaca E4 curta (4C) em solo compactado(C)
Caso 17:	4P4E1D4CC	A3	S _{M2}	Placa de 4 estacas (4P), em contato com o solo, com 4 estacas (4E), com uma estaca danificada (1D), estaca E4 curta (4C) em solo compactado(C)
Caso 18:	4B4E1D4AC	A3	S _{M2}	Bloco de 4 estacas (4B), sem contato com o solo, com 4 estacas (4E), com uma estaca danificada (1D), estaca E4 ausente (4A) em solo compactado (C);
Caso 19:	4P4E1D4AC	A3	S _{M2}	Bloco de 4 estacas (4B), em contato com o solo, com 4 estacas (4E), com uma estaca danificada (1D), estaca E4 ausente (4A) em solo compactado (C);
Caso 20:	9P0E0DC	A4	S _{M2}	Placa de 9 estacas em contato com o solo (9P) sem estacas (0E), sem dano (0D) em solo compactado(C);
Caso 21:	9B9E0DC	A4	S _{M2}	Bloco sem contato com o solo de 9 estacas (9B) com 9 estacas (9E), sem dano (0D) em solo compactado(C);
Caso 22:	9P9E0DC	A4	S _{M2}	Placa de 9 estacas em contato com o solo (9P) com 9 estacas (9E), sem dano (0D) em solo compactado(C);
Caso 23:	9B9E1D9CC	A4	S _{M2}	Bloco de 9 estacas (9B), sem contato com o solo, com 9 estacas (9E), com uma estaca danificada (1D), estaca E9 curta (9C) em solo compactado (C);
Caso 24:	9P9E1D9CC	A4	S _{M2}	Placa de 9 estacas (9B), em contato com o solo, com 9 estacas (9E), com uma estaca danificada (1D), estaca E9 curta (9C) em solo compactado (C);

Tabela 3.4 Ensaios e condições ensaiadas (continuação)

Tipo de Ensaio	Nomenclatura	Análise	Modelo de Solo	Descrição
Caso 25:	9B9E1D6CC	A4	S _{M2}	Bloco de 9 estacas (9B), sem contato com o solo, com 9 estacas (9E), com uma estaca danificada (1D), estaca E6 curta (6C) em solo compactado (C);
Caso 26:	9P9E1D6CC	A4	S _{M2}	Placa de 9 estacas (9P), em contato com o solo, com 9 estacas (9E), com uma estaca danificada (1D), estaca E6 curta (6C) em solo compactado (C);
Caso 27:	9B9E1D5CC	A4	S _{M2}	Bloco de 9 estacas (9B), sem contato com o solo, com 9 estacas (9E), com uma estaca danificada (1D), estaca E5 curta (5C) em solo compactado (C);
Caso 28:	9P9E1D5CC	A4	S _{M2}	Placa de 9 estacas (9P), em contato com o solo, com 9 estacas (9E), com uma estaca danificada (1D), estaca E5 curta (5C) em solo compactado (C);
Caso 29:	9B9E1D9AC	A4	S _{M2}	Bloco de 9 estacas (9B), sem contato com o solo, com 9 estacas (9E), com uma estaca danificada (1D), estaca E9 ausente (9A) em solo compactado (C);
Caso 30:	9P9E1D9AC	A4	S _{M2}	Placa de 9 estacas (9P), em contato com o solo, com 9 estacas (9E), com uma estaca danificada (1D), estaca E9 ausente (9A) em solo compactado (C);
Caso 31:	9B9E1D6AC	A4	S _{M2}	Bloco de 9 estacas (9B), sem contato com o solo, com 9 estacas (9E), com uma estaca danificada (1D), estaca E6 ausente (6A) em solo compactado (C);
Caso 32:	9P9E1D6AC	A4	S _{M2}	Placa de 9 estacas (9P), em contato com o solo, com 9 estacas (9E), com uma estaca danificada (1D), estaca E6 ausente (6A) em solo compactado (C);

Tabela 3.4 Ensaios e condições ensaiadas (continuação)

Tipo de Ensaio	Nomenclatura	Análise	Modelo de Solo	Descrição
Caso 33:	9B9E1D5AC	A4	S _{M2}	Bloco de 9 estacas (9B), sem contato com o solo, com 9 estacas (9E), com uma estaca danificada (1D), estaca E5 ausente (5A) em solo compactado (C);
Caso 34:	9P9E1D5AC	A4	S _{M2}	Placa de 9 estacas (9P), em contato com o solo, com 9 estacas (9E), com uma estaca danificada (1D), estaca E5 ausente (5A) em solo compactado (C);
Caso 35:	16P0E0DC	A5	S _{M2}	Placa de 16 estacas em contato com o solo (16P) sem estacas (0E), sem dano (0D) em solo compactado(C);
Caso 36:	16B16E0DC	A5	S _{M2}	Bloco de 16 estacas sem contato com o solo (16B) com 16 estacas (16E), sem dano (0D) em solo compactado(C);
Caso 37:	16P16E0DC	A5	S _{M2}	Placa de 16 estacas em contato com o solo (16P) com 16 estacas (16E), sem dano (0D) em solo compactado(C);
Caso 38:	16B16E1D16CC	A5	S _{M2}	Bloco de 16 estacas (16B), sem contato com o solo, com 16 estacas (16E), com uma estaca danificada (1D), estaca E16 curta (16C) em solo compactado (C);
Caso 39:	16P16E1D16CC	A5	S _{M2}	Placa de 16 estacas (16B), em contato com o solo, com 16 estacas (16E), com uma estaca danificada (1D), estaca E16 curta (16C) em solo compactado (C);
Caso 40:	16B16E1D12CC	A5	S _{M2}	Bloco de 16 estacas (16B), sem contato com o solo, com 16 estacas (16E), com uma estaca danificada (1D), estaca E12 curta (12C) em solo compactado (C);

Tabela 3.4 Ensaios e condições ensaiadas (continuação)

Tipo de Ensaio	Nomenclatura	Análise	Modelo de Solo	Descrição
Caso 41:	16P16E1D12CC	A5	S _{M2}	Placa de 16 estacas (16B), em contato com o solo, com 16 estacas (16E), com uma estaca danificada (1D), estaca E12 curta (12C) em solo compactado (C);
Caso 42:	16B16E1D11CC	A5	S _{M2}	Bloco de 16 estacas (16B), sem contato com o solo, com 16 estacas (16E), com uma estaca danificada (1D), estaca E11 curta (11C) em solo compactado (C);
Caso 43:	16P16E1D11CC	A5	S _{M2}	Placa de 16 estacas (16B), em contato com o solo, com 16 estacas (16E), com uma estaca danificada (1D), estaca E11 curta (11C) em solo compactado (C);
Caso 44:	16B16E1D16AC	A5	S _{M2}	Bloco de 16 estacas (16B), sem contato com o solo, com 16 estacas (16E), com uma estaca danificada (1D), estaca E16 ausente (16A) em solo compactado (C);
Caso 44:	16P16E1D16AC	A5	S _{M2}	Placa de 16 estacas (16P), em contato com o solo, com 16 estacas (16E), com uma estaca danificada (1D), estaca E16 ausente (16A) em solo compactado (C);
Caso 45:	16B16E1D12AC	A5	S _{M2}	Bloco de 16 estacas (16B), sem contato com o solo, com 16 estacas (16E), com uma estaca danificada (1D), estaca E12 ausente (12C) em solo compactado (C);
Caso 46:	16P16E1D12AC	A5	S _{M2}	Placa de 16 estacas (16P), em contato com o solo, com 16 estacas (16E), com uma estaca danificada (1D), estaca E12 ausente (12C) em solo compactado (C);

Tabela 3.4 Ensaio e condições ensaiadas (continuação)

Tipo de Ensaio	Nomenclatura	Análise	Modelo de Solo	Descrição
Caso 47:	16B16E1D11AC	A5	S _{M2}	Bloco de 16 estacas (16B), sem contato com o solo, com 16 estacas (16E), com uma estaca danificada (1D), estaca E11 ausente (11C) em solo compactado (C);
Caso 48:	16P16E1D11AC	A5	S _{M2}	Placa de 16 estacas (16P), em contato com o solo, com 16 estacas (16E), com uma estaca danificada (1D), estaca E11 ausente (11C) em solo compactado (C);

A análise A1 engloba os Casos 1, Caso 2, Caso 9, Caso 10 e Caso 11, que estudam as estacas isoladas e os blocos de estacas individuais. A análise A2 avalia o Caso 3, Caso 4, Caso 5, Caso 6 e Caso 7, que pertencem ao mesmo tipo de solo, o solo do tipo 2. Nesta análise o caso 3, que é a placa de 4 estacas sem estacas, e o caso 4, placa de 4 estacas com 4 estacas íntegras são analisadas como referência para os estudos dos danos apresentados.

A análise A3 avalia os casos do grupo de 4 estacas para o solo do tipo 3. Onde o caso 12, placa de 4 estacas sem as estacas e o caso 13, bloco de 4 estacas sem contato do bloco com o solo com a presença de 4 estacas íntegras e o caso 14, placa de 4 estacas com a placa em contato com o solo contendo 4 estacas íntegras que servem de referência para o estudo para os grupos que apresentam dois tipos de danos. A análise A4 avalia o caso do grupo de 9 estacas para o solo do tipo 3. São estudados do caso 19 ao caso 33. Em que é avaliado dois tipos de dano em diferentes posições, referenciado pelo caso do grupo íntegro, bloco e radier. Os danos são locados nas posições 5E, 6E e 9E. Finalmente, a análise A5 avalia situação do grupo de 16 estacas para o solo do tipo 3 para os casos 34 ao caso 48. As posições 11,12 e 16 são impostos os dois danos.

Vale lembrar que todas as fundações em escalas reduzidas foram carregadas verticalmente nos seus respectivos eixos. Os ensaios utilizados para análise, no presente trabalho, foram àqueles com o solo compactado através da placa de aço, e sem a presença de dano algum nos grupos, e radiers estaqueados.

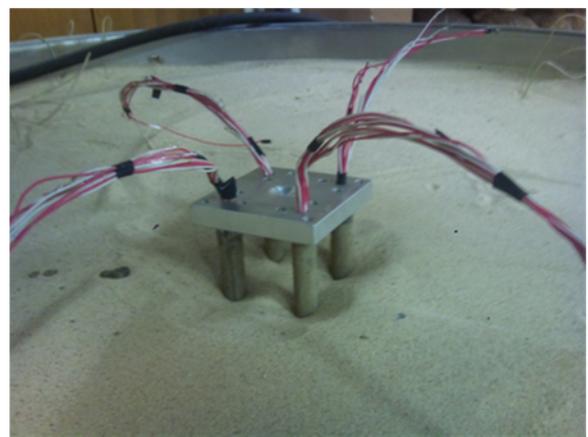
3.3.4 – Procedimento Executivo dos Ensaio com os Modelos Reduzidos

Após o preparo do solo de sustentação, os modelos reduzidos para os ensaios com as estacas isoladas foram colocados nivelados na superfície da última camada e instalados seguindo-se um procedimento de cravação (conforme Figura 3.25a). Para tal, utilizou-se um martelo de borracha com massa de 190g. Não se optou pela cravação estática, pela falta de espaço entre a placa de reação e o modelo reduzido (radier/cap + estacas).

Após esta cravação, o sistema de carregamento (descrito no item 3.1.2) e o sistema de aquisição de dados foram instalados. Os carregamentos foram efetuados em incrementos pequenos (da ordem de 1,0 kgf) até a ruptura geotécnica dos protótipos; a cada carregamento efetuava-se a leitura proveniente do medidor de deslocamento analógico, bem como das instrumentações instaladas nas estacas (através da mesa leitora do modelo SM-60D, descrita no item 3.1.3). A Figura 3.25b ilustra o procedimento realizado para os grupos estaqueados, neste ensaio a cravação se dava até a altura da base da primeira linha de extensômetros (a referência do alinhamento dos extensômetros é o topo da placa que simula o bloco das fundações).



(a) Instalação da estaca através de cravação



(b) Bloco de estacas sendo ensaiado

Figura 3.25. Procedimento de instalação dos protótipos: (a) Cravação do modelo reduzido para ensaios com as estacas isoladas e (b) Ensaio do modelo reduzido sem o contato com o solo de fundação.

Após a instalação das fundações, os ensaios foram realizados em duas etapas: num primeiro momento efetuaram-se carregamentos sem o contato da placa com o solo (neste caso, simulou-se um agrupamento convencional de estacas, conforme Figura 3.25b) e numa segunda etapa, o contato entre a face inferior da placa e o solo foi considerado (simulação de

um radier estaqueado). Foram efetuados também ensaios em todas as placas de maneira isolada (sem a presença de estacas). Como descrito anteriormente, foram realizados também ensaios com as estacas isoladas. A figura 3.26 ilustra a realização de um ensaio executado.

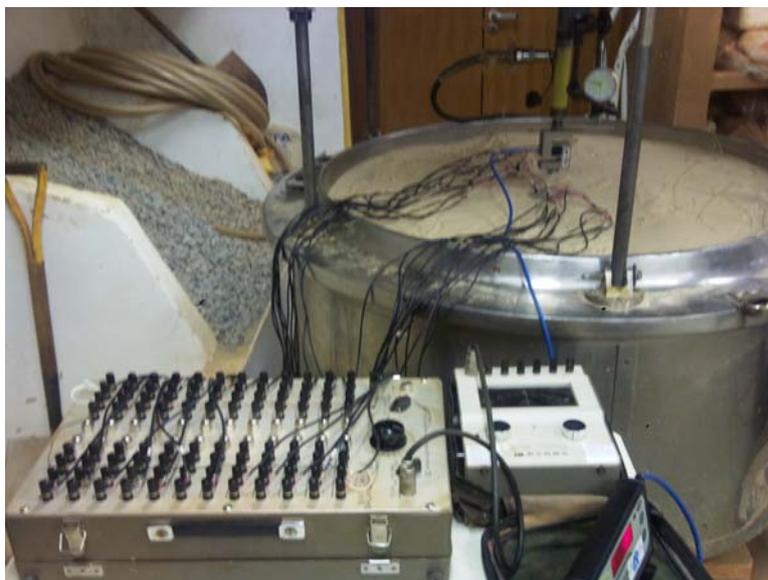


Figura 3.26. Realização de um dos ensaios com o modelo em escala reduzida.

Conforme exposto anteriormente, os ensaios realizados com as estacas isoladas seguiram a metodologia visualizada na Figura 3.25a, com a configuração esquemática apresentada na Figura 3.27a. Como relatado no item 3.2.2, o comprimento das estacas é de 232 mm, portanto, para os ensaios com os grupos de estacas, as mesmas situam-se unicamente na 3^a camada (vide Figura 3.27b); já para as estacas isoladas, e para os raders estaqueados, os elementos verticais das fundações ensaiadas penetram 32 mm na 2^a camada (vide 3.27a e c).

O fluxograma apresentado na Figura 3.28 ilustra a sequência sucinta de todos os ensaios realizados: as setas horizontais, que conectam os casos contidos no fluxograma, representam ensaios realizados no mesmo dia, com o solo de sustentação com a mesma densidade para as camadas. Os ensaios com os raders estaqueados se iniciaram a partir do contato da placa, nos ensaios com os grupos de estacas, com o nível superior da 3^a camada do solo de sustentação. Em seguida, os ensaios com as placas isoladas das fundações estaqueadas com 4, 9 e 16 estacas eram efetuados. A Tabela 3.5 relata somente os casos, já mencionados na Tabela 3.4, utilizados na presente pesquisa. A referência S_{M3} trata-se do modelo de solo do tipo 3 (Soil Model 3) adotado em outra pesquisa do grupo de fundações.

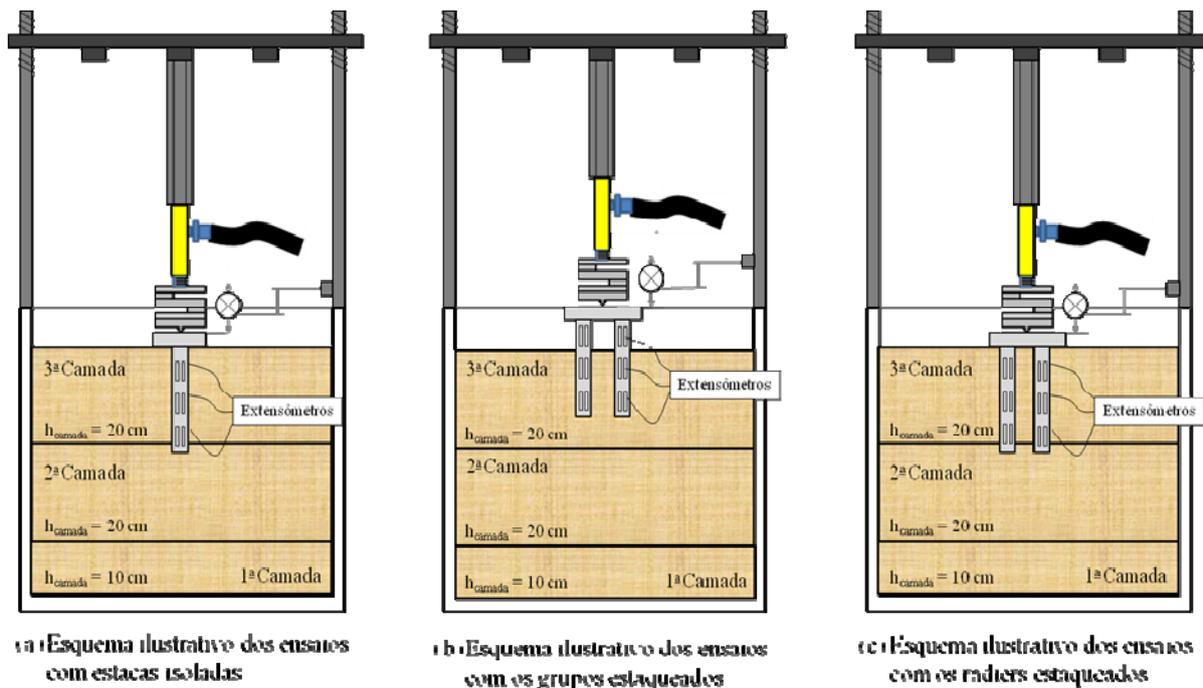


Figura 3.27. Desenho esquemático da realização dos ensaios: (a) Esquema ilustrativo dos ensaios com as estacas isoladas; (b) Esquema ilustrativo dos ensaios com os grupos estaqueados e; (c) Esquema ilustrativo dos ensaios com os radiers estaqueados.

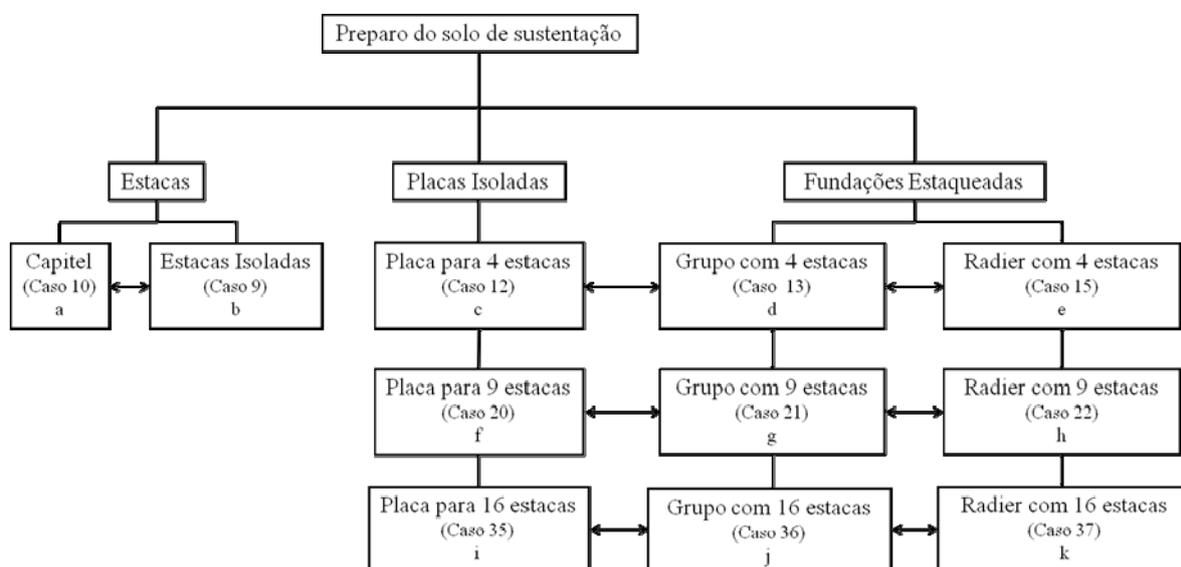


Figura 3.28. Fluxograma da campanha de ensaios efetuada na presente pesquisa.

Tabela 3.5 Casos utilizados na presente pesquisa.

Tipo de Ensaio	Nomenclatura	Análise	Modelo do Solo	Descrição
Caso 9:	1P1E0DC	A1	S _{M3}	Placa de 1 estaca (1P), com uma estaca (1E), sem dano (0D) em solo compactado (x4)
Caso 10:	1P0E0DC	A1	S _{M3}	Placa de 1 estaca (1P), sem estaca (0E), sem dano (0D) em solo compactado;
Caso 12:	4P0E0DC	A3	S _{M3}	Placa de 4 estacas (4P), sem estacas (0E), sem dano (0D) em solo compactado.
Caso 13:	4B4E0DC	A3	S _{M3}	Bloco sem contato com o solo de 4 estacas (4B) com 4 estacas (4E), sem dano (0D) em solo compactado (C);
Caso 15:	4P4E0DC	A3	S _{M3}	Placa em contato com o solo de 4 estacas (4P) com 4 estacas (4E), sem dano (0D) em solo compactado(C)
Caso 20:	9P0E0DC	A4	S _{M3}	Placa de 9 estacas em contato com o solo (9P) sem estacas (0E), sem dano (0D) em solo compactado(C);
Caso 21:	9B9E0DC	A4	S _{M3}	Bloco sem contato com o solo de 9 estacas (9B) com 9 estacas (9E), sem dano (0D) em solo compactado(C);
Caso 22:	9P9E0DC	A4	S _{M3}	Placa de 9 estacas em contato com o solo (9P) com 9 estacas (9E), sem dano (0D) em solo compactado(C);
Caso 35:	16P0E0DC	A5	S _{M3}	Placa de 16 estacas em contato com o solo (16P) sem estacas (0E), sem dano (0D) em solo compactado(C);
Caso 36:	16B16E0DC	A5	S _{M3}	Bloco de 16 estacas sem contato com o solo (16B) com 16 estacas (16E), sem dano (0D) em solo compactado(C);
Caso 37:	16P16E0DC	A5	S _{M3}	Placa de 16 estacas em contato com o solo (16P) com 16 estacas (16E), sem dano (0D) em solo compactado(C);

A disposição dos ensaios realizados no cilindro de modelagem reduzida é apresentada na Figura 3.29: conforme a ilustração citada, os ensaios com os grupos de estacas, e radiers estaqueados foram executados no mesmo quadrante, enquanto que os ensaios realizados com as placas isoladas foram num quadrante diferente. Os quadrantes não citados correspondem aos ensaios que simularam fundações com danos, objeto este, não pertencente a presente pesquisa.

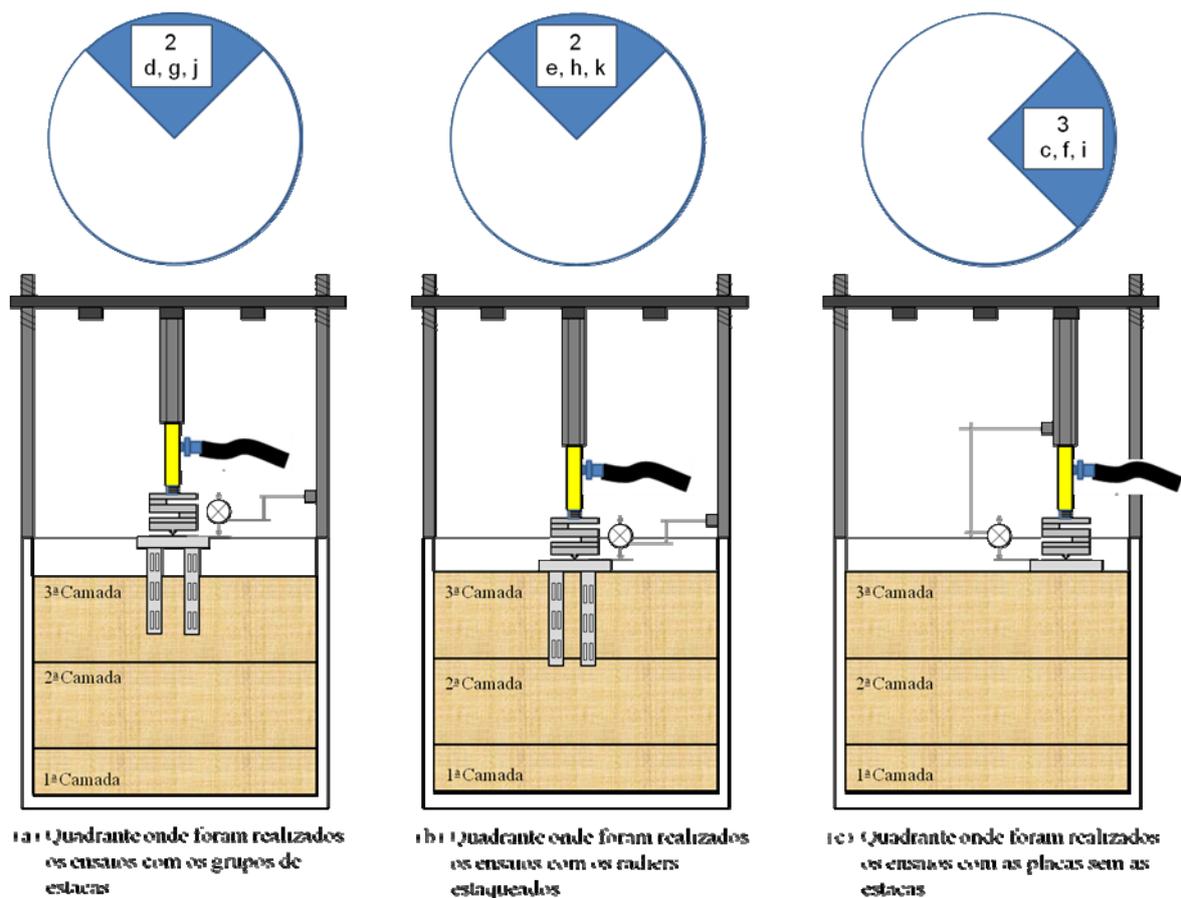


Figura 3.29. Disposição das fundações ensaiadas no cilindro de modelagem reduzida: (a) Quadrante onde foram realizados os ensaios com os grupos de estacas; (b) Quadrante onde foram realizados os ensaios com os radiers estaqueados e; (c) Quadrante onde foram realizados os ensaios com as placas sem a presença de estacas.

Por fim, a Figura 3.30 ilustra os ensaios realizados com as estacas isoladas. Na verdade, o Caso 9, presente na Tabela 3.5, é uma média do comportamento encontrado das estacas ensaiadas isoladamente: cada prova de carga realizada em cada estaca isolada foi efetuada num quadrante específico (e visualizado na Figura 3.30), sendo, por último, ensaiado o capitel sem a presença das estacas no centro do cilindro de modelagem reduzida utilizado na presente pesquisa.

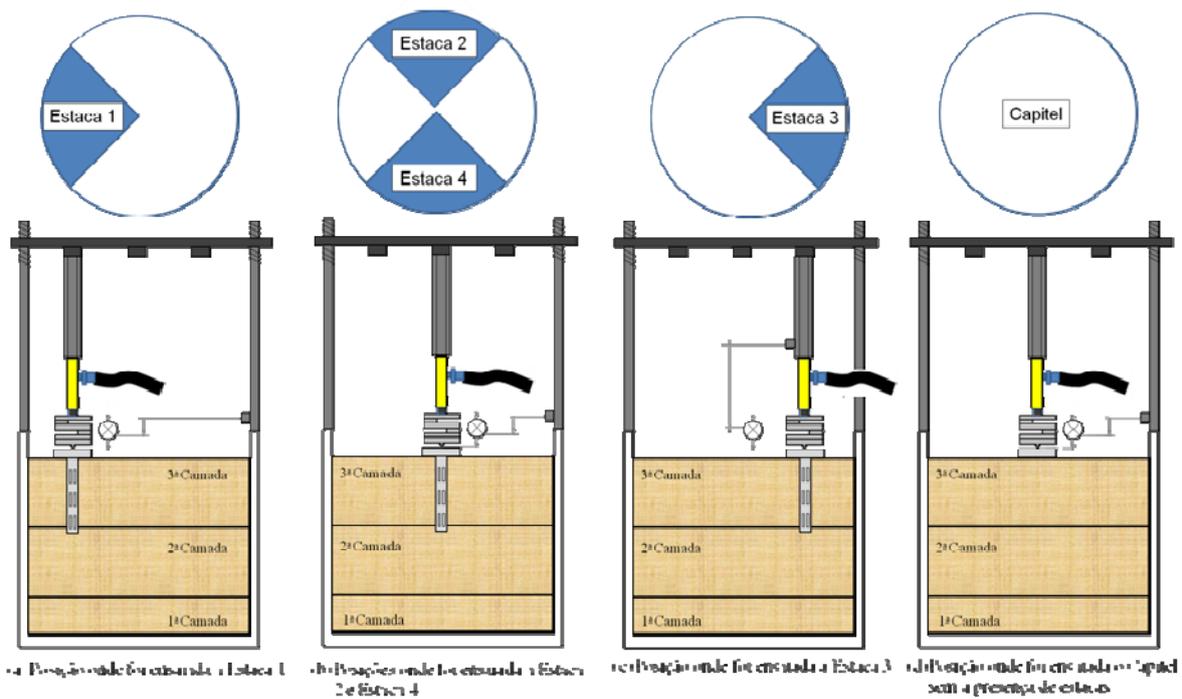


Figura 3.30. Disposição das provas de carga com as estacas isoladas: (a) Quadrante onde foi ensaiada a Estaca 1; (b) Quadrantes onde foram realizados os ensaios com as Estacas 2 e 4, e; (c) Quadrante onde foi ensaiada a Estaca 3, e; (d) Posição onde foi realizado o ensaio de placa com o capitel isolado.

4 – Apresentação dos Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados para aferição do sistema de aquisição de dados utilizados, das estacas isoladas, o grupo de estacas com 4, 9 e 16, os ensaios com os blocos/radiers, e os radiers estaqueados com 4, 9 e 16 estacas.

Os ensaios, realizados em areia seca como solo de sustentação para a fundação em modelo reduzido forneceram as seguintes informações:

- Carga total aplicada no sistema;
- Deslocamento no topo do bloco/radier rígido;
- Deformações ao longo de algumas estacas.

Utilizou-se uma célula de carga, com capacidade para 20 kN, para a medição das cargas aplicadas ao sistema (bloco/radiers mais as estacas) e às estacas isoladas também. A instrumentação forneceu, ainda, as medidas de deformação, obtidas através dos strain-gages, instalados no topo, na mediana e na ponta das estacas.

As deformações medidas pelos extensômetros instalados nas estacas fornecem os seguintes dados:

- Módulo de elasticidade das estacas em alumínio revestidas com araldite;
- Diagrama de transferência de carga das estacas com medição no topo, mediana e base.

4.1 – Ensaio de Placa

Os resultados dos ensaios de placa são mostrados no gráfico da Figura 4.1 de carga total pelo deslocamento médio para cada sistema de fundação.

Realizaram-se ensaios de placa com a carga diretamente aplicada ao bloco/radier isolado, e do capitel utilizado para os ensaios com estacas isoladas. As curvas do tipo carga recalque são apresentadas, bem como as médias das densidades entre as camadas de cada ensaio logo a seguir, na Figura 4.1:

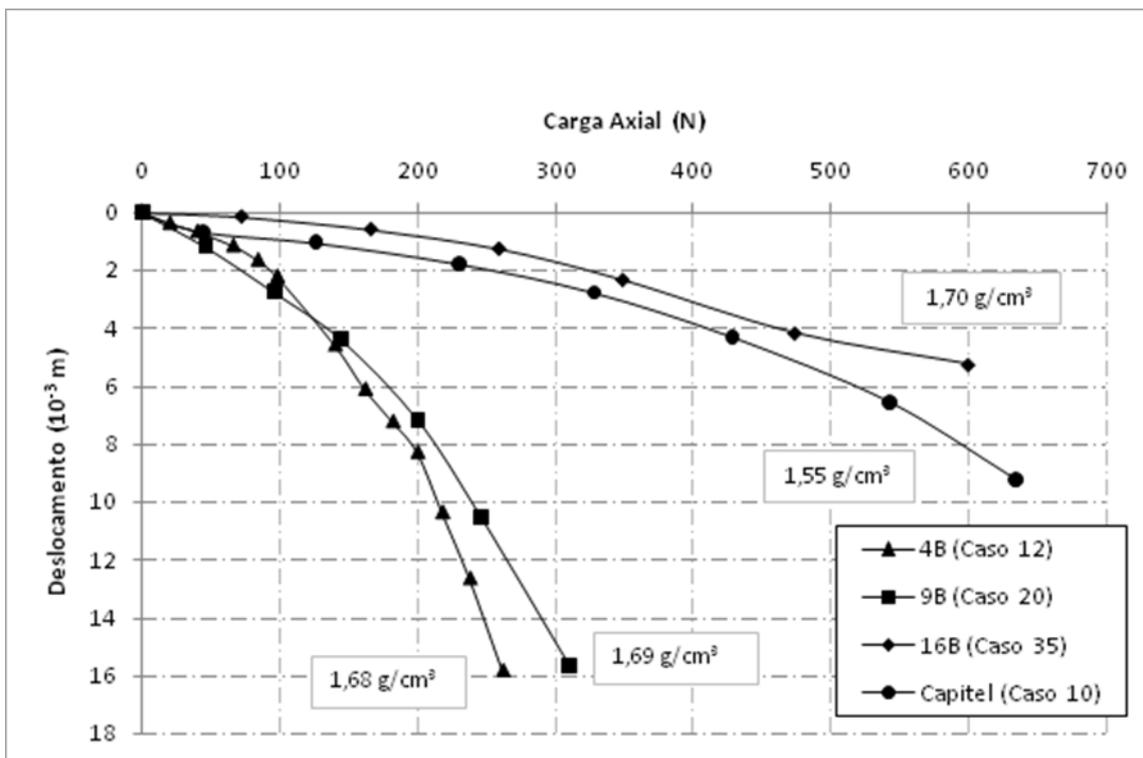


Figura 4.1. Curva carga recalque para o bloco/rádier isolado de 4, 9 e 16 estacas.

Os valores máximos atingidos de carga e deslocamento do ensaio de placa do bloco/rádier isolado de 4, 9 e 16 estacas são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Valores máximos de carga e deslocamento do ensaio de placa do bloco/rádier isolado de 4, 9 e 16 estacas.

Ensaio	Fundação	Casos	Largura - B (mm)	Carga Máxima (N)	Deslocamento Máximo (mm)
Ensaio de Placa	Radier/Bloco de 4 estacas Isolado	12	80	262	15,80
Ensaio de Placa	Radier/Bloco de 9 estacas Isolado	20	107	356	18,18
Ensaio de Placa	Radier/Bloco de 16 estacas Isolado	35	142	600	5,25
Ensaio de Placa	Capitel	10	128	634	9,22

4.2 – Ensaio com as Estacas Isoladas

Para a presente pesquisa, foi considerado como estaca isolada o ensaio do sistema placa + estaca individual, com o contato com o solo. Os resultados presentes na Figura 4.2 são provenientes da capacidade de carga total do sistema. No Capítulo 5, estes dados foram devidamente tratados, obtendo-se a capacidade de carga da estaca isolada através da diferença entre a capacidade isolada do cap com a do sistema placa + estaca isolada (com a placa em contato com o solo).

Os resultados dos ensaios das estacas isoladas são mostrados em gráficos individuais, de carga total (combatida pela estaca e cap) pelo deslocamento médio para cada sistema de fundação. Além da curva carga-recalque, serão apresentados os gráficos de rigidezes das estacas, carga axial pela porcentagem de carregamento que é absorvido pelo capitel e um gráfico comparativo entre a carga aplicada na parte superior do capitel pela carga lida através dos strains-gages. Conforme exposto anteriormente ao final do item 3.3.4 – Procedimento Executivo dos Ensaio com os Modelos Reduzidos, o Caso 9 corresponde a uma média extraída dos comportamentos mecânicos das estacas ensaiadas isoladamente, com a presença de um capitel, que está em contato com o solo.

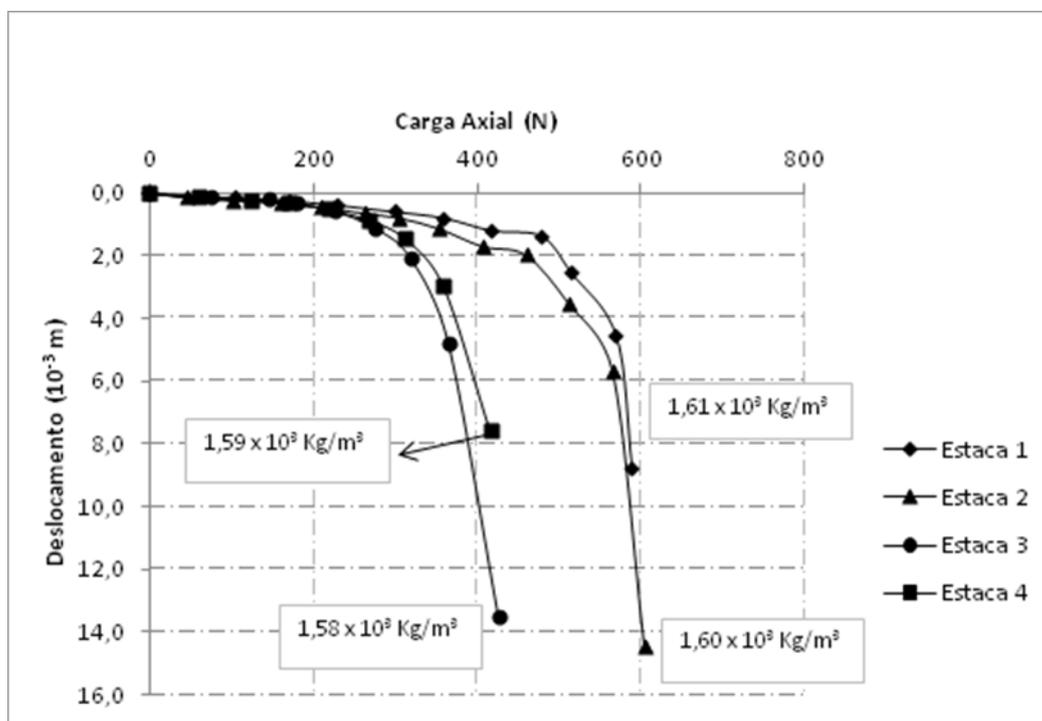


Figura 4.2. Curva carga-recalque para as estacas ensaiadas isoladamente.

Os valores máximos atingidos de carga e deslocamento para os ensaios com as estacas isoladas são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Valores máximos de carga e deslocamento dos ensaios de prova de carga para estacas isoladas.

Ensaio	Fundação	Carga Máxima (N)	Deslocamento Máximo (mm)
Prova de Carga	Estaca 1	588,5	14,40
Prova de Carga	Estaca 2	789	18,55
Prova de Carga	Estaca 3	426,5	13,48
Prova de Carga	Estaca 4	416,75	7,59

Os resultados dos ensaios realizados com as estacas isoladas foram tratados de modo a se obter um comportamento “médio” entre as estacas, já que as mesmas possuíam características geométricas semelhantes, visto que as densidades dos solos onde foram realizados os ensaios são próximas. A densidade média dos ensaios possui o valor de $1,60 \text{ g/cm}^3$, e desvio padrão de $0,01 \text{ g/cm}^3$. O gráfico da Figura 4.3 detalha o comportamento médio das estacas ensaiadas de forma isolada.

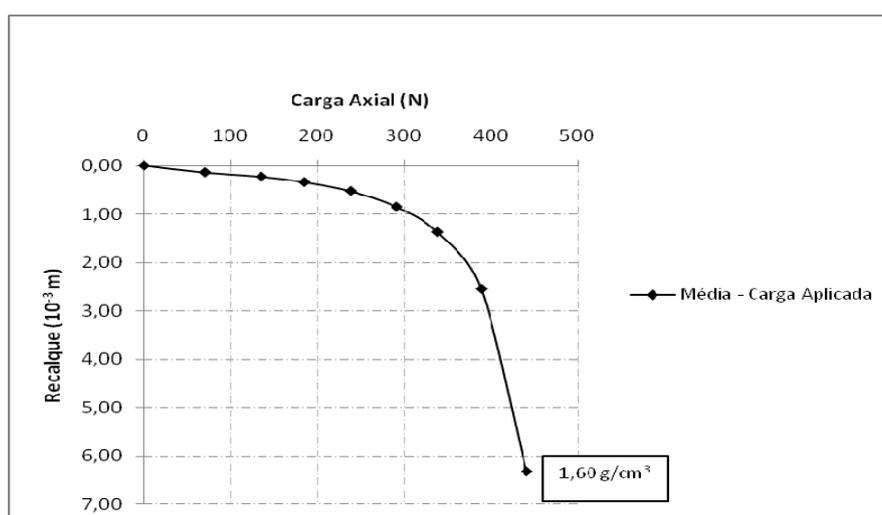


Figura 4.3. Curva carga-recalque para o comportamento médio das estacas ensaiadas isoladamente.

Os valores máximos médios de carga e deslocamento para os ensaios com as estacas isoladas são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Valores máximos de carga e deslocamento do comportamento médio dos ensaios de prova de carga para as estacas isoladas.

Ensaio	Fundação	Casos	Carga Máxima (N)	Deslocamento Máximo (mm)
Prova de Carga	Estacas – Média	9	441,19	6,33

4.3 – Ensaio com Grupos de Estacas

As curvas do tipo carga-recalque dos ensaios em grupos de estacas são apresentadas na Figura 4.4. Em virtude do comportamento carga-recalque, para os ensaios em grupo, as cargas proporcionaram grandes deslocamentos, inviabilizando a quantidade de pontos nos gráficos. Desta forma, as análises para estes ensaios foram complementadas com regressões lineares (vide Capítulo 5).

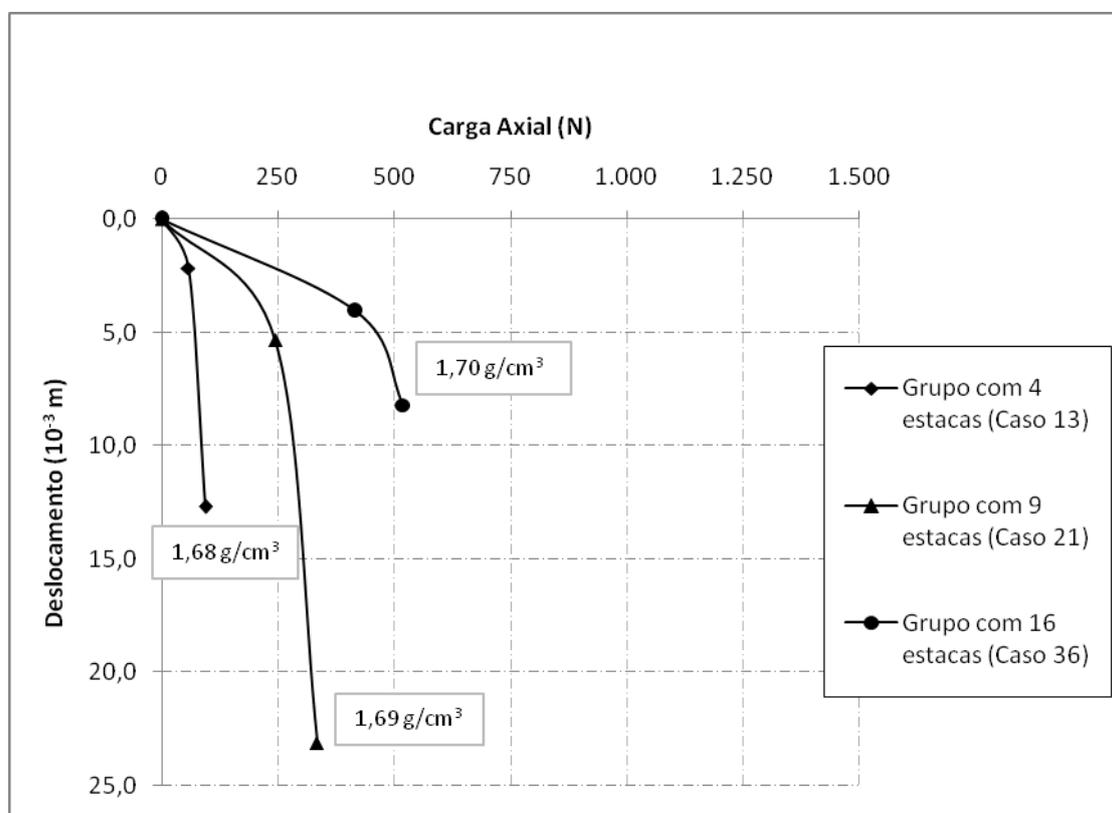


Figura 4.4. Curva carga-recalque para os grupos de estacas ensaiados.

Os valores máximos de carga e deslocamento para os ensaios com os grupos de estacas são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Valores máximos de carga e deslocamento do ensaio de prova de carga para os grupos com 4, 9 e 16 estacas.

Ensaio	Fundação	Casos	Carga Máxima (N)	Deslocamento Máximo (mm)
Prova de Carga	Grupo com 4 estacas	13	94,7	12,7
Prova de Carga	Grupo com 9 estacas	21	333	23,12
Prova de Carga	Grupo com 16 estacas	36	519	8,23

4.4 – Ensaio com os Radiers Estaqueados

As curvas do tipo carga-recalque dos ensaios em radiers estaqueados são apresentadas na Figura 4.5.

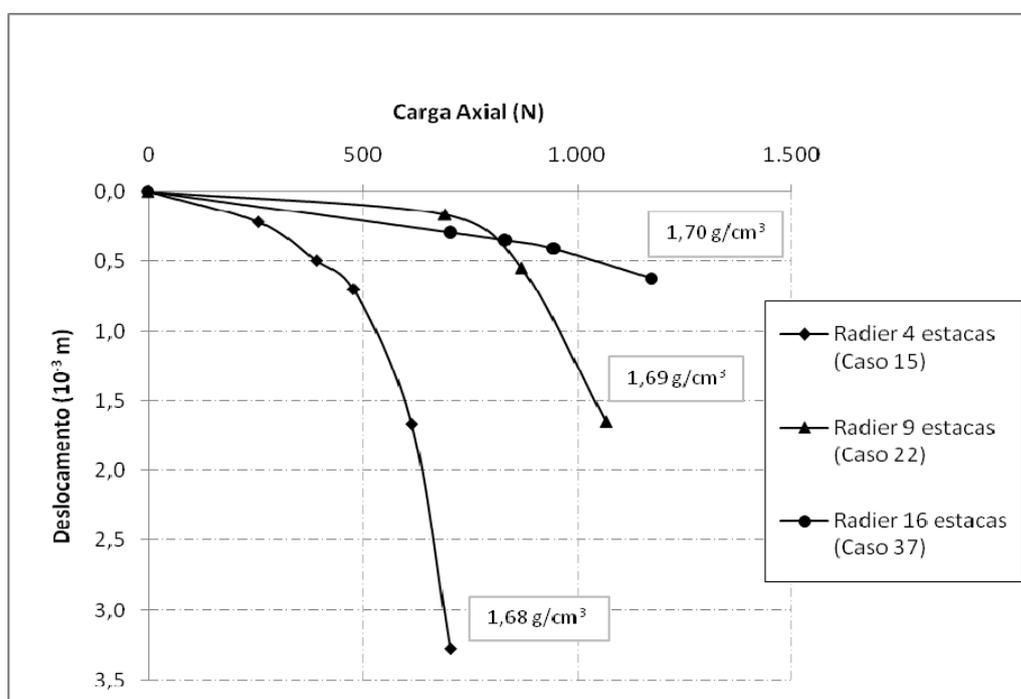


Figura 4.5. Curva carga-recalque para os radiers estaqueados ensaiados.

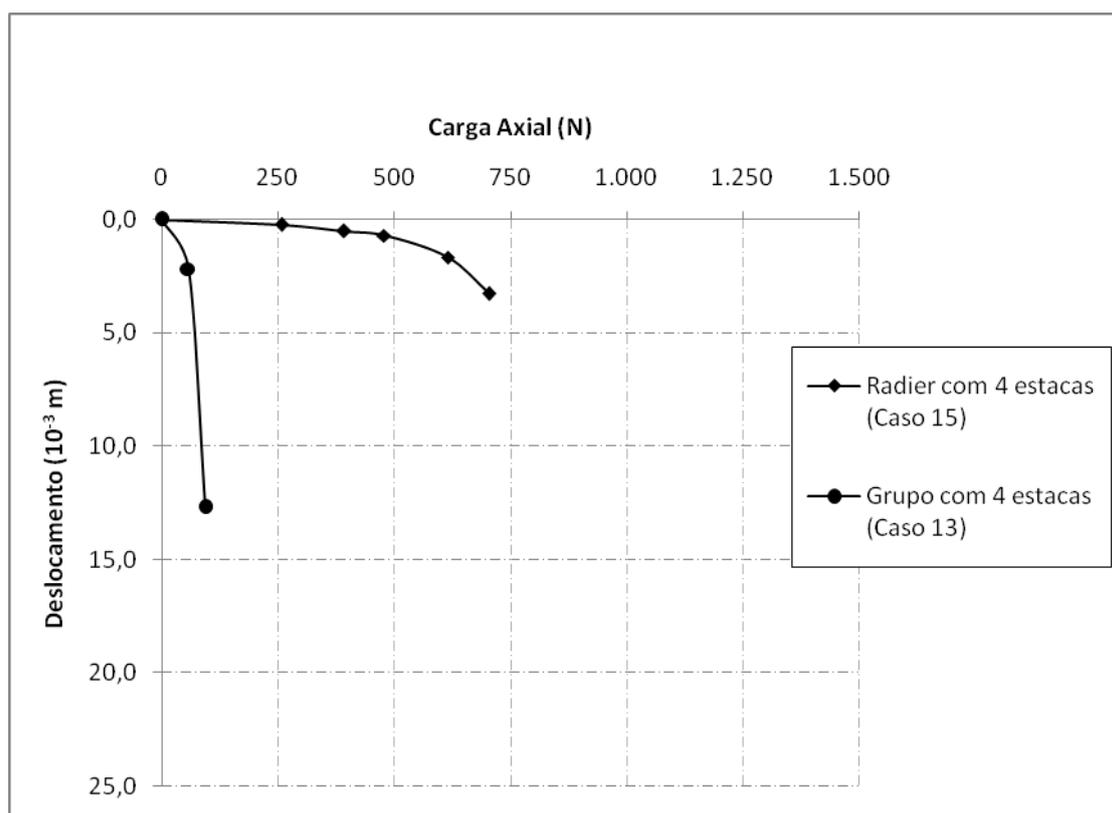
Os valores máximos de carga e deslocamento para os ensaios com os radiers estaqueados são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Valores máximos de carga e deslocamento do ensaio de prova de carga com radiers estaqueados com 4, 9 e 16 estacas.

Ensaio	Fundação	Casos	Carga Máxima (N)	Deslocamento Máximo (mm)
Prova de Carga	Radier com 4 estacas	15	704	3,28
Prova de Carga	Radier com 9 estacas	22	1.067	1,65
Prova de Carga	Radier com 16 estacas	37	1.173,50	0,62

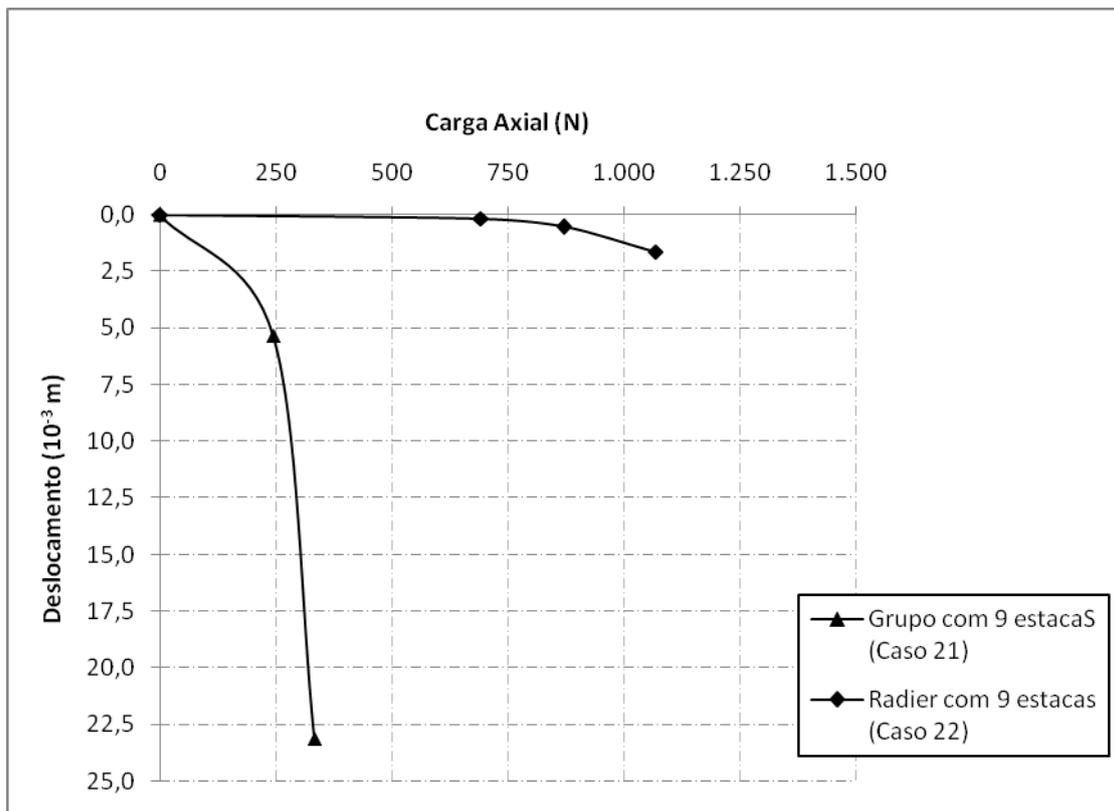
4.5 – Grupos de Estacas x Radiers Estaqueados

A Figura 4.6 apresenta um comparativo entre o grupo de estacas e o radier estaqueado com 4 estacas.



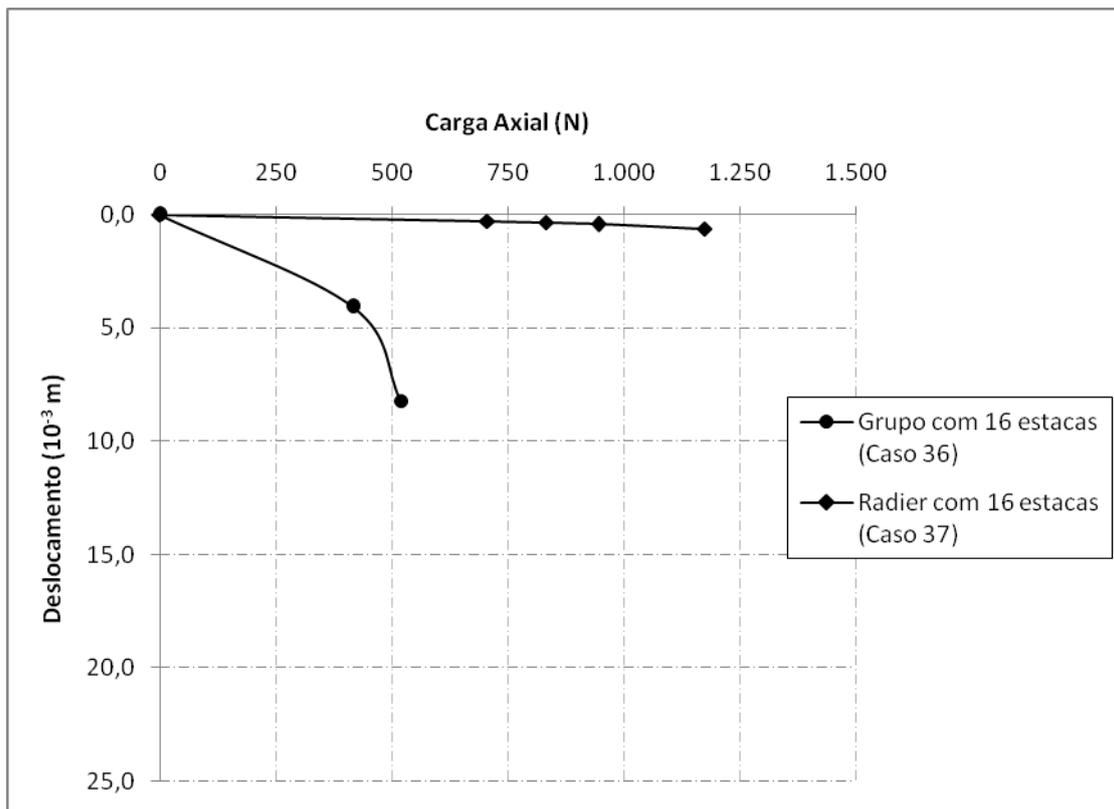
[Figura 4.6. Comparativo entre as curvas carga-recalque do grupo com 4 estacas e o radier estaqueado com 4 estacas.

A Figura 4.7 apresenta um comparativo entre o grupo de estacas e o radier estaqueado com 9 estacas.



[Figura 4.7. Comparativo entre as curvas carga-recalque do grupo com 9 estacas e o radier estaqueado com 9 estacas.

A Figura 4.8 apresenta um comparativo entre o grupo de estacas e o radier estaqueado com 16 estacas.



[Figura 4.8. Comparativo entre as curvas carga-recalque do grupo com 16 estacas e o radier estaqueado com 16 estacas.

4.6 – Resultados da Instrumentação com a Profundidade das Estacas

Os sensores elétricos de deformação (*strains gages*) permitem a análise da transferência de carga com a profundidade em cada estaca instrumentada. Com esta medição, devidamente instalados no topo, na mediana e na base, buscou-se a obtenção dos valores de atrito lateral e da quantidade de carga que cada estaca absorve, nos pontos onde estão instalados os sensores. Os valores de deformação medidos pelos *strain gages* para os ensaios com os grupos de 4, 9 e 16 estacas são apresentados da Tabela 4.6 à 4.8.

Tabela 4.6. Valores de carga e deslocamento nas seções instrumentadas do ensaio de prova de carga com o grupo de 4 estacas (Caso 13 – 4B4E0DC).

Carga Aplicada no Topo da Placa (N)	Recalque (10^{-3} m)	Estaca	Deformação ϵ ($\mu\text{m/m}$)		
			Topo	Meio	Base
0,0	0,00	1	0,0	0,0	0,0
		2	0,0	0,0	0,0
		3	0,0	0,0	0,0
		4	0,0	0,0	0,0
57,0	2,17	1	0,0	2,5	2,5
		2	5,0	5,0	2,5
		3	0,0	7,5	2,5
		4	2,5	12,5	5,0
94,0	12,70	1	0,0	17,5	5,0
		2	5,0	20,0	5,0
		3	2,5	17,5	5,0
		4	5,0	22,5	5,0

Tabela 4.7. Valores de carga e deslocamento nas seções instrumentadas do ensaio de prova de carga com o grupo de 9 estacas (Caso 21 – 9B9E0DC)

Carga Aplicada no Topo da Placa (N)	Recalque (10^{-3} m)	Estaca	Deformação ϵ ($\mu\text{m/m}$)		
			Topo	Meio	Base
0,0	0,00	1	0,0	0,00	0,0
		2	0,0	0,00	0,0
		3	0,0	0,00	0,0
		4	0,0	0,00	0,0
244,0	5,34	1	5,0	30,00	15,0
		2	0,0	25,00	15,0
		3	-5,0	20,00	5,0
		4	12,5	15,00	10,0
333,0	23,12	1	-7,5	57,50	32,5
		2	10,0	45,00	30,0
		3	5,0	35,00	10,0
		4	5,0	25,00	15,0

Tabela 4.8. Valores de carga e deslocamento nas seções instrumentadas do ensaio de prova de carga com o grupo de 16 estacas (Caso 36 – 16B16E0DC).

Carga Aplicada no Topo da Placa (N)	Recalque (10^{-3} m)	Estaca	Deformação ϵ ($\mu\text{m/m}$)		
			Topo	Meio	Base
0,0	0,00	1	0,0	0,0	0,0
		2	0,0	0,0	0,0
		3	0,0	0,0	0,0
		4	0,0	0,0	0,0
417,0	4,07	1	-5,0	30,0	12,5
		2	0,0	20,0	10,0
		3	2,5	20,0	12,5
		4	5,0	15,0	5,0
519,0	8,23	1	2,5	35,0	22,5
		2	2,5	30,0	17,5
		3	27,5	30,0	17,5
		4	-10,0	20,0	10,0

Os valores de deformação medidos pelos strain gages para os ensaios com os radiers estaqueados são apresentados da Tabela 4.9 à 4.11.

Tabela 4.9. Valores de carga e deslocamento nas seções instrumentadas do ensaio de prova de carga com o radier estaqueado com 4 estacas (Caso 15 – 4P4E0DC).

Carga Aplicada no Topo da Placa (N)	Recalque (10^{-3} m)	Estaca	Deformação ϵ ($\mu\text{m}/\text{m}$)		
			Topo	Meio	Base
0,0	0,00	1	0,0	0,0	0,0
		2	0,0	0,0	0,0
		3	0,0	0,0	0,0
		4	0,0	0,0	0,0
257,0	0,22	1	7,5	7,5	3,8
		2	11,3	7,8	5,0
		3	10,0	6,5	3,8
		4	12,5	9,0	6,3
392,0	0,50	1	20,5	11,3	6,0
		2	16,4	12,9	9,0
		3	12,5	10,8	8,0
		4	20,3	15,0	10,0
478,0	0,70	1	24,8	15,3	8,5
		2	22,4	17,5	12,1
		3	18,5	14,3	11,8
		4	26,3	20,8	12,5
614,0	1,67	1	28,3	20,0	12,0
		2	26,0	21,1	15,1
		3	22,0	17,8	15,3
		4	30,0	24,5	15,0
704,0	3,28	1	32,8	24,5	15,0
		2	30,0	23,9	17,3
		3	27,5	21,0	18,0
		4	32,5	26,8	16,5

Tabela 4.10. Valores de carga e deslocamento nas seções instrumentadas do ensaio de prova de carga com o radier estaqueado com 9 estacas (Caso 22 – 9P9E0DC).

Carga Aplicada no Topo da Placa (N)	Recalque (10^{-3} m)	Estaca	Deformação ϵ ($\mu\text{m/m}$)		
			Topo	Meio	Base
0,0	0,00	1	0,0	0,0	0,0
		2	0,0	0,0	0,0
		3	0,0	0,0	0,0
		4	0,0	0,0	0,0
691,0	0,17	1	7,5	7,5	3,8
		2	11,3	7,8	5,0
		3	10,0	6,5	3,8
		4	12,5	9,0	6,3
870,0	0,55	1	20,5	11,3	6,0
		2	16,4	12,9	9,0
		3	12,5	10,8	8,0
		4	20,3	15,0	10,0
1.067,0	1,65	1	24,8	15,3	8,5
		2	22,4	17,5	12,1
		3	18,5	14,3	11,8
		4	26,3	20,8	12,5

Tabela 4.11. Valores de carga e deslocamento nas seções instrumentadas do ensaio de prova de carga com o radier estaqueado com 16 estacas (Caso 37 – 16P16E0DC).

Carga Aplicada no Topo da Placa (N)	Recalque (10^{-3} m)	Estaca	Deformação ϵ ($\mu\text{m}/\text{m}$)		
			Topo	Meio	Base
0,0	0,00	1	0,0	0,0	0,0
		2	0,0	0,0	0,0
		3	0,0	0,0	0,0
		4	0,0	0,0	0,0
705,0	0,30	1	7,5	7,5	3,8
		2	11,3	7,8	5,0
		3	10,0	6,5	3,8
		4	12,5	9,0	6,3
832,0	0,35	1	20,5	11,3	6,0
		2	16,4	12,9	9,0
		3	12,5	10,8	8,0
		4	20,3	15,0	10,0
945,0	0,41	1	24,8	15,3	8,5
		2	22,4	17,5	12,1
		3	18,5	14,3	11,8
		4	26,3	20,8	12,5
1.173,5	0,62	1	28,3	20,0	12,0
		2	26,0	21,1	15,1
		3	22,0	17,8	15,3
		4	30,0	24,5	15,0

5 – Análise dos Resultados

Neste capítulo estão presentes as análises dos ensaios de prova de carga efetuados nas estacas isoladas, nos grupos de estacas e nos radiers estaqueados. Mostram-se também as interpretações das curvas do tipo carga-recalque, as distribuições dos esforços nas estacas com a profundidade, os métodos de extrapolação adotados e a metodologia adotada para o cálculo do recalque limite utilizada nas análises.

O estudo das estacas isoladas é realizado através da instrumentação. Avaliam-se os mecanismos de transferência de carregamentos com a profundidade, e comparam-se estes resultados com o método da rigidez de Décourt (1996b).

As relações, entre as estacas de um mesmo grupo, são analisadas com base no efeito de grupo na taxa de recalque. As medidas de carga, realizadas em cada estaca, permitem avaliar o modo de distribuição do carregamento nos elementos.

A análise do radier estaqueado mostra a porcentagem de carga dividida entre os elementos (radier e estacas). A comparação com as fundações isoladas estabelece a relação de eficiência do grupo (η) dos elementos e o aumento de resistência (ζ_{PR}) da fundação devido ao contato do radier com o solo, e o fator de segurança do mesmo na condição de trabalho.

5.1 – Análise das Curvas do tipo Carga-Recalque

As curvas do tipo carga-recalque obtidas nos ensaios com as estacas isoladas, e o capitel, apresentaram a ruptura física clara. As médias das densidades entre as camadas do solo de sustentação, utilizado para cada estaca ensaiada, apresentaram valores bem próximos de $1,60 \text{ g/cm}^3$, o que permite, com boa margem de segurança, a comparação entre os comportamentos mecânicos das estacas. O valor máximo de recalque atingido para estes ensaios é de 18,55 mm, e a carga máxima alcançada foi 789 N.

Para as provas de carga realizadas nos grupos de estacas, a única curva do tipo carga-recalque que não apresentou uma ruptura física clara foi a do grupo com 16 estacas. Estes ensaios apresentaram uma densidade média para o solo de fundação da ordem de $1,61 \text{ g/cm}^3$,

valor este bem próximo da densidade média do solo utilizado para os ensaios com as estacas isoladas (1,60 g/cm³).

O formato das curvas experimentais das provas de carga nos radiers estaqueados com 4 e 9 estacas apresentou, também, uma ruptura clara. Para o radier estaqueado com 16 estacas, a curva carga-recalque mostrou um crescimento contínuo do recalque sem evidenciar uma ruptura. O trecho inicial do carregamento possui declividades menores em relação às curvas dos ensaios com os grupos de estacas.

Os recalques apresentados nos ensaios com os radiers estaqueados foram inferiores aos dos grupos de estacas. Os valores de carregamentos atingidos nesses ensaios foram sensivelmente superiores, o que evidencia o ganho de resistência da fundação proveniente do contato da placa com o solo de sustentação.

Para a avaliação da capacidade de carga dos elementos de fundação, a partir das curvas do tipo carga-recalque, utilizaram-se os métodos de extrapolação de Van der Veen (1953), modificado por Aoki (1976) e o método de Décourt (1996), baseado no conceito da rigidez para a caracterização da ruptura física. Além destes dois métodos, utilizou-se também do critério de ruptura da NBR 6122:2010.

Os gráficos das provas de carga realizadas nas estacas foram plotados de maneira a se evidenciar a semelhança mecânica de comportamentos, conforme Figura 5.1. A partir de então, considerou-se um comportamento médio entre as estacas para o cálculo das cargas de ruptura. Portanto, para cada um dos três critérios anteriormente expostos (o Método do Décourt em 1996, a NBR 6122:2010 e conforme Van der Veen, modificado por Aoki em 1976) foram calculados os valores da carga de ruptura segundo cada metodologia (vide Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e Tabela 5.1).

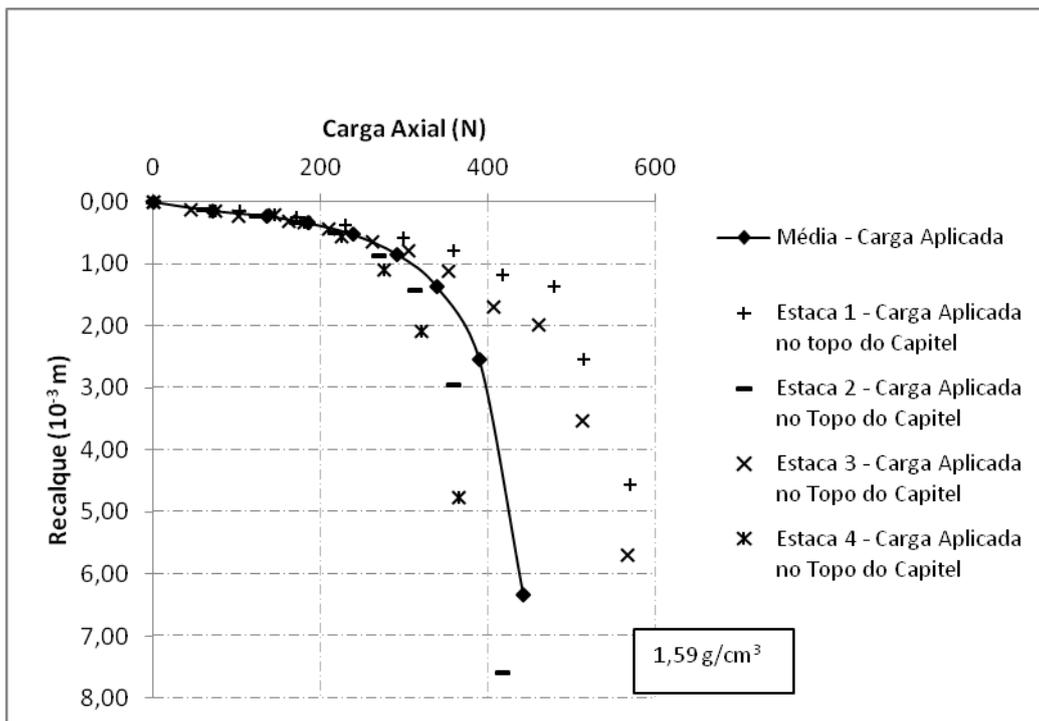


Figura 5.1. Curva carga-recalque normalizada para cada estaca isolada

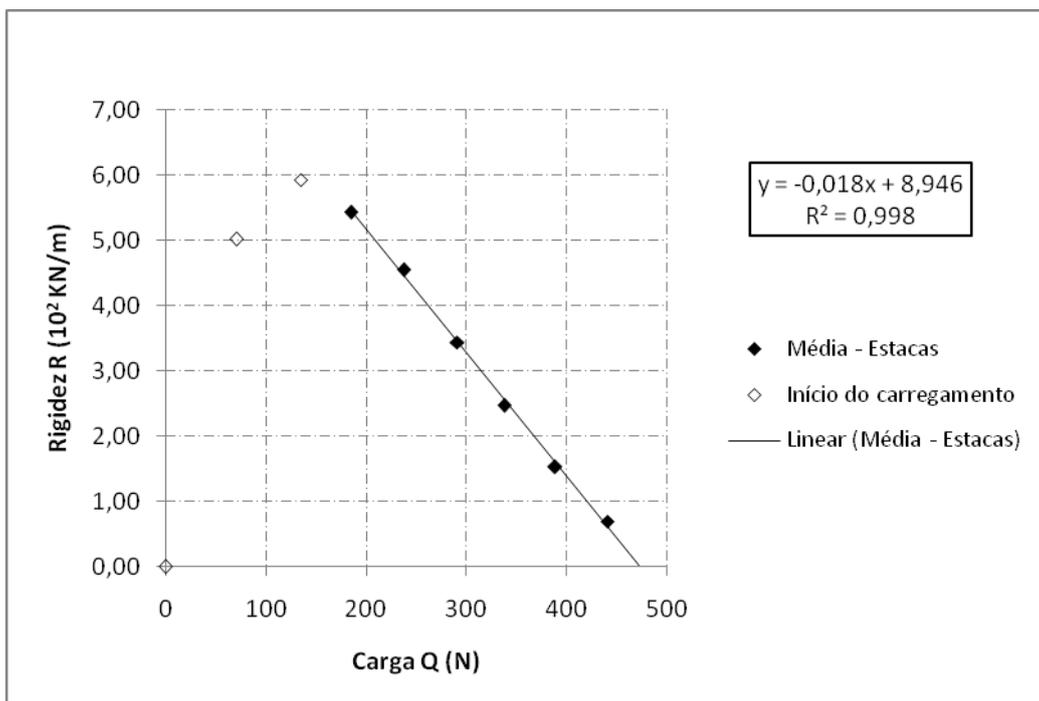


Figura 5.2. Gráfico de rigidez para o comportamento médio das estacas.

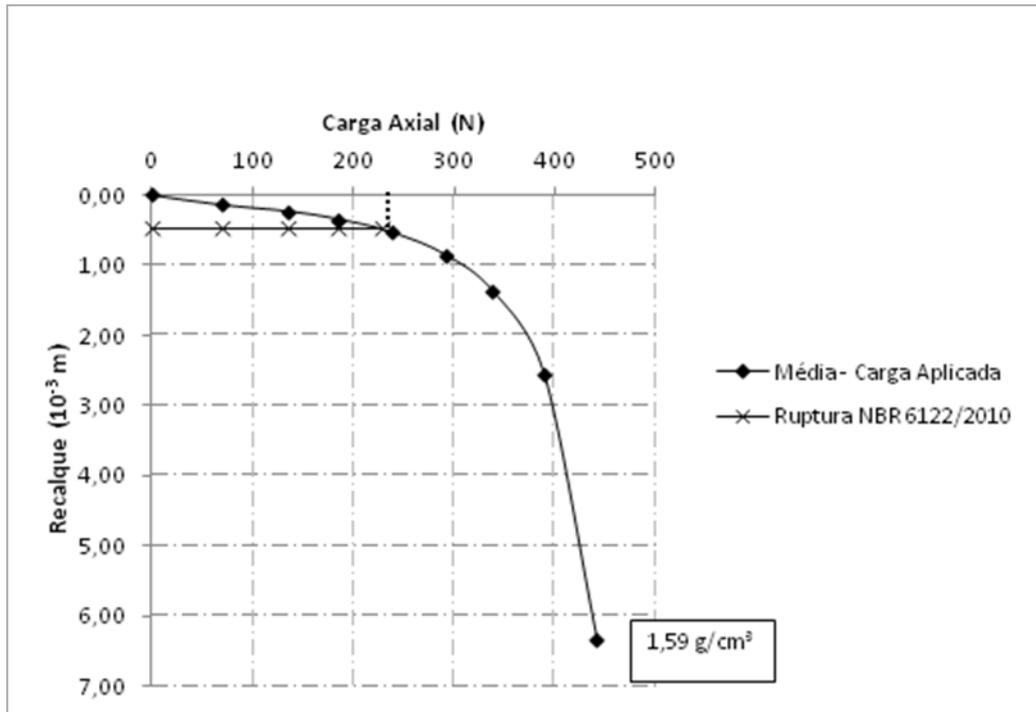


Figura 5.3. Critério de ruptura da NBR 6122:2010 para o comportamento médio das estacas.

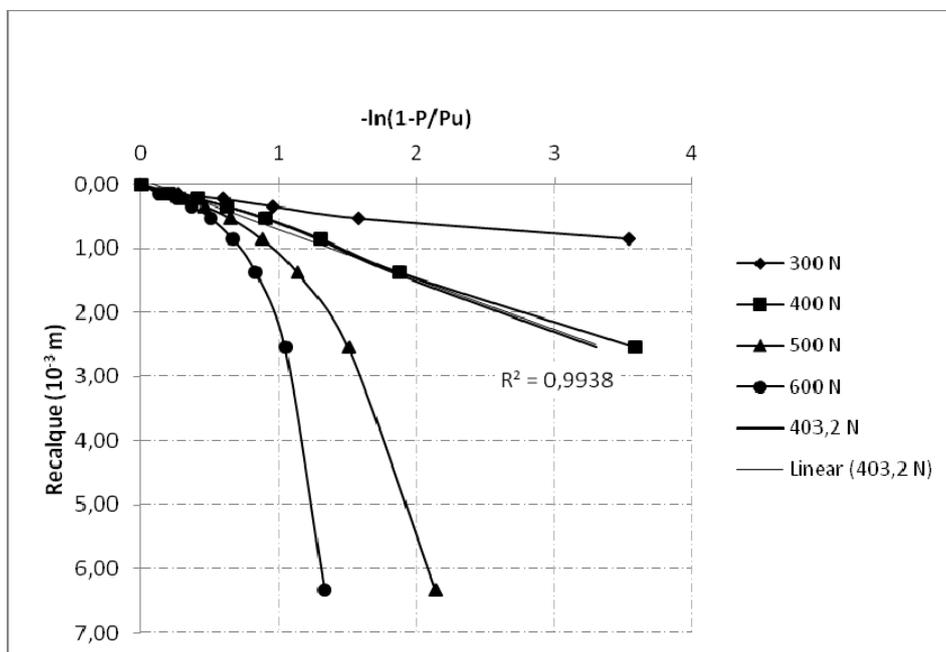


Figura 5.4. Gráfico do tipo $-\ln(1-P/P_u)$ em função do recalque para a estaca isolada.

Tabela 5.1. Parâmetros de entrada e carga de ruptura segundo Van der Veen (1953), modificado Aoki (1976) para o comportamento médio das estacas isoladas.

Carga de Ruptura (N)	Parâmetro "a"	Parâmetro "b"
508,12	0,07	857,06

O critério de Décourt (1996) previu uma ruptura (473,34 N) relativamente próxima da encontrada pela metodologia de Van der Veen (1953), modificada por Aoki (1976) cujo valor corresponde a 508,12 N. A NBR 6122:2010 previu uma carga de ruptura aquém das anteriormente encontradas no valor de 230 N.

O valor da carga de ruptura adotado na presente pesquisa foi àquele obtido através da média aritmética entre os resultados dos cálculos para cada metodologia descrita anteriormente e possui o valor de 403,82 N, conforme Figura 5.5. Apesar do critério da Norma 6122/2010 prever um valor de capacidade de carga da ordem de 113% a menor, ainda assim, este método foi considerado para que os dados tratados sejam os medidos, e não extrapolados (já que ao se desconsiderar o critério da norma, a nova média seria de 490,73 N). Sendo assim o comportamento médio das estacas na curva carga-recalque foi normalizado e pode ser visualizado na Figura 5.6.

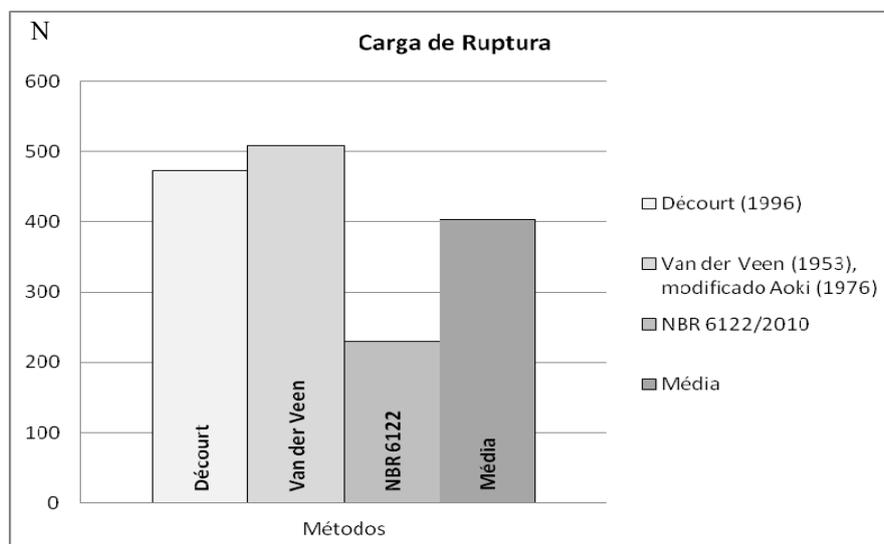


Figura 5.5. Resultados dos cálculos das metodologias de ruptura adotadas para as estacas isoladas.

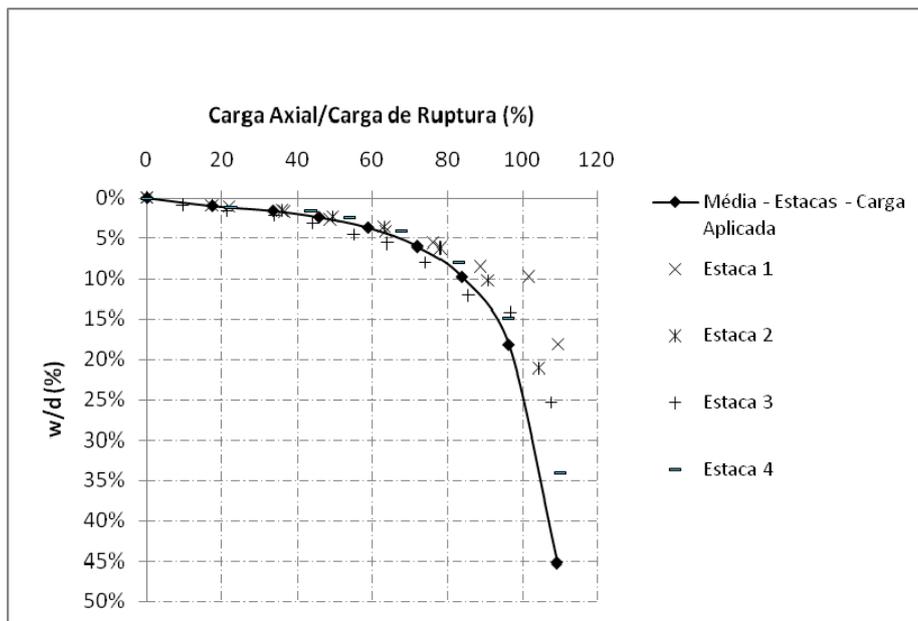


Figura 5.6. Curva do tipo carga-recalque normalizada para o comportamento médio das estacas.

A partir do valor da carga de ruptura adotado de 403,2 N, obteve-se o valor do recalque máximo admitido equivalente a carga de ruptura adotada de $3,10 \times 10^{-3}$ m, ou 3,10 mm (que equivale a 24,22% do diâmetro externo das estacas utilizadas), graficamente com a curva do tipo carga-recalque para o comportamento médio das estacas (vide Figura 5.7).

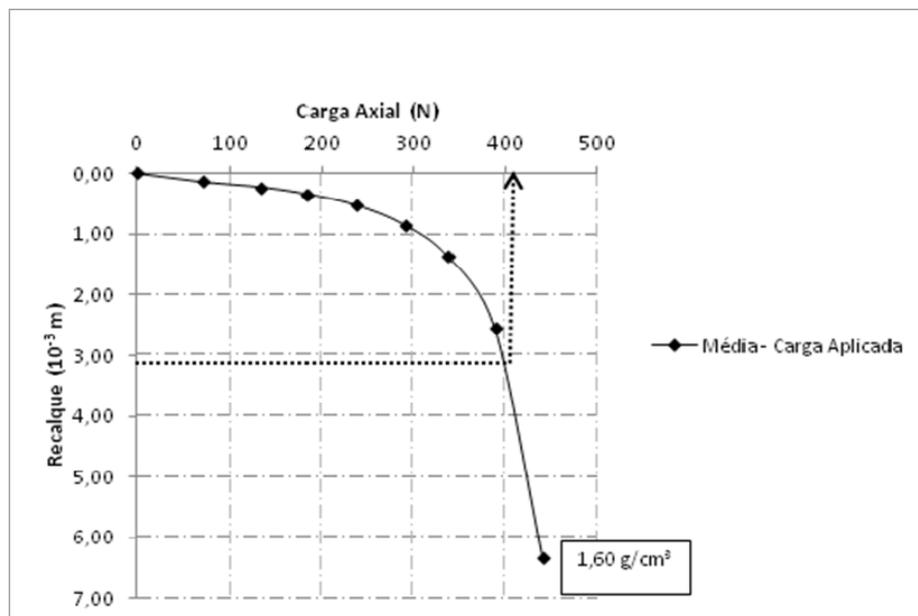


Figura 5.7. Curva carga-recalque com a carga de ruptura e recalque máximo para o comportamento médio das estacas isoladas.

Este critério de recalque máximo equivalente à carga de ruptura adotada foi estendido para as demais fundações. A carga admissível das fundações (P_{adm}) é calculada com o fator de segurança no valor de 1,5 aplicado às cargas ($P_{rec.Max}$ adotado.) que alcançam o valor de $3,10 \times 10^{-3}$ m, ou 3,10 mm.

As cargas de ruptura (Q_{rup}) dos ensaios dos grupos de estacas, e radiers estaqueados, foram obtidas através dos métodos de extrapolação de Van der Veen apenas para os casos em (Caso 22 e 37) que a ruptura física não ficou clara. Estes resultados, bem como as cargas que provocam o recalque máximo ($P_{rec.Max.}$) e suas respectivas cargas admissíveis são apresentadas na Tabela 5.2.

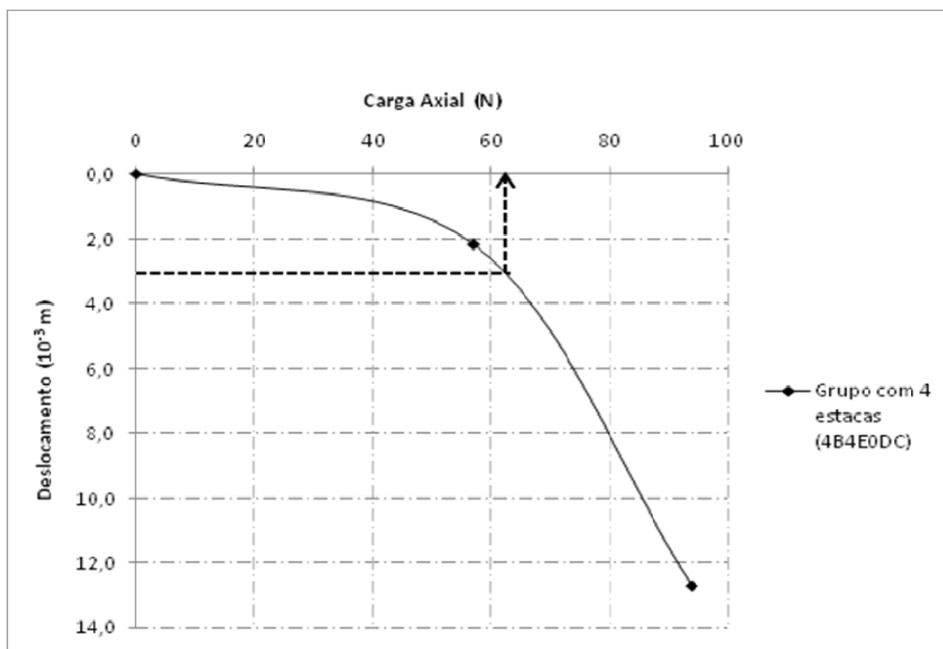


Figura 5.8. Curva carga-recalque do grupo com 4 estacas com a carga de ruptura e o recalque máximo adotado.

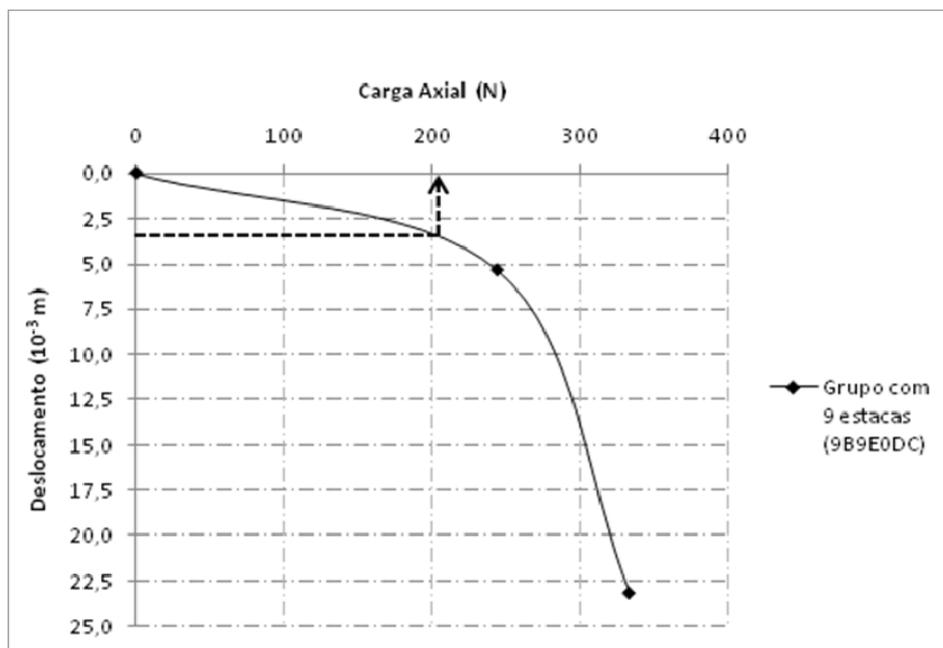


Figura 5.9. Curva carga-recalque do grupo com 9 estacas com a carga de ruptura e o recalque máximo adotado.

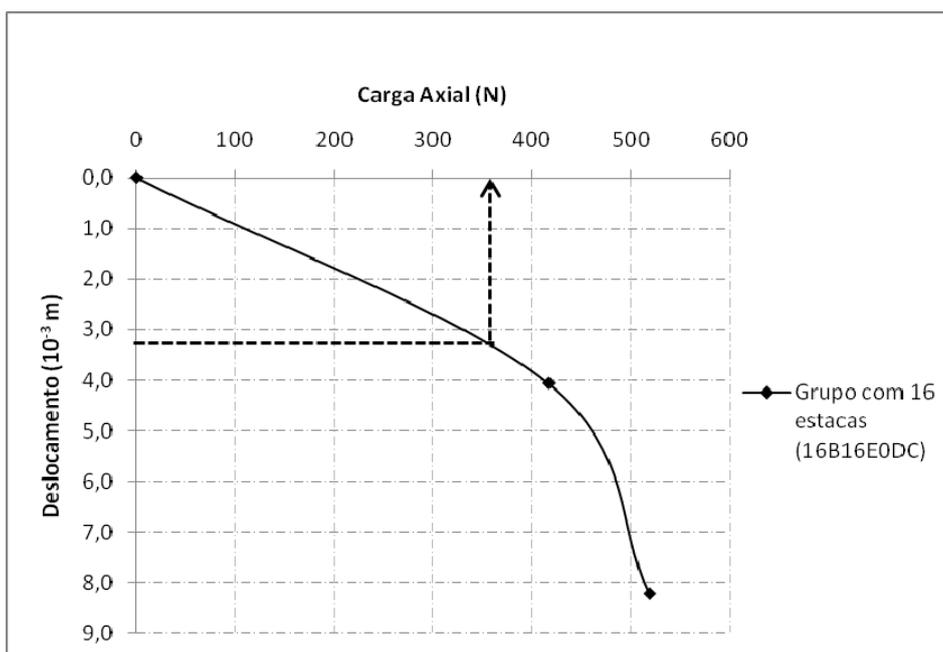


Figura 5.10. Curva carga-recalque do grupo com 16 estacas com a carga de ruptura e o recalque máximo adotado.

Para todos os ensaios com os grupos de estacas, o nível de recalque máximo admitido (3,10 mm) foi alcançado: para o grupo com 4 estacas para este nível de recalque estipulado, o valor da carga de ruptura é de 65 N; para o grupo com 9 estacas é de 200 N e; para o grupo com 16 estacas, a carga de ruptura atinge o valor de 350 N.

As Figuras 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 apresentam as cargas de ruptura correspondentes ao recalque máximo adotado no presente trabalho para os ensaios realizados com as placas, e com o capitel, também, sem a presença das estacas.

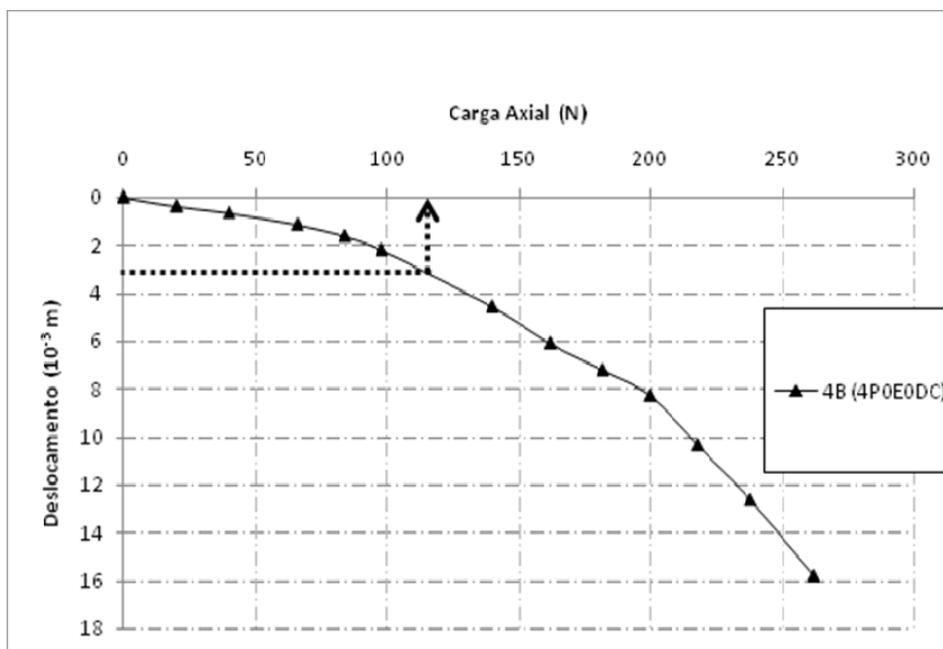


Figura 5.11. Curva carga-recalque para o radier sem a presença de estacas (placa para 4 estacas).

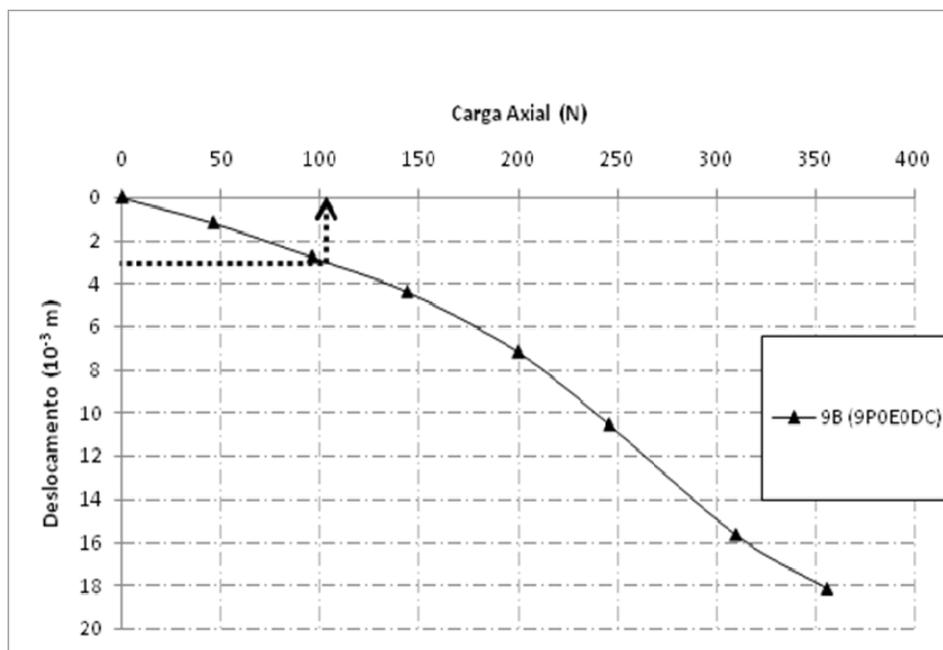


Figura 5.12. Curva carga-recalque para o radier sem a presença de estacas (placa para 9 estacas).

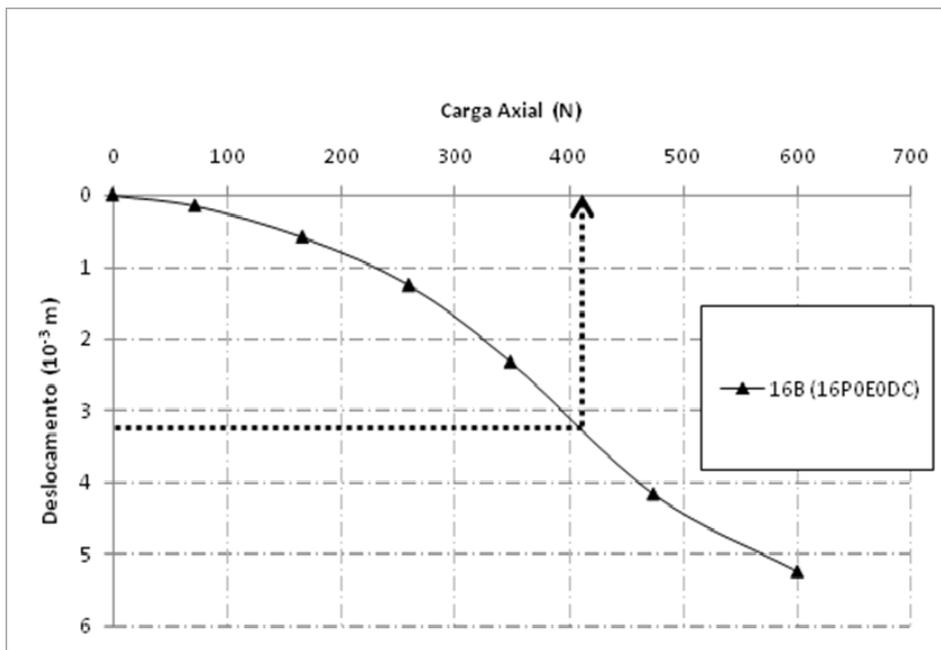


Figura 5.13. Curva carga-recalque para o radier sem a presença de estacas (placa para 16 estacas).

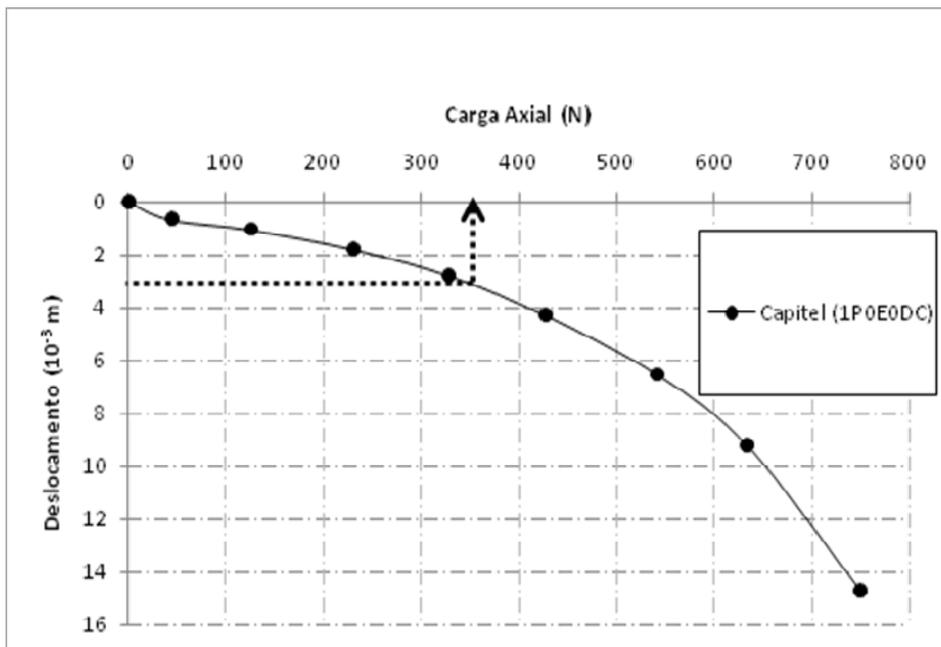


Figura 5.14. Curva carga-recalque para o capitel das estacas isoladas.

Para os ensaios com o radiers isolados, constataram-se valores de capacidade de carga, da placa de nove estacas, inferiores aos encontrados para a placa destinada a quatro estacas, até o nível de carregamento da ordem de 150 N; para carregamentos superiores a este último valor, a capacidade de carga do radier isolado destinado a nove estacas permanece superior ao da placa (radier isolado) destinada a quatro estacas. Este resultado inesperado provavelmente

deve-se a algum erro experimental inicial que foi corrigido naturalmente com a evolução do próprio ensaio. Os gráficos que se seguem (Figuras 5.15, 5.16 e 5.17) apresentam as curvas do tipo carga-recalque para os radiers estaqueados com a presença do critério de recalque máximo (da ordem de 3,10 mm) adotado na presente pesquisa.

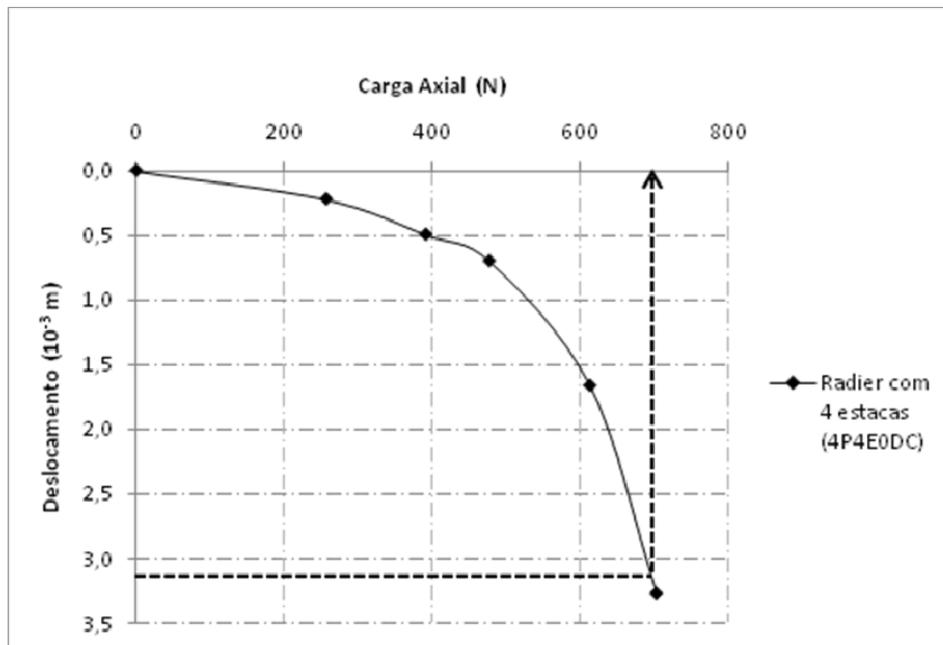


Figura 5.15. Curva carga-recalque do radier estaqueado com 4 estacas com a carga de ruptura e o recalque máximo.

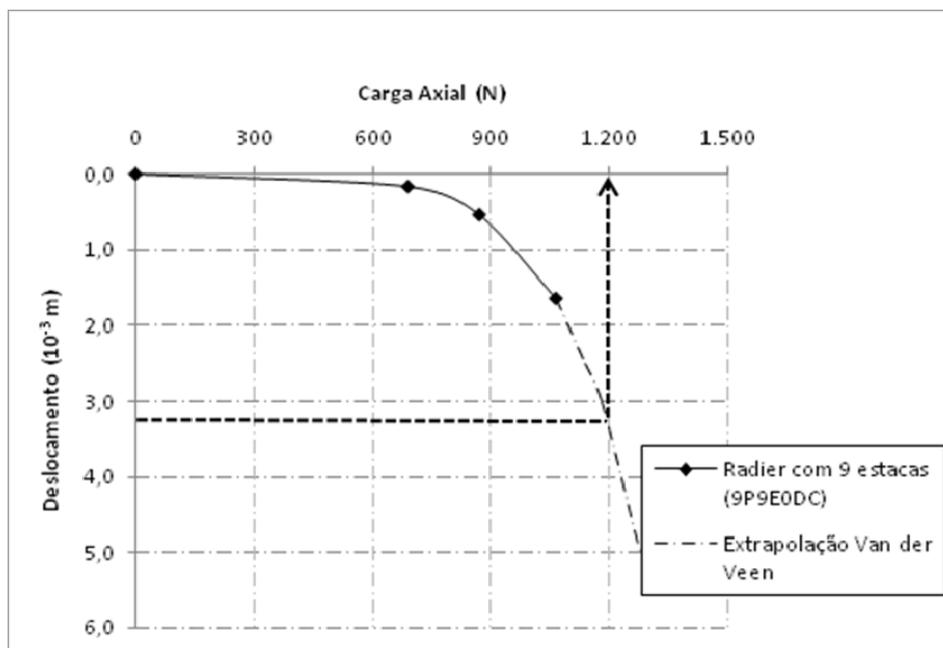


Figura 5.16. Curva carga-recalque do radier estaqueado com 9 estacas com a carga de ruptura e o recalque máximo.

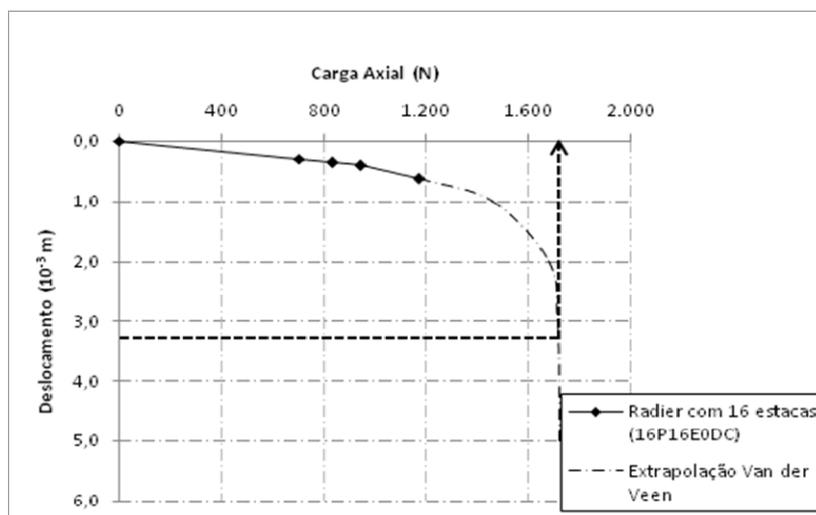


Figura 5.17. Curva carga-recalque do radier estacado com 16 estacas com a carga de ruptura e o recalque máximo.

As curvas extrapoladas, através da metodologia de Van der Veen, apresentam boa aproximação com os resultados das provas de carga dos radiers estacados com 9 e 16 estacas. Não foi necessária a extrapolação dos resultados dos outros ensaios, uma vez que as rupturas eram nítidas nas curvas do tipo carga-recalque. A Tabela 5.2 apresenta o resumo das cargas de ruptura, e de trabalho, calculadas a partir dos critérios adotados na presente pesquisa; ressalta-se ainda que o Caso 9 refere-se na verdade do comportamento médio das estacas relatado na Figura 5.1.

Tabela 5.2. Cargas de ruptura extrapoladas, cargas de recalque máximo e cargas admissíveis das fundações.

Fundação	Caso	Nomenclatura	Recalque Máximo Adotado (3,10 mm)	
			Q_{rup} (N)	Q_{trab} (N)
Capitel Isolado	10	1P0E0DC	350,00	233,33
Média das estacas isoladas	9	1P1E0DC	403,20	268,80
Radier isolado para 4 estacas	12	4P0E0DC	130,00	86,67
Radier isolado para 9 estacas	20	9P0E0DC	110,00	73,33
Radier isolado para 16 estacas	35	16P0E0DC	405,00	270,00
Grupo com 4 estacas	13	4B4E0DC	65,00	43,33
Grupo com 9 estacas	21	9B9E0DC	200,00	133,33
Grupo com 16 estacas	36	16B16E0DC	350,00	233,33
Estaca Isolada	9	1P1E0DC	53,82	35,47
Radier estacado de 4 estacas	15	4P4E0DC	700,00	466,67
Radier estacado de 9 estacas	22	9P9E0DC	1.180,32	786,88
Radier estacado de 16 estacas	37	16P16E0DC	1.716,27	1.144,18

5.2 – Análise das Estacas Instrumentadas

Os resultados provenientes da instrumentação, com *strain gages*, nas estacas, não permitiram avaliar a carga em suas seções de topo, meio e ponta (ou base), nem como a distribuição das estacas no grupo/radier estaqueado. Estas análises foram prejudicadas pelo sistema de carga adotado ter proporcionado momentos durante os carregamentos. Os extensômetros utilizados na presente pesquisa foram àqueles com ¼ de ponte, infelizmente inadequados para leituras de deformações geradas por cargas verticais com momentos: sendo assim, estes dados não são aqui analisados (este problema só foi detectado após a série de ensaios ter sido finalizada).

5.3 – Análise dos Grupos de Estacas

O estudo do grupo avalia a distribuição da carga entre as estacas, com os extensômetros instalados nas mesmas, e com os deslocamentos sofridos pelos blocos. Os efeitos da proximidade, entre as estacas, são interpretados através do fator de eficiência.

5.3.1 – Efeito de Grupo

O efeito de grupo nas fundações estaqueadas da presente pesquisa através do fator de eficiência, dado pela relação entre a capacidade de carga do grupo e de uma estaca isolada:

$$Q_{\text{grupo}} = \eta \sum_1^n Q_{\text{estaca}} \quad (5.1)$$

Onde:

Q_{grupo} : capacidade de carga do grupo de estacas

η : fator de eficiência;

Q_{estaca} : capacidade de carga da estaca isolada.

A Figura 5.18 apresenta as curvas do tipo carga-recalque dos grupos de estacas, e a carga correspondente ao recalque máximo, anteriormente definido de $3,10 \times 10^{-3}$ m, ou 3,10 mm.

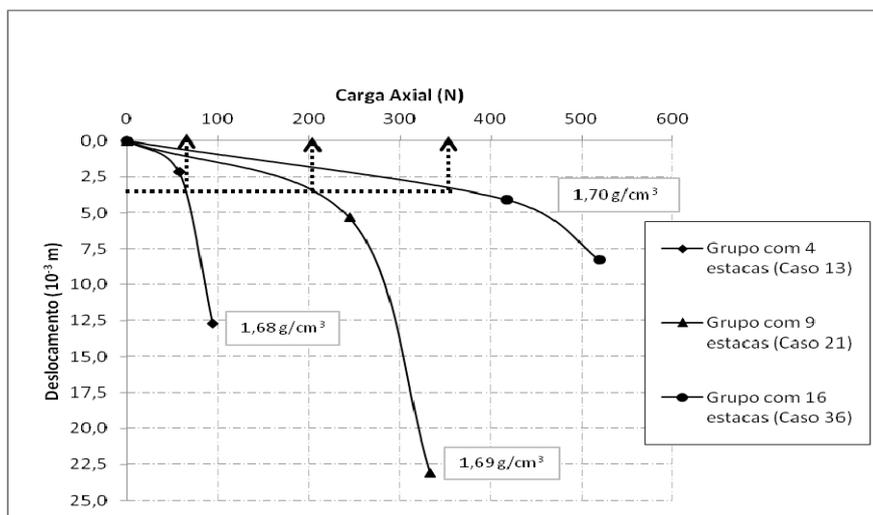


Figura 5.18. Cargas para o recalque máximo das fundações em grupos de estacas.

A Tabela 5.3 apresenta os fatores de eficiência (η) dos grupos de estacas, em função da capacidade de carga das fundações (Q), calculadas pelos a partir do critério do recalque máximo.

Tabela 5.3. Fator de eficiência (η) em grupo de estacas.

Fundação	Recalque Máximo	
	Q_{rup} (N)	η
Grupo de 4 estacas	65,00	0,30
Grupo de 9 estacas	200,00	0,45
Grupo de 16 estacas	350,00	0,44

Os resultados demonstram que a capacidade de carga do grupo é inferior a soma das capacidades de carga das estacas isoladas (a capacidade de carga da estaca isolada é 53,82 N). Esta redução na capacidade de carga do sistema é gerada pelo efeito de grupo presente nas fundações estaqueadas. Agregado a este efeito está a própria dinâmica dos ensaios realizados com os grupos de estacas: conforme Figura 3.27b, somente 2/3 do comprimento das estacas, nestes ensaios, estão localizadas unicamente na camada 3 do solo de sustentação, o que contribui para a diminuição da capacidade de carga das estacas nos ensaios com os grupos. Constata-se ainda, que o efeito de grupo nestas fundações permanece praticamente o mesmo tanto para o grupo de 9, como para o de 16 estaca, e o resultado sofreu com a comparação de ensaios em condições bem distintas.

Os valores de eficiência para os grupos de estacas situam-se entre 0,30 e 0,56. O resultado não está próximo dos valores relatados por Vesic (1969) apud Freitas (2010) em virtude erros cometidos na metodologia de execução do solo de sustentação.

5.3.2 – Taxa de Recalque do Grupo

A taxa de recalque do grupo (R_s) relaciona o recalque do grupo (ρ) com recalque da estaca isolada (ρ_s), ambos no trecho elástico:

$$R_s = \frac{\rho}{\rho_s} \quad (5.2)$$

Onde ρ_s é o recalque da estaca isolada para a carga média de trabalho do grupo (ρ/n).

A obtenção dos recalques do grupo e da estaca isolada, para os trechos elásticos, é mostrada nas Figuras 5.40 à 5.42.

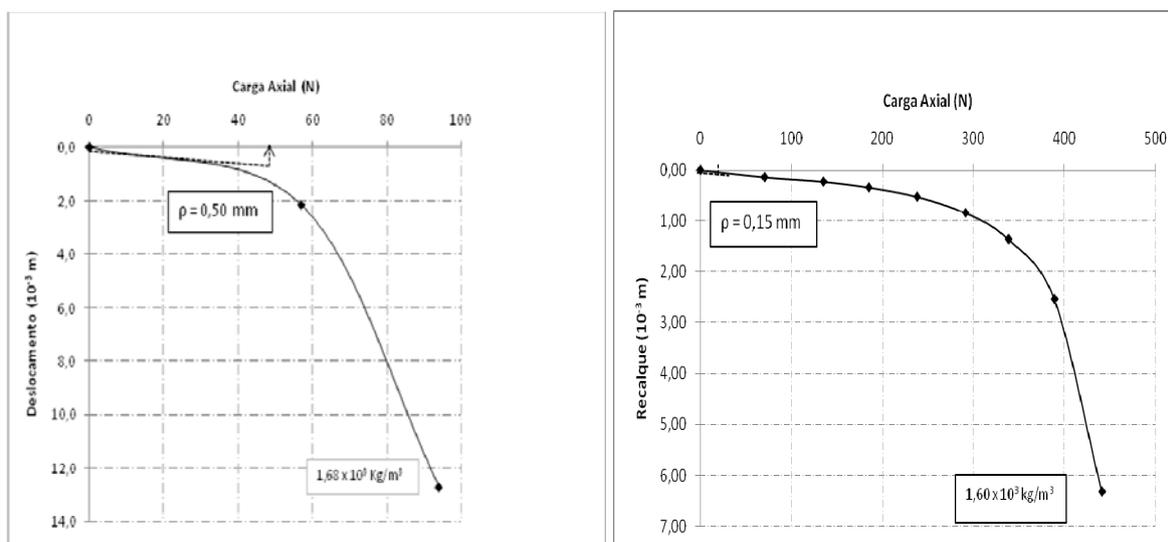


Figura 5. 19. Determinação, no trecho elástico, do grupo com quatro estacas, e para as estacas isoladas, para a carga de trabalho de 43,33 N, e para carga média de 10,83 N, respectivamente.

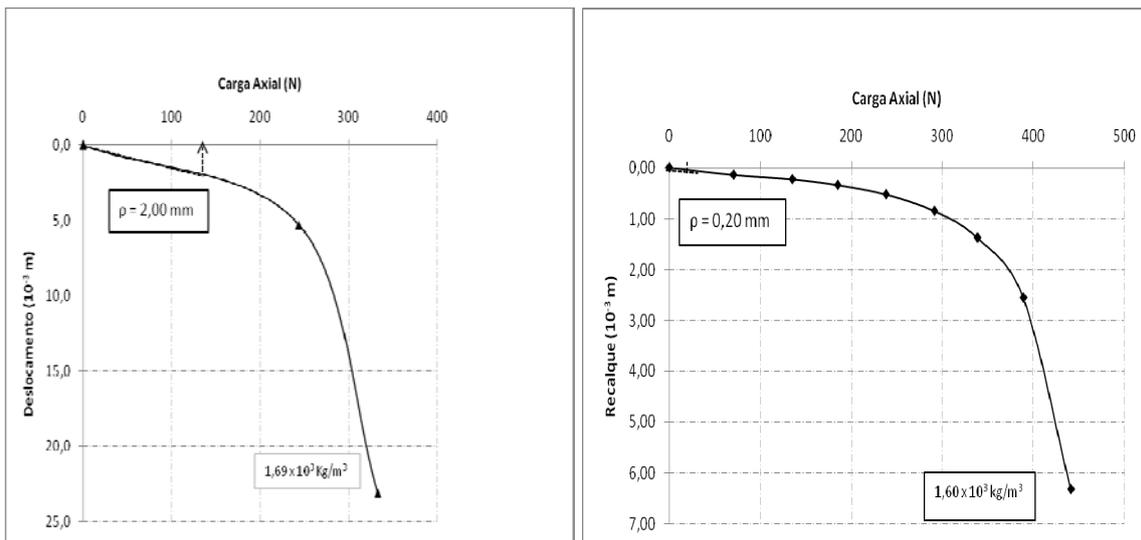


Figura 5.20. Determinação, no trecho elástico, do grupo com nove estacas, e para as estacas isoladas, para a carga de trabalho de 133,33 N, e para carga média de 14,81 N, respectivamente.

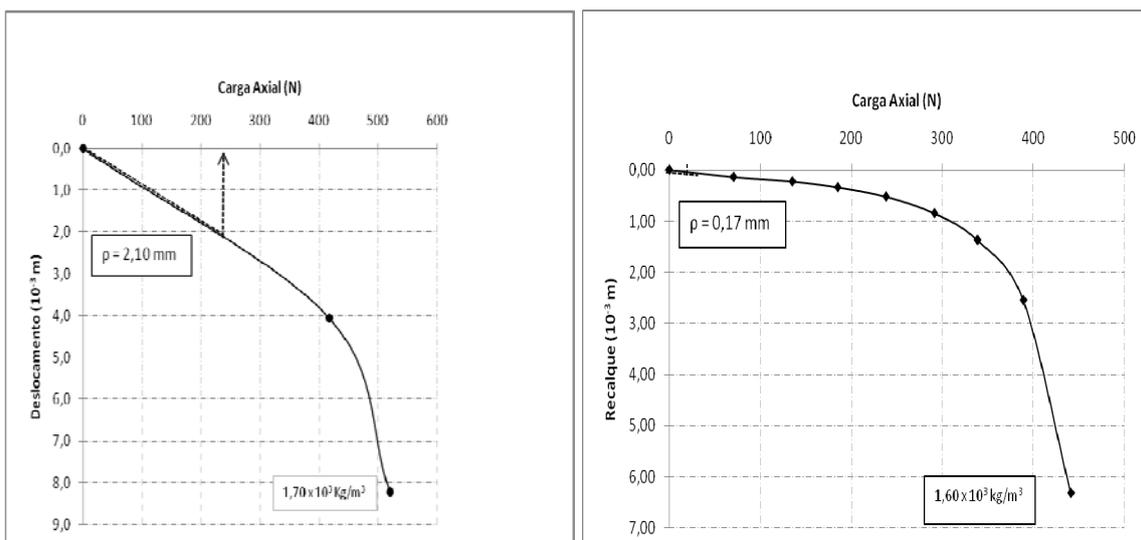


Figura 5.21. Determinação, no trecho elástico, do grupo com dezesseis estacas, e para as estacas isoladas, para a carga de trabalho de 233,33 N, e para carga média de 14,58 N, respectivamente.

Os valores de R_s , correspondentes às cargas admissíveis, para os grupos de estacas são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Taxa de recalque (R_s) para os grupos de estacas.

Fundação	Caso	Nomenclatura	Q_{adm}	$Q_{média}$	ρ_s (mm)	ρ (mm)	R_s
Grupo com 4 estacas	13	4B4E0DC	43,33	10,83	0,15	0,50	3,33
Grupo com 9 estacas	21	9B9E0DC	133,33	14,81	0,20	2,00	10,00
Grupo com 16 estacas	36	16B16E0DC	233,33	14,58	0,17	2,10	12,35

Os valores de R_s , maiores que um, indicam que, as estacas de um mesmo grupo, sofrem interações mútuas. Os resultados mostram que o recalque do grupo de estacas, sujeito a uma carga média por estaca, é maior do que o da estaca isolada, sob a mesma carga. Os valores dos fatores de redução de grupo R_G são apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.5. Fator de redução de grupo $R_G = R_s/n$.

Fundação	Caso	Nomenclatura	R_s	R_G
Grupo com 4 estacas	13	4B4E0DC	3,33	0,83
Grupo com 9 estacas	21	9B9E0DC	10,00	1,11
Grupo com 16 estacas	36	16B16E0DC	12,35	0,77

Os valores de R_G encontrados não seguem os resultados presentes na literatura, para o caso 21 (R_G é sempre menor que a unidade): este fato, provavelmente se deve a erros experimentais no procedimento do ensaio, anteriormente verificados na Figura 4.5 do Capítulo 4, da presente pesquisa (Apresentação de Resultados). Um comparativo entre os casos documentados por Mandolini e os valores de R_G encontrados é apresentado na Figura 5.22, logo a seguir. Nota-se entretanto que os pontos experimentados estão dentro da tendência apresentada por Mandolini *et al.* (2005).

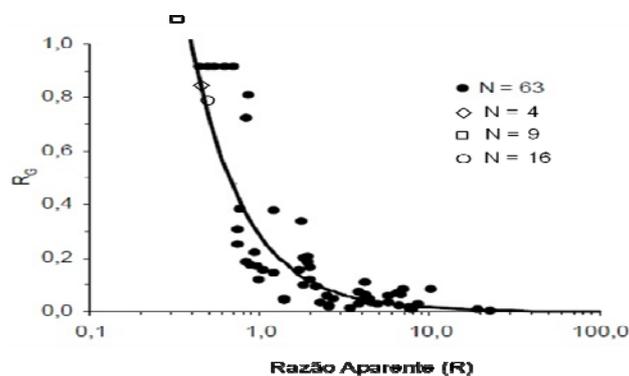


Figura 5.22. Pontos de R_G encontrados e pontos relatados por Mandolini (adaptado de Mandolini, Russo e Viggiani – 2005).

Ou seja, os pontos de RG encontrados situam-se na distribuição de pontos relatados por Mandolini e próximos da curva que representa a equação para cálculo de RG em função da razão aparente $R = (ns/L)^{0,5}$.

5.4 – Análise do Radier Estaqueado

O estudo das fundações em radiers estaqueados analisa a distribuição de carga entre seus elementos (estacas e radier) e seus respectivos fatores de eficiência – a comparação de desempenho de cada elemento entre as situações isoladas e associadas (radier estaqueado). Avaliam-se o aumento da capacidade de carga devido ao contato do radier com o solo, e as relações entre os fatores de segurança dos elementos na condição de trabalho do sistema.

5.4.1 – Distribuição de Carga entre as Estacas e o Radier

A análise das estacas instrumentadas (seção 5.2 da presente pesquisa) mostrou um comportamento usual para as provas de carga com as estacas isoladas. Em virtude das dimensões, e da própria rigidez também do capitel utilizado nestes ensaios, as provas de carga com as estacas isoladas se comportaram de forma semelhante a um radier estaqueado com uma única estaca, onde a capacidade de carga da estaca individualizada é de 53,82 N.

Em função disso, avaliou-se a distribuição de carga nas estacas do radier estaqueado com as medidas de deformação dos *strain gages* (instalados no topo de cada estaca instrumentada).

A carga absorvida pelo radier, e distribuída diretamente ao solo é obtida pela subtração simples da carga total (medida através de uma célula de carga com capacidade de 20 kN instalada na parte superior do radier) pelas cargas absorvidas nas estacas (calculadas a partir dos extensômetros). A seguir são apresentados os gráficos (Figura 5.23 a 5.25) com as cargas totais, e aquelas divididas entre os elementos, em função do recalque médio das fundações em radiers estaqueados. Ressalta-se que os problemas provenientes da instrumentação não afetaram os resultados médios encontrados.

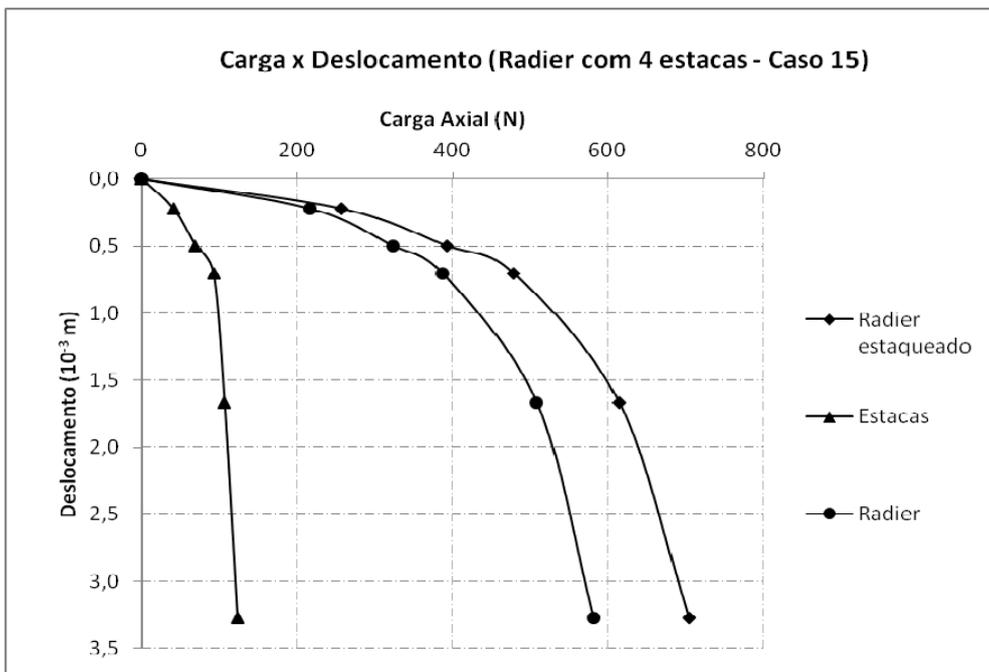


Figura 5.23. Gráfico do tipo carga-recalque do radier e da estaca para o radier estaqueado com 4 estacas.

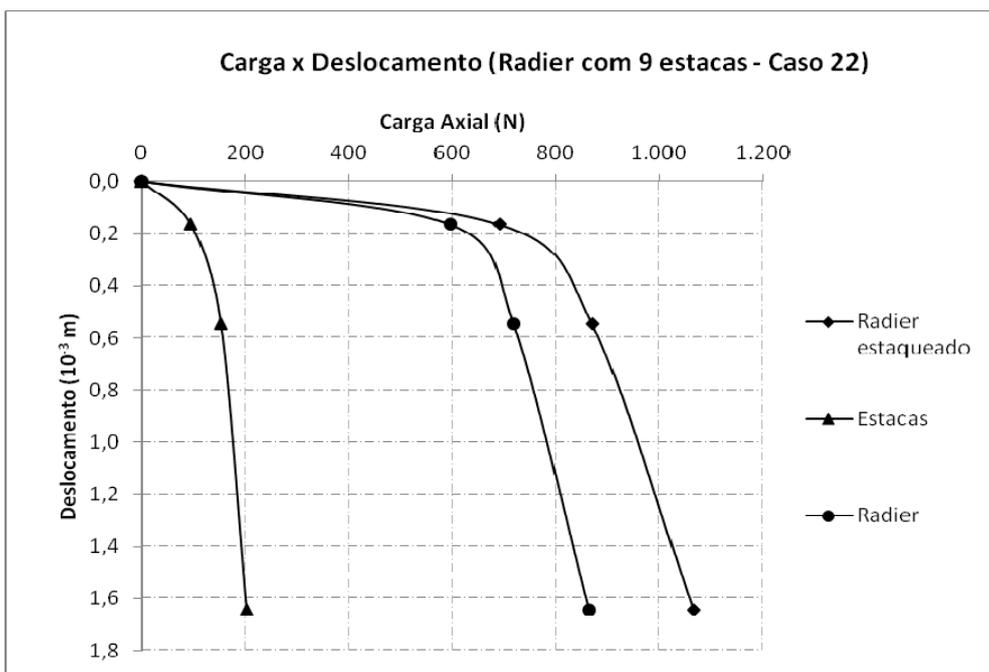


Figura 5.24. Gráfico do tipo carga-recalque do radier e da estaca para o radier estaqueado com 9 estacas.

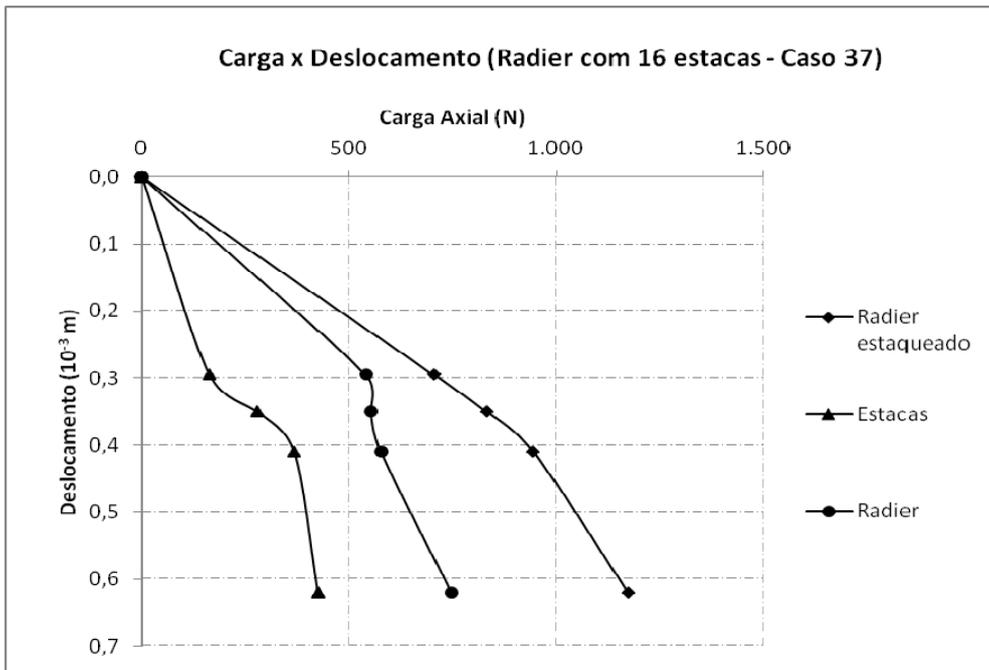


Figura 5.25. Gráfico do tipo carga-recalque do radier e da estaca para o radier estaqueado com 16 estacas.

Os gráficos de distribuição de carga entre os elementos do radier estaqueado (placa e estacas) são apresentados nas Figuras 5.26, 5.27 e 5.28.

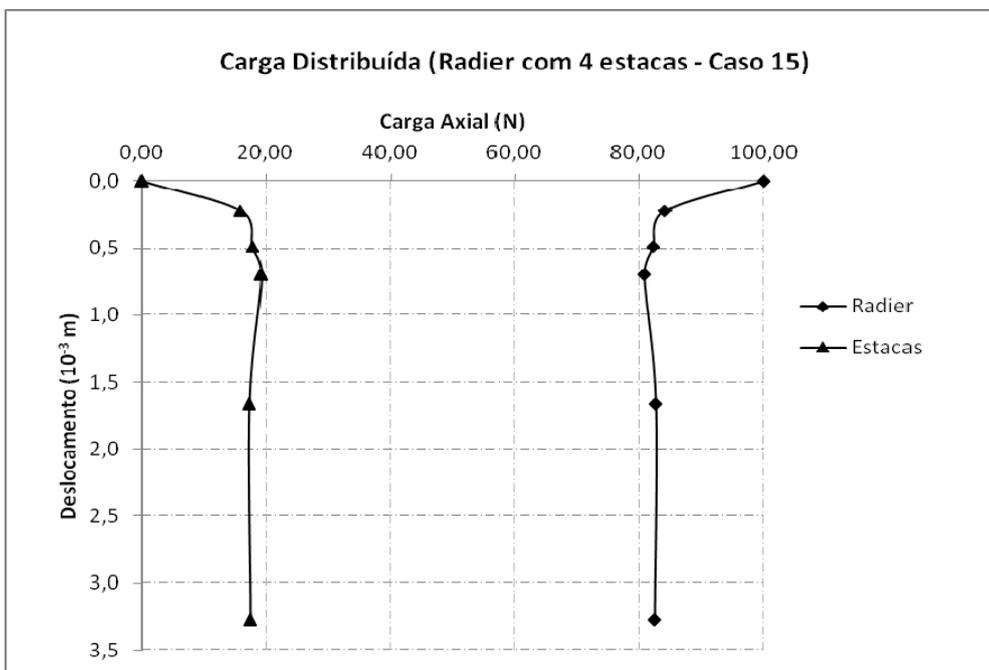


Figura 5.26. Distribuição da carga entre os elementos do radier estaqueado com 4 estacas.

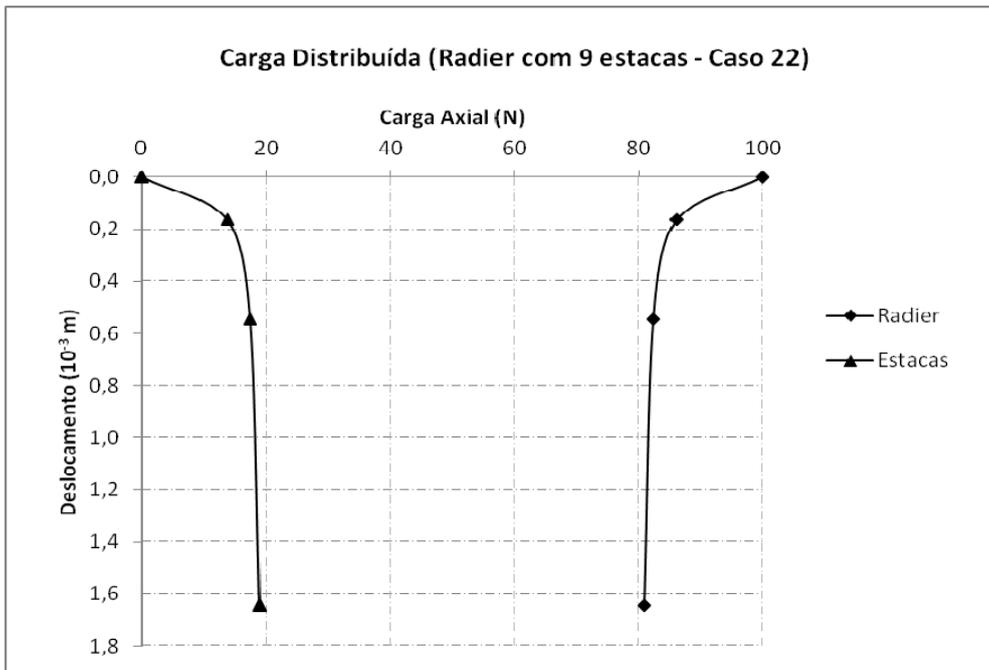


Figura 5.27. Distribuição da carga entre os elementos do radier estaqueado com 9 estacas.

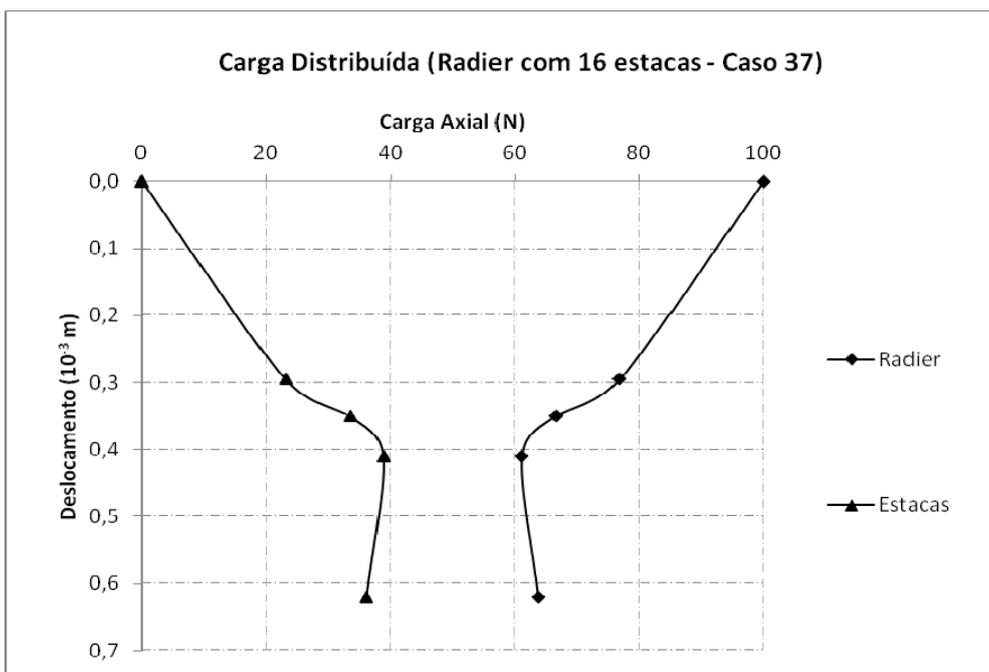


Figura 5.28. Distribuição da carga entre os elementos do radier estaqueado com 16 estacas.

Os gráficos mostram que a divisão de carga entre os elementos, tende a se estabilizar, nos últimos estágios do carregamento. A distribuição final do carregamento, entre o radier (P_{radier}) e as estacas (P_{estacas}), é apresentada na Tabela 5.6.

Tabela 5.6. Distribuição para a carga de ruptura entre o radier e o grupo de estacas.

Fundação	P_{radier} (%)	P_{estacas} (%)
Radier com 4 estacas	82,50	17,50
Radier com 9 estacas	80,95	19,05
Radier com 16 estacas	63,79	36,21

A placa absorve a maior parte do carregamento em todos os ensaios realizados com os raders estaqueados. A Tabela 5.7 apresenta um crescimento da taxa de carga absorvida pelas estacas (P_{estacas}) com o aumento na quantidade das mesmas. A tendência observada indica que, grupos com mais de 16 estacas, provavelmente, irão absorver uma parcela ainda maior de carregamento entre seus elementos que a apresentada pelo radier com 16 estacas; isto pode ser verificado através da visualização da Figura 5.29.

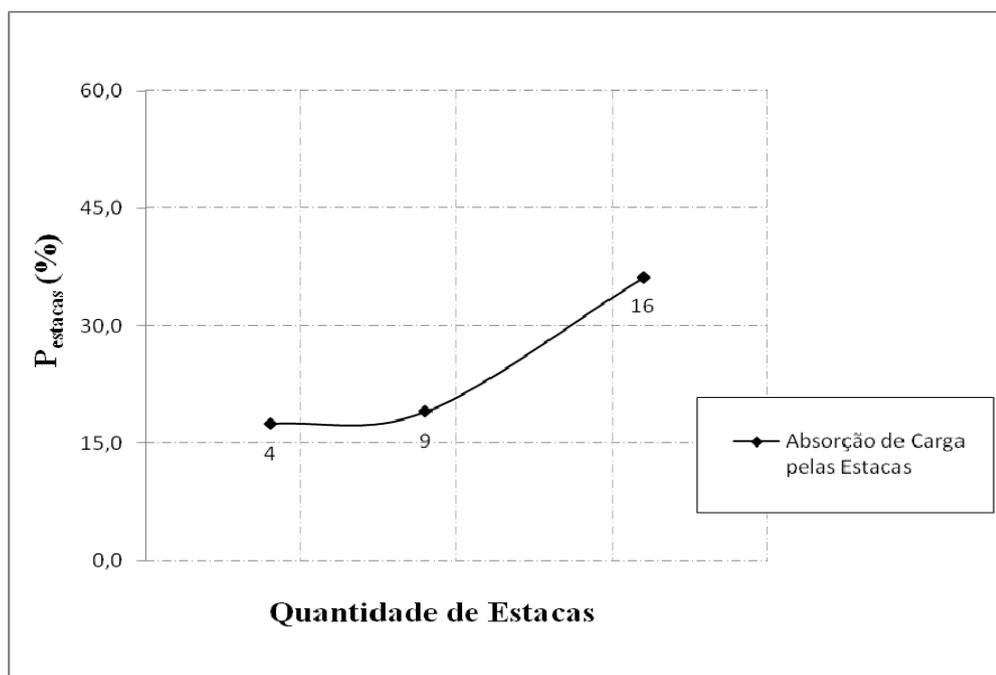


Figura 5.29. Distribuição da carga de ruptura dos raders estaqueados pela quantidade de estacas.

O desempenho superior do radier, quanto à absorção de carga, pode ser explicado pelas características geotécnicas da camada de apoio do solo; no caso em questão uma areia, e também pelas reações de áreas entre o grupo e radier ($A_{\text{grupo}}/A_{\text{total}}$).

A relação de área, entre o grupo de estacas e o radier ($A_{\text{grupo}}/A_{\text{total}}$), influencia a distribuição de carga entre os elementos. Os valores de $A_{\text{grupo}}/A_{\text{total}}$ adotados nas fundações beneficiam o desempenho do radier, na absorção dos carregamentos. As relações de área são

apresentadas na Tabela 5.7. A área do grupo (A_{grupo}) é a área entre os eixos das estacas para todos os radiers estaqueados.

Tabela 5.7. Relação de áreas entre grupo de estacas e radier.

Fundação	A_{grupo} (10^6 m^2)	A_{total} (10^6 m^2)	$A_{\text{grupo}}/A_{\text{total}}$
Radier com 4 estacas	1.453,13	6.400,00	0,23
Radier com 9 estacas	3.269,55	11.449,00	0,29
Radier com 16 estacas	7.356,49	20.164,00	0,36

Um comparativo entre os resultados encontrados para o Caso 15, desta presente pesquisa, e os dados do ensaio de radier estaqueado com 4 estacas da pesquisa de doutorado de Soares (2011) foi efetuado com o objetivo de se verificar a possibilidade de extrapolação, sob o prisma qualitativo, dos resultados, uma vez que os ensaios efetuados pelo respectivo autor foram em verdadeira grandeza: as Figuras 5.30, e 5.31, apresentam esta comparação.

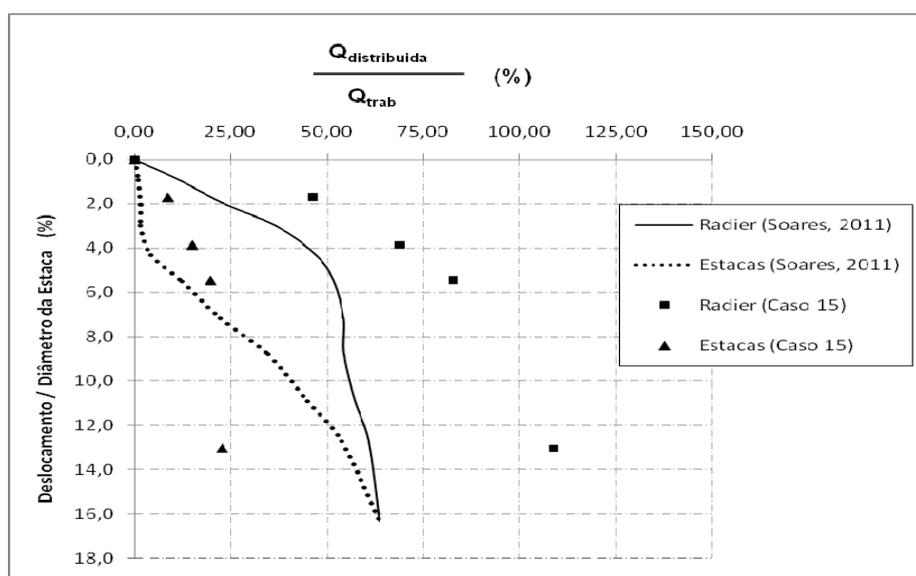


Figura 5.30. Comparativo entre a distribuição de carga entre os elementos do radier estaqueado de 4 estacas (Caso 15) com os dados de Soares (2011).

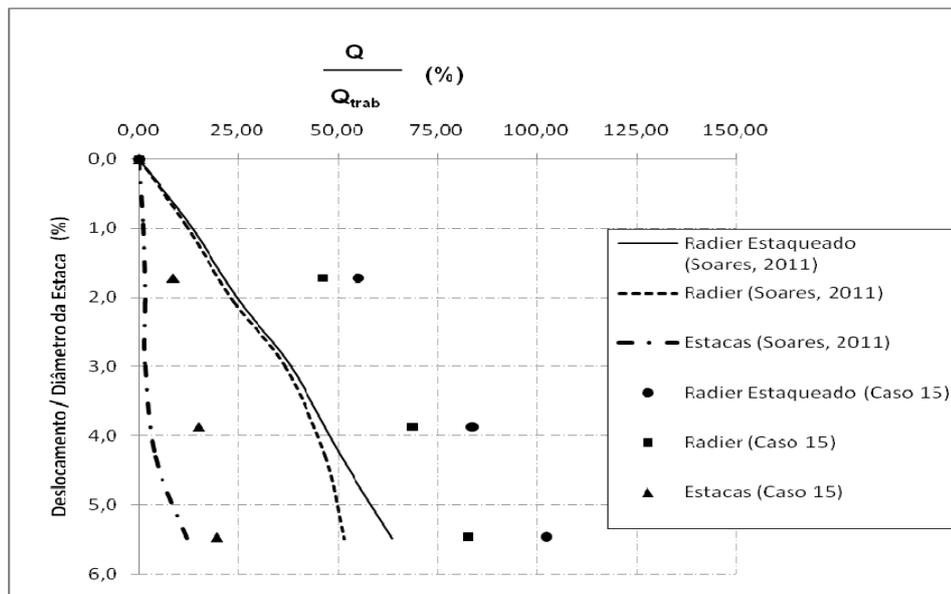


Figura 5.31. Comparativo entre a distribuição de carga entre os elementos do radier estaqueado de 4 estacas (Caso 15) com os dados de Soares (2011) para a curva do tipo carga-recalque normalizada.

Como esperado, se verificou a impossibilidade de extrapolação dos resultados da presente pesquisa. A justificativa desta tentativa impraticável reside, dentre outros motivos, das próprias escalas dos ensaios serem totalmente diferentes, e inexistir semelhança, reológica e executiva, entre a fundação em radier estaqueado utilizada na tese de Soares (2011) com o empregado nesta presente pesquisa. Entretanto, a tendência qualitativa dos resultados é demonstrada para os elementos do protótipo de campo e o modelo reduzido de laboratório.

5.4.2 – Eficiência dos Elementos

A capacidade de carga de um radier estaqueado pode ser obtida pela soma da resistência dos elementos (radier e estacas) considerando os seus respectivos fatores de eficiência.

A definição de eficiência é baseada na relação entre a parcela de carga dos elementos (radier ou as estacas) na ruptura, quando combinado num radier estaqueado, pela carga de ruptura do elemento isolado:

$$Q_{\text{radier estaqueado}} = \alpha_{\text{radier}} \cdot Q_{\text{radier}} + \alpha_{\text{estacas}} \cdot Q_{\text{estacas}} \quad (5.3)$$

Onde:

α_{radier} : carga do radier na condição de ruptura/carga de ruptura do radier isolado;

α_{estacas} : carga das estacas na condição de ruptura do radier estaqueado/carga de ruptura do grupo de estacas;

As parcelas de carga dos elementos combinados são determinadas através dos gráficos de distribuição de carga entre o radier e as estacas (Figuras 5.26, 5.27 e 5.28). Seus valores em termos percentuais, e absolutos, para cargas correspondentes ao recalque máximo de $3,10 \times 10^{-3}$ m, são apresentados na Tabela 5.8. Para o radier estaqueado com 9, e 16 estacas foram adotados os valores das parcelas de carga absorvidos aqueles calculado no último nível de carregamento.

Tabela 5.8. Parcelas de cargas dos elementos combinados.

Fundação	P_{radier}		P_{estacas}	
	(%)	N	(%)	N
Radier com 4 estacas	82,50	577,50	17,50	122,50
Radier com 9 estacas	80,95	955,47	19,05	224,85
Radier com 16 estacas	63,79	1.094,81	36,21	621,46

Os fatores de α_{radier} , e α_{estacas} , representam a eficiência do radier isolado e do grupo de estacas quando combinados num radier estaqueado. Os valores de α_{radier} correspondentes à carga que provoca o recalque máximo adotado ($3,10 \times 10^{-3}$ m) dos radiers isolados são apresentados na Tabela 5.10

Tabela 5.9. Eficiência do radier.

Fundação	Carga Radier (N)		α_{radier}
	Combinado	Isolado	
Radier com 4 estacas	577,50	130,00	4,44
Radier com 9 estacas	955,47	110,00	8,69
Radier com 16 estacas	1.094,81	405,00	2,70

Os valores de α_{radier} não estão dentro do intervalo esperado entre 0,4 e 1,0 relatado por De Sanctis e Mandolini (2006). A dinâmica de execução dos próprios ensaios possibilitou os valores diferentes do intervalo esperado: como os ensaios com os grupos de estacas eram executados anteriormente aos ensaios com radiers estaqueados, ocorreu uma densificação da camada 3 do solo de sustentação (camada com o contato direto com as placas). Conforme item 3.3.4 (Procedimento Executivo dos Ensaios nos Modelos Reduzidos) da presente pesquisa, os ensaios com os grupos de estacas finalizavam no momento em que ocorria o

contato da placa com o solo, e isso se dava após a cravação completa das estacas do grupo na última camada do solo.

Em outras palavras, os radiers estaqueados executados, se assentavam numa camada de solo densificada através de um processo anterior de cravação, que na verdade era o próprio ensaio de grupo. Estes valores se diferenciam dos resultados comumente relatados na literatura também pelo fato da maioria dos trabalhos publicados se remeterem a estacas escavadas, e não cravadas, como as que aborda a presente pesquisa.

Como consequência da densificação da última camada de solo, os resultados da eficiência α_{radier} , das fundações analisadas, não estão coerentes com as relações de áreas entre grupo e radier. O maior valor de α_{radier} ocorre para o radier com 9 estacas ($A_{\text{grupo}}/A_{\text{total}} = 0,29$). Conforme apresentado na seção 4.1 (Figura 4.1) a capacidade de carga da placa para 9 estacas, no nível de carregamento que gera o recalque máximo adotado ($3,10 \times 10^{-3}$ m), é menor que a capacidade de carga da placa para 4 estacas. Esta anomalia foi determinante para que o maior valor de α_{radier} não ocorresse para o radier com 4 estacas. O menor valor de α_{radier} ocorreu para o radier com 16 estacas ($A_{\text{grupo}}/A_{\text{total}} = 0,36$).

A relação entre a eficiência do radier (α_{radier}) e o fator de preenchimento ($A_{\text{grupo}}/A_{\text{total}})/(s/d)$ são mostrados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10. Eficiência do grupo de estacas.

Fundação	α_{radier}	s/d	A_{grupo} (10^{-6} m^2)	A_{total} (10^{-6} m^2)	$(A_{\text{grupo}}/A_{\text{total}})/(s/d)$
Radier com 4 estacas	4,44	3,47	1.453,13	6.400,00	0,07
Radier com 9 estacas	8,69	2,72	3.269,55	11.449,00	0,10
Radier com 16 estacas	2,7	2,72	7.356,49	20.164,00	0,13

Os valores de eficiência do grupo de estacas (α_{estacas}) correspondentes à carga de recalque máximo ($P_{\text{rec. máximo}}$) são apresentados na Tabela 5.11 e nos gráficos 5.32, 5.33 e 5.34.

Tabela 5.11. Eficiência do grupo de estacas.

Fundação	Carga Grupo de Estacas		$\alpha_{estacas}$
	Combinado	Isolado	
Grupo com 4 estacas	122,50	65,00	1,88
Grupo com 9 estacas	224,85	200,00	1,12
Grupo com 16 estacas	621,46	350,00	1,78

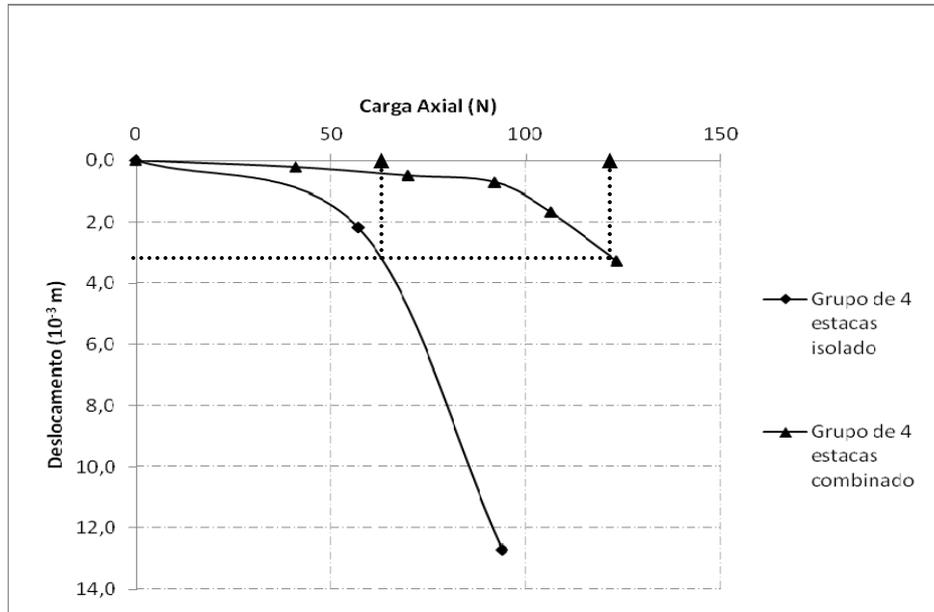


Figura 5.32. Cálculo da eficiência $\alpha_{estacas}$ para o grupo de 4 estacas.

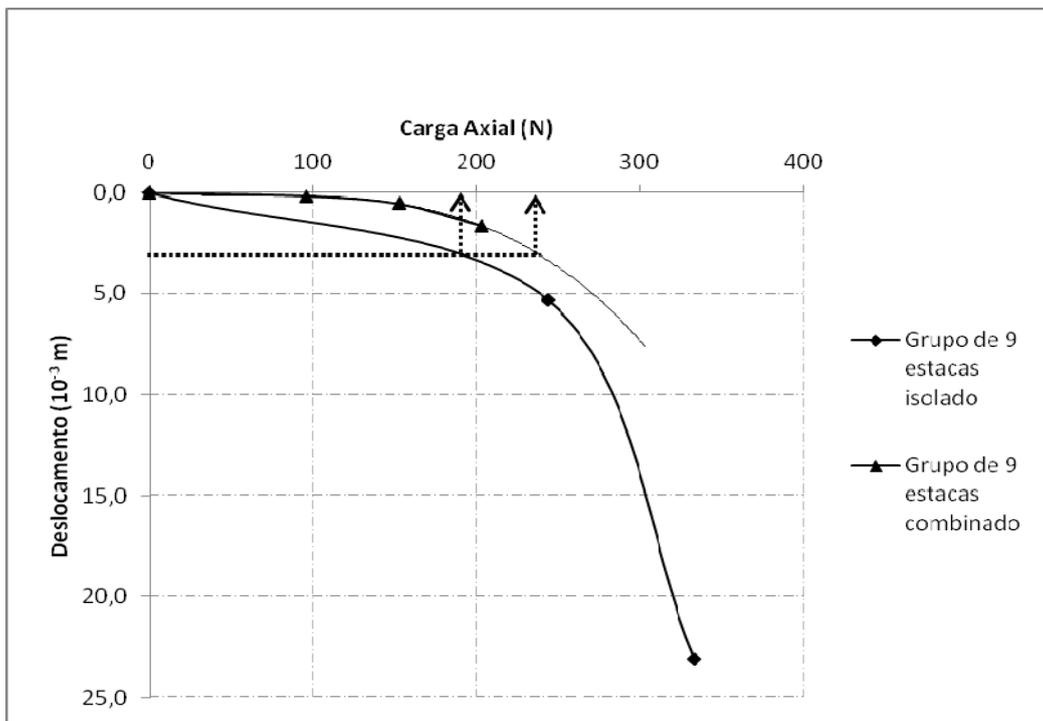


Figura 5.33. Cálculo da eficiência $\alpha_{estacas}$ para o grupo de 9 estacas.

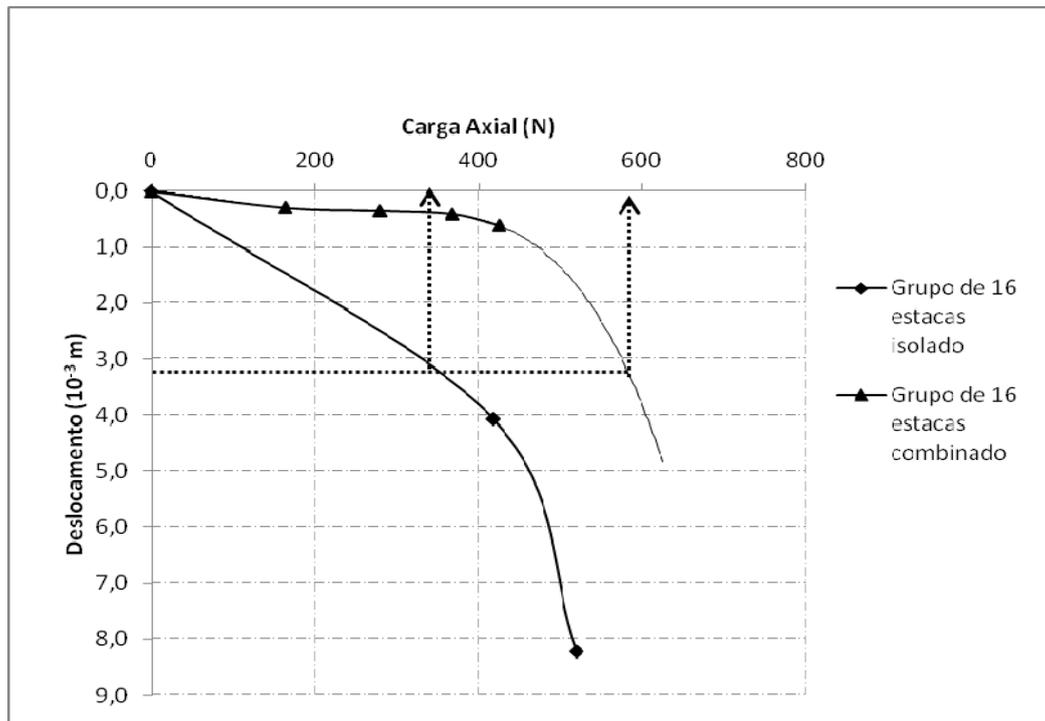


Figura 5.34. Cálculo da eficiência $\alpha_{estacas}$ para o grupo de 16 estacas.

Os gráficos mostram que as estacas associadas apresentaram um aumento na rigidez e uma maior mobilização das suas resistências, devido aos efeitos da interação com o radier. Isto se deve em parte, também ao fato das estacas, nos ensaios com os radiers estaqueados, penetrarem com suas respectivas pontas numa camada com uma densidade maior que àquela presente nos ensaios com os grupos de estacas, além da densificação ocorrida no solo de sustentação do radier estaqueado, já relatada. Conforme já exposto no item 3.3.2 – Preparação do Solo de Fundação para os Modelos Reduzidos, da presente pesquisa, a diferença em termos percentuais entre a Camada 3 e 2 é dar ordem de 16,24%. Em outras palavras, a resistência das estacas nos ensaios com os grupos de estacas é menor que aquelas presentes nos ensaios com radiers estaqueados (vide Figura 3.27 que apresenta um desenho esquemático do ensaio).

O radier exerce influência de maneiras distintas nos grupos de estacas. Para o grupo com 4, e 16 estacas, o efeito da interação é maior nos carregamentos finais. As curvas do tipo combinadas, e isoladas, não apresentam semelhança quanto ao formato das curvas para as figuras 5.32 e 5.34; já para o grupo com 9 estacas existe esta semelhança.

O valor de α_{estacas} aumenta com os deslocamentos medidos, entre os casos analisados, e o maior valor de α_{estacas} é para o grupo com 4 estacas.

5.4.3 – Aumento da capacidade de Carga do Radier Estaqueado (ζ_{PR})

O aumento da capacidade de carga da fundação em virtude do contato do radier com o solo é dado por:

$$\zeta_{\text{PR}} = \frac{Q_{\text{radier estaqueado}}}{Q_{\text{grupo de estacas}}} \quad (5.4)$$

A seguir, será apresentado um comparativo entre as curvas do tipo carga-recalque das fundações em grupo de estacas com os radiers estaqueados, (Figura 5.35 à 5.37).

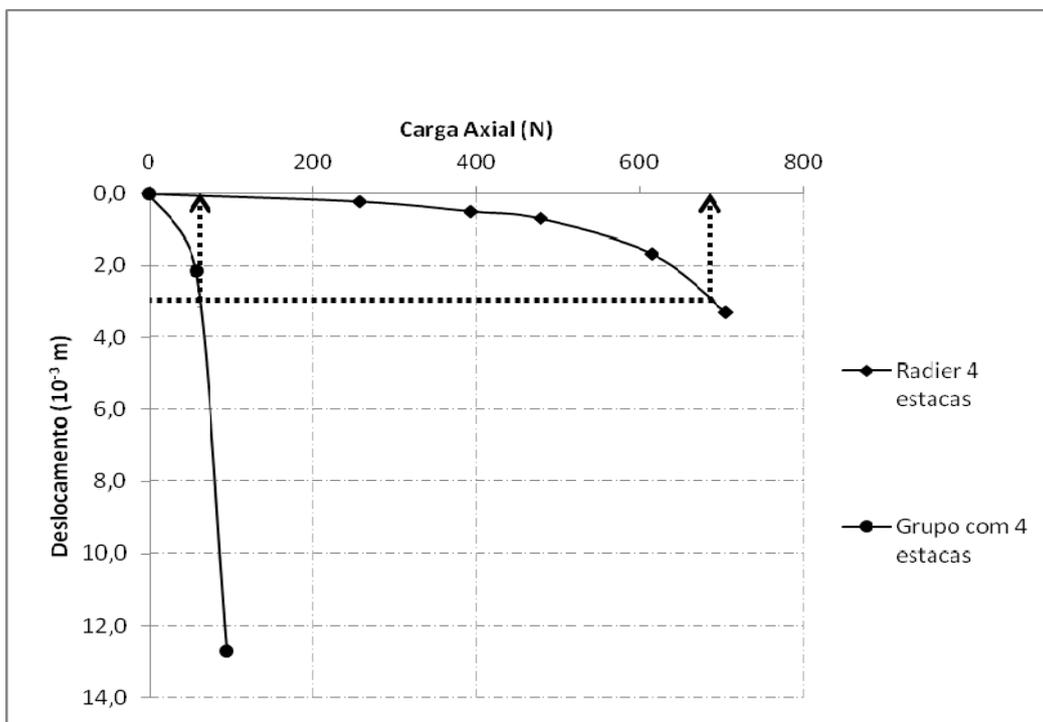


Figura 5.35. Capacidades de carga do grupo e radier com 4 estacas.

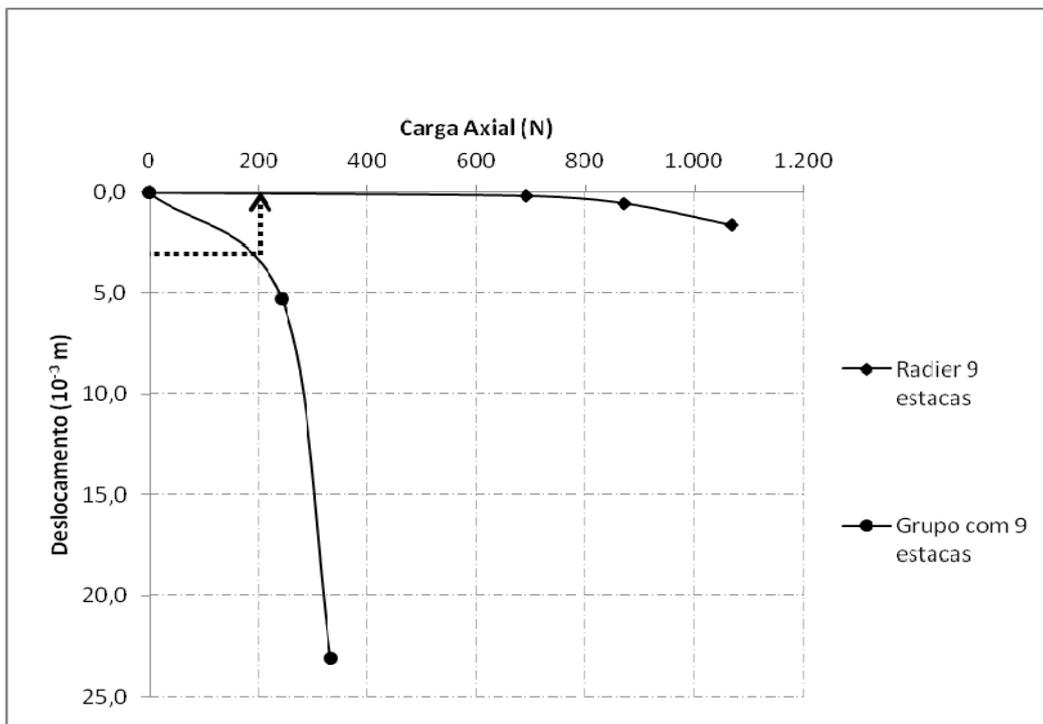


Figura 5.36. Capacidades de carga do grupo e radier com 9 estacas.

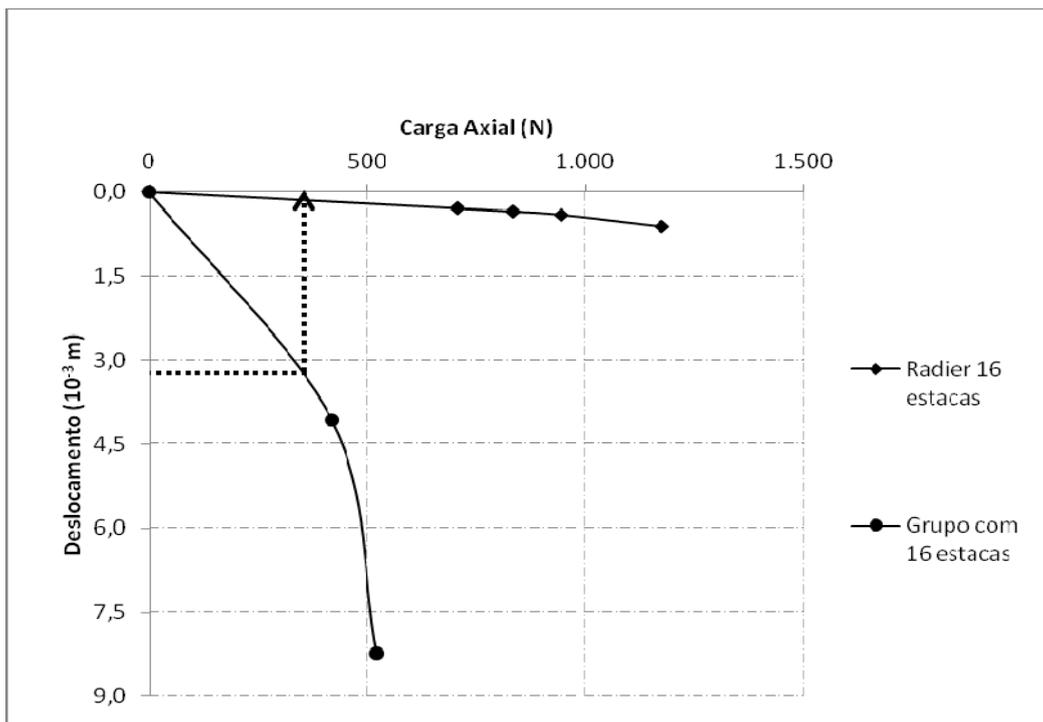


Figura 5.37. Capacidades de carga do grupo e radier com 16 estacas.

O aumento da capacidade de carga das fundações (ζ_{PR}) é apresentado na Tabela 5.12.

Tabela 5.12. Aumento da capacidade de carga das fundações (ζ_{PR}).

Fundação	P_{rec. max.} (N)	P_{ad} (N)	ζ_{PR}
Grupo com 4 estacas	65,00	43,33	10,77
Radier com 4 estacas	700,00	466,67	
Grupo com 9 estacas	200,00	133,33	5,90
Radier com 9 estacas	1.180,32	786,88	
Grupo com 16 estacas	405,00	233,33	4,48
Radier com 16 estacas	1.716,27	1.144,18	

O radier com 4 estacas apresentou o maior valor de ζ_{PR} . O resultado é coerente, pois neste ensaio existe uma maior área do radier efetivamente em contato com o solo, já que são apenas 4 estacas. Desta forma, espera-se que o benefício desse contato seja maior nos casos com menos estacas. O radier com 4 estacas tem a menor relação entre áreas $A_{grupo}/A_{total} = 0,23$ das fundações analisadas.

A relação entre ζ_{PR} e fator $R_M = [R/(A_{grupo}/A_{total})]$ é apresentado na Tabela 5.13 e na Figura 5.38. Neste gráfico poderá ser observado que o maior ganho de capacidade de carga para o sistema está de fato no ensaio realizado no radier estaqueado com 4 estacas. Para este último ensaio, a área de contato da placa com o solo é a maior efetivamente em comparação com os demais ensaios. Desta maneira, com a redução do número de estacas, aumenta-se a área efetiva de contato radier/solo, contribuindo assim para um maior ganho de capacidade de carga.

Tabela 5.13. Relação entre ζ_{PR} e R_M .

Fundação	Caso	Nomenclatura	ζ_{PR}	R	A_{grupo} ($10^{-6} m^2$)	A_{total} ($10^{-6} m^2$)	R_M
Radier com 4 estacas	15	4P4E0DC	10,77	0,46	1.453,13	6.400,00	2,03
Radier com 9 estacas	22	9P9E0DC	5,9	0,37	3.269,55	11.449,00	1,30
Radier com 16 estacas	37	16P16E0DC	4,48	0,48	7.356,49	20.164,00	1,32

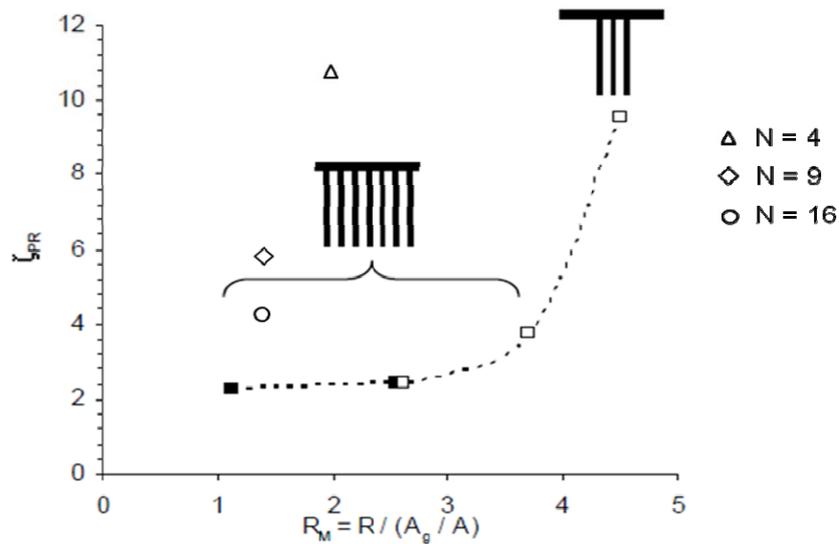


Figura 5.38. Relação entre ζ_{PR} e R_M (adaptado de Conte et al. 2003).

Os resultados das análises seguem a tendência relatada por Cooke (1986), segundo o qual, o valor do coeficiente (ζ_{PR}) aumenta com a redução do número de estacas. O radier com 16 estacas tem o menor valor de ζ_{PR} , entre as fundações analisadas. Seu resultado não se enquadra, assim como os demais radiers estaqueados, na configuração de estacas distribuídas, sob a área do bloco, de acordo o gráfico presente no trabalho de Conte *et al.* (2003). A explicação para este fato se deve em razão de um motivo:

- Os ensaios com radiers estaqueados se iniciam no momento em que os blocos dos agrupamentos de estacas tocam a camada 3 do solo de sustentação (Vide figura 3.27, no Capítulo 3 da presente pesquisa). Um fenômeno que ocorre em paralelo com a execução destes ensaios é a densificação da camada que entrará em contato com as placas dos radiers estaqueados. Ou seja, nos ensaios com as placas isoladas (cujas nomenclaturas são 4P0E0DC, 9P0E0DC e 16P0E0DC) a camada não sofreu um processo de densificação por uma cravação de estacas, portanto este ganho de resistência atípico é consequência deste acontecido;

6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas com a pesquisa e sugestões, para futuros trabalhos relacionadas ao tema estudado.

6.1 – CONCLUSÕES

A presente pesquisa desconsiderou o efeito de escala, pois num primeiro momento, a proposta consistiu na definição de uma metodologia concisa para a reprodução do comportamento mecânico de provas de cargas de estacas isoladas, grupos de estacas e radiers estaqueados assentes em solos arenosos. Sob este prisma, de uma análise qualitativa, torna-se prematuro, a priori, a extrapolação destes dados. Entretanto, elementos metodológicos aqui adotados devem ser levados em consideração para pesquisas futuras, como forma de mitigar obstáculos encontrados na metodologia adotada.

Alguns ensaios geraram dados inesperados em virtude do sistema de carregamento utilizado ser excêntrico, acrescentado à falta de repetibilidade das características portantes do solo de sustentação durante a execução dos vários ensaios.

A metodologia executiva adotada na execução dos ensaios confrontou os limites de contorno praticados, devido o intuito da manutenção de características portantes semelhantes para os ensaios realizados com as mesmas quantidades de estacas: em outras palavras, tentou-se ensaiar o grupo de 4 estacas num solo com a mesma densidade do radier estaqueado com 4 estacas.

A espessura das camadas utilizadas no preparo do solo de sustentação dos ensaios foi inadequada em virtude do comprimento das estacas (232 mm) ser maior que o valor adotado nos estratos utilizados (1ª Camada: 100 mm; 2ª Camada: 200 mm e 3ª Camada: 200 mm).

O procedimento executivo dos ensaios realizados gerou uma densificação da camada 3 do solo de sustentação, o que gerou resultados diferentes dos encontrados na literatura.

A instalação de *strain gages* nas seções de topo, meio e ponta das estacas não permitiu a análise do mecanismo de transferência de carga ao longo do fuste da estaca. As excentricidades inerentes ao sistema de carregamento conjugadas com a utilização de $\frac{1}{4}$ de

ponte nas instrumentações impossibilitou esta análise, concluindo-se sobre a real necessidade da utilização *strain gages* tri-axiais para a adequada aferição de deformações oriundas de carregamentos verticais acrescidos de momentos.

O comportamento das estacas isoladas para o nível de recalque admitido (3,10 mm) se aproximou com boa precisão do comportamento médio das estacas ensaiadas.

As curvas do tipo carga x recalque das fundações, na sua grande maioria, apresentaram ruptura física. Os recalques provocados nos testes foram elevados e atingiram a ordem de 23,12 mm no ensaio da prova de carga para o grupo com 9 estacas.

O método de Décourt (Rigidez) prevê cargas de ruptura maiores que o critério de recalque máximo. Nos grupos de estacas a maior diferença entre os métodos de previsão é da ordem de 48,39% (grupo com 16 estacas). Já nos radiers estaqueados foi constatada a maior variação, 30,72%, entre as metodologias de previsão de ruptura no radier com dezesseis estacas. Nos ensaios com as placas isoladas, a variação foi de 81,22% para a placa de nove estacas. O método Décourt – Quaresma fornece os menores valores de carga de ruptura, entre os critérios semi-empíricos e de extrapolação. Seu resultado é mais conservador e a favor da segurança.

Nos ensaios com os radiers estaqueados, as placas absorveram a maior parte dos carregamentos efetuados. A tendência observada no crescimento da taxa de carga absorvida pelas estacas indica que fundações com mais de 16 estacas irão absorver maiores parcelas de carga.

Os resultados das análises seguem a tendência relatada por Cooke (1986), segundo o qual, o valor do coeficiente (ζ_{PR}) aumenta com a redução do número de estacas.

6.2 – SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

O assunto abordado na pesquisa é amplo. Os conhecimentos adquiridos precisam ser aprofundados, e os dados estudados devem ser expandidos, de maneira, a se obter amostragem mais representativa. Com isso, sugerem-se novos objetos, para futuras pesquisas:

- Realizar os mesmos ensaios aqui considerados em condições mais propícias de preparação de amostra, instrumentação e desenho de blocos de pequena dimensão;
- Realizar os mesmos ensaios aqui considerados em condições de verdadeira grandeza ou numa centrífuga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akinmusuru, J.O. (1980). *Interaction of piles and cap in piled footing*. Journal of Geot. Eng. Div., ASCE, 106(11): 1263-1268.

Almeida, F. M. (2001). *Laje sobre solo para fundação de residências*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil na área de concentração de Geotecnia. Unicamp. Campinas. São Paulo.

American Concrete Institute – ACI. (1997). *Design of slabs on grade*. (ACI 360R-92);

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6122:2010: *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro;

Balaam, N. P., Poulos, H. G. & Booker, J. R. (1975). *Finite element analysis of the effects of installation on uile load-settlement behaviour*. Geotech. Engng 6, Ejo. 1, 33-48;

Banerjee, P. K. (1978). *Analysis of axially and laterally loaded pile groups*. In Deoelopments in Soil Mechanits.ed. C. Scott, Ch. 9, London: Applied Science Publishers;

Banerjee, P. K. & Davies, T. 6. (1478). *The behavior of axially and laterally loaded single piles embedded in non-homogeneous soils*. Geotechnique 28, No. 3, 309-326;

Bezerra, J. E. (2003), *Estudo do Comportamento de Fundações em Radier Estaqueado: Conceitos e Aplicações*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, UnB, Brasília, p. 27;

Brito, J. L. W. de. (1987). *Fundações do edifício*. EPUSP. São Paulo;

Burland, J. B., Broms, B.B., De Mello, V.F.B (1977). *Behaviour of foundations and structures*. In Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokio, Japan, Vol. 2, pp.495-546;

Butterfield. R. & Banerjee . P. K. (1971). *The elastic analysis of compressible piles and pile groups*. Geotechnique 21, No. 1, 43-60;

CGE. *Canadian Foundation Engineering Manual*. (1992) 3th Edition. Canadian Geotechnical Society. Ottawa. Canada. p. 512;

Chan. R. K. S. (2006). *Foundation design and construction*. Geo Publication, n. 1. The Government of the Hong Kong Special Administrative Region. Hong Kong;

Chellis, R. D. (1961). *Pile Foundations*. 2nd Edition. MacGraw-Hill. New York. USA. p. 704;

Cordeiro, A. F. (2007). *Avaliação Numérica de Reforço de Grupo de Estacas pela Introdução de Estacas Adicionais*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. UnB. Brasília;

Coyle, H. M. & Reese, L. C. (1966). *Load transfer for axially loaded piles in clay*. J. Soil Mechs Fdn Engng, Am. Sot. Cio. Engrs 92, No. SM2, 1-26;

Cunha, R. P.; Cordeiro, A. F.; Sales, M. M.; Small, J. C. (2007). *Parametric Analyses of Pile Groups with Defective Piles: Observed Numerical Behaviour and Remediation*. Artigo Técnico, ANZ, Austrália, p. 1;

Cunha, R.P., Small, J.C. e Poulos, H.G. (2000a). *Class C analysis of a piled raft case history in Gothenburg, Sweden. Year 2000 Geotechnics*. Geotechnical Engineering Conference, Bangkok. v. 1. p. 271-280;

Cunha, R.P., Small, J.C. e Poulos, H.G. (2000b). *Parametric analysis of a piled raft case history in Uppsala, Sweden*. IV Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia-SEFE IV, São Paulo, Vol. 2, pp. 381-390;

Cunha, R. P. & Zhang, H. H. (2006). *Behavior of piled raft foundation system under a combined set of loadings*. Proc. 10th Int. Conf. on Piling and Deep Foundation, Amsterdam, v. 1. p. 242-251;

De Beer, E. (1988). *Different behaviour of bored and driven piles*. Proc. Int. Geoth. Sem. on Deep Found. On Bored and Auger Piles, Ghent, Balkema ed., Rotterdam, 47 – 82;

Desai, C. S. (1974). *Numerical design-analysis for piles in sands*. J. Geotech. Engng, Am. Sot. Cio. Engrs 100, No. GT6, 613 – 635;

Freitas, A. C. de. (2010). *Contribuição ao estudo do efeito tri-dimensional de instalação e de grupos em estacas cravadas em areias*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. UERJ. Rio de Janeiro;

Fleming, W. G., Thorburn, S. (1983). *Recent piling advances*. Un: Conference on advances in piling and ground treatment for foundations. London Proceedings. London. England. p. 1-16;

Fleming, W. G., Welman, A. J., Randolph, M. F. & Elson, W. K. (1985). *Piling Engineering*. Surrey University Press;

Giretti, Daniela (2009). *Modelling of Piled Raft Foundations in Sand*. Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria. Università degli Studi di Ferrara. p. 2;

Gomes, R. C. (1993). *Interação Solo-Reforço e Mecanismos de Ruptura em Solos Reforçados com Geotêxteis*. Tese de Doutorado em Geotecnia. USP. São Carlos. p. 116;

Hain, S.J. & Lee, I.K. (1978). *The analysis of flexible raft-pile systems*. *Geotechnique*, 28(1). p. 65-83;

Hansbo, S. (1984). *Foundation on Friction Creep Piles in Soft Clays*. International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, Prakash, S. Ed. Vol.2, p. 913-922;

Hansbo, S. and Jendeby, L. (1983). *Case Study of Two Alternative Foundation Principle; Conventional Friction piling and Creep Piling*. *Vag-och Vattenbyggaren*, No.7-8, p. 29-31;

Harris, H. G.; Sabnis G. M. (1999). *Structural modeling and experimental techniques*. 2nd edition. CRC PRESS. Boca Raton;

Hobbs, N. B. (1957). *Unusual necking of cast-in-situ concrete piles*. Proc. 4th Int. Conf. Soil Mechanics Foundation Engineering, London, v.3, p. 40-42;

Horikoshi, K. and Randolph, M.F. (1998). *A Contribution to Optimal Design of Piled Rafts*. *Geotechnique* Vol. 48, No. 3, pp. 301-317;

Jardine, R. J., Potts, D. M., Fourie, A. B. & Burland, J. B. (1986). *Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction*. Geotechnique 36, No. 3, p. 377-396;

Katzenbach, R. & Turek, J. (2005). *Combined Pile-Raft Foundation subjected to lateral loads*. 16th ICSMGE, Tokyo, 2001-2004;

Kuwabara, F. (1989). *An elastic analysis for piled raft foundations in a homogeneous soil*. Soils and Foundations, v. 29, n. 1, p. 82-92;

Lambe, T. W., Whitman, R. V. (1979). *Soil Mechanics (SI Version)*. Jhon Wiley & Sons. New York. USA. p. 553;

Mandolini, A. & Viggiani, C. (1997). *Settlement of piled foundations*. Géotechnique. V. 47:4. p. 791-816;

Mandolini, A. and Russo, G. & Viggiani, C. (2005). *Pile foundations: experimental investigation, analysis and design*. XVI ICSMGE. Osaka;

Melhado, S. B., Souza, U. E. L. de, Barros, M. M. B. de, Franco, L. S., Hino, M. K., Godói, E. H. P. de, Hoo, G. K., Shimizu, J. Y. (2002). *Apostila de Tecnologia da Construção de Edifício I – Fundações*. USP. São Paulo;

Meyerhof, G. G. (1976). *Bearing capacity and settlement of pile foundations*. JSMFED. ASCE. p. 197-228;

Mota, R. & Fialho, R. L. (2000). *Avaliação da integridade de estacas de betão pelo método de diagrafia sônica entre os furos*. VII Cong. Nac. de Get. Portugal. p. 593-600;

Motta, V. F. (1972). *Curso de teoria da semelhança*. Editora UFRS. UFRS. Rio Grande do Sul;

Nogueira, R. C. R. (2004). *Comportamento de estacas tipo raiz, instrumentadas, submetidas à compressão axial, em solo de diabásio*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil na área de concentração de Geotecnia. Unicamp. Campinas. São Paulo;

O'Neill, M. W., Caputo V., De Cock, F., Hartikainen, J., and Mets, M. (1996). *Case histories of pile supported rafts*. Rep. for ISSMFE TC18, Univ. of Houston, Houston;

Ottaviani, M. (1975). *Three-dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups*. *Geotechnique*, 25, No. 2, 159-174;

Padfield, C. J. & Sharrock, M. J. (1983). *Settlement of structures on clay soils*. CIRIA 27. (apud Fleming et al., 1992);

Phung, D. L. (1993). *Footings with Settlement-Reducing Piles in Non-Cohesive Soil*. PhD Thesis, Dep. Of Geotechnical Eng. Chalmers Univ. of Technology, Gothenburg, Sweden, 179p;

Poulos, H. G. (1989). *Pile behavior – theory and application*. *Géotechnique* 39, No. 3, 365 – 415;

Poulos, H. G. (1997). *Behaviour of pile groups with defective piles*. Proc., 14th Int. Conf. Soil Mechanics Foundation Engineering. Hamburg. 2. p. 871-876;

Poulos, H.G. (1998). *The pile-enhanced raft. An economical foundation system*. Proc. XI Brazilian Congress on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Brasília. v. 4. p. 27-43;

Poulos, H.G. (2001). *Piled raft foundations: design and applications*. *Geotechnique*, Vol 51, N° 2, p.95-113;

Poulos, H.G. & Davis, E.H. (1980). *Pile Foundations Analysis and Design*. John Wiley and Sons, New York, 397p.;

Randolph, M. F. (1994). *Design methods for pile groups and piled rafts*. International Conference on soil mechanics and foundation engineering, 13. New Delhi. v. 5. p. 61-82;

- Randolph, M. F. & Wroth, C. P. (1978). *Analyses of deformation of vertically loaded piles*. J. Geotech. Engng, Am. Soc. Ciu. Engrs 104, No. GT12, 1465-1488;
- Reese, L. C. (1978). *Design and construction of drilled shafts*. Journal of Geotechnical Engineering. ASCE. 104 (1), 95-116;
- Reinhorn, A. M. (2008). *Experimental methods in structural engineering*. Lecture notes of Departamento of Civil. Structural and Environmental Engineering of University at Buffalo. Buffalo - New York;
- Ribeiro, L. F. M. (2000). *Simulação física do processo de formação dos aterros hidráulicos aplicado a barragens de rejeitos*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF.
- Russo, G. and Viggiani, C. (1998). *Factors Controlling Soil-Structure Interaction for Piled Rafts*. Darmstadt Geotechnics, Darmstadt Univ. of Technology, No. 4, pp. 297-322;
- Sales, M. M. (2000). *Análise do comportamento de sapatas estacadas*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF.
- Sommer, H.; Wittmann, P.; Ripper, P. (1985). *Piled raft foundation of a tall building in Frankfurt clay*. ICSMFE, v. 11, n. 4, 2253-2257. STEINBRENNER, W. (1934) Tafeln zur Setzungsberechnung. Die Strasse, v. 1, n. 221;
- Sousa, L. C. M. (2003). *Estudo experimental do comportamento de sapatas assente em solo poroso reforçado*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-106A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 133p.;
- Terzaghi, K. & Peck, R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*. 2nd Ed. Willey. New York. p. 729;
- Tomlinson, M. J. (1994). *Pile Design and construction practice*. 4th Edition. London: Spon Press. London. England. p. 411;

Valliappan, S., Lee, I. K. & Boonlualohr, P. (1974). *Settlement of piles in layered soils*. Proc. 7th Biennial Conf., Aust. Road Res. Board, Adelaide I, Pt 7, 144-153;

Van Impe, W.F. (1991). *Deformation of deep foundations*. Proc. X Eur. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Firenze, 3, 1031-1064;

Van Weele, A.F. (1988). *Cast-in-situ piles – Installation methods, soil disturbance and resulting pile behaviour*. Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Balkema, Rotterdam, 219-228;

Velloso, D. A. & Lopes, F. R. (2002). *Fundações Volume 2 – Fundações Profundas*. COPPE/UFRJ, p. 472, Rio de Janeiro;

Viggiani, C. (1989). *Influenza dei fattori tecnologici sul comportamento dei pali*. XVII Convegno di Geotecnica AGI, Taormina, 2, 83-91;

Viggiani, C. (1993). *Further experiences with auger piles in Naples area*. Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Balkema, Rotterdam, 445-455.