

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Cleide Jeane Ribeiro Bacelar**

**Análises de recalque em  
radiers estaqueados**

**TESE DE DOUTORADO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**

Rio de Janeiro

Maio de 2003



**Cleide Jeane Ribeiro Bacelar**

**Análises de recalque em radiers estaqueados**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientadores: Pedricto Rocha Filho  
Celso Romanel

Rio de Janeiro

Maio de 2003



**Cleide Jeane Ribeiro Bacelar**

## **Análises de Recalque em Radiers Estaqueados**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Pedricto Rocha Filho**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Celso Romanel**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Eurípedes Vargas do Amaral Júnior**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Sérgio A. B. da Fontoura**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Marcus Peigas Pacheco**

Departamento de Engenharia Civil – UERJ

**George de Paula Bernardes**

Departamento de Engenharia Civil – UNESP

**Bernadete Ragoni Danziger**

Departamento de Engenharia Civil – UFF

**Prof. Ney Augusto Dumont**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de Maio de 2003

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Cleide Jeane Ribeiro Bacelar**

Graduou-se em Engenharia Civil na UEFS (Universidade Estadual de Feira de Santana) em 1996. Concluiu o Mestrado em Engenharia Civil na PUC-Rio, na área de Geotecnia, em 1999 cuja dissertação foi intitulada “Implementação Numérica para Análise do Comportamento de Grupos de Estacas em Maciços Estratificados”. Desde então tem se dedicado ao estudo do comportamento de radiers estaqueados.

#### Ficha Catalográfica

Bacelar, Cleide Jeane Ribeiro

Análises de Recalque em Radiers Estaqueados/ Cleide Jeane Ribeiro Bacelar; orientadores: Pedricto Rocha Filho e Celso Romanel. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2003.

[24]. , 193 f. : il. ; 30 cm

1. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Fundações. 3. Estacas. 4. Radiers. 5. Radiers estaqueados. 6. Recalques diferenciais. 7. Distorções angulares. . I. Rocha Filho, Pedricto e Romanel, Celso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD : 624

Aos meus pais,  
que me deram a vida e me ensinaram a  
vivê-la com dignidade.

## Agradecimentos

Aos professores orientadores Pedricto Rocha Filho e Celso Romanel pela inestimável contribuição, amizade e parceria indispensáveis para a realização desse trabalho.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, também fundamentais para que este trabalho pudesse ser desenvolvido.

Aos meus pais e irmãos, pelo carinho e atenção de todas as horas.

Ao meu marido, Eudes, por sempre compartilhar sentimentos de carinho, compreensão, respeito e amor, estando sempre presente em todos os momentos dessa trajetória.

Aos meus colegas e amigos da PUC-Rio que estiveram presentes em diversos momentos dessa enriquecedora caminhada.

Aos professores que participaram da Comissão Examinadora.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil pelos ensinamentos, amizade e espírito de colaboração.

A Ana Rôxo pela sua inestimável amizade, paciência e dedicação.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam e me ajudaram.

## Resumo

Bacelar, Cleide Jeane Ribeiro; Rocha Filho, Pedricto; Romanel, Celso. **Análises de Recalque em Radiers Estaqueados**. Rio de Janeiro, 2003. 193p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O comportamento de radiers estaqueados submetidos a carregamento vertical é estudado nesse trabalho.

O método de análise é baseado no método dos elementos finitos, através da utilização do programa ABAQUS. Estimativas de valores de recalque ao longo de três seções distintas e distribuição de forças nos topos das estacas são obtidas para diversas configurações de radiers estaqueados em meio homogêneo com diferentes quantidades e arranjos de estacas, para os quais são adotados diferentes comprimentos relativos das estacas  $L/d$ , coeficientes de Poisson do solo  $\nu_s$  e espessuras do radier.

A maior parte do recalque ocorre imediatamente após a construção, sendo que os recalques por adensamento se apresentam maiores no centro do que na borda do radier.

Uma considerável parcela da carga aplicada é transferida diretamente ao solo através do radier, especialmente sob condições não-drenadas. Para condições drenadas essa proporção é reduzida, mostrando que o efeito do coeficiente de Poisson do solo na distribuição de cargas é bastante significativo.

A posição das estacas no radier afetam diretamente a proporção da carga transmitida diretamente do radier para o solo, sendo este efeito mais representativo à medida que aumentam o comprimento relativo das estacas e a rigidez do radier.

Análises de capacidade de carga são realizadas em condições não-drenadas para todas as configurações avaliadas, mostrando que o aumento na rigidez do radier contribui significativamente para o aumento dos coeficientes de segurança das estacas.

## Palavras-chave

Fundações; Estacas; Radier; Radier estaqueado; Recalque diferencial; Distorção angular; Capacidade de carga.

## Abstract

Bacelar, Cleide Jeane Ribeiro; Rocha Filho, Pedricto (Advisor); Romanel, Celso (Advisor). **Settlement Analyses of Piled Rafts**. Rio de Janeiro, 2003. 193p. PhD. Thesis – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The behaviour of vertically loaded piled rafts is studied in this research.

The main objective of this thesis is to analyse the behaviour of a piled raft foundation system acting on a homogeneous half-space subjected to vertical loading.

The analysis is based on finite element method by using of the computational program ABAQUS. The evaluation of settlements along three main sections and the load distribution on pile top were obtained for several piled raft configurations in single layered soil profile with different pile number and position, considering different values of pile slenderness ratio, soil Poisson's ratio and also of raft thickness.

It has been shown that the major component of the total settlement takes place immediately after the loading application and the component of the consolidation settlement are bigger close to the raft centre than values at the raft edge.

A big part of the total applied load is directly transferred to the subsoil by the raft, which becomes more significant under undrained conditions. For drained conditions this ratio decreases, which have shown that the soil Poisson's ratio influence at the load distribution is significant.

The pile position under the raft influences the percentage of the load transferred directly to the subsoil by the raft. This influence becomes more significant with the increase of the pile slenderness ratio and of the raft stiffness.

The bearing capacity of the piled raft configurations for undrained conditions was evaluated, which have indicated that the increase of the raft stiffness contributes to the increase of the pile safety factors.

## Keywords

Foundations; Pile; Raft; Piled raft; Differential settlement; Angular distortion; Bearing capacity.



# Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>27</b>
1.1. COMENTÁRIOS GERAIS	27
1.2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO	29
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	30
<b>2 RADIERS ESTAQUEADOS</b>	<b>31</b>
2.1. INTRODUÇÃO	31
2.2. MECANISMOS DE INTERAÇÃO EM RADIERS ESTAQUEADOS	31
2.3. ABORDAGENS PARA O PROJETO DE RADIERS ESTAQUEADOS	33
2.4. MÉTODOS PROPOSTOS PARA ANÁLISE DE RADIERS ESTAQUEADOS	39
2.4.1. Métodos para cálculo manual	39
2.4.2. Análises baseadas no método dos elementos de contorno	42
2.4.3. Análises baseadas no método dos elementos finitos	45
2.4.4. Análises baseadas em métodos híbridos	48
2.5. OTIMIZAÇÃO DA DISPOSIÇÃO DAS ESTACAS EM RADIERS ESTAQUEADOS	50
2.5.1. Discussão sobre o método baseado em processo de otimização	58
<b>3 INSTRUMENTAÇÃO DE RADIERS ESTAQUEADOS</b>	<b>60</b>
3.1. INTRODUÇÃO	60
3.2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	61
3.2.1. Prédio sobre radier estaqueado em Londres	61
3.2.2. Ensaios em modelos reduzidos	70
3.2.3. Prédio sobre radier estaqueado em Frankfurt	71
3.2.4. Prédio sobre radier estaqueado no Japão	79
<b>4 METODOLOGIA DE ANÁLISE E RESULTADOS</b>	<b>84</b>
4.1. INTRODUÇÃO	84
4.2. MODELAGEM DE RADIERS ESTAQUEADOS COM O PROGRAMA ABAQUS	84
4.2.1. Características do modelo	85
4.2.2. Características especiais da modelagem	86
4.3. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS PRINCIPAIS	88
4.3.1. Parâmetros que definem o carregamento aplicado	88
4.3.2. Parâmetros que definem a fundação	88
4.3.3. Parâmetros que definem o solo	88
4.4. INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ DO RADIER NA DISTRIBUIÇÃO DE RECALQUE	89
4.5. AFERIÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS	91
4.6. ANÁLISE PARAMÉTRICA	97

4.6.1. Geometria do problema	97
4.6.2. Características das análises	99
4.6.2.1. Propriedades elásticas dos materiais	99
4.6.2.2. Malha de elementos finitos	99
4.6.3. Resultados da análise paramétrica	101
4.6.3.1. Distribuição de pressões no contato solo-radier	101
4.6.3.2. Distribuição de recalques	102
4.6.3.3. Distribuição de cargas	105
4.6.3.4. Distorções angulares	116
4.6.3.5. Capacidade de suporte	118
4.7. ESTUDO DE CASO APRESENTADO POR KIM <i>et al.</i> (2001)	124
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	<b>126</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>130</b>
<b>APÊNDICE 1</b>	<b>134</b>
GRÁFICOS FATOR DE INFLUÊNCIA $I_z$ vs. $x/R$	134
<b>APÊNDICE 2</b>	<b>162</b>
GRÁFICOS RECALQUE IMEDIATO $\rho_i$ vs. RECALQUE FINAL $\rho_F$	162
<b>APÊNDICE 3</b>	<b>166</b>
DISTORÇÕES ANGULARES MÁXIMAS	166

# Lista de figuras

## CAPÍTULO 2

Figura 2. 1 – Mecanismos de interação em radiers estaqueados (modificado de Hain & Lee, 1978).	32
Figura 2. 2 – Valores do fator de interação $\alpha_{rp}$ para radiers com diversos números de estacas (modificado de Clancy & Randolph, 1992).	36
Figura 2. 3 – Eficiência na redução de recalque em dois edifícios, o primeiro com estacas convencionais e o segundo com estacas totalmente mobilizadas (modificado de Hansbo, 1993).	37
Figura 2. 4 – Estacas centrais para redução de recalques diferenciais (modificado de Randolph, 1994).	38
Figura 2. 5 – Esquema de projeto de estacas para redução de recalques diferenciais (modificado de Randolph, 1994).	38
Figura 2. 6 – Fatores de interação $\alpha_r$ para unidades estaca-radier com $L/d = 10$ (modificado de Poulos & Davis, 1980).	40
Figura 2. 7 – Fatores de interação $\alpha_r$ para unidades estaca-radier com $L/d = 25$ (modificado de Poulos & Davis, 1980).	41
Figura 2. 8 – Fatores de interação $\alpha_r$ para unidades estaca-radier com $L/d = 100$ (modificado de Poulos & Davis, 1980).	41
Figura 2. 9 – Geometria do radier estaqueado e parâmetros adotados (modificado de Kuwabara, 1989).	44
Figura 2. 10 – Elemento de interface bidimensional (modificado de Desai et al., 1984).	45
Figura 2. 11 – Radier estaqueado em argila de Frankfurt: (a) vista isométrica esquemática da fundação e superestrutura; (b) vista em planta (modificado de Sommer et al., 1985).	47
Figura 2. 12 – Commerzbank Tower em Frankfurt: (a) foto da estrutura; (b) disposição das estacas no radier (modificado de Katzenbach et al., 1994).	47
Figura 2. 13 – Modelo de elementos finitos de um radier estaqueado (modificado de Kim et al., 2001).	51
Figura 2. 14 – Disposição inicial das estacas e condições de carregamento (modificado de Kim et al., 2001).	53
Figura 2. 15 – Variação da função objetivo com o número de iterações do processo de otimização (modificado de Kim et al., 2001).	54

Figura 2. 16 – Configuração ótima das estacas e recalques ao longo das seções A-A e B-B (Figura 2. 14), considerando carregamento uniformemente distribuído de 72kPa (modificado de Kim et al., 2001).	55
Figura 2. 17 - Configuração ótima das estacas e recalques ao longo das seções A-A e B-B (Figura 2. 14), considerando linhas de carga distribuída de 792kN/m (modificado de Kim et al., 2001).	56
Figura 2. 18 - Configuração ótima das estacas e recalques ao longo das seções A-A e B-B (Figura 2. 14), considerando quatro cargas concentradas (modificado de Kim et al., 2001).	57

### CAPÍTULO 3

Figura 3. 1 – Prédio construído sobre radier estaqueado (apud Cooke et al., 1981).	61
Figura 3. 2 – Detalhes do radier estaqueado mostrando a disposição das 351 estacas (modificado de Cooke et al., 1981).	62
Figura 3. 3 – Planta da região instrumentada (modificado de Cooke et al., 1981).	63
Figura 3. 4 – Desenvolvimento da carga durante a construção e leituras dos medidores magnéticos de recalque (modificado de Cooke et al., 1981).	64
Figura 3. 5 – Aplicação do carregamento nas estacas durante a construção (modificado de Cooke et al., 1981).	65
Figura 3. 6 – Desenvolvimento no tempo das parcelas de resistência de ponta e atrito lateral nas estacas características (modificado de Cooke et al., 1981).	66
Figura 3. 7 – Pressões de pico no radier: (a) em aproximadamente 45% da carga total (6 ½ pavimentos); (b) em 100% da carga total, com a construção ocupada (modificado de Cooke et al., 1981).	67
Figura 3. 8 – (a) Distribuição provável de pressão de contato na base de uma área do radier entre quatro estacas adjacentes; (b) distribuição de pressão admitida para obtenção da carga total do radier (modificado de Cooke et al., 1981).	69
Figura 3. 9 – Carga total na fundação em cinco estágios de construção comparada com a carga aplicada pela superestrutura (modificado de Cooke et al., 1981).	69
Figura 3. 10 – Proporção da carga total suportada pelas estacas em vários estágios de construção.	70
Figura 3. 11 – Edifício Messe Turm construído em Frankfurt, na Alemanha: (a) vista real da estrutura; (b) radier estaqueado otimizado (modificado de Sommer et al., 1991).	72
Figura 3. 12 – Perfil de solo e resistência ao cisalhamento não-drenada (modificado de Sommer et al., 1991).	73
Figura 3. 13 – Localização dos instrumentos (modificado de Sommer et al., 1991).	74
Figura 3. 14 – Inclinação do radier (modificado de Sommer et al., 1991).	75

Figura 3. 15 – Distribuição de recalques com a profundidade (modificado de Sommer et al., 1991).	76
Figura 3. 16 – Distribuição de carga e atrito lateral nas estacas após a conclusão da superestrutura (modificado de Sommer et al., 1991).	77
Figura 3. 17 – Distribuição de carga nas estacas (modificado de Sommer et al., 1991).	77
Figura 3. 18 – Pressão de contato média, efetiva, na interface solo-radier (modificado de Sommer et al., 1991).	78
Figura 3. 19 – Distribuição de carga entre as estacas e o radier (modificado de Sommer et al., 1991).	78
Figura 3. 20 – Modelo da estrutura da fundação e do perfil de solo (modificado de Yamashita e Kakurai, 1991).	80
Figura 3. 21 – Planta da fundação e posições de monitoramento (modificado de Yamashita e Kakurai, 1991).	81
Figura 3. 22 – Recalques totais medidos (modificado de Yamashita e Kakurai, 1991).	81
Figura 3. 23 – Aplicação da força axial no topo das estacas (modificado de Yamashita e Kakurai, 1991).	82
Figura 3. 24 – Desenvolvimento da força axial ao longo da estaca B (modificado de Yamashita e Kakurai, 1991).	82
Figura 3. 25 – Evolução das pressões de contato na face inferior do radier (modificado de Yamashita e Kakurai, 1991).	83

#### **CAPÍTULO 4**

Figura 4. 1 – Estágios de análise do ABAQUS/Standard.	85
Figura 4. 2 – Elementos utilizados na modelagem do radier estaqueado.	86
Figura 4. 3 – Discretização da interação e do contato entre as superfícies “mestre” e “escrava”.	87
Figura 4. 4 – Parâmetros que definem o carregamento aplicado.	88
Figura 4. 5 – Parâmetros que definem a fundação.	89
Figura 4. 6 – Parâmetros que definem o solo.	89
Figura 4. 7 – Geometria do problema para aferição da modelagem numérica.	91
Figura 4. 8 – Malha de elementos finitos usada nas análises para aferição do modelo.	93
Figura 4. 9 – Comparação entre valores de pressões de contato no radier rígido ( $K_r = 100$ ) obtidos no presente estudo e aqueles propostos por Rowe (1982).	94
Figura 4. 10 – Variação nos valores de recalque na borda e no centro do radier em função da rigidez relativa $K_r$ para $v_s = 0$ .	96
Figura 4. 11 – Variação nos valores de recalque na borda e no centro do radier em função da rigidez $K_r$ para $v_s = 0,5$ .	96
Figura 4. 12 – Geometria do problema com detalhes.	97
Figura 4. 13 – Configurações de estacas analisadas no estudo paramétrico.	98

Figura 4. 14 – Malha de elementos finitos usada nas análises paramétricas.	100
Figura 4. 15 – Distribuição de pressões no contato solo-radier de radiers não-estaqueados.	102
Figura 4. 16 – Proporção média entre o recalque imediato $\rho_i$ e o recalque final $\rho_F$ em função de $L/d$ .	104
Figura 4. 17 – Distribuição de carga entre as estacas e o radier ( $v_s = 0,1$ ). Símbolos vazados indicam configurações 9(b) e 13(b) da Figura 4. 14.	107
Figura 4. 18 – Distribuição de carga entre as estacas e o radier ( $v_s = 0,3$ ). Símbolos vazados indicam configurações 9(b) e 13(b) da Figura 4. 14.	108
Figura 4. 19 – Distribuição de carga entre as estacas e o radier ( $v_s = 0,5$ ). Símbolos vazados indicam configurações 9(b) e 13(b) da Figura 4. 14.	109
Figura 4. 20 – Classificação das estacas em função da sua posição no radier.	111
Figura 4. 21 – Distribuição de carga entre as estacas em função do número de estacas na configuração para rigidez do radier $K_r = 0,01$ .	113
Figura 4. 22 – Distribuição de carga entre as estacas em função do número de estacas na configuração para rigidez do radier $K_r = 0,1$ .	114
Figura 4. 23 – Distribuição de carga entre as estacas em função do número de estacas na configuração para rigidez do radier $K_r = 1$ .	115
Figura 4. 24 – Definição de recalques diferenciais e distorções angulares.	116
Figura 4. 25 – Critérios para fixação de limites para a distorção angular $\beta$ (modificado Hachich et al., 1996).	117
Figura 4. 26 – Parcelas de resistência de ponta, lateral e total em função do comprimento relativo das estacas.	119
Figura 4. 27 – Coeficientes de segurança das estacas para $v_s = 0,1$ .	121
Figura 4. 28 – Coeficientes de segurança das estacas para $v_s = 0,3$ .	122
Figura 4. 29 – Coeficientes de segurança das estacas para $v_s = 0,5$ .	123
Figura 4. 31 – Resultados obtidos no presente trabalho para caso apresentado por Kim et al. (2001).	124

## APÊNDICE 1

Figura A1. 1 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,1$ , $K_r = 0,01$ , seção A-A).	135
Figura A1. 2 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,1$ , $K_r = 0,01$ , seção B-B).	136
Figura A1. 3 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,1$ , $K_r = 0,01$ , seção C-C).	137
Figura A1. 4 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,1$ , $K_r = 0,1$ , seção A-A).	138

Figura A1. 5 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,1$ , $K_r = 0,1$ , seção B-B).	139
Figura A1. 6 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,1$ , $K_r = 0,1$ , seção C-C).	140
Figura A1. 7 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,1$ , $K_r = 1$ , seção A-A).	141
Figura A1. 8 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,1$ , $K_r = 1$ , seção B-B).	142
Figura A1. 9 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,1$ , $K_r = 1$ , seção C-C).	143
Figura A1. 10 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,3$ , $K_r = 0,01$ , seção A-A).	144
Figura A1. 11 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,3$ , $K_r = 0,01$ , seção B-B).	145
Figura A1. 12 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,3$ , $K_r = 0,01$ , seção C-C).	146
Figura A1. 13 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,3$ , $K_r = 0,1$ , seção A-A).	147
Figura A1. 14 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,3$ , $K_r = 0,1$ , seção B-B).	148
Figura A1. 15 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,3$ , $K_r = 0,1$ , seção C-C).	149
Figura A1. 16 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,3$ , $K_r = 1$ , seção A-A).	150
Figura A1. 17 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,3$ , $K_r = 1$ , seção B-B).	151
Figura A1. 18 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,3$ , $K_r = 1$ , seção C-C).	152
Figura A1. 19 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,5$ , $K_r = 0,01$ , seção A-A).	153
Figura A1. 20 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,5$ , $K_r = 0,01$ , seção B-B).	154
Figura A1. 21 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,5$ , $K_r = 0,01$ , seção C-C).	155
Figura A1. 22 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,5$ , $K_r = 0,1$ , seção A-A).	156
Figura A1. 23 – Efeito do arranjo das estacas e $L/d$ na deflexão do radier ( $v_s = 0,5$ , $K_r = 0,1$ , seção B-B).	157

Figura A1. 24 – Efeito do arranjo das estacas e L/d na deflexão do radier ( $v_s = 0,5$ , $K_r = 0,1$ , seção C-C).	158
Figura A1. 25 – Efeito do arranjo das estacas e L/d na deflexão do radier ( $v_s = 0,5$ , $K_r = 1$ , seção A-A).	159
Figura A1. 26 – Efeito do arranjo das estacas e L/d na deflexão do radier ( $v_s = 0,5$ , $K_r = 1$ , seção B-B).	160
Figura A1. 27 – Efeito do arranjo das estacas e L/d na deflexão do radier ( $v_s = 0,5$ , $K_r = 1$ , seção C-C).	161

## APÊNDICE 2

Figura A2. 1 – Recalque imediato $\rho_i$ vs. recalque final $\rho_F$ para $K_r = 0,01$ .	163
Figura A2. 2 – Recalque imediato $\rho_i$ vs. recalque final $\rho_F$ para $K_r = 0,1$ .	164
Figura A2. 3 – Recalque imediato $\rho_i$ vs. recalque final $\rho_F$ para $K_r = 1$ .	165



## Lista de tabelas

### CAPÍTULO 2

Tabela 2. 1 – Recalques diferencial máximo e médio do radier (modificado de Kim et al., 2001).	55
Tabela 2. 2 – Momento fletor médio no radier (modificado de Kim et al., 2001).	55

### CAPÍTULO 3

Tabela 3. 1 – Dimensões e parâmetros elásticos do radier e das vigas da fundação (modificado de Yamashita e Kakurai, 1991).	79
Tabela 3. 2 – Força axial medida no topo da estaca e relação entre a força axial e a carga na coluna (modificado de Yamashita e Kakurai, 1991).	82

### CAPÍTULO 4

Tabela 4. 1 – Espessura $t$ (m) do radier em função do coeficiente de Poisson do solo $\nu_s$ e da rigidez relativa do radier $K_r$ .	90
Tabela 4. 2 – Valores do módulo de Young do solo.	90
Tabela 4. 3 – Soluções analíticas para cálculo de recalque de radiers circulares em camadas de espessura finita.	92
Tabela 4. 4 – Comparação entre valores de recalque no centro e na borda dos radiers obtidos neste trabalho e aqueles propostos por soluções analíticas.	92
Tabela 4. 5 – Valores de recalque (mm) no centro ( $\rho_{\text{centro}}$ ) e na borda ( $\rho_{\text{borda}}$ ) de radiers circulares obtidos no presente estudo para $\nu_s = 0$ .	94
Tabela 4. 6 – Valores de recalque (mm) no centro ( $\rho_{\text{centro}}$ ) e na borda ( $\rho_{\text{borda}}$ ) de radiers circulares obtidos no presente estudo para $\nu_s = 0,5$ .	95
Tabela 4. 7 – Parâmetros elásticos do solo de fundação.	99
Tabela 4. 8 – Aumento médio na proporção da carga suportada pelo radier em função da rigidez do radier para condições drenadas.	110
Tabela 4. 9 – Razões médias das cargas no topo das estacas normalizadas em relação à estaca central (tipo 1) para $K_r = 0,01$ .	112
Tabela 4. 10 – Razões médias das cargas no topo das estacas normalizadas em relação à estaca central (tipo 1) para $K_r = 0,1$ .	112
Tabela 4. 11 – Razões médias das cargas no topo das estacas normalizadas em relação à estaca central (tipo 1) para $K_r = 1$ .	112

### APÊNDICE 3

Tabela A3. 1 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo L/d ( $v_s = 0,1$ , $K_r = 0,01$ , seção A-A).	167
Tabela A3. 2 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo L/d ( $v_s = 0,1$ , $K_r = 0,01$ , seção B-B).	167
Tabela A3. 3 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo L/d ( $v_s = 0,1$ , $K_r = 0,01$ , seção C-C).	167
Tabela A3. 4 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo L/d ( $v_s = 0,1$ , $K_r = 0,1$ , seção A-A).	168
Tabela A3. 5 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo L/d ( $v_s = 0,1$ , $K_r = 0,1$ , seção B-B).	168
Tabela A3. 6 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo L/d ( $v_s = 0,1$ , $K_r = 0,1$ , seção C-C).	168
Tabela A3. 7 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo L/d ( $v_s = 0,1$ , $K_r = 1$ , seção A-A).	169
Tabela A3. 8 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo L/d ( $v_s = 0,1$ , $K_r = 1$ , seção B-B).	169
Tabela A3. 9 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo L/d ( $v_s = 0,1$ , $K_r = 1$ , seção C-C).	169
Tabela A3. 10 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo L/d ( $v_s = 0,3$ , $K_r = 0,01$ , seção A-A).	170
Tabela A3. 11 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo L/d ( $v_s = 0,3$ , $K_r = 0,01$ , seção B-B).	170
Tabela A3. 12 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo L/d ( $v_s = 0,3$ , $K_r = 0,01$ , seção C-C).	170
Tabela A3. 13 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo L/d ( $v_s = 0,3$ , $K_r = 0,1$ , seção A-A).	171
Tabela A3. 14 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo L/d ( $v_s = 0,3$ , $K_r = 0,1$ , seção B-B).	171
Tabela A3. 15 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo L/d ( $v_s = 0,3$ , $K_r = 0,1$ , seção C-C).	171
Tabela A3. 16 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo L/d ( $v_s = 0,3$ , $K_r = 1$ , seção A-A).	172
Tabela A3. 17 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo L/d ( $v_s = 0,3$ , $K_r = 1$ , seção B-B).	172
Tabela A3. 18 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo L/d ( $v_s = 0,3$ , $K_r = 1$ , seção C-C).	172

Tabela A3. 19 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo $L/d$ ( $v_s = 0,5$ , $K_r = 0,01$ , seção A-A).	173
Tabela A3. 20 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo $L/d$ ( $v_s = 0,5$ , $K_r = 0,01$ , seção B-B).	173
Tabela A3. 21 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo $L/d$ ( $v_s = 0,5$ , $K_r = 0,01$ , seção C-C).	173
Tabela A3. 22 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo $L/d$ ( $v_s = 0,5$ , $K_r = 0,1$ , seção A-A).	174
Tabela A3. 23 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo $L/d$ ( $v_s = 0,5$ , $K_r = 0,1$ , seção B-B).	174
Tabela A3. 24 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo $L/d$ ( $v_s = 0,5$ , $K_r = 0,1$ , seção C-C).	174
Tabela A3. 25 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo $L/d$ ( $v_s = 0,5$ , $K_r = 1$ , seção A-A).	175
Tabela A3. 26 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo $L/d$ ( $v_s = 0,5$ , $K_r = 1$ , seção B-B).	175
Tabela A3. 27 – Distorções angulares máximas em função do comprimento relativo $L/d$ ( $v_s = 0,5$ , $K_r = 1$ , seção C-C).	175
Tabela A3. 28 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $v_s = 0,1$ , $L/d = 10$ , seção A-A).	176
Tabela A3. 29 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $v_s = 0,1$ , $L/d = 10$ , seção B-B).	176
Tabela A3. 30 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $v_s = 0,1$ , $L/d = 10$ , seção C-C).	176
Tabela A3. 31 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $v_s = 0,1$ , $L/d = 25$ , seção A-A).	177
Tabela A3. 32 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $v_s = 0,1$ , $L/d = 25$ , seção B-B).	177
Tabela A3. 33 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $v_s = 0,1$ , $L/d = 25$ , seção C-C).	177
Tabela A3. 34 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $v_s = 0,1$ , $L/d = 50$ , seção A-A).	178
Tabela A3. 35 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $v_s = 0,1$ , $L/d = 50$ , seção B-B).	178
Tabela A3. 36 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $v_s = 0,1$ , $L/d = 50$ , seção C-C).	178
Tabela A3. 37 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $v_s = 0,3$ , $L/d = 10$ , seção A-A).	179

Tabela A3. 38 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $\nu_s = 0,3$ , $L/d = 10$ , seção B-B).	179
Tabela A3. 39 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $\nu_s = 0,3$ , $L/d = 10$ , seção C-C).	179
Tabela A3. 40 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $\nu_s = 0,3$ , $L/d = 25$ , seção A-A).	180
Tabela A3. 41 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $\nu_s = 0,3$ , $L/d = 25$ , seção B-B).	180
Tabela A3. 42 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $\nu_s = 0,3$ , $L/d = 25$ , seção C-C).	180
Tabela A3. 43 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $\nu_s = 0,3$ , $L/d = 50$ , seção A-A).	181
Tabela A3. 44 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $\nu_s = 0,3$ , $L/d = 50$ , seção B-B).	181
Tabela A3. 45 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $\nu_s = 0,3$ , $L/d = 50$ , seção C-C).	181
Tabela A3. 46 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $\nu_s = 0,5$ , $L/d = 10$ , seção A-A).	182
Tabela A3. 47 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $\nu_s = 0,5$ , $L/d = 10$ , seção B-B).	182
Tabela A3. 48 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $\nu_s = 0,5$ , $L/d = 10$ , seção C-C).	182
Tabela A3. 49 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $\nu_s = 0,5$ , $L/d = 25$ , seção A-A).	183
Tabela A3. 50 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $\nu_s = 0,5$ , $L/d = 25$ , seção B-B).	183
Tabela A3. 51 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $\nu_s = 0,5$ , $L/d = 25$ , seção C-C).	183
Tabela A3. 52 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $\nu_s = 0,5$ , $L/d = 50$ , seção A-A).	184
Tabela A3. 53 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $\nu_s = 0,5$ , $L/d = 50$ , seção B-B).	184
Tabela A3. 54 – Distorções angulares máximas em função da rigidez do radier $K_r$ ( $\nu_s = 0,5$ , $L/d = 50$ , seção C-C).	184
Tabela A3. 55 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $\nu_s$ ( $K_r = 0,01$ , $L/d = 10$ , seção A-A).	185
Tabela A3. 56 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $\nu_s$ ( $K_r = 0,01$ , $L/d = 10$ , seção B-B).	185

Tabela A3. 57 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 0,01$ , $L/d = 10$ , seção C-C).	185
Tabela A3. 58 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 0,1$ , $L/d = 10$ , seção A-A).	186
Tabela A3. 59 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 0,1$ , $L/d = 10$ , seção B-B).	186
Tabela A3. 60 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 0,1$ , $L/d = 10$ , seção C-C).	186
Tabela A3. 61 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 1$ , $L/d = 10$ , seção A-A).	187
Tabela A3. 62 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 1$ , $L/d = 10$ , seção B-B).	187
Tabela A3. 63 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 1$ , $L/d = 10$ , seção C-C).	187
Tabela A3. 64 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 0,01$ , $L/d = 25$ , seção A-A).	188
Tabela A3. 65 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 0,01$ , $L/d = 25$ , seção B-B).	188
Tabela A3. 66 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 0,01$ , $L/d = 25$ , seção C-C).	188
Tabela A3. 67 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 0,1$ , $L/d = 25$ , seção A-A).	189
Tabela A3. 68 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 0,1$ , $L/d = 25$ , seção B-B).	189
Tabela A3. 69 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 0,1$ , $L/d = 25$ , seção C-C).	189
Tabela A3. 70 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 1$ , $L/d = 25$ , seção A-A).	190
Tabela A3. 71 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 1$ , $L/d = 25$ , seção B-B).	190
Tabela A3. 72 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 1$ , $L/d = 25$ , seção C-C).	190
Tabela A3. 73 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 0,01$ , $L/d = 50$ , seção A-A).	191
Tabela A3. 74 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 0,01$ , $L/d = 50$ , seção B-B).	191
Tabela A3. 75 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 0,01$ , $L/d = 50$ , seção C-C).	191

Tabela A3. 76 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 0,1$ , $L/d = 50$ , seção A-A).	192
Tabela A3. 77 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 0,1$ , $L/d = 50$ , seção B-B).	192
Tabela A3. 78 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 0,1$ , $L/d = 50$ , seção C-C).	192
Tabela A3. 79 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 1$ , $L/d = 50$ , seção A-A).	193
Tabela A3. 80 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 1$ , $L/d = 50$ , seção B-B).	193
Tabela A3. 81 – Distorções angulares máximas em função do coeficiente de Poisson $v_s$ ( $K_r = 1$ , $L/d = 50$ , seção C-C).	193

## Lista de símbolos

### Símbolos algébricos

$A_p$	Área da seção transversal da estaca
$a$	Extensão da linha de carga distribuída na superfície do radier
$A$	Fator para cálculo da resistência ao cisalhamento não-drenada do solo
$A_L$	Área lateral da estaca
$B_0$	Largura da região do radier medida a partir do fuste das estacas mais externas
$d$	Diâmetro da estaca
$d_r$	Diâmetro do bloco
$E_c$	Módulo de Young do concreto armado
$E_p$	Módulo de Young da estaca
$E_r$	Módulo de Young do radier
$E_s$	Módulo de Young do solo
$E_s'$	Módulo de Young drenado do solo
$E_{s0}$	Módulo de Young não-drenado do solo ao nível da superfície
$E_u$	Módulo de Young não-drenado do solo
$F_s$	Coefficiente de segurança contra a ruptura da estaca
$h$	Espessura da camada de solo homogêneo
$I$	Fator de influência do recalque de radiers circulares uniformemente carregados
$I_c$	Índice de consistência
$I_z$	Fator de recalque normalizado
$I_p$	Fator de influência do recalque de estacas submetidas a um carregamento axial
$K_p$	Rigidez do grupo de estacas
$K_{pr}$	Rigidez global da fundação mista
$K_r$	Rigidez do radier
$L$	Comprimento da estaca
$L_e$	Comprimento do elemento de interface
$LL$	Limite de liquidez
$LP$	Limite de plasticidade
$n$	Número de estacas
$N_c$	Fator de capacidade de carga
$N_{SPT}$	Número de golpes em ensaio de penetração dinâmica (SPT)
$P_0$	Carga total no topo das estacas de determinado tipo
$P_{AV}$	Carga total aplicada ao radier $P_t$ dividida pelo número de estacas $n$
$P$	Carga axial aplicada no topo da estaca
$P_i, P_j$	Cargas nas unidades estaca-radier

$P_p$	Parcela do carregamento total suportada pelas estacas
$P_p^i$	Carga atuante no topo da estaca $i$
$P_r$	Parcela do carregamento total suportada pelo radier
$P_t$	Resultante da carga aplicada ao radier
$q$	Carga vertical uniformemente distribuída na superfície do radier
$Q_B$	Capacidade de carga da ponta das estacas
$Q_L$	Capacidade de carga lateral das estacas
$Q_p$	Capacidade de carga das estacas
$q_r$	Capacidade de carga do radier
$R$	Raio da fundação circular
$r_0$	Raio de uma estaca circular equivalente
$r_c$	Raio equivalente para um grupo de $n$ estacas
$r_m$	Raio de influência máximo das estacas
$s$	Espaçamento entre os eixos de estacas adjacentes
$S_u$	Resistência ao cisalhamento não-drenada
$t$	Espessura do radier
$t_e$	Espessura do elemento de interface
$V$	Sobrecarga estrutural
$Z$	Vetor de restrições
$w$	Vetor dos gradientes da superfície deformada do radier
$w_n$	Teor de umidade natural
$x$	Distância do centro do radier ao ponto considerado
$z$	Profundidade em metros abaixo da superfície do solo
$\alpha$	Fator de interação estaca-estaca
$\alpha_{pr}$	Fator de interação estaca-radier
$\alpha_r$	Fator de interação entre unidades estaca-radier adjacentes
$\alpha_{rp}$	Fator de interação radier-estaca
$\beta$	Distorção angular
$\beta_p$	Fator de interação estaca-radier
$\beta_s$	Fator de interação radier-estaca
$\chi^p$	Vetor das coordenadas das estacas
$\delta$	Recalque diferencial
$\gamma_c$	Peso específico do concreto armado
$\nu_c$	Coefficiente de Poisson do concreto armado
$\nu_p$	Coefficiente de Poisson da estaca
$\nu_r$	Coefficiente de Poisson do radier
$\nu_s$	Coefficiente de Poisson do solo
$\nu_s'$	Coefficiente de Poisson drenado do solo
$\Pi$	Função objetivo



$\rho$	Recalque em cada ponto do radier
$\rho_{est}$	Recalque no topo da estaca
$\rho_F$	Recalque final
$\rho_i$	Recalque imediato
$\rho_1$	Recalque de uma unidade estaca-radier sob carga unitária
$\sigma_{V0}$	Tensão vertical total na profundidade da ponta da estaca
$\sigma_{Vi}$	Tensão vertical média atuante no topo da estaca i
$\sigma_z$	Pressão de contato na interface s25lo-radier

### Símbolos matemáticos

[ ]	Matriz
{ }	Vetor coluna
$\Sigma$	Somatório
$\int$	Integral
$\nabla$	Operador gradiente
$\ \dots\ ^2$	norma Euclidiana

Outros símbolos e abreviaturas são direta e devidamente definidos no texto.

*“No caráter, na conduta, no estilo, em todas as coisas, a simplicidade  
é a suprema virtude.”*

*(Henry Wadsworth Longfellow)*