



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Ciência e Tecnologia

Faculdade de Engenharia

Karina Almeida Vitor

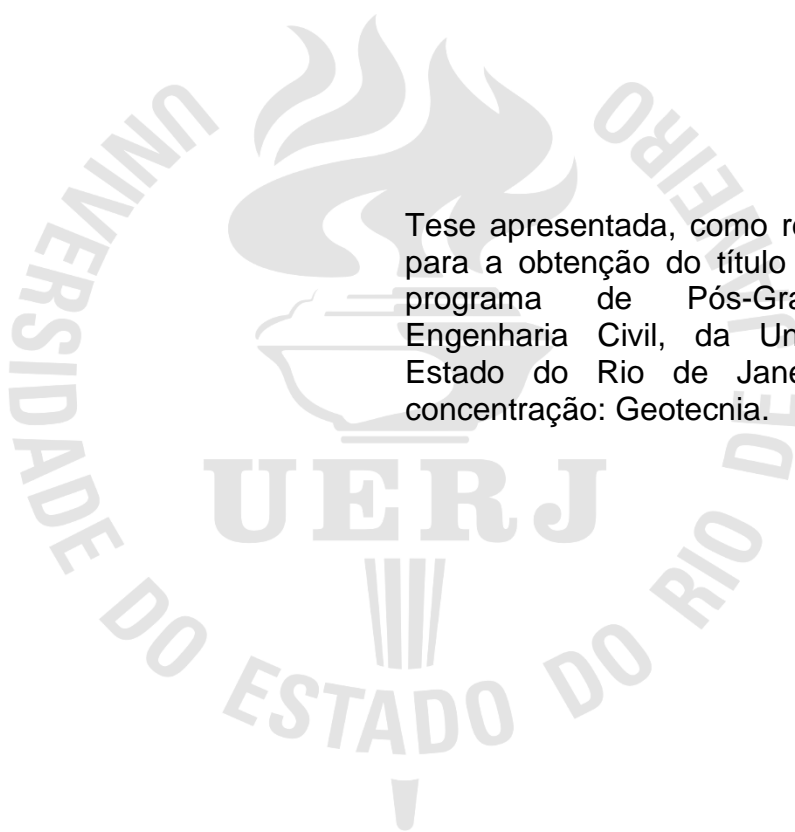
**Um modelo simplificado de radier estaqueado em solo estratificado  
aplicado a casos com interação solo x estrutura**

Rio de Janeiro

2024

Karina Almeida Vitor

**Um Modelo Simplificado de Radier Estaqueado em Solo Estratificado Aplicado  
a Casos com Interação Solo x Estrutura**



Tese apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>.Dr<sup>a</sup>. Bernadete Ragoni Danziger  
Coorientadoras: Prof<sup>a</sup>.Dr<sup>a</sup>. Maria Cascão Ferreira de Almeida  
Prof<sup>a</sup>.Dr<sup>a</sup>. Eliane Maria Lopes Carvalho

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

V845 Vitor, Karina Almeida.  
Um modelo simplificado de radier estaqueado em solo estratificado aplicado a casos com interação solo x estrutura / Carlos Augusto Paiva da Silva. – 2024.  
215 f.

Orientadora: Bernadete Ragoni Danziger.  
Coorientadoras: Maria Cascão Ferreira de Almeida, Eliane Maria Lopes Carvalho.

Tese (Doutorado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Estacaria (Engenharia civil) - Teses. 3. Recalque de estruturas - Teses. 4. Fundações (Engenharia) - Teses. I. Danziger, Bernadete Ragoni. II. Almeida, Maria Cascão Ferreira de. III. Carvalho, Eliane Maria Lopes. IV. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. V. Título.

CDU 624.154

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Karina Almeida Vitor

**Um Modelo Simplificado de Radier Estaqueado em Solo Estratificado Aplicado  
a Casos com Interação Solo x Estrutura**

Tese apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em

Banca examinadora:

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Bernadete Ragoni Danziger (Orientadora)  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Cascão Ferreira de Almeida (Coorientadora)  
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ/COPPE

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eliane Maria Lopes Carvalho (Coorientadora)  
Universidade Federal Fluminense – UFF

---

Prof. Dr. Marcus Peigas Pacheco  
Faculdade de Engenharia – UERJ

---

Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

---

Prof. Dr. Paulo J. R. Albuquerque  
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP  
Rio de Janeiro

2024

## DEDICATÓRIA

Dedico esta tese primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, autor do meu destino, meu guia, socorro bem presente na hora da angústia. Ele me concedeu meu esposo Alex, minha alma gêmea, que manteve nosso lar operacional enquanto eu investia tempo neste projeto.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu Deus, meu bom amigo, Jesus meu Salvador, o escolhido dos milhares para mim.

Pai e mãe, obrigada por tudo que vocês planejaram e fizeram, por tudo que planejaram e não fizeram e pelo que fizeram sem planejar.

Todos os dias eu sou grata pela bênção de ter o homem da minha vida do meu lado. Foi uma escolha sensata, a melhor das minhas decisões.

À minha filha Amy: eu lhe dei a vida, mas você deu significado e felicidade à minha. Te amo.

Ao meu irmão por todo apoio em tudo que me proponho a fazer.

À minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Bernadete Ragoni Danziger, por sua atenção e disponibilidade em período de férias e quarentena. Sua contribuição em minha vida foi muito além dessa tese.

Às minhas coorientadoras Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Cascão Ferreira de Almeida e Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eliane Maria Lopes Carvalho, estou verdadeiramente honrada por ter trabalhado ao lado de profissionais tão notáveis como vocês.

À FAPERJ pelo apoio financeiro.

E não vos conformeis com este mundo, mas transformai-vos pela renovação do vosso entendimento, para que experimente qual seja a boa, agradável e perfeita vontade de Deus.

*Romanos 12:2*

## RESUMO

VITOR, Almeida Karina. *Um modelo simplificado de radier estaqueado em solo estratificado aplicado a casos com interação solo x estrutura*. 2024. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

A pesquisa objetiva a apresentação de uma metodologia simples para a estimativa de projeto de fundações em radier estaqueado. A vantagem da metodologia é ter um caráter geral, podendo contemplar um semi-espaço finito, estratificado na direção vertical e horizontal, com recalques que se anulam junto à fronteira rígida. O procedimento desenvolvido permite a estimativa de recalques de um radier estaqueado projetado para funcionar como grupo de estacas reforçado pelo radier, justificando a estimativa de recalques previstos pela teoria da elasticidade. Após a calibração da proposta com métodos conhecidos da literatura, com análises numéricas e casos instrumentados, o procedimento foi adotado em dois casos documentados em situações distintas. O primeiro caso trata de uma obra em fundações diretas que apresentou mal comportamento, com acréscimo de algumas estacas e solução em radier estaqueado. A segunda obra trata de um caso de fundações profundas em que o monitoramento de recalques indicou valores muito pequenos, com espaço suficiente para otimização do número de estacas. Ao aplicar o procedimento aos casos de obra, foram observadas várias conclusões já destacadas na pesquisa bibliográfica, para outros casos. A expectativa da autora é que este procedimento simples, mas de caráter abrangente, será útil para alavancar emprego da solução em radier estaqueado em obras correntes.

Palavras-chave: Radier estaqueado; Método Aoki-Lopes; Estudo de Caso; Recalques; Proposta.



## ABSTRACT

VITOR, Almeida Karina. *A simplified model of piled raft in stratified soil applied to cases with soil x structure interaction*. 2024. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The research aims to present a simple method for the design estimation of piled raft foundations. The advantage of the method is that it has a general character, being able to contemplate a finite semi-space, stratified in the vertical and horizontal directions, with settlements that are nullified at the resistant rock layer. The developed procedure allows the estimation of settlements of a piled raft designed to function as a pile group enhanced by the raft, justifying the estimation of settlements predicted by the elasticity theory. After calibrating the proposal with methods known in the literature, with numerical analyses and instrumented cases, the procedure was adopted in two documented cases in different situations. The first case deals with a construction based on a shallow foundation that presented very poor behaviour. With the addition of some piles, a solution in a pile rafted foundation could reduce distortion settlements to a tolerable range. The second case deals with a deep foundation structure in which the monitoring of settlements indicated very small values, with much room for optimization of the number of piles. When applying the procedure to these cases, many conclusions already highlighted in the bibliographic research were observed, for other cases. The author expects that this simple procedure will be useful to improve the use of piled raft foundations as an alternative in current foundation.

Keywords: Pile draft foundation; Aoki-Lopes Method; Case Studies; Settlement; Proposal.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Comportamento carga x recalque de radiers, grupo de estacas e diferentes tipos de radier estaqueados, adaptado de O'Brien et al. (2012). .....	27
Figura 2. Grupo de estacas reforçado pelo radier e radier reforçado por estacas - zona intermediária que deve ser evitada, adaptado de O'Brien et al. (2012). .....	28
Figura 3. Exemplos de curvas carga x recalque: a) estacas hélice contínuas em solos aluvionares e b) estacas cravadas em aterros, adaptado de O'Brien et al. (2012)...29	
Figura 4. Recalque da estaca versus fator de segurança em relação à resistência por atrito lateral, O'Brien et al. (2012). .....	30
Figura 5. Grupo de estacas reforçado pelo radier versus radier reforçado por estacas: a) grupo de estacas reforçado pelo radier b) radier reforçado por grupo de estacas, adaptado de O'Brien et al. (2012). .....	31
Figura 6. Fator $\alpha R$ da capacidade de carga de radier estaqueado versus espaçamento e área (modificado de Mandolini et al. 2005).....	34
Figura 7. Observações da parcela da carga total absorvida pelo radier, adaptado de Mandolini et al (2005). .....	35
Figura 8. Curva carga x recalque simplificada para um radier estaqueado, Poulos (2001). .....	40
Figura 9. Interações entre diferentes componentes de um radier estaqueado, O'Brien et al. (2012). .....	43
Figura 10. Influência da não linearidade do método de cálculo na rigidez do radier, adaptado de O'Brien e Sharp (2001) .....	44
Figura 11. Influência do comprimento e número de estacas na redução de recalques do radier estaqueado, adaptado de Katzenbach et al. (1998). .....	46
Figura 12. Otimização da localização das estacas em radier estaqueado para um carregamento uniformemente distribuído, adaptado de Randolph (1994). .....	48
Figura 13. Influência do layout do grupo de estacas no recalque diferencial do radier, adaptado de Randolph (1994).....	49
Figura 14. Fator de correção $I_g$ , Mayne e Poulos (1999) .....	53
Figura 15. Fator de correção $I_f$ , Mayne e Poulos (1999) .....	53
Figura 16. Fator de correção $I_e$ , Mayne e Poulos (1999) .....	54

Figura 17. Divisão do maciço, (b) modos de deformação das duas partes do maciço e (c) perfil da estaca e do terreno no problema resolvido por Randolph (1977), adaptado de Velloso e Lopes (2014).....	55
Figura 18. Método da estaca equivalente (Randolph, 1994).....	57
Figura 19. Exemplo de um grupo de 5 x 5 estacas, Randolph (1994).....	60
Figura 20. Sistema equivalente de forças concentradas, representando as ações da estaca no solo (Aoki e Lopes, 1975, adaptada de Danziger e Lopes (2021). ....	69
Figura 21. Metodologia de Steinbrenner para solos estratificados (Iwamoto, 2000) .	71
Figura 22. Geometria e armadura do radier estaqueado, Garcia. J.R, (2015) .....	77
Figura 23. Valores de $N_{spt}$ em profundidade, Garcia. J.R, (2015).....	78
Figura 24. Parâmetros médios do perfil geológico do campo experimental, Garcia, (2015).....	79
Figura 25. Curva carga recalque do radier estaqueado indicado na Figura 21, Garcia, (2015).....	79
Figura 26. Estudo de caso Bhartiya et al. 2019, adaptado de Yamashita et al. 2011	88
Figura 27. Exemplo hipotético apresentado por Poulos et al. (1997) .....	93
Figura 28. Valores de recalque médio no radier de 9 estacas com carga admissível igual a 12 MN obtidos na literatura e em Freitas, (2018).....	94
Figura 29. Partição de cargas, resultados comparativos do exemplo hipotético de Poulos et al. 1997, adaptado.....	95
Figura 30. Perfil geotécnico, adaptado de Rosa (2005) .....	97
Figura 31. Fissuras nos apartamentos, Rosa (2005) .....	98
Figura 32. Indicação esquemática das trincas a 45° (adaptado de Rosa, 2005).....	99
Figura 33. Representação esquemática das linhas de pilares do edifício (adaptado de Rosa, 2005).....	100
Figura 34. Detalhe do projeto original de fundações do edifício – Rosa (2005) .....	101
Figura 35. Sondagem junto às fundações, externamente ao edifício, (Rosa, 2005). .....	102
Figura 36. Reaterro junto a uma viga, com presença de turfa, (Rosa, 2005). .....	103
Figura 37. Curvas de iso-recalque (em centímetros) sem considerar a interação solo-estrutura, Rosa (2005). ....	105
Figura 38. Modelo numérico do edifício analisado .....	106
Figura 39. Localização dos pilares e forma da fundação, Rosa (2005) .....	106
Figura 40. Função multiplicadora do carregamento no tempo. ....	108

Figura 41. Modelo de Kelvin.....	109
Figura 42. Curvas iso-recalques (a) sem considerar a interação solo-estrutura e (b) considerando a interação para 20 anos, Rosa (2005).....	116
Figura 43. Curvas iso-recalques (a) sem considerar a interação solo-estrutura e (b) considerando a interação para 20 anos, terceira análise .....	116
Figura 44. Indicação dos pilares que sofreram acréscimo de carga; Rosa (2005) assinalados com os círculos e da autora assinalados com as setas.....	121
Figura 45. Indicação das novas sapatas e 14 estacas incluídas na linha D.....	123
Figura 46. Curvas iso-recalques, com radier estaqueado na linha D, (a) sem considerar a interação solo-estrutura e (b) considerando a interação para 20 anos, terceira análise.....	127
Figura 47. Critérios de danos, Bjerrum (1963) .....	128
Figura 48. Alternativa 2, com radier estaqueado nas linhas C e D, 26 estacas. ....	131
Figura 49. Curvas iso-recalques, com radier estaqueado nas linhas C e D, (a) sem considerar a interação solo-estrutura e (b) considerando a interação para 20 anos, terceira análise.....	133
Figura 50. Perfil do subsolo.....	138
Figura 51. Modelo tridimensional refinado, Costa (2003).....	139
Figura 52. Área da projeção do radier estaqueado posicionado na região com maior concentração de cargas .....	144
Figura 53. Radier estaqueado com 25 estacas.....	145
Figura 54. Radier estaqueado com 17 estacas .....	147
Figura 55. Radier estaqueado com 9 estacas .....	149
Figura 56. Radier estaqueado com 13 estacas .....	150
Figura 57. Recalque normalizado em função do número de estacas do radier analisado.....	151
Figura 58. Porcentagem da carga absorvida no radier em função do número de estacas.....	151
Figura 59. Curvas de iso-recalques, em mm, considerando recalques obtidos por Costa (2003) em (a) e pela autora considerando o radier sem estacas em (b).....	154
Figura 60. Curvas de iso-recalques, em mm, considerando recalques do radier estaqueado com 25 estacas (a) e com 17 estacas (b).....	154

Figura 61. Curvas de iso-recalques considerando recalques (em mm) do radier estaqueado com 17 estacas, na primeira interação (a) e na segunda interação (b). .....	158
Figura 62. Comparação entre as análises de (a) a (e), recalques em mm.....	159
Figura 63. Cálculo da rigidez do radier, $K_{rs}$ , sendo este retangular.....	174
Figura 64. Cálculo da rigidez do radier, $K_{rs}$ , sendo este circular. ....	174
Figura 65. Arquivos solo.txt, pontos.txt e carga.txt.....	175
Figura 66. Algoritmo aplicado a um trecho da linha D, cálculo inicial.....	176
Figura 67. Algoritmo aplicado a um trecho da linha D, 1 <sup>o</sup> Iteração.....	177
Figura 68. Algoritmo aplicado a um trecho da linha D, 2 <sup>o</sup> Iteração.....	177
Figura 69. Planilhas para cálculo da contribuição do radier e estacas – Análise com placa rígida, inicialmente e 1 <sup>a</sup> interação. ....	178
Figura 70. Planilha para cálculo da contribuição do radier e estacas – Análise com placa rígida, 6 <sup>a</sup> interação.....	179
Figura 71. Planilhas para cálculo da contribuição do radier e estacas – Análise com placa flexível, recalque inicial das estacas. ....	180
Figura 72. Planilhas para cálculo da contribuição do radier e estacas – Análise com placa flexível, recalque inicial do radier.....	181
Figura 73. Planilhas para cálculo da contribuição do radier e estacas – Análise com placa flexível, 6 <sup>a</sup> interação.....	181
Figura 74. Resultado do programa Aoki-Lopes para o radier.....	182
Figura 75. Resultado do programa Aoki-Lopes para as estacas.....	183
Figura 76. Resultado do programa Aoki-Lopes para o radier estaqueado.....	184
Figura 77. Aplicação do método de Randolph (1994) – Grupo de estacas.....	185
Figura 78. Aplicação do método de Randolph (1994) – Estaca Equivalente.....	186
Figura 79. Algoritmo para determinação da partição de cargas, caso hipotético de Poulos et al.1997, fase inicial.....	187
Figura 80. Algoritmo para determinação da partição de cargas, caso hipotético de Poulos et al.1997, 1 <sup>a</sup> interação.....	188
Figura 81. Algoritmo para determinação da partição de cargas, caso hipotético de Poulos et al.1997, 2 <sup>a</sup> interação.....	188
Figura 82. Coeficiente de rigidez nas linhas longitudinais da edificação.....	189
Figura 83. Coeficiente de rigidez nas linhas transversais da edificação. ....	190
Figura 84. Parâmetros da Equação de Mindlin (1936).....	192

Figura 85. Distribuição da carga ao longo de estaca prismática e cilíndrica (Aoki e Lopes, 1975). .....	193
Figura 86. Discretização da base de estaca cilíndrica (Aoki e Lopes, 1975). .....	194
Figura 87. Discretização do fuste de estaca cilíndrica (Aoki e Lopes, 1975). .....	195
Figura 88. Procedimento de Steinbrenner, adaptado de Mota (2009).....	198

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Correlações de Decourt utilizadas por Poulos (2001). .....	36
Tabela 2. Fatores de correlação.....	37
Tabela 3. Alguns fatores que influenciam o comportamento do radier estaqueado, O'Brien et al. (2012).....	42
Tabela 4. Comparações entre a estaca isolada, grupo de estacas e a estaca equivalente, Randolph, 1994.....	60
Tabela 5. Resultados de previsão do comportamento do radier estaqueado, caso instrumentado por Garcia (2015).....	83
Tabela 6. Influência da camada rígida nos recalques do radier pela rotina da autora, Vitor e Danziger (2021). .....	88
Tabela 7. Recalques de grupos de estacas para duas alternativas de transferência de carga, Vitor e Danziger (2021). .....	90
Tabela 8. Solução de radier estaqueado para 2 alternativas de transferência de carga, Vitor e Danziger (2021). .....	90
Tabela 9. Solução de radier estaqueado considerando um limite rígido muito profundo, Vitor e Danziger (2021). .....	92
Tabela 10. Cargas aplicadas nos 3 casos apresentados (Poulos et al., 1997). .....	93
Tabela 11. Parâmetros utilizados nas análises do caso do radier sobre 9 e 15 estacas (Poulos et al., 1997). .....	93
Tabela 12. Valores de $\eta$ , Rosa (2005) .....	112
Tabela 13. Quadro comparativo de cargas nos pilares considerando apoios fixos. ....	113
Tabela 14. Comparação entre os valores de recalque sem interação e considerando interação por Rosa (2005) e pela autora. ....	115
Tabela 15. Quadro comparativo de cargas nos pilares sem considerar e considerando a interação com a estrutura, valores de Rosa (2005) e da autora.....	118
Tabela 16. Acréscimo / alívio nas cargas dos pilares para o modelo com apoio fixo e para o modelo visco-elástico. ....	120
Tabela 17. Solução com parte em Radier estaqueado, sem interação e com interação solo x estrutura, após os 20 anos.....	126
Tabela 18. Valores de distorção angular; Rosa (2005) em fundação direta e Vitor (2023) com radier estaqueado na linha D. ....	129

Tabela 19. Segunda solução em fundações mistas, radier estaqueado nas linhas C e D.....	132
Tabela 20. Valores de distorção angular; Rosa (2005) em fundação direta e pela autora com radier estaqueado na linha D, e nas linhas C e D. ....	134
Tabela 21. Resultados da análise, Costa (2003).....	141
Tabela 22. Valores de módulos de elasticidade ajustados, Costa (2003) .....	143
Tabela 23. Valores de recalque do projeto original e sua comparação à solução alternativa em radier estaqueado com 25 estacas (recalque na base dos pilares) .	146
Tabela 24. Valores de recalque do projeto original comparados à alternativa em radier estaqueado com 25 e 17 estacas (recalques na base dos pilares).....	148
Tabela 25. Comparação dos modelos de radier estaqueado.....	150
Tabela 26. Valores de recalque considerando o projeto original, o radier estaqueado com 25 e com 17 estacas e ainda o radier sem estacas.....	153
Tabela 27. Cargas para: coluna 2, apoios rígidos, Costa (2003); coluna 3, obtida pela autora em sua primeira iteração; coluna 4, obtida pela autora em sua segunda iteração .....	156
Tabela 28. Recalques encontrados pela autora para o radier estaqueado para as cargas de Costa (2003) em apoios indeslocáveis, coluna 2. Recalques estimados atualizados após primeira redistribuição das cargas (primeira iteração) da interação solo x estrutura, coluna 4. ....	157
Tabela 29. Comparação das estimativas de recalque em mm.....	161



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

COPPE	Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia
CPT	Cone Penetration Test
DMT	Ensaio Dilatômetro de Marchetti
ELS	Estado Limite de Serviço.
ELU	Estado de Limite Último
MEF	Métodos dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
PGECIV	Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil
PRF	Piled Raft Foundation
SPT	Standard Penetration Test
SPT	Standard Penetration Test
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense
UERJ	Universidade Estadual do Rio de Janeiro
UFF	Universidade Federal Fluminense
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UNB	Universidade de Brasília
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	19
<b>Motivação e objetivos</b> .....	20
<b>Estrutura da Tese</b> .....	21
<b>1. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA</b> .....	24
<b>1.1 Tipos de estacas e condições de subsolo adequados ao uso de radier estaqueado</b> .....	28
<b>1.2. Concepção de projeto de grupo de estacas reforçado pelo radier</b> .....	32
1.2.1. <u>Modelos simplificados para a determinação das cargas transferidas ao radier e às estacas e comportamento do radier estaqueado</u> .....	33
1.2.2. <u>Interação entre as estacas e o radier</u> .....	41
1.2.3 <u>Locação adequada das estacas e número de estacas otimizado</u> .....	45
1.2.4. <u>Radier estaqueado compensado</u> .....	49
<b>1.3. Concepção de projeto de radier reforçado por grupo de estacas</b> .....	50
<b>1.4. Contribuição de Randolph (1994)</b> .....	51
1.4.1. <u>Proposta para fundação direta (recalque e rigidez do radier)</u> .....	51
1.4.2. <u>Método de Randolph para estaca isolada</u> .....	55
1.4.3. <u>Método de Randolph para um grupo de estacas</u> .....	56
1.4.4. <u>A resposta para um grupo de estacas, exemplo de caso</u> .....	58
1.4.5. <u>Método de Randolph para um radier estaqueado</u> .....	61
<b>2. PROPOSTA SIMPLIFICADA DE SOLUÇÃO</b> .....	68
<b>2.1 Premissas Básicas</b> .....	68
<b>2.2 Rotina para a fundação em radier estaqueado, em etapas</b> .....	71
<b>3. APLICAÇÃO DA ROTINA A CASOS DOCUMENTADOS NA LITERATURA</b> .....	77
<b>3.1. Caso 1: Campinas – São Paulo – Garcia (2015)</b> .....	77
<b>3.2. Caso 2: Aichi Prefecture – Japão – Yamashita et al. (2011)</b> .....	87
<b>3.3. Caso 3: Caso Hipotético – Poulos et al. (1997)</b> .....	92
<b>4. ANÁLISE DE UM CASO DE OBRA ENVOLVENDO DANOS ESTRUTURAIS</b> ...	96
<b>4.1. Características gerais da edificação</b> .....	97
<b>4.2. Histórico dos problemas verificados</b> .....	98
<b>4.3. Reconstituição do caso em Fundações Diretas</b> .....	104
4.3.1. <u>Estimativa de recalques</u> .....	104

4.3.2. <u>Modelo estrutural da edificação</u> .....	105
4.3.3. <u>O modelo de Kelvin</u> .....	108
4.3.4. <u>Condições de contorno aplicadas ao modelo</u> .....	109
4.3.5. <u>Análise dos resultados considerando os apoios indeslocáveis</u> .....	112
4.3.6. <u>Análise dos resultados considerando a interação com a estrutura</u> .....	114
<b>4.4. Alternativa de fundação: radier estaqueado</b> .....	121
4.4.1. <u>Verificação dos valores extremos de distorção para a solução alternativa com radier estaqueado na linha D.</u> .....	128
<b>5. ANÁLISE DE UM CASO DE OBRA DE FUNDAÇÃO PROFUNDA COM SUBSTITUIÇÃO POR UM RADIER ESTAQUEADO</b> .....	136
<b>5.1. Características gerais da edificação e do solo de fundação</b> .....	137
<b>5.2. Modelo numérico tridimensional</b> .....	138
<b>5.3. Projeto original de fundações</b> .....	139
<b>5.4. Alternativa em radier estaqueado</b> .....	142
5.4.1. <u>Primeira alternativa em radier estaqueado</u> .....	144
5.4.2. <u>Segunda alternativa em radier estaqueado</u> .....	147
5.4.3. <u>Terceira alternativa em radier estaqueado</u> .....	149
5.4.4. <u>Quarta alternativa em radier estaqueado</u> .....	149
<b>5.5. Interação da fundação em radier estaqueado com a estrutura</b> .....	155
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO</b> .....	162
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	166
<b>APÊNDICE A-</b> Aplicação de Bhartiya et al (2020).. .....	174
<b>APÊNDICE B-</b> Exemplo de entrada de dados no programa Aoki-Lopes... .....	175
<b>APÊNDICE C-</b> Planilha em Excel do algoritmo... .....	176
<b>APÊNDICE D-</b> Aplicação da metodologia de placa rígida.....	178
<b>APÊNDICE E-</b> Aplicação da metodologia de placa flexível.....	180
<b>APÊNDICE F-</b> Aplicação da metodologia de placa flexível com programa Aoki-Lopes... .....	182
<b>APÊNDICE G-</b> Aplicação da metodologia de Randolph (1994)... .....	185
<b>APÊNDICE H-</b> Estimativas Poulos et al. 1997... .....	187
<b>APÊNDICE I-</b> Estimativas dos coeficientes de rigidez e viscosidade no caso de Vitória, Rosa 2005... .....	189
<b>ANEXO A-</b> Método Aoki-Lopes. ....	191
<b>ANEXO B-</b> Plantas edificação residencial do caso em Vitória, item 4.1. ....	199

<b>ANEXO C-</b> Plantas edificação residencial do caso no Recreio, item 5.1.. .....	209
---	-----

## INTRODUÇÃO

A construção de edifícios, cada vez mais esbeltos, produz cargas estruturais muito altas e concentradas nas fundações, necessitando assim de blocos com grande quantidade de estacas ou estacas com seções robustas.

Na situação de grandes grupos de estacas, muitas das normas vigentes, incluindo a brasileira (NBR 6122), não contemplam a possibilidade de considerar a influência da transferência da carga ao solo pela base do bloco no dimensionamento geotécnico. Porém, há vários casos documentados na literatura em que a contribuição do bloco, no aumento da capacidade de carga do grupo, e a contribuição das estacas, na redução dos recalques de radiers, foram também considerados. Nestes casos os elementos de fundações são híbridos e conhecidos como radier estaqueado.

Radier estaqueado é, portanto, um tipo de fundação mista, composta por um elemento horizontal (o radier) e outros verticais (as estacas). A transferência das cargas estruturais ao solo se faz concomitantemente pela base do elemento horizontal, como nas fundações rasas, e ainda ao longo do fuste e da ponta do elemento vertical, como em fundações profundas.

Sabe-se que as estacas que estão sob qualquer bloco rígido e, em particular, sob um radier, interagem entre si. O comportamento de uma estaca isolada difere do comportamento de uma estaca pertencente a um grupo, sobretudo se este grupo estiver “coroadado” por um elemento de fundação superficial que contribua também na capacidade de carga do sistema.

A presente pesquisa faz parte da linha de Interação Solo- Estrutura, que até o presente momento contemplou a análise de uma série de casos de instrumentação de recalques e cargas em pilares desde o início da construção, reunindo uma tese de doutorado e 7 dissertações de mestrado. Esta linha de pesquisa foi iniciada, no Rio de Janeiro na UFRJ e na UFF e tem tido continuidade na UERJ. No Brasil, a UFPE, a UNB, a UENF e a UNICAMP também têm desenvolvido pesquisas nesta área.

Nas pesquisas até então desenvolvidas na UFF e UERJ, estruturas em fundações diretas e em fundações profundas foram monitoradas e acompanhadas e os efeitos de interação solo-estrutura avaliados, revelando o mecanismo de redistribuição de cargas e uniformização dos recalques. No caso em fundações profundas, apenas a contribuição das estacas tem sido considerada na interação solo-estrutura. Na presente pesquisa, pretende-se revisitar alguns destes casos de forma

a considerar o efeito de incorporar, no estudo, também a contribuição da resistência mobilizada sob o bloco, na interação.

As publicações de radier estaqueados consultadas até o presente momento mostram o estudo da interação entre o radier e as estacas com o maciço suporte, mas não inclui a interação da fundação em radier estaqueado com a estrutura. Para tal, pretende-se elaborar uma metodologia simplificada, para o estudo do radier estaqueado, de forma a viabilizar sua análise conjunta à estrutura. A NBR 6122 (2022) preconiza, em seu item 5.5 que: “Em estruturas nas quais a deformabilidade das fundações pode influenciar na distribuição de esforços, deve-se estudar a interação solo x estrutura ou fundação estrutura.” Para que a influência conjunta estaca x radier x solo seja contemplada num estudo de interação com a estrutura, apenas uma metodologia simplificada será capaz de fornecer uma resposta aproximada em prazo compatível com a demanda de uma solução rápida para a prática corrente de projeto de fundações. Por outro lado, a metodologia que se pretende desenvolver deverá ser capaz de reproduzir o comportamento de casos publicados na literatura.

A principal contribuição desta pesquisa é, assim, a elaboração de uma rotina simples, sua calibração com casos documentados na literatura e a posterior aplicação da rotina a casos já documentados, mas incorporando a interação solo x estrutura num reprojeto das fundações, contemplando o uso de radier estaqueado.

### **Motivação e objetivos**

O tema interação solo x estrutura tem merecido o interesse de grande número de profissionais, uma vez que, na maioria dos casos, o projeto estrutural e o de fundações são desenvolvidos separadamente. Para o engenheiro estrutural, os apoios costumam ser considerados como indeslocáveis. Por outro lado, o projetista geotécnico avalia os recalques para solicitações que não correspondem àquelas que efetivamente irão ocorrer. O estudo da interação solo x estrutura objetiva um melhor conhecimento das cargas reais, após redistribuição, e dos recalques, submetidos a uma uniformização. Se nas fundações diretas e profundas se lida com incertezas em relação às solicitações e aos recalques, no caso de fundações mistas esta incerteza deve ser ainda maior. Por outro lado, o emprego de fundações mistas pode representar uma economia grande nas obras de maior porte.

O projetista deve visar uma maior confiabilidade no comportamento da fundação aliada à redução dos custos, que é sempre uma questão fundamental. A

escolha da melhor alternativa quanto à confiabilidade e custo não é simples de ser resolvida. A dificuldade de escolha ainda esbarra no fato de que o mau comportamento das fundações consiste na causa principal das graves patologias em estruturas.

A motivação para a escolha deste tema resulta do desafio em introduzir mais uma variável neste estudo, que é a parcela do carregamento que será transmitido ao radier e seu efeito no comportamento das fundações mistas e do conjunto, solo x estrutura.

O objetivo desta pesquisa é contribuir para este tema, propondo uma metodologia de fácil acesso, que possa ser aplicada a casos simples do dia a dia de projeto, de forma a possibilitar seu emprego mais extenso. Para esta aplicação, a metodologia simples será calibrada a casos publicados. Após calibração, a rotina será aplicada ao reprojeto de dois casos bem documentados como alternativa de solução: o primeiro caso trata de uma alternativa visando melhoria do comportamento e o segundo na otimização da solução da fundação.

### **Estrutura da Tese**

Após esta parte introdutória, no Capítulo 1 é apresentada a pesquisa bibliográfica suscinta, contendo as contribuições clássicas que focam neste assunto. Algumas destas contribuições contemplam metodologias simplificadas que, a princípio, poderiam ser utilizadas nas análises da presente pesquisa. No entanto, as análises simplificadas desenvolvidas anteriormente foram estabelecidas, em geral, para perfis de solos homogêneos, que raramente são encontrados nas situações da prática. Além disso, não consideram diretamente a influência da fronteira rígida, particularmente relevante quando a contribuição de todas as fundações da edificação é verificada na estimativa de recalque e na interação solo x estrutura.

O Capítulo 2 ilustra a metodologia que se pretende desenvolver em detalhe nesta pesquisa. Esta metodologia se baseia na utilização da mesma rotina proposta para a estimativa de recalques pelo método de Aoki-Lopes. Embora concebida para grupos de fundações profundas, a rotina pode ser estendida a fundações diretas e à análise de radier estaqueado como um grupo de estacas reforçado pelo radier. A rotina permite a separação da contribuição da carga absorvida pelo bloco e pelas estacas, bem como a estimativa do recalque do radier estaqueado em maciço de solo estratificado, sobrejacente a um horizonte rígido. A escolha do método Aoki-Lopes

nesta rotina se deve ao fato dele incorporar a solução de recalques para solos estratificados, além de contemplar a presença da camada rígida.

O Capítulo 3 apresenta alguns resultados da literatura que foram instrumentados ou que já foram analisados por modelos numéricos mais refinados. A aplicação da rotina desenvolvida nestes casos documentados visou a calibração da rotina, antes de sua aplicação aos casos escolhidos do banco de dados já analisados nesta linha de pesquisa. As diferentes soluções simplificadas de radier estaqueado, incluindo a rotina desenvolvida nesta pesquisa, serão comparadas entre si e às medições experimentais.

O Capítulo 4 estuda um caso do banco de dados existente, aplicando a rotina desenvolvida, numa situação em que o emprego de fundação direta ocasionou graves patologias estruturais decorrentes do mau comportamento das fundações. Este caso foi inicialmente estudado por Rosa (2005). O reprojeto em fundações em radier estaqueado, em parte da construção, mostrou que algumas estacas, se introduzidas na construção, levariam a um comportamento satisfatório, sem ocorrência de danos. Após reconstituir a análise original de Rosa (2005) que previu com acurácia a localização dos danos e sua extensão, foi analisado o reprojeto das fundações utilizando solução em radier estaqueado. Neste estudo foi incluída a interação da fundação em radier estaqueado com a estrutura. A adoção de parte da fundação em radier estaqueado resultaria numa alternativa com pequeno custo e comportamento satisfatório.

O Capítulo 5 estuda outro caso de obra em que o reprojeto em radier estaqueado visou um estudo da otimização do número de estacas em relação ao que foi executado. Os recalques monitorados desta obra, desde o início da construção, foram muito reduzidos. Porém, se adotado apenas um radier, como fundação direta, os recalques seriam excessivos. A aplicação da solução em radier estaqueado no reprojeto ilustra o grande espaço existente para a otimização do número de estacas e redução do custo. Neste caso, o reprojeto consistiu na retirada de uma parte das estacas do trecho central da edificação e substituição por um radier estaqueado, valendo-se da contribuição do bloco numa fundação mista em radier estaqueado. O fato deste caso de obra ter sido instrumentado foi relevante por já contemplar a calibração do modelo de compressibilidade do solo. Foi analisada a interação do reprojeto otimizado com a estrutura.



O Capítulo 6 contém as principais conclusões e as sugestões para pesquisas futuras.

Os anexos reúnem informações geotécnicas e dados das obras retiradas das pesquisas anteriores, com o projeto original, bem como algumas estimativas realizadas que foram incluídas com a intenção de ilustrar e detalhar, ao leitor, todos os passos desenvolvidos.

## 1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

O emprego do radier estaqueado tem grande relevância quando se pode contar com um solo superficial de adequada capacidade de suporte. Este tipo de fundação mista tem sido utilizado em várias situações de edifícios muito altos e para cargas elevadas.

Conhecido na literatura internacional como PRF (piled raft foundation) este tipo de fundação é mais vantajoso quando comparado ao radier atuando somente como fundação direta e ao grupo de estacas, em que é desprezado o apoio oferecido pelo solo superficial. A locação das estacas, diâmetro e comprimento podem ser estrategicamente escolhidos de forma a otimizar o projeto de fundações, minimizando o recalque máximo e o recalque diferencial aos valores tolerados pela estrutura, sem custo excessivo, Mandolini et al. (2005), de Sanctis e Russo (2008), de Sanctis et al. (2002). A redução de custos é considerável, quando se pondera a redução do número de estacas, a espessura do radier e o consumo de armadura do bloco. Com a redução do número de estacas, o prazo da obra destinado às fundações é também reduzido.

A análise do PRF não é simples, uma vez que envolve a interação entre o radier, as estacas e o maciço de solo, tanto na estimativa das reações nos apoios (sob o radier e estacas), como nos esforços no radier e comportamento do maciço na estimativa de recalques do conjunto.

Modelos físicos em centrífuga foram investigados por El Garhy et al. (2013), Alnuaim et al. (2015), Park e Lee (2015), entre outros. No entanto, para capturar de forma adequada o comportamento experimental das fundações em radier estaqueado, ensaios em escala real oferecem o melhor potencial de avaliação de seu comportamento.

No Brasil, algumas pesquisas experimentais desenvolvidas na UFPE, Soares (2011), Soares et al. (2015), Soares et al. (2021), na UNICAMP em 2015, Garcia, (2015), Garcia e Albuquerque (2019), na UNB, Bernardes (2023), Bernardes et al. (2023), entre outras contribuições, ilustram o interesse do tema em nosso país. Outras contribuições relevantes no país foram desenvolvidas em análises numéricas de radiers estaqueados, como em Freitas (2018).

Alguns métodos simplificados consideram as estacas como redutoras de recalques como Burland et al. 1977. Com a capacidade de carga provida pelo radier,

as estacas são adicionadas para controlar os recalques excessivos. Outros métodos simplificados, que serão mostrados mais adiante, consideram as cargas particionadas entre as estacas e o radier, como Randolph (1994) e Poulos (2001).

Outros autores propuseram análises numéricas, como Clancy e Randolph (1993), Russo (1998), Horikoshi e Randolph (1988), Nguyen et al. (2013), Comodromus et al. (2016). Métodos mais rigorosos como o método de elementos de contorno e o MEF 3D, com emprego de modelos constitutivos mais adequados, geometria acurada do problema, podem ser incorporados na análise para cobrir todos os aspectos do comportamento do radier. Porém, requerem resultados de ensaios de laboratório cuidadosos que não são, em geral, disponíveis na maior parte dos projetos de fundações da prática.

Os métodos mais simples são, em geral, úteis para projetos correntes, mas em geral não consideram a rigidez estrutural real do radier.

Bhartiya et al. (2019) desenvolveram análises lineares pelo MEF numa série de radiers isolados, grupos de estacas e radiers estaqueados, com diferentes geometrias e configuração de estacas para determinar a rigidez destes radiers, grupos de estacas e radiers estaqueados. Desenvolveram estudos paramétricos em conjunto com regressões lineares para estabelecer equações para estimativas da rigidez do radier estaqueado pela combinação da rigidez do radier e do grupo de estacas. Recalques médios e máximos de radiers estaqueados foram estimados usando as equações propostas, validadas por análises numéricas e experimentais

O capítulo 56 do manual do ICE (Institution of Civil Engineers) que trata de radiers e de radiers estaqueados, de O'Brien et al. (2012), reúne e resume de forma organizada resultados da experiência dos autores e dos principais estudos neste tema. A autora irá seguir a ordem de apresentação destes estudos, inserindo comentários e complementos da revisão bibliográfica de forma a focar nos aspectos mais relacionados à pesquisa que ora se apresenta.

O'Brien et al. (2012) distinguem duas filosofias de projeto: grupo de estacas reforçado pelo radier e radier reforçado por estacas.

No primeiro caso, as estacas e o radier irão trabalhar numa faixa de comportamento pseudo-elástico. Nesta situação, a capacidade de carga das estacas do grupo não será totalmente mobilizada, na situação de serviço. O parâmetro que governa o comportamento é a rigidez relativa entre o grupo de estacas e o radier. Portanto, é importante a previsão do limite inferior e superior da rigidez do radier e do

grupo de estacas. Embora as estacas devam ser muito mais rígidas que o radier, absorvendo a maior parcela do carregamento, o radier pode ser projetado para resistir uma parte da carga de serviço. É nesta linha que se enquadra a presente pesquisa.

No caso do radier reforçado por estacas, as estacas são projetadas para mobilizar toda a sua capacidade de carga. O radier costuma suportar a maior parte do carregamento de projeto. As estacas costumam ser locadas sob as colunas mais pesadas da estrutura. Nesta situação de projeto, é importante se prever o limite inferior e superior da capacidade de carga das estacas com uma certa confiança e a curva carga x recalque deve ser dúctil, ou seja, a resistência da estaca deve ser mantida a níveis de recalques elevados, da ordem de 50 a 100mm.

Estes diferentes tipos de comportamento são ilustrados na Figura 1. O grupo de estacas convencional, curva (2), é muito rígido e seu recalque, para a carga de trabalho, é muito menor do que o recalque admissível. O grupo de estacas reforçado pelo radier (curva 3), é também relativamente rígido, e este comportamento é alcançado com um número de estacas menor do que o do grupo de estacas. Já o radier reforçado por estacas (curva 4) apresenta muito maior recalque para a estrutura. A curva carga x recalque para o radier reforçado por estacas revela um comportamento não linear. A Figura 1 ilustra que se o recalque admissível for muito pequeno, o radier reforçado por estacas dificilmente poderá ser adotado. Portanto, a definição de um recalque admissível realístico para a estrutura é muito importante.

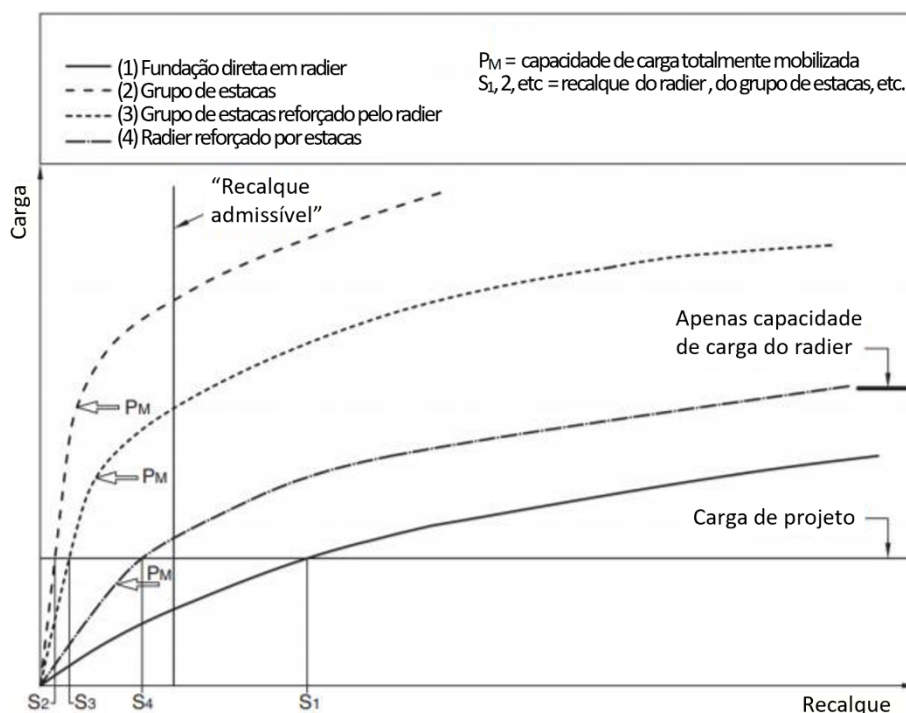


Figura 1. Comportamento carga x recalque de radiers, grupo de estacas e diferentes tipos de radier estaqueados, adaptado de O’Brien et al. (2012).

Burland et al. (1977) usaram a denominação “Estacas redutoras de recalque” para descrever o conceito do radier reforçado por estacas.

O’Brien et al. (2012) ressaltam que a concepção de projeto e os métodos utilizados para um grupo de estacas reforçado pelo radier e para um radier reforçado por estacas são muito diferentes. Como ilustra a Figura 2, existe uma zona intermediária entre grupo de estacas reforçado pelo radier e para um radier reforçado por estacas que deve ser evitada. Observa-se que na zona intermediária, compreendendo uma variação do fator de segurança das estacas entre 1,0 e 1,3, o comportamento da fundação mista varia de forma abrupta.

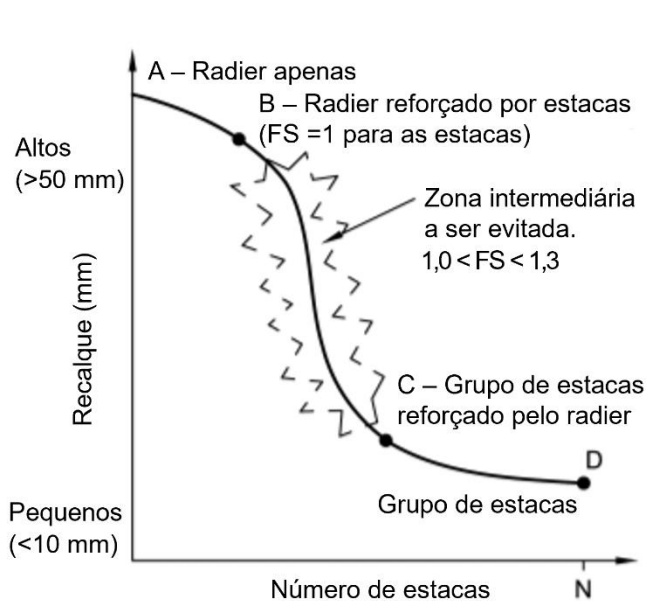


Figura 2. Grupo de estacas reforçado pelo radier e radier reforçado por estacas - zona intermediária que deve ser evitada, adaptado de O'Brien et al. (2012).

O'Brien et al. (2012) salientam que para um radier reforçado por estacas, a capacidade de carga global não é o condicionante do projeto, e as estacas são utilizadas para reduzir os recalques ou as tensões cisalhantes no radier. Nestes casos não há necessidade de se somar a capacidade de carga do radier à contribuição das estacas. Todavia, para o grupo de estacas reforçado pelo radier, a principal vantagem da consideração de ambos os componentes (estacas e radier) é que a capacidade de carga complementar do radier permite que, com um número reduzido de estacas, se obtenha uma mesma margem de segurança. Naturalmente que a resistência mobilizada pelo radier deverá ser compatível com o comportamento das estacas, devendo ser reduzida em razão da compatibilidade dos deslocamentos entre as suas componentes (equação 1, item 1.2.1). Na presente pesquisa se tratará apenas do grupo de estacas reforçado pelo radier.

### 1.1. Tipos de estacas e condições de subsolo adequados ao uso de radier estaqueado

Os diferentes padrões de comportamento das curvas carga x recalque são importantes ao grupo de estacas reforçado pelo radier, enquanto a variabilidade da capacidade de carga das estacas é o principal condicionante do projeto de um radier

reforçado por estacas. Variações na capacidade de carga e rigidez são comumente observadas em uma dada obra, principalmente em decorrência de variações de cuidados na execução ou na variabilidade do subsolo. Alguns exemplos são ilustrados nas Figuras 3 a e b.

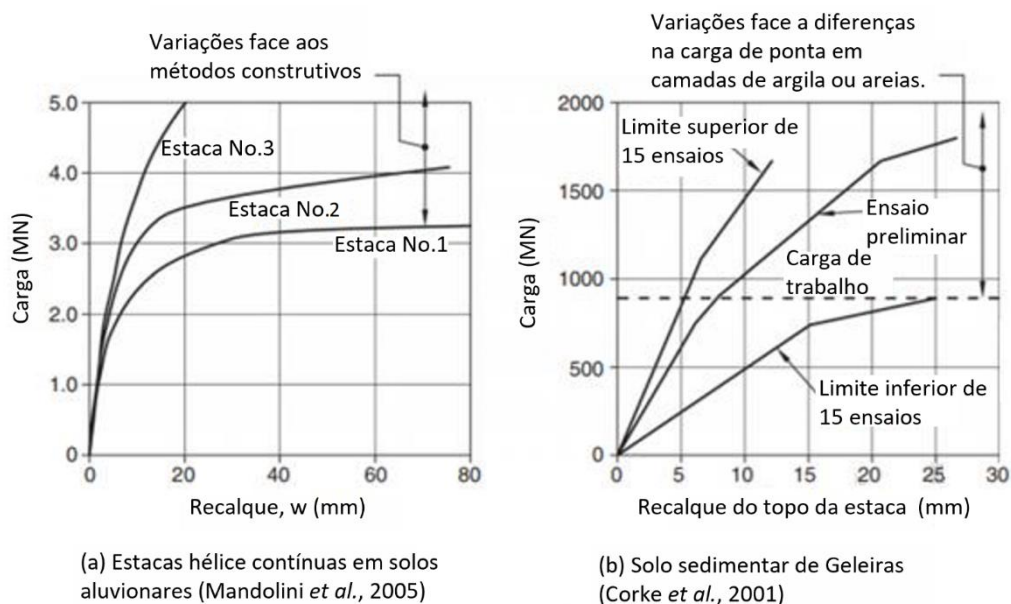


Figura 3. Exemplos de curvas carga x recalque: a) estacas hélice contínuas em solos aluvionares e b) estacas cravadas em aterros, adaptado de O'Brien *et al.* (2012).

No caso das estacas hélice contínuas em solo aluvionar, um valor de rigidez uniforme pode ser observado, para pequenos deslocamentos, mesmo para diferenças muito grandes na capacidade de carga, em face de diferenças em métodos construtivos. Contudo, no caso de estacas cravadas em perfil errático, como do caso da Figura 3.b, que varia entre areia argilosa e argila arenosa, tanto a rigidez como a capacidade de carga variam de forma acentuada. Esta variação é devida, principalmente, às grandes diferenças na capacidade de carga de ponta quando a estaca está assente em areia argilosa ou argila arenosa, por exemplo.

A Figura 4 ilustra que quando o fator de segurança em relação à carga absorvida por atrito é superior a cerca de 1,2 - 1,3, o recalque da estaca se torna muito menor e com menor variabilidade. Portanto, não é o fator de segurança global (ponta e atrito), mas o fator de segurança em relação ao atrito que controla, de fato, a rigidez da estaca. Para estacas de ponta, tanto a sua rigidez como a sua capacidade de carga tende a ser mais variável do que estacas de atrito. Isso decorre do fato da resistência

de ponta ser mais vulnerável a variações pontuais nas condições geotécnicas e nos procedimentos executivos. Cabral (2008) apresentou resultados que ilustram bem a pequena variabilidade da resistência de atrito lateral em relação à de ponta. O'Brien et al. (2012) recomendam, portanto, que antes de optar pelo uso de um grupo de estacas reforçado pelo radier ou radier reforçado por estacas, é importante considerar o tipo de estaca que será utilizado, a natureza do perfil geotécnico e as possíveis variações na capacidade de carga das estacas, principalmente para radiers reforçado por estacas, além da rigidez e dos métodos que serão utilizados para minimizar estas variações. Um grupo de estacas reforçado pelo radier poderá tolerar muito mais as variações no perfil geotécnico e no comportamento das estacas. Por outro lado, um radier reforçado por estacas geralmente é mais econômico do que um grupo de estacas reforçado pelo radier.

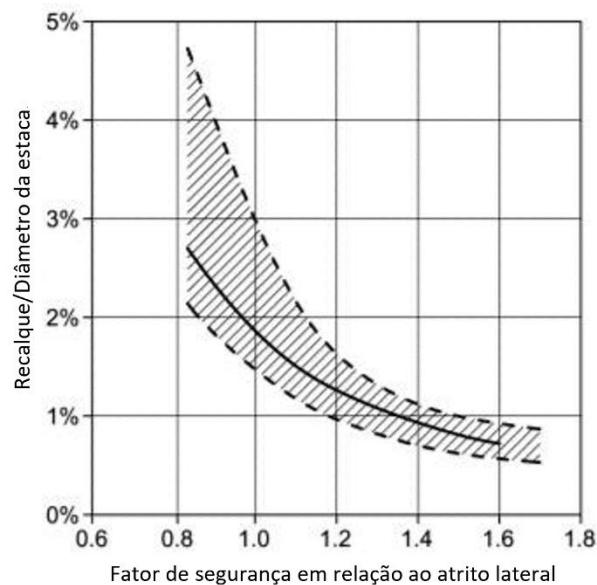


Figura 4. Recalque da estaca versus fator de segurança em relação à resistência por atrito lateral, adaptado de O'Brien et al. (2012).

A Figura 5 ilustra as duas situações, um grupo de estacas reforçado pelo radier e um radier reforçado por estacas, bem como algumas recomendações de seu uso em função do perfil geotécnico. O grupo de estacas reforçado pelo radier pode ser utilizado em condições geotécnicas muito mais amplas, desde que a natureza do solo sob o radier seja suficientemente resistente para garantir que o radier possa absorver uma parcela da carga de projeto ao longo da vida útil da obra. Tanto estaca de ponta como de atrito pode ser utilizada. Para um radier reforçado por estacas é desejável



que se tenha condições de subsolo relativamente uniformes, como depósitos relativamente profundos de argilas rijas e homogêneas.

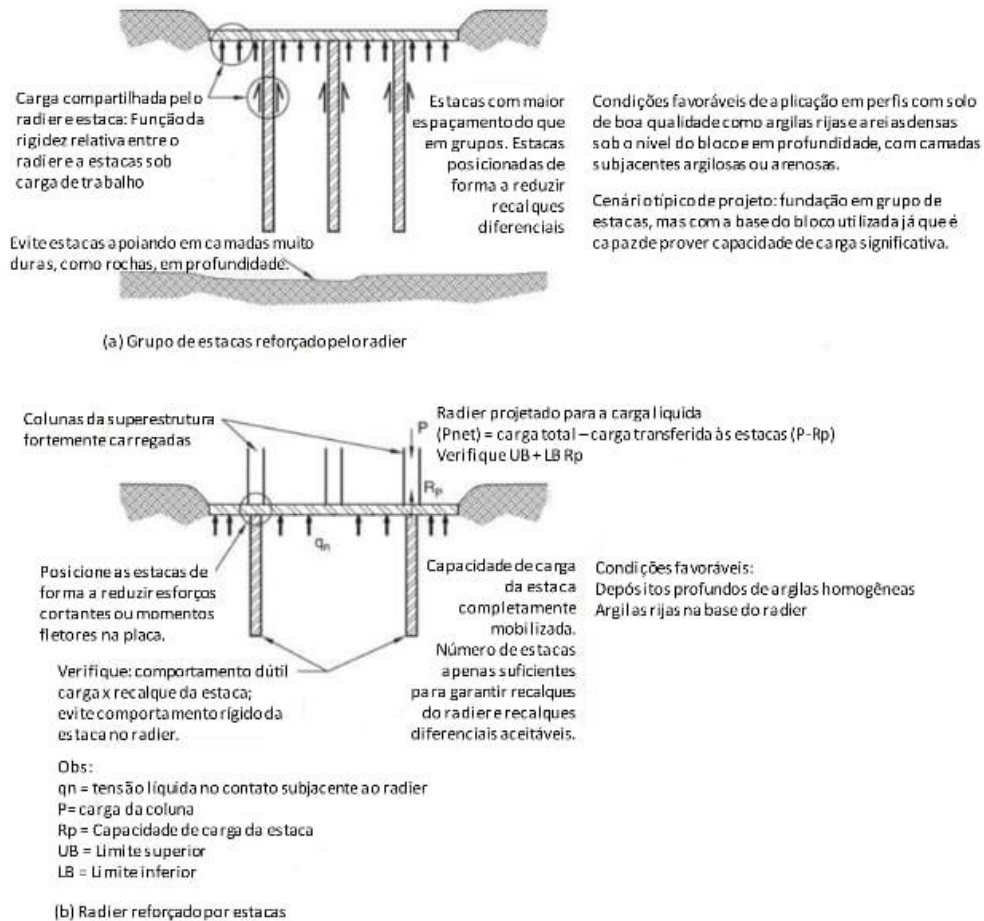


Figura 5. Grupo de estacas reforçado pelo radier versus radier reforçado por estacas: a) grupo de estacas reforçado pelo radier b) radier reforçado por grupo de estacas, adaptado de O'Brien et al. (2012).

O'Brien et al. (2012) observam que o comportamento a longo prazo de radiers estaqueados tem sido satisfatório e seu uso tem resultado em economia significativa comparada com projetos convencionais. Os citados autores ressaltam que existem algumas condições que se tornam desfavoráveis para o emprego de radiers estaqueados, que incluem:

- (i) Perfis de solo contendo aterros lançados, argilas moles ou areias fofas próximo à base do radier. Neste caso, o radier não apresentará rigidez suficiente ou capacidade de carga comparável com a das estacas.

- (ii) Locais onde o subsolo seja vulnerável a sofrer recalques excessivos devido a causas externas.

## **1.2 Concepção de projeto de grupo de estacas reforçado pelo radier**

Poulos (2001) relacionou as principais etapas do projeto:

- (i) Projeto conceitual, etapa em que o projetista deve verificar a viabilidade de se utilizar um radier estaqueado e avaliar o número de estacas que satisfaça, de forma geral, os requisitos de projeto (recalques e capacidade de carga).
- (ii) Projeto preliminar, etapa em que o projetista seleciona a posição das estacas, suas principais características (comprimento, diâmetro, etc.) e o recalque diferencial do radier.
- (iii) Projeto executivo, etapa de finalização do número ótimo, locação, configuração das estacas e cálculo detalhado da distribuição dos recalques, os momentos fletores, dos cortantes no radier, das cargas e momentos nas estacas.

Poulos (2001) salienta que as etapas (i) e (ii) devem ser baseadas num estudo das condições do perfil geotécnico, tipo de estaca mais adequado e em cálculos simplificados. O projeto executivo irá requerer um programa analítico apropriado, que leve em conta a interação entre estacas, radier, solo e superestrutura. Este programa analítico pode variar de uma versão modificada de um enfoque iterativo e interativo de molas que simulem o comportamento do radier, até uma modelagem 3D não linear. Poulos (2001) observa que, mesmo quando uma modelagem mais refinada é utilizada, haverá dois modelos distintos, um focando especialmente no comportamento estrutural e outro no comportamento do solo.

O objetivo desta pesquisa é focar apenas o grupo de estacas reforçado pelo radier com uma concepção simplificada, com um modelo elástico do comportamento da fundação mista, capaz de ser acoplado a um modelo 3D estrutural para uma análise conjunta da interação do solo (transmitindo as tensões através de um sistema de radier estaqueado) com a estrutura.

Poulos (2001) ainda destaca que por ocasião do projeto conceitual, etapa (i), é essencial se considerar, inicialmente:

- (i) O comportamento do radier sem as estacas
- (ii) O comportamento do grupo de estacas sem o radier

Caso a capacidade de carga do radier seja apenas uma fração pequena da requerida ou o radier sensível a recalques excessivos por ação de movimentos adversos do subsolo, independentemente das cargas estruturais aplicadas, a solução natural que se impõe é de um grupo de estacas convencional. Por outro lado, se o radier puder ser assente num horizonte de razoável capacidade de suporte, que garanta uma resistência a longo prazo, então o radier pode ser utilizado para reduzir o número de estacas e alcançar os critérios de projeto (capacidade de carga e recalque). A parte relevante do processo é verificar a parcela da carga transferida ao radier e às estacas para a faixa de carregamento presente na vida útil da estrutura.

A seguir serão apresentados alguns modelos simplificados disponíveis na literatura para a verificação da parcela de carga transferida ao radier e às estacas. A autora da presente pesquisa destaca que os modelos disponíveis consideram o perfil de solo como um meio homogêneo e isotrópico.

### 1.2.1 Modelos simplificados para a determinação das cargas transferidas ao radier e às estacas e comportamento do radier estaqueado

#### ***Verificação da capacidade de carga***

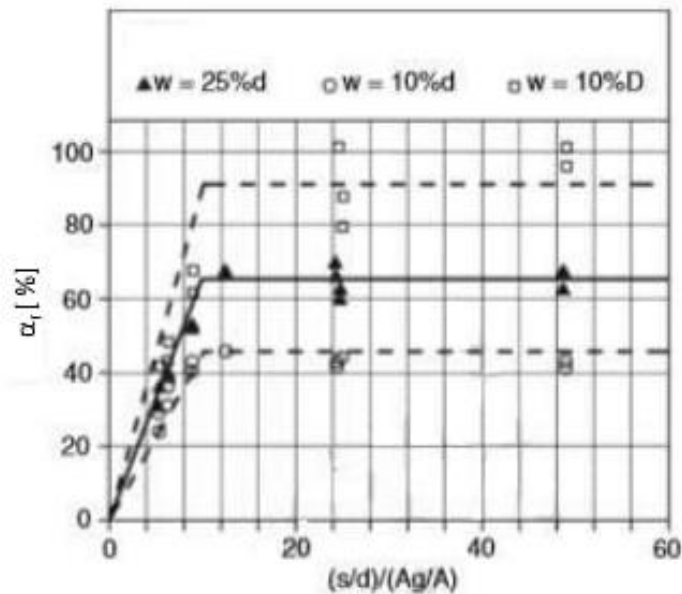
Para a verificação da capacidade de carga vertical, esta deve ser considerada a menor entre:

A capacidade de carga de um bloco contendo as estacas e o radier, mais a parcela da capacidade de carga do radier além dos limites do perímetro do grupo de estacas.

A capacidade de carga compartilhada entre a parcela correspondente ao radier, somada à das estacas, como indicada na equação 1.

$$Q_{PR} = \alpha_R Q_R + \alpha_P Q_P \quad (1)$$

Mandolini et al. (2005) indicaram que a ruptura tipo (i) é a mais provável quando o espaçamento entre estacas é pequeno, abaixo de um valor  $S_{crítico}$ , com  $S_{crítico}/d$  variando de 2,5 (para um grupo de 3x3 estacas) a 3,5 (para um grupo de 9x9 estacas), sendo  $d$  o diâmetro das estacas. Para espaçamentos entre estacas superiores a  $S_{crítico}$ , a capacidade de carga geotécnica do radier estaqueado,  $Q_{PR}$ , deve ser o menor valor entre aquela da equação (1), com  $\alpha_R$  variando de acordo com a Figura 6, e  $\alpha_P=1$ .



Obs.:

w = recalque do radier estacado. d = diâmetro da estaca

D = diâmetro ou largura do radier

s = espaçamento entre estacas

$A_g$  = área do grupo de estacas

A = área total do radier

Figura 6. Fator  $\alpha_R$  da capacidade de carga de radier estacado versus espaçamento e área (modificado de Mandolini et al. 2005).

O'Brien et al. (2012) destacam que a Figura 6 de Mandolini et al. (2005) mostra que o valor de  $\alpha_R$  depende da definição de ruptura, ou seja, da magnitude do recalque do radier estacado na "ruptura convencional". O'Brien et al. (2012) recomendam que um valor limite de  $\alpha_R$  de 0,65 é usualmente adequado para a verificação de ruptura para um recalque do radier estacado de 25% de d, embora para espaçamentos típicos e geometrias típicas de grupo o valor de  $\alpha_R$  esteja compreendido entre 0,3 e 0,5, ou:

$$Q_{PR} = f_{RP} (Q_R + Q_P) \quad (2)$$

Com  $f_{PR}=0,8$  (baseado em Mandolini et al (2005)).

O menor valor entre (1) e (2) deve ser considerado para a capacidade de carga da fundação em radier estacado e utilizado para a verificação do **ELU** (Estado de

Limite Último). A capacidade de carga dos componentes individuais (radier e estacas individuais ou grupo de estacas) não precisa atender às prescrições das normas.

A situação anterior considera o valor de  $\alpha_R$  por ocasião da ruptura (**ELU**). A seguir será considerado o valor de  $\alpha_R$  para a situação de trabalho **ELS** (Estado Limite de Serviço).

Quanto à verificação da partição de cargas na situação de trabalho:

Com base em 22 casos de obra instrumentados, principalmente na argila de Londres e na argila de Frankfurt, Mandolini et al. (2005) forneceram um gráfico que permite obter a porcentagem da carga absorvida pelo radier (%) em função do parâmetro adimensional  $(s/d)/(A_g/A)$ , com  $s$  e  $d$  sendo o espaçamento entre estacas e seu diâmetro, respectivamente,  $A_g$  a área do grupo de estacas (área do bloco contendo o grupo) e  $A$  é a área do radier, Figura 7.

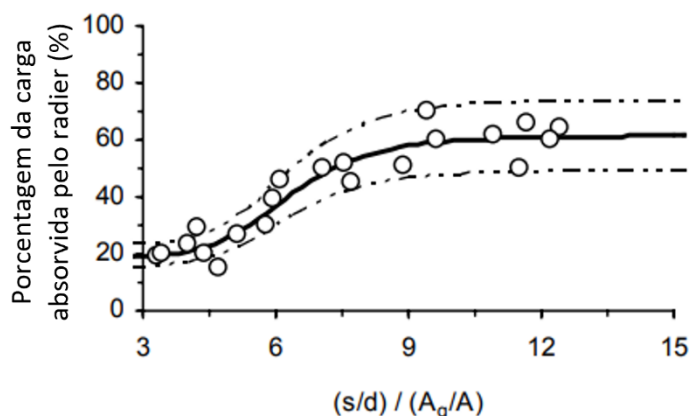


Figura 7. Observações da parcela da carga total absorvida pelo radier, adaptado de Mandolini et al (2005).

A Figura 7 indica que, de modo geral, o radier absorve entre 20 e 50% da carga total do grupo de estacas reforçado pelo radier. Mandolini et al. (2005) recomendam certa cautela quando o radier absorver mais do que 50%.

Alguns aspectos destacados por Mandolini et al. (2005) na aplicação de projetos em radier estaqueados são resumidos a seguir:

**Em relação à avaliação das propriedades do solo e implementação das análises**

De forma a reduzir as incertezas decorrentes da escolha dos parâmetros do solo Mandolini et al. (2005) desenvolveram um procedimento em que a rigidez relativa das camadas do solo é interpretada por ensaios de campo, como CPT, SPT e DMT. Os diferentes valores absolutos da rigidez das diferentes camadas são fixados pelo ajuste do comportamento de provas de carga em estacas isoladas por análises de natureza elástica.

É necessário escolher se o modelo do solo é linear ou não linear. No caso do modelo linear, a rigidez do solo pode ser determinada pelo ajuste dos resultados da análise elástica à tangente inicial da curva carga recalque (análise linear elástica), ou a uma secante à curva correspondente à carga média de serviço da estaca. Uma vez que o modelo do subsolo é fixado e a rigidez de cada camada estabelecida, o mesmo modelo é usado para o grupo de estacas. No caso de um modelo não linear, uma análise incremental é realizada, pela atualização da rigidez em cada etapa. A escolha de uma análise elástica com base em um módulo secante é a mais utilizada e aparentemente a que apresenta resultados mais adequados.

Em relação aos parâmetros do solo, interessante observar que Poulos (2001) cita as correlações de Décourt (1989, 1995), que o autor incorpora em suas estimativas iniciais de projeto em radier estaqueado. A Tabela 1 resume estas correlações e a Tabela 2 os fatores sugeridos para diferentes tipos de solos.

Tabela 1. Correlações de Decourt utilizadas por Poulos (2001).

Verificação	Correlação
Capacidade de carga do radier	$q_{ur} = K_1 N_t$ (kPa)
Atrito lateral unitário no fuste da estaca na ruptura	$f_s = \alpha (2,8 N_s + 10)$ (kPa)
Resistência unitária de ponta da estaca na ruptura	$q_p = K_2 N_b$ (kPa)
Módulo de Young do solo abaixo do radier	$E = 2 N$ (MPa)
Módulo de Young do solo no entorno da estaca	$E = 3 N$ (MPa)

Na Tabela 1  $N_t$  é o valor médio do SPT ( $N_{60}$ ) no trecho até a profundidade correspondente à metade da largura do radier;  $N_s$  é o valor do SPT ( $N_{60}$ ) ao longo do fuste;  $N_b$  é o valor médio do SPT ( $N_{60}$ ) próximo à ponta da estaca;  $K_1$  e  $K_2$  são fatores indicados na Tabela 2 a seguir;  $\alpha = 1$  para estacas de deslocamento em todos os tipos

de solo e estacas sem deslocamento em argilas e 0,5 – 0,6 para estacas sem deslocamento em areias.

A autora da presente tese observou que Poulos (2001) procurou adaptar os valores de Decourt incorporando também a correção da energia, uma vez que Poulos (2001) considera o  $N_{60}$ . Porém, os valores de Decourt, quando ele estende os valores obtidos originalmente para estacas cravadas, com deslocamento, às estacas escavadas ou hélice contínuas, sem deslocamento, são afetados de dois fatores,  $\alpha$  e  $\beta$ , o primeiro para a parcela de atrito e o segundo para a parcela de ponta. Poulos (2001) ao invés de apresentar o fator  $\beta$ , prefere utilizar fatores  $K_2$  distintos para estacas com e sem deslocamento, como se observa na Tabela 2.

Tabela 2. Fatores de correlação

Tipo de solo	$K_1$ (radier)	$K_2$ (estacas de deslocamento)	$K_2$ (estacas sem deslocamento)
Areia	90	325	165
Areia siltosa	80	205	115
Silte argiloso	80	165	100
Argila	65	100	80

### **Em relação às cargas de projeto**

Mandolini et al (2005) consideram para a definição do projeto apenas as cargas verticais. Ao realizar diversas análises paramétricas observaram que a redução de um número significativo de estacas é possível, sem aumento apreciável do recalque. Há, portanto, um espaço para otimização do projeto sem redução apreciável de seu desempenho. Os citados autores destacam também que quanto mais longas as estacas, mais econômica é a solução; um menor grupo de estacas longas é a solução mais conveniente. A inclusão de um número reduzido de estacas no trecho central do radier é muito efetivo na redução do recalque diferencial. No entanto, esta indicação não se aplica a distribuição de cargas não uniformes e a perfis de subsolo com acentuada heterogeneidade.

### **Em relação ao enfoque das normas de fundações**

Os citados autores destacam ser uma pena que os códigos que regulam o projeto de fundações impeçam uma seleção do enfoque de projeto mais adequado, forçando o projetista a adotar uma concepção de projeto considerando apenas a capacidade de carga, qualquer que seja a tolerância aos recalques. O Eurocode 7, em algumas versões, como a de 1994, no item 7, dizia:

*When the piles are used to reduce the settlement of a raft, their resistance corresponding to the creep load may be used in analyzing the serviceability state of the structure.*

Inexplicavelmente, para os citados autores, na versão de 2004 um texto diferente foi introduzido:

*The provisions of this Section should not be applied directly to the design of piles that are intended as settlement reducers, such as in some piled raft foundations.*

Os autores dizem que apesar do projeto de fundações em radier estaqueado não ser proibido, as diferentes versões das normas apresentam certas restrições justamente num período de avanços significativos na compreensão dos mecanismos e da capacidade de análise.

Os autores apresentam conclusões que consideram suficientemente compreendidas e que podem ser propostas para emprego em projeto: **i)** o aumento do número de estacas é em geral benéfico, mas nem sempre produzem uma solução ótima. Há um número limite superior para o número de estacas que, se ultrapassado, é inútil. Projetos convencionais em geral resultam em número de estacas além deste limite. **ii)** Para controlar o recalque médio, um desempenho ótimo é alcançado com estacas com comprimento superior à largura do bloco, uniformemente espaçadas abaixo de toda a área. Isso é interessante para radiers pequenos e médios, mas não para grandes radiers. No caso de grandes radiers, o recalque é muito pouco reduzido com o acréscimo do número de estacas. **iii)** para o controle do recalque diferencial, um desempenho ótimo pode ser alcançado para um número pequeno de estacas, com disposição adequada, que depende da distribuição do carregamento. No caso de carregamento uniformemente distribuído, as estacas devem se concentrar no trecho central. Quanto mais longas as estacas, mais efetivamente são capazes de reduzir os recalques diferenciais. **iv)** a espessura do radier afeta os momentos fletores e os recalques diferenciais do radier estaqueado, mas apresenta pouco efeito na partição da carga e no recalque médio.



Com base na teoria da elasticidade, Randolph (1994) mostrou que a proporção da carga total absorvida pelo radier,  $P_r$ , em relação à carga total aplicada,  $P_t$ , é de (veja também Anexo V e item 1.4):

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{P_r}{P_r + P_p} = \frac{(1 - \alpha_{rp}) K_r}{K_p + (1 - 2\alpha_{rp}) K_r} \quad (3)$$

onde  $P_R$  é a carga transmitida ao radier,  $P_P$  é a carga transmitida às estacas,  $P_t$  é a carga total,  $K_R$  é a rigidez do radier e  $\alpha_{rp}$  é o fator de interação entre o radier e as estacas. Observe que as equações (1) e (2) se referem à capacidade de carga, daí a notação de Q, enquanto P consiste em cargas aplicadas, de serviço.

A rigidez do radier e do grupo de estacas pode ser determinada pela proposta de Randolph (1994) para fundações diretas e para grupos de estacas, respectivamente, como se verá no item 1.4. Se o espaçamento entre estacas é superior a  $8d$ , então a interação entre estacas será desprezível e a rigidez do grupo será a soma da rigidez das estacas isoladas.

O'Brien et al. (2012) destacam que a carga transmitida ao radier e às estacas irá variar ao longo do tempo, devido à influência de: **i)** Mudanças na rigidez do solo devido à alteração da condição não drenada para drenada em solos argilosos e a influência do creep em solos arenosos. A consequência deste efeito é a redução da carga transmitida ao radier, ao longo do tempo. **ii)** Mudanças na poro-pressão ao longo do tempo. Esta situação é particularmente importante para o caso de radier estaqueado compensado (casos de escavação, subsolos) onde a força decorrente da poro-pressão é uma parcela significativa da carga total, de forma que o radier suporta uma elevada parcela da carga total. Nesta situação O'Brien et al (2012) citam Sales et al. (2010).

Sales et al. (2010) apresentam um método de análise do comportamento de radier estaqueado em solos argilosos nos quais uma escavação profunda foi necessária. Dois casos bem conhecidos de radier estaqueado compensado (Hyde Park Barracks em Londres e o edifício Messeturm em Frankfurt) e um edifício mais novo (o Skyper Tower, Frankfurt) são analisados usando a abordagem apresentada por Sales e os comportamentos calculados e medidos de recalque com o tempo são comparados.

Para situações em que a proporção de carga transmitida ao radier e às estacas varia com o tempo, cada um dos componentes da fundação mista deve ser projetado

para sua maior porcentagem do carregamento, e todo o cuidado deve ser considerado para que a solução de fundação mista não resulte numa opção mais cara do que a solução em radier ou em grupo de estacas.

Poulos (2001) sugeriu um método trilinear simplificado da curva carga recalque para a etapa preliminar de análise, ilustrado na Figura 8.

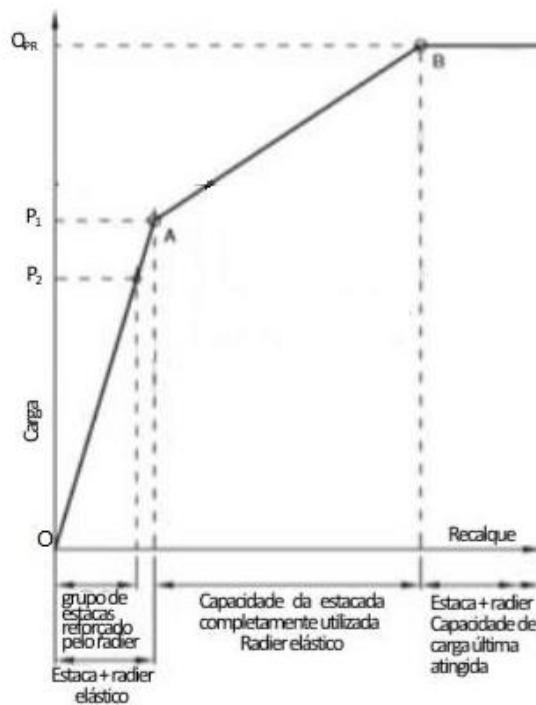


Figura 8. Curva carga x recalque simplificada para um radier estaqueado, Poulos (2001).

Para cálculos preliminares simples pode ser considerado que o comportamento do radier estaqueado é linear elástico, com a rigidez do radier estaqueado dada por:

$$K_{pr} = \frac{K_p + (1 - 2\alpha_{rp})K_r}{1 - \alpha_{rp}^2 (K_r/K_p)} \quad (4)$$

Esta expressão, cujo desenvolvimento se discutirá mais adiante, foi inicialmente concebida por Randolph (1994).

A capacidade de carga do grupo de estacas é totalmente mobilizada para uma carga aplicada  $P_1$  dada por:

$$P_1 = \frac{Q_p}{1 - P_r/P_t} \quad (5)$$

onde  $P_R/P_t$  é calculado com o emprego da equação 3 e  $Q_P$  é a capacidade de carga do grupo de estacas.

Para cargas acima de  $P_1$ , a rigidez do grupo de estacas é simplesmente igual à do radier isolado ( $K_R$ ), até que a carga de ruptura do radier estaqueado seja atingida (equação 1 ou 2). A rigidez relativa entre o radier e o grupo de estacas controla a carga transferida aos dois elementos. A rigidez total do radier estaqueado e a magnitude de  $P_1$  são ilustradas na Figura 8.

O'Brien et al. (2012) recomendam que o limite inferior e superior dos valores de  $K_R$  e  $K_P$  precisam ser cuidadosamente obtidos para aplicação das equações (4 e 5).

O'Brien et al. (2012) destacam ainda que um grupo de estacas reforçado pelo radier deve operar na parte inicial da curva carga x recalque trilinear, relativamente rígida, com uma carga de trabalho inferior a  $P_2$  (Figura 8), enquanto um radier reforçado pelas estacas deve operar na curva menos rígida, segundo trecho da curva carga x recalque trilinear, com uma carga de projeto superior a  $P_3$ . Para uma faixa razoável de cargas de trabalho, é importante que o grupo de estacas reforçado pelo radier não ultrapasse a carga  $P_1$ . Para reduzir o risco de se ultrapassar a carga  $P_1$ , um fator de mobilização deve ser aplicado à capacidade de carga do grupo. Para estacas de atrito, um valor de 0,75 deve ser considerado para o fator de mobilização, e para estacas de ponta, 0,6. O fator de mobilização não deve ser confundido com fator de segurança: ele é simplesmente uma forma pragmática de garantir que a carga transmitida ao radier ou às estacas é restringida à faixa de valores previstos. Grandes grupos de estacas projetados de forma convencional apresentam fatores de segurança global acima de 2,5 a 3,0. Considerando que o radier absorva 30% da carga total (um valor típico razoável), então o fator de mobilização dado anteriormente resultará numa redução do número de estacas para cerca da metade a dois terços do número calculado num projeto convencional do grupo de estacas.

### 1.2.2 Interação entre as estacas e o radier

Uma série de estudos paramétricos realizados por Randolph (1994), Poulos (2001) e Katzenbach et al. (1998) revelaram aspectos interessantes e muito úteis do comportamento do radier estaqueado, alguns deles resumidos por O'Brien et al. (2012) na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3. Alguns fatores que influenciam o comportamento do radier estaqueado, O'Brien et al. (2012).

Aspecto Considerado	Comentário
Número de estacas	O aumento do número de estacas será de benefício limitado, uma vez que um valor limite é alcançado (valor limite para uma mudança de comportamento).
Localização das estacas	Para uma ótima eficiência, o projetista deve concentrar as estacas sob as colunas mais carregadas e no trecho médio central do radier.
Comprimento das estacas e espaçamento entre seus eixos	Um menor número de estacas longas terá mais efeito do que um maior número de estacas mais curtas. Deve-se manter o espaçamento entre estacas tão mais aberto quanto possível, tipicamente superior a 4 diâmetros.
Espessura do radier	Um radier de maior espessura irá reduzir o recalque diferencial, às custas de um maior momento fletor. A espessura do radier apresenta um efeito desprezível em relação ao recalque total ou à distribuição relativa entre as cargas nas estacas e no radier.
Distribuição das cargas aplicadas	A distribuição das cargas aplicadas tem efeito importante nos recalques diferenciais e momentos fletores do radier, com efeito desprezível no recalque máximo e distribuição das cargas entre o radier e as estacas.
Análise da interação solo x estrutura	A maioria dos métodos leva a uma superestimativa das cargas transmitidas às estacas, e, conseqüentemente, subestimativa de cargas transmitidas ao radier. Portanto, deve-se ter cuidado no dimensionamento estrutural do radier. Análises 2D refinadas costumam ser menos acuradas do que métodos aproximados que permitam considerar a natureza 3D do problema.

No caso geral do radier estaqueado, interações muito complexas ocorrem entre os diversos elementos, como resumidas e ilustradas na Figura 9, que mostra um radier estaqueado com carregamentos aplicados não uniformes e o radier em contato com o solo subjacente.

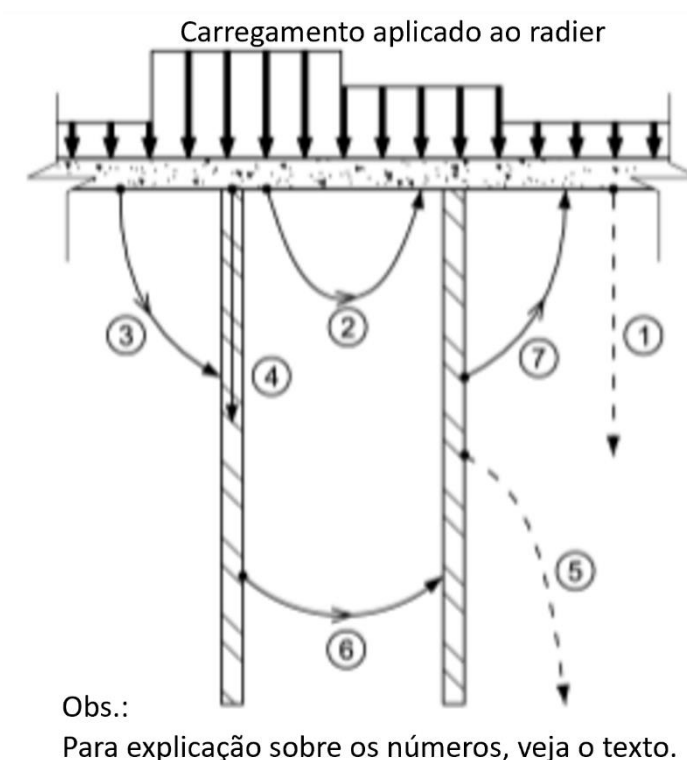


Figura 9. Interações entre diferentes componentes de um radier estaqueado, O'Brien et al. (2012).

A Figura 9 apresenta as seguintes interações:

1. Interação radier x solo - As tensões de contato entre o radier e o solo são transmitidas ao solo e os recalques do radier ocorrem.
2. Interação radier x solo x radier - A interação acontece através do solo com outras partes do radier.
3. Interação radier x solo x estacas - As tensões de contato do radier são também transmitidas através do solo e interagem com as estacas.
4. Interação entre o radier e as estacas - Cargas são transmitidas às estacas diretamente pelo radier.
5. Interação estacas x solo - As cargas transmitidas às estacas se dispersam no maciço ao redor das mesmas.
6. Interação estacas x solo x estacas - Interação ocorre entre cada estaca através do solo para outras estacas.

7. Interação estaca x solo x radier - Interação também ocorre entre cada estaca através do solo abaixo do radier.

Quanto ao comentário da última linha da Tabela 3, a Figura 10 ilustra a razão dos métodos elásticos levarem a uma superestimativa das cargas nas estacas. A Figura 10 mostra que para recalques moderados, típicos de grupos de estacas reforçados por radiers, a rigidez do radier é praticamente dobrada quando se utiliza modelos não lineares, enquanto os valores de rigidez se aproximam para grandes deslocamentos.

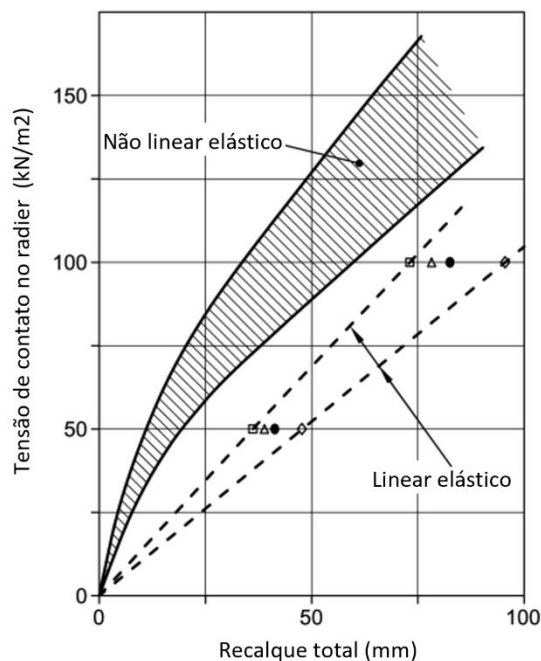


Figura 10. Influência da não linearidade do método de cálculo na rigidez do radier, adaptado de O'Brien e Sharp (2001)

O'Brien et al. (2012) apontam que a mobilização plena do atrito lateral requer um deslocamento relativo entre o solo e a estaca, de cerca de 5 a 10 mm. Para uma estaca sob um radier, o deslocamento relativo varia de zero, no topo da estaca, para um valor máximo na ponta da estaca. Com o aumento do recalque do radier, o atrito lateral é mobilizado próximo à ponta e vai avançando para cima. A velocidade de mobilização do atrito lateral varia com a variação da rigidez do solo. Quando a rigidez do solo aumenta com a profundidade, o que é uma ocorrência comum da prática, o

atrito lateral será mobilizado mais rapidamente do que quando a rigidez for constante com a profundidade. No entanto, haverá sempre uma região pequena, próxima ao topo da estaca, onde o atrito lateral não é totalmente mobilizado.

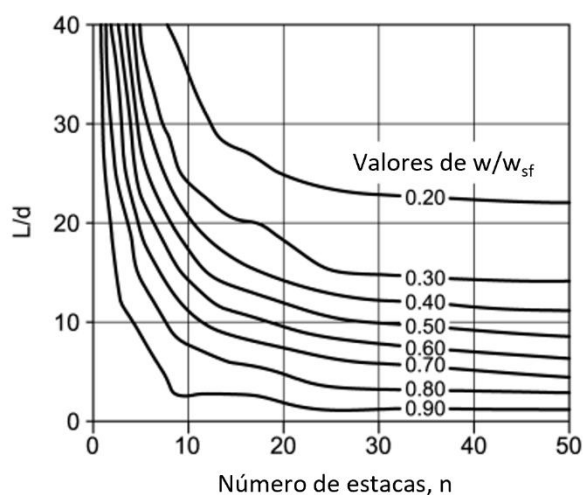
A calibração de modelos complexos é extremamente importante e deve incluir:

- (i) A verificação de que as características carga x recalque do radier isolado e da estaca isolada é simulada de forma realística.
- (ii) A verificação de que as características carga x recalque apenas do grupo de estacas (sem a contribuição do radier) é realística.
- (iii) Retroanálise de casos de obra relevantes para uma simulação de um grupo de estacas reforçado pelo radier.

A autora destaca que esta mesma linha de calibração foi seguida pela autora, em sua rotina simplificada, incluindo a etapa iii. A proposta da autora incluiu a comparação com casos documentados na literatura de grupo de estacas reforçados pelo radier.

### 1.2.3 Locação adequada das estacas e número de estacas otimizado

Estudos de Randolph (1994) e Katzenbach et al. (1998) forneceram muitos aspectos úteis na melhor locação e no número de estacas ótimo de grupos de estacas reforçado por radier. Na Figura 11 estão plotados os valores de recalque relativo (razão entre recalques de radier estaqueado pelo recalque do radier sem estacas) contra o número de estacas e a relação  $L/d$ , razão entre o comprimento e o diâmetro da estaca. Neste exemplo, 50 estacas seriam necessárias num projeto convencional de um grupo de estacas.



**Obs:**  $w$  = recalque do radier estaqueado

$w_{sf}$  = recalque do radier

$L$  = comprimento das estacas

$d$  = diâmetro das estacas

Figura 11. Influência do comprimento e número de estacas na redução de recalques do radier estaqueado, adaptado de Katzenbach et al. (1998).

Observa-se na Figura 11 que uma considerável redução dos recalques é obtida com a instalação de 10 estacas, especialmente para estacas relativamente longas,  $L/d > 20$ ; no entanto, apenas uma pequena redução de recalques irá ocorrer pelo emprego de mais de 20 estacas.

Viggiani (1998) retroanalisou o grupo de estacas do Stonebridge Park Building em Londres (constituído de 350 estacas de 450 mm de diâmetro) e encontrou uma redução no número de estacas para a terça parte (117 estacas) gerando apenas um aumento no recalque de 5 para 10mm. O radier absorveria cerca de 20 a 25% do carregamento da construção.

Retroanálises similares à realizada por Viggiani (1998) serão apresentadas nos Capítulos 5 e 6, com base no banco de dados de obras já contempladas com a medição de recalques e interação solo x estrutura em fundação direta e fundação profunda convencional, na expectativa de verificar a viabilidade do uso de radier estaqueado e a economia que resulta desta prática, com o objetivo de contribuir para a incorporação desta técnica à prática brasileira.



O'Brien et al. (2012) lembram que num projeto convencional de um grupo de estacas reforçado pelo radier, a tendência é distribuição das estacas sob o bloco. Os recalques totais são reduzidos, pela presença das estacas, e o recalque diferencial (no caso de blocos de menor altura, como um radier) será reduzido como consequência do menor recalque total. Um enfoque de projeto eficiente é estudar a locação das estacas de forma a reduzir o recalque diferencial, num bloco de pequena altura (radier estaqueado). A ótima localização das estacas de um radier estaqueado irá depender, principalmente, das cargas estruturais poderem ser caracterizadas como cargas uniformemente distribuídas (através de uma infraestrutura rígida) ou concentradas abaixo de um pequeno número de colunas muito carregadas, como resumido na segunda linha da Tabela 3. Para um carregamento uniformemente distribuído, os princípios para o controle dos recalques diferenciais são ilustrados na Figura 12. Randolph (1994) mostra que se um pequeno número de estacas é colocado sob a área central do radier, o recalque diferencial será minimizado. Para um carregamento uniformemente distribuído num radier relativamente flexível, a tendência é o radier fletir. Ao colocar as estacas próximas ao centro, esta tendência ficará minimizada.

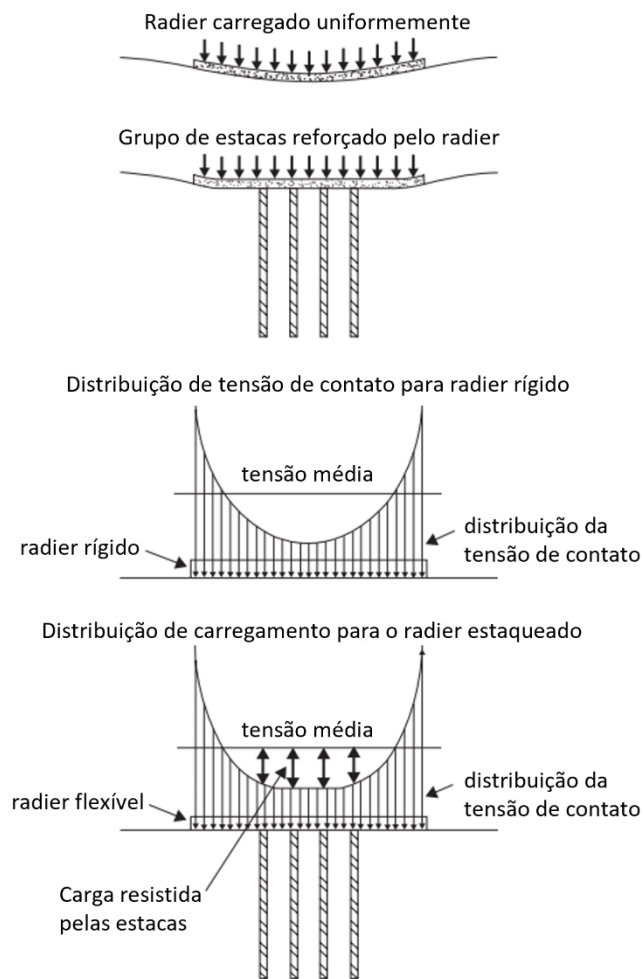


Figura 12. Otimização da localização das estacas em radier estaqueado para um carregamento uniformemente distribuído, adaptado de Randolph (1994).

Já para o caso de um radier rígido, haverá uma tendência de concentração de tensões nos bordos. Ao colocar estacas no trecho central, uma distribuição mais próxima da distribuição uniforme será alcançada, reduzindo os momentos fletores e as tensões cisalhantes.

O caso da Figura 13 foi apresentado por Randolph (1994) para ilustrar a eficiência do emprego de um menor número de estacas no trecho central do radier ( $n=9$  estacas) na redução do recalque diferencial ao invés da utilização de um número maior de estacas ( $n=81$ ) distribuídas ao longo da área do radier.

A Figura 13 já ilustra a eficiência do radier com as estacas na região central na redução do recalque diferencial, como uma solução muito mais efetiva e econômica do que aquela contemplando um maior número de estacas. Para toda a faixa de carregamento analisado por Randolph (1994) o recalque diferencial é menor no caso de 9 estacas concentradas no centro do radier do que o emprego de 81 estacas uniformemente distribuídas. As recomendações da Tabela 3 para projeto trazem sugestões interessantes e muito úteis ao projetista, obtidas de uma série de análises realizadas ao longo dos anos comprovando sua eficácia.

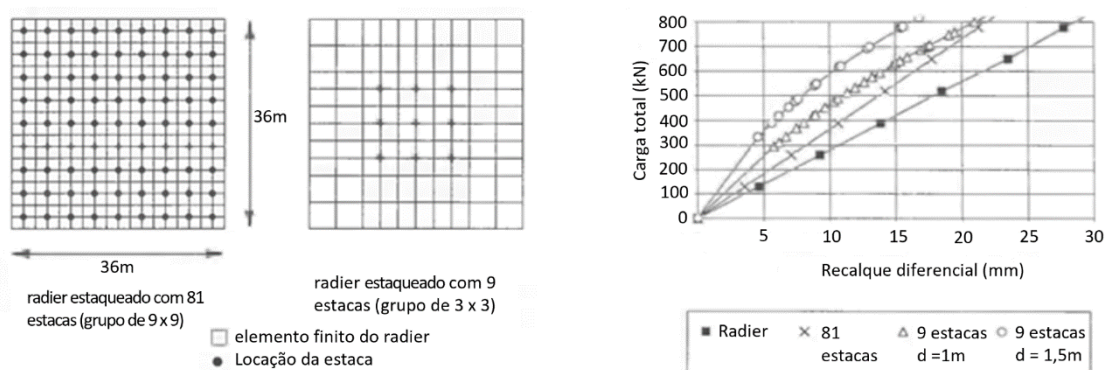


Figura 13. Influência do layout do grupo de estacas no recalque diferencial do radier, adaptado de Randolph (1994)

Conclui-se que, de forma a minimizar o recalque total e o recalque diferencial é mais efetivo o uso de um pequeno número de estacas longas posicionadas no trecho central do radier do que um grande número de estacas curtas uniformemente distribuídas em toda a área do mesmo.

#### 1.2.4 Radier estaqueado compensado

Quando radiers estaqueados são localizados na base de uma escavação, conhecido como “compensated piled draft”, seu comportamento é diferente do radier estaqueado assente próximo ao nível do terreno natural, como mostram Sales et al. (2010), em relação aos seguintes aspectos:

- (i) Um radier estaqueado compensado experimenta recalques menores;
- (ii) Em decorrência de (i), as estacas ficam sujeitas a uma menor proporção do carregamento e o radier a uma maior porcentagem.
- (iii) O comportamento das estacas e a distribuição de cargas entre as estacas e o radier será modificado pela escavação e pela sequência de instalação das estacas.
- (iv) A presença e a magnitude da força devida ao empuxo da água, quando a cota do radier encontra-se abaixo do NA, irá afetar de forma significativa o comportamento conjunto, e a carga no radier será particularmente sensível à magnitude do empuxo da água.

As cargas axiais nas estacas estarão diretamente afetadas pela sequência construtiva. Se as estacas forem instaladas antes da escavação para a execução do subsolo, o levantamento do solo devido à escavação induzirá forças de tração nas estacas, face ao levantamento a curto prazo das estacas. Se as estacas forem instaladas após a escavação, não haverá tensões de tração induzidas a curto prazo nas estacas.

### **1.3 Concepção de projeto de radier reforçado pelo grupo de estacas**

Conforme esclarecem O'Brien et al. (2012), a capacidade de carga não é um condicionante de projeto para um radier, uma vez que o fator limitador de seu emprego são os recalques excessivos. Quando a análise do radier indica que os recalques totais ou diferenciais são excessivos ou a resistência estrutural do radier é excedida localmente, deve ser considerada a alternativa de melhoria do projeto. O desempenho estrutural do radier pode ser modificado pelo aumento de sua espessura, porém pode resultar num alto custo. A redução dos recalques geralmente irá requerer o emprego de estacas.

Os métodos convencionais de cálculo de estaqueamentos são baseados essencialmente em prover um fator de segurança adequado contra a ruptura por capacidade de carga. A pergunta que se deseja responder é: qual o número de estacas necessárias para resistir a carga da estrutura? Assim, o que seria um

problema de recalque passa a ser um problema de capacidade de carga, que pode resultar numa solução muito cara.

Quando o recalque é o fator condicionante, a questão a ser posta seria verificar o número de estacas necessário para reduzir os recalques a um nível aceitável. O enfoque de prover um número adequado de estacas para limitar o recalque pode ser também utilizado para controlar o recalque diferencial, momentos fletores e tensões de cisalhamento no radier. Os raders projetados para esta finalidade são chamados de raders reforçado por estacas. Esta designação parece ser mais adequada do que aquela inicialmente proposta por Burland et al. (1977) e Burland (1995) de estacas redutoras de recalque.

#### **1.4 Contribuição de Randolph (1994).**

São reunidos, neste item, vários aspectos que contribuem para uma melhor compreensão do modelo simplificado de Randolph (1994), uma vez ser este o modelo elástico cuja consistência e rigor melhor reproduzem os fundamentos da estimativa de recalques, bem como do comportamento conjunto de estacas e radier, no radier estaqueado. Como a autora realizará estimativas também com este método, visando comparar seus resultados àqueles obtidos pela rotina proposta pela autora, neste item a contribuição de Randolph (1994) será descrita em maior detalhe. As expressões desenvolvidas por Randolph foram reproduzidas, matematicamente, pela autora, mas estes desenvolvimentos não serão incluídos no presente texto.

##### **1.4.1 Proposta para fundação direta (recalque e rigidez do radier)**

Cabe destacar que os métodos elásticos não devem ser utilizados, no caso de solos argilosos, para tensões acima da tensão de pré-adensamento, uma vez que no trecho normalmente adensado os deslocamentos não podem ser considerados elásticos.

Os recalques de fundações diretas, em particular em radier, podem ser estimados através da teoria da elasticidade. Muitos autores, em suas publicações,

assumem que o material elástico tem um módulo de Young constante com a profundidade e que o material elástico tem espessura infinita. Estas soluções não são recomendadas. Mayne e Poulos (1999), assim como outros autores, apresentaram soluções para recalques de fundações diretas assentes sobre material elástico e isotrópico de espessura finita. Na solução destes autores, o módulo de Young pode variar linearmente com a profundidade, sendo  $E_0$  o módulo sob a fundação e  $kZ$  a variação do módulo com a profundidade, sendo  $Z=0$  na base da fundação. A equação abaixo fornece o valor do recalque:

$$w = \frac{((qDI_g(1 - \nu^2)I_fI_e))}{E_0} \quad (6)$$

onde  $w$  é o recalque da fundação,  $q$  é a tensão líquida atuante,  $D$  é o diâmetro da fundação circular,  $I_g$  é o fator de influência que leva em conta o fato do solo não ser uniforme (dado na Figura 14),  $\nu$  é o coeficiente de Poisson,  $E_0$  é o módulo de Young do solo na profundidade de assentamento da fundação,  $I_f$  é o fator de correção que tem em vista a rigidez (Figura 15) e  $I_e$  é o fator de correção que leva em conta a profundidade de embutimento (Figura 16).

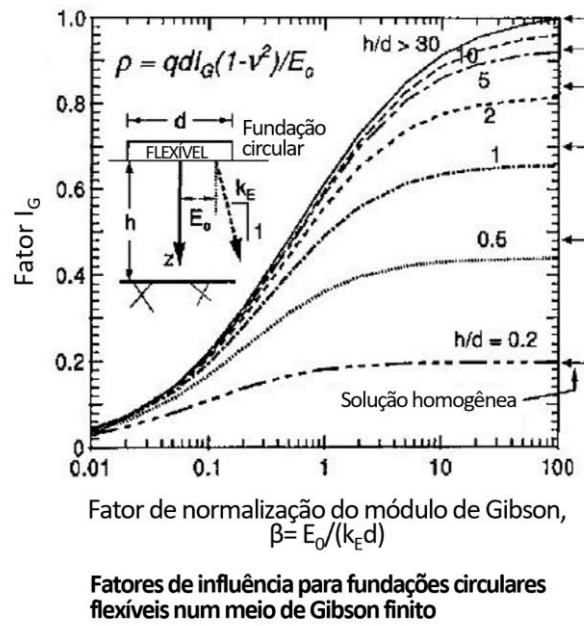


Figura 14. Fator de correção  $I_g$ , Mayne e Poulos (1999)

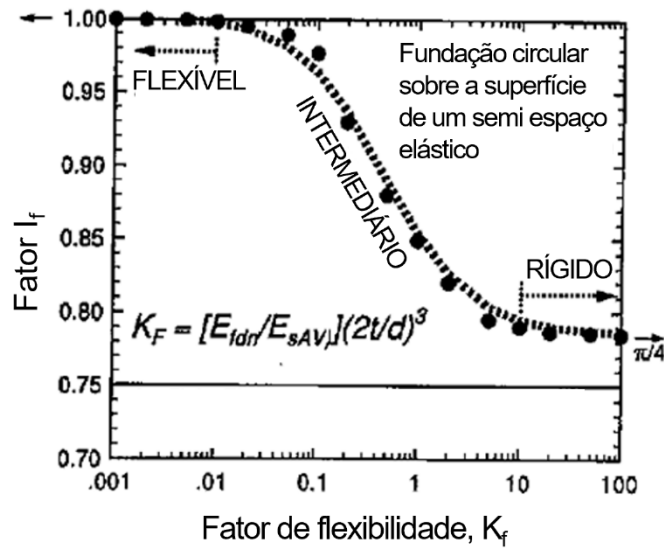


Figura 15. Fator de correção  $I_f$ , Mayne e Poulos (1999)

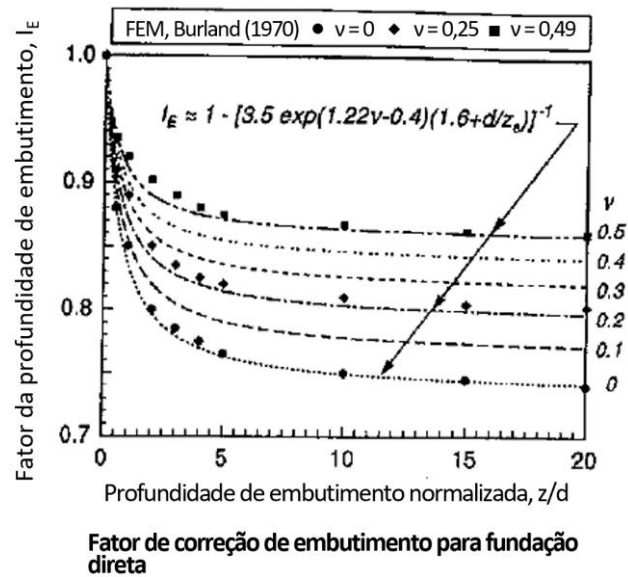


Figura 16. Fator de correção  $I_E$ , Mayne e Poulos (1999)

O fator de influência para o solo de rigidez não uniforme é apresentado na Figura 14, no eixo das ordenadas, em função do valor de  $\beta = E_0/kD$ , no eixo das abscissas, sendo  $k$  o aumento do módulo com a profundidade.

Embora Mayne e Poulos (1999) tenham desenvolvido o método para fundação circular, ele pode ser empregado também para fundações quadradas e retangulares, para  $L \leq 3B$ , sendo  $L$  o comprimento e  $B$  a largura da fundação, com resultados comparáveis a de soluções mais rigorosas. Para fundações retangulares com  $L > 3B$ , Meigh (1976) apresenta soluções elásticas adequadas.

Sendo  $w$  o recalque e  $q\pi d^2/4$  a carga total aplicada, a rigidez da fundação direta pode ser obtida por:

$$K_r = \frac{\pi D E_0}{4 I_G (1 - \nu^2) I_F I_E} \quad (7)$$



### 1.4.2 Método de Randolph para estaca isolada

Randolph (1977), e também Randolph e Wroth (1978), estudou o recalque de uma estaca isolada carregada verticalmente, considerando inicialmente as cargas transferidas pela base e pelo fuste separadamente e, posteriormente, juntando os dois efeitos para produzir uma solução aproximada. O problema resolvido está mostrado na Figura 17, onde o maciço afetado pela estaca é dividido em duas camadas por um plano horizontal que passa pela base da estaca. É admitido que a parte superior se deforme exclusivamente devido à carga transferida pelo fuste e que a parte inferior se deforme exclusivamente pela carga transferida pela base. A figura apresenta ainda os modos de deformação admitidos para a parte superior e inferior do maciço, Figura 17.

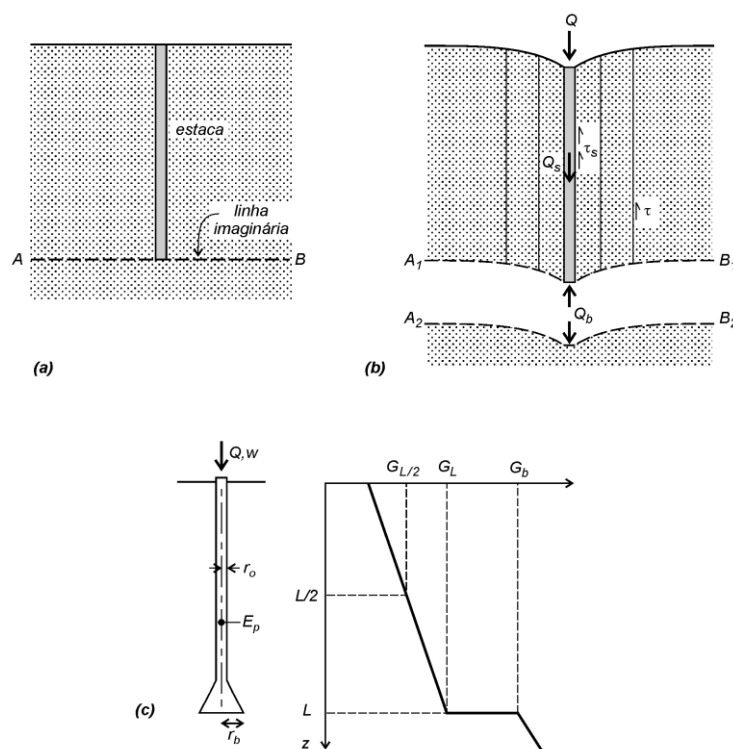


Figura 17. Divisão do maciço, (b) modos de deformação das duas partes do maciço e (c) perfil da estaca e do terreno no problema resolvido por Randolph (1977), adaptado de Velloso e Lopes (2014).

A expressão mais geral que relaciona a carga de serviço é:

$$\frac{Q}{w r_o G_L} = \left[ \frac{\frac{4n}{(1-\nu)\Omega} + \frac{2\pi L \operatorname{tgh}(\mu L)}{\zeta r_o \mu L} \rho}{1 + \frac{4n}{(1-\nu)\Omega} \frac{1}{\pi \lambda r_o} \frac{L \operatorname{tgh}(\mu L)}{\mu L}} \right] \quad (8)$$

onde:

$\zeta = \ln(r_m/r_o) \cong 4$  representa a influência (horizontal) da estaca

$r_m \cong 2,5 L (1-\nu)\rho$  representa o raio máximo de influência da estaca

$$\mu = \frac{1}{r_o} \sqrt{2/\zeta \lambda}$$

$\rho = \frac{G_L/2}{G_L}$  indica a taxa de crescimento do módulo G com a profundidade

$\lambda = E_p/G_L$  representa a rigidez relativa estaca-solo

$\Omega = G_L/G_b$  representa a melhora do solo no nível da base

$n = r_b/r_o$  representa o aumento do diâmetro da estaca na base

A rigidez da estaca isolada é  $P/w$ , razão entre a carga de serviço e o recalque correspondente, podendo ser obtida a partir da equação (8), que pode ser programada numa planilha.

A parcela da carga que chega à ponta da estaca é dada por:

$$\frac{P_b}{P_t} = \frac{\frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} \frac{1}{\cosh(\mu l)}}{\frac{4\eta}{(1-\nu)\xi} + \rho \frac{2\pi \operatorname{tanh}(\mu l)}{\zeta} \frac{l}{\mu l} \frac{1}{r_o}} \quad (9)$$

#### 1.4.3 Método de Randolph para um grupo de estacas

No caso de um grupo de estacas, além do método do radier equivalente, empregado por vários autores e indicado no texto da norma brasileira, pode-se utilizar o método da estaca equivalente, detalhado a seguir.

O grupo de estacas pode ser tratado como uma estaca equivalente, como proposto por Poulos e Davis (1980) e Randolph (1994). Por este artifício de cálculo, o grupo de estacas é transformado em uma estaca circular com diâmetro que depende do espaçamento e interação entre as estacas, e cujo módulo de Young é um valor ponderado considerando as áreas ocupadas pelas estacas e pelo solo.

A região do solo no qual as estacas do grupo estão embutidas é considerada como um meio contínuo equivalente, substituindo o grupo de estacas por uma estaca equivalente, Figura 18.

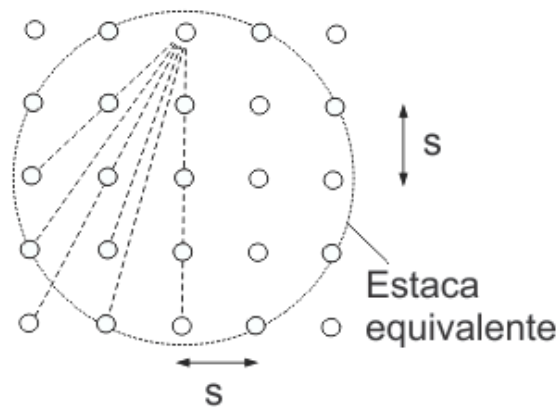


Figura 18. Método da estaca equivalente (Randolph, 1994).

Para um grupo de área retangular  $A_g$ , o diâmetro da estaca equivalente pode ser obtido como:

$$A_g = \frac{\pi D_{eq}^2}{4} \quad e \quad D_{eq} = \sqrt{\frac{4 A_g}{\pi}} \quad (10)$$

E o módulo de Young da estaca equivalente:

$$E_{eq} = E_s + (E_p - E_s) \left( \frac{A_p}{A_g} \right) \quad (11)$$

Sendo  $E_p$  o módulo de Young das estacas,  $E_s$  o módulo de Young médio do solo de embutimento das estacas e  $A_p$  a área total ocupada pelas estacas no grupo.

A resposta carga x recalque do grupo, ou da estaca equivalente, pode ser calculada usando a solução acima para estaca isolada. Assim como o método do

radier equivalente, o método da estaca equivalente só fornece uma estimativa do recalque médio do grupo de estacas, não do recalque diferencial médio.

Randolph (1994) pondera que a aproximação do recalque calculado pelo radier equivalente ou pela estaca equivalente, para o grupo de estacas, pode ser verificada através da relação  $b/l$  (**aspect ratio**) do grupo. Para um grupo quadrado de  $n$  estacas com espaçamento entre eixos  $s$ , o **aspect ratio** é

$$((\sqrt{n} - 1)s + d))/l \text{ ou, aproximadamente } R = \sqrt{ns/l}$$

Um parâmetro apropriado para caracterizar um grupo de estacas, segundo Randolph e Clancy (1993) é o aspect ratio:

$$R = \sqrt{\frac{ns}{l}} \quad (12)$$

Para valores de  $R$  maiores que 4, o padrão de recalque diferencial do grupo de estacas (assumindo um bloco totalmente flexível) é muito similar ao de um radier. Um radier equivalente seria, neste caso, o melhor modelo de análise do recalque do grupo de estacas. Para menores valores de  $R$ , e certamente para valores inferiores a 2, o enfoque da estaca equivalente é mais adequado, pelo menos para a estimativa do recalque médio.

#### 1.4.4 A resposta para um grupo de estacas, exemplo de caso.

A base para o cálculo da resposta de um grupo de estacas, comparado com uma estaca isolada, é o princípio da interação elástica entre estacas. Por simplicidade, o desempenho de uma estaca num grupo tem sido geralmente expresso em termos de uma razão de recalque de grupo, Poulos e Davis (1980), ou eficiência, Fleming et al. (1992), modificando a rigidez de uma estaca isolada para considerar a interação entre estacas.

Um enfoque simples para a estimativa da resposta de um grupo é pela extensão do modelo de uma estaca isolada, em que as respostas do fuste e da base são consideradas separadamente, para o equivalente ao grupo de estacas, onde as duas componentes são modificadas, de acordo com o grau de interação.

A solução de uma estaca isolada, equação 8, foi baseada na asserção de um campo de deslocamentos logaritmo no entorno da estaca. Isso implica em que, se o deslocamento de uma dada estaca é  $w_s$ , então uma estaca vizinha, a um espaçamento  $s$ , será submetida a um deslocamento de  $w_s \ln(r_m/s)/\zeta$ , onde  $r_m$  é o máximo raio de influência da estaca original e  $\zeta = \ln(r_m/r_0)$ .

O campo de deslocamentos no entorno da ponta da estaca, tratado como um funcionamento rígido, decresce inversamente com o raio. Para um deslocamento da ponta de  $w_b$ , o deslocamento interativo de uma estaca vizinha a um espaçamento  $s$  será  $2w_b r_b / (\pi s)$ , onde  $r_b$  é o raio da base da estaca (Randolph e Wroth (1979)).

As considerações acima permitem que a resposta de uma estaca média no grupo seja deduzida, modificando a rigidez do atrito e da base de uma estaca isolada de acordo com o efeito da interação total. Para um grupo de  $n$  estacas, o parâmetro de transferência  $\zeta$  deve ser substituído por:

$$\zeta^* = n\zeta - i = \sum_{i=2}^n \ln(s_i/r_0) \quad (13)$$

De forma similar, a rigidez da base é ajustada pela substituição do parâmetro  $\xi$ , por:

$$\xi^* = \xi \left[ 1 + \frac{2}{\pi} \sum_{i=2}^n \frac{r_0}{s_i} \right] \quad (14)$$

Onde  $s_i$  é o espaçamento da estaca  $i$  em relação à estaca 1.

As equações (13) e (14) podem ser então empregadas, na equação (8), para encontrar a resposta do grupo de estacas. Já que a interação é maior para a resposta do fuste do que a da base, o efeito disso é que uma maior carga é transferida para a ponta em estacas num grupo do que em estacas isoladas.

Para grupos de estacas de até 100 estacas, a estaca típica pode ser escolhida como aquela do centro do bordo, como indica a Figura 18, que mostra a faixa de espaçamentos entre estacas que precisam ser considerados. Para grupos com mais estacas, deve ser escolhida a estaca central da linha adjacente ao bordo.

Randolph (1994) exemplifica o cálculo na Figura 19.

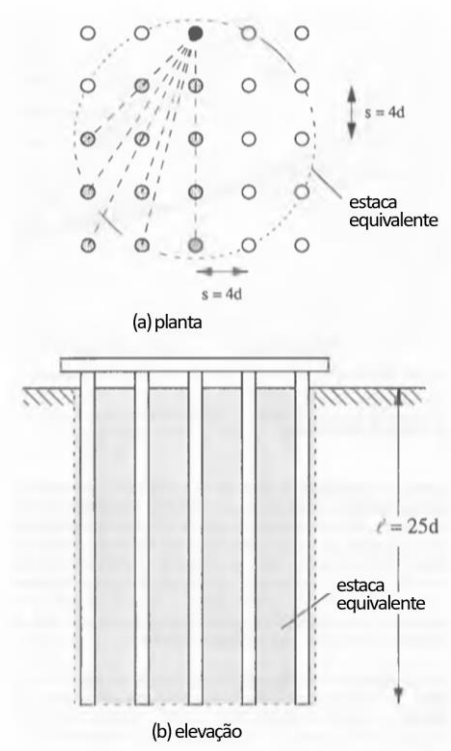


Figura 19. Exemplo de um grupo de 5 x 5 estacas, Randolph (1994).

A Figura 19 mostra a faixa de espaçamentos de estacas que precisam ser considerados na estimativa da resposta de um grupo de 5 x 5 estacas. Para um espaçamento relativo de  $s/d = 4$ , e razão de esbeltez  $l/d = 25$ , e razão de rigidez  $E_p/G = 1000$ , os valores modificados de  $\zeta$  e  $\xi$  são 43,2 e 2,78, respectivamente, comparados aos valores de 4,47 e 1 para uma estaca isolada. A Tabela 4 mostra o resultado da rigidez do grupo (em termos da carga por estaca), que reduz de 54,2, para uma estaca isolada, para 8,8, para o grupo de estacas – uma eficiência estimada em  $8,8/54,2 = 0,16$ . A proporção da carga transmitida à base é estimada em 6,1% para uma estaca isolada e em 21,5% para o grupo de estacas.

Tabela 4. Comparações entre a estaca isolada, grupo de estacas e a estaca equivalente, Randolph, 1994

	Equação 8	Equação 9	Análise numérica		Estaca equivalente
	Estaca isolada	Grupo de 5x5 estacas	Estaca isolada	Grupo de 5x5 estacas	Grupo de 5x5 estacas
$P_t/(G\alpha w_i)$	54,2	8,8	54,3	7,8	8,9
$P_b/P_t$	6,1%	21,5%	6,1%	13,5%	41,8%

Como comparação, os valores de rigidez e da carga compartilhada utilizando o enfoque numérico de Clancy e Randolph (1993) também são apresentados na Tabela 4. Pode ser observado que o método aproximado fornece uma rigidez maior para o grupo de estacas, 8,8, em relação ao enfoque numérico, 7,8 (13% a mais), e indica uma parcela significativamente maior chegando na ponta, 21,5% contra 13,5%. Randolph (1994) explica que a diferença na rigidez estimada se deve à tendência da análise numérica em subestimar a rigidez quando comparada a uma análise de condições de contorno do grupo (por exemplo, Butterfield e Douglas, 1981).

A coluna final, na Tabela 4 mostra os resultados de se tratar o grupo de estacas como uma estaca equivalente. Este resultado leva a uma maior estimativa da rigidez do grupo, pouco superior à análise aproximada, mas é a mais simples estimativa entre as três. A estimativa da proporção da carga que chega à ponta da estaca, no enfoque da estaca equivalente, inclui todas as cargas transmitidas pelas estacas reais, e assim é consideravelmente maior do que os valores obtidos nas demais análises.

#### 1.4.5 Método de Randolph para um radier estaqueado

Randolph (1994) destaca que recentemente tem havido um uso crescente de radier estaqueado, principalmente em argilas rijas, já que este tipo de solo oferece um bom suporte para fundações em radier, embora elevados recalques ocorram quando não são introduzidas as estacas. Em grande parte dos casos, as estacas foram utilizadas para reduzir os recalques, sendo a disposição das estacas escolhida em função da distribuição das cargas estruturais, de forma a minimizar os momentos fletores no radier.

As questões fundamentais que surgem no projeto de um radier estaqueado são relativas à proporção da carga total suportada pelo radier e pelas estacas, e o efeito do suporte das estacas nos recalques totais e diferenciais. Estas questões podem ser respondidas, pelo menos aproximadamente, através da consideração da resposta de cada componente (radier e grupo de estacas) bem como a interação entre estes componentes.

Adotando os subscritos  $p$ , para o grupo de estacas, e  $r$  para o radier (ou bloco de coroamento), os recalques de cada componente podem ser expressos por (Randolph, 1983):

$$w_p = \frac{1}{K_p} P_p + \frac{\alpha_{pr}}{K_r} P_r \quad (15)$$

$$w_r = \frac{\alpha_{rp}}{K_r} P_p + \frac{1}{K_r} P_r \quad (16)$$

Onde  $\alpha_{rp}$  e  $\alpha_{pr}$  são fatores de interação, e P e K são a carga e a rigidez relativa a cada uma das componentes (radier e grupo de estacas).

Do teorema da reciprocidade, os termos da diagonal da matriz de flexibilidade devem ser iguais, assim os fatores de interação são relacionados pela equação:

$$\alpha_{pr} = \alpha_{rp} K_r / K_p \quad (17)$$

Uma vez que o recalque (médio) das estacas e do radier são idênticos, as duas equações acima permitem o cálculo da rigidez equivalente,  $K_{rp}$ , e da proporção da carga do radier e das estacas, como indicado nas equações abaixo:

$$K_{pr} = \frac{K_p + (1 - 2\alpha_{rp})K_r}{1 - \alpha_{rp}^2 (K_r / K_p)} \quad (18)$$

$$\frac{P_r}{P_r + P_p} = \frac{(1 - \alpha_{rp}) K_r}{K_p + (1 - 2\alpha_{rp}) K_r} \quad (19)$$

Para estacas isoladas com radier circular de raio  $r_c$ , Randolph (1983) mostrou que o fator de interação  $\alpha_{rp}$  pode ser aproximado por:

$$\alpha_{rp} \sim 1 - \frac{\ln \frac{r_c}{r_0}}{\zeta} \quad (20)$$

Randolph (1994) explica que, em princípio, esta relação pode também ser usada para grandes grupos de estacas, onde um raio equivalente  $r_c$  é calculado pela área do radier associado com cada estaca. Contudo, análises mais rigorosas de Clancy e Randolph (1993) mostram que, à medida que o grupo de estacas cresce, o valor de  $\alpha_{rp}$  tende a um valor constante de 0,8, independentemente do espaçamento



entre estacas, razão de esbeltez ou razão de rigidez. Isto leva à expressão da rigidez do radier como:

$$K_{pr} = \frac{1-0,6(K_r/K_p)}{1-0,64(K_r/K_p)} K_p \quad (21)$$

A partir da equação 21, observa-se que a rigidez do radier estaqueado será próxima da rigidez do grupo de estacas. De forma similar, a razão entre as cargas transferidas ao radier e às estacas é:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{0,2}{1-0,8(K_r/K_p)} (K_r/K_p) \quad (22)$$

O valor da equação (22) estará, tipicamente, compreendido na faixa 0,3 a 0,5 de  $\frac{K_r}{K_p}$ .

### Filosofia de projeto

Randolph (1994) destaca que são três os enfoques de projeto para um radier estaqueado, já incluído no texto principal desta tese:

- (1) **Convencional**, em que a fundação é projetada, essencialmente, como um grupo de estacas, com espaçamento regular entre as estacas ao longo da área completa da fundação, mas que se concebe que parte da carga seja transmitida diretamente do bloco para o solo superficial. Para esta análise se utilizam as fórmulas desenvolvidas anteriormente (ou uma análoga à estaca equivalente), sendo o principal benefício deste enfoque a redução do número total de estacas, face à maior parcela do carregamento, 60 a 75% da carga total estrutural, ser transferida às estacas. Randolph (1994) ilustra casos de obra onde esta filosofia de projeto foi utilizada.
- (2) **Creeping piles**, situação em que: (i) cada estaca é projetada para trabalhar com uma carga para a qual um comportamento significativo de creep começaria a ocorrer, tipicamente entre 70 a 80% de sua carga de ruptura. (ii)

um número suficiente de estacas é projetado de forma a reduzir a tensão de contato efetiva entre o radier e o solo, a níveis inferiores à tensão de pré adensamento da argila.

A escolha de uma carga de trabalho elevada para as estacas impede que altas cargas sejam desenvolvidas nas estacas no bordo da fundação, permitindo uma determinação mais acurada dos momentos fletores no radier.

(3) **Controle do recalque diferencial**, nas concepções (1) e (2), se adota uma distribuição uniforme das estacas sob o radier, com o propósito principal de limitar os recalques a um valor aceitável, sendo o recalque diferencial reduzido como consequência da redução do recalque total. Porém, um enfoque mais direto é escolher a locação das estacas de forma a minimizar os recalques diferenciais, sem necessidade de redução significativa do recalque médio. A Figura 12 ilustra a solução do controle do recalque diferencial.

Cabe incluir nesta revisão o passo a passo do roteiro sugerido por Bhartiya et al. (2019), já citados no início deste capítulo. Os autores fizeram uma extensa análise paramétrica com base no emprego do MEF cujos resultados permitiram o estabelecimento de regressões lineares que resultaram em equações simples que permitem a estimativa do comportamento do radier estaqueado nesta mesma filosofia de radier reforçado por estacas, semelhantemente às contribuições de Randolph (1994) e Poulos (2001). Na Tabela 3 do item 1.2.2., quanto à espessura do radier, O'Brien et al. (2012) observaram que um radier de maior espessura irá reduzir o recalque diferencial às custas de um maior momento fletor, mas que a espessura do radier apresenta um efeito desprezível em relação ao recalque total ou à distribuição relativa entre as cargas nas estacas e no radier. Porém, Bhartiya et al. (2019) consideraram diretamente a influência da espessura,  $T_r$ , na rigidez do radier.

i) Inicialmente, o coeficiente de recalque do solo é estimado como:

$$K_s = \frac{E_s(1-\nu_s)}{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)\sqrt{A_s}} \quad (23)$$

onde  $E_s$  e  $\nu_s$  são o módulo de Young e coeficiente de Poisson do solo e  $A$  a área do radier.

A rigidez  $K_r$  do radier é estimada como:

$$K_r = K_s k_{rs} \quad (24)$$

onde  $k_{rs}$  é o fator de interação radier solo, adimensional, ou seja,  $K_r$  e  $K_s$  são expressos em unidade equivalente a  $\text{kN/m}^3$  e:

$$k_{rs} = 1,73 C_s x \left\{ \log_{10} \left( \frac{L_r}{T_r} \right) \right\}^{0,5} x \left( \frac{1 - \nu_s^2}{1 - \nu_r^2} \right) x \left[ 1 - \left( \frac{T_r}{B_r} \right)^3 \right] x e^{-30 (E_s/E_r)} \quad (25)$$

onde  $C_s$  = fator de forma =  $(B_r / L_r)^{0,5}$  para seções retangulares e  $C_s = 0,85$  para seções circulares,  $B_r$  é a largura,  $L_r$  o comprimento e  $T_r$  a espessura do radier.

## ii) Rigidez do grupo de estacas:

Para uma estaca única, tem-se:

$$K_{p1} = I_{ps} A_p E_p / L_p \quad (26)$$

onde  $A_p$ ,  $E_p$ ,  $L_p$  se referem à área, módulo de Young, comprimento da estaca e

$$I_{ps} = \frac{K_{p1}}{A_p E_p / L_p} \quad (27)$$

$$I_{ps} = 0,0084 x \left( \frac{\nu_p}{\nu_s} \right) x \left( \frac{L_p}{D_p} \right) x e^{-0,001 (E_p/E_s) (L_p/D_p)^{0,034}} \quad (28)$$

Estimada a rigidez da estaca isolada, parte-se para a estimativa da rigidez do grupo de estacas:

$$K_p = K_{p1} n_p (e^\eta - 2) / A_{gp} \quad (29)$$

$$\eta = 1 - 0,4 \log_{10} \left( 1 - \frac{A_{gp}}{A_r} - \frac{D_p}{2s_r} \right) \text{ para radiers retangulares ou corridos} \quad (30)$$

$$\eta = 1 - 0,4 \log_{10} \left( 1 - \frac{A_{gp}}{A_r} - \frac{D_p}{s_r} \right) \text{ para radier circular} \quad (31)$$

onde  $A_{gp}$  é a área do grupo de estacas e  $n_p$  é o número de estacas do grupo.

Finalmente se chega à expressão da rigidez do radier estaqueado:

iii) Rigidez do radier estaqueado:

$$K_{pr} = \frac{0,38 K_p e^{2,4(A_{gp}/A)} + K_r (1-2\alpha_{pr})}{1 + \alpha_{pr}^2 K_r/K_p} \quad (32)$$

$$K_{pr} = \frac{0,038 K_p e^{2,4(A_{gp}/A)} + K_r (1+2\alpha_{pr})}{1 + \alpha_{pr}^2 K_r/K_p} \quad (33)$$

onde:

$$\alpha_{pr} = 1 - \frac{\ln(r_r/r_p)}{\ln(r_m/r_p)} \quad (34)$$

$$r_m = 2,5 + L_p [2,5 (1 - \nu_p) - 0,25] \quad (35)$$

e  $r_r$  é o raio efetivo do radier associado a cada estaca, que pode ser calculado como a raiz quadrada da área total do radier dividida pelo número de estacas e dividida também por  $\pi$ , e  $r_p$  é o raio da estaca.

A autora desta pesquisa destaca que apesar de Bhartiya et al. (2019) terem feito uma série de análises de radiers estaqueados para em seguida estabelecerem as regressões lineares que resultaram nas expressões (23) a (35), ilustradas anteriormente, a estratigrafia do solo foi considerada uniforme e o semiespaço infinito. No próximo capítulo a autora irá resumir uma discussão que ela apresentou, com sua orientadora, a este artigo publicado na ASCE em que a autora comparou resultados de sua rotina ao método simplificado de Bhartiya et al. (2019) aplicado a um caso clássico da literatura. Ao reproduzir alguns resultados de aplicação apresentados no artigo de Bhartiya et al. (2020), a autora desta pesquisa observou também alguns enganos numa expressão, avisou aos autores e eles apresentaram uma errata ao trabalho original. Uma destas aplicações são apresentadas no Apêndice A já com a correção da expressão de Bhartiya et al. (2020).

A equação (25) apresentada anteriormente já está em sua versão corrigida.

Conhecida a rigidez do radier estaqueado, segue a estimativa de seu recalque, em termos médios:

$$w_{pr,av} = \frac{(P/A)}{K_{pr}} \quad (36)$$

Finalmente, Bhartiya et al. (2020) apresenta a expressão desenvolvida para a parcela da carga transferida às estacas, a transferida para o radier será o complemento.

$$\% P_p = \frac{P_p}{P} = \frac{K_p + (1 - 2\alpha_{pr})K_r}{K_p + K_r} \quad (37)$$

## 2 PROPOSTA SIMPLIFICADA DE SOLUÇÃO

Neste capítulo será descrita a metodologia simplificada elaborada nesta pesquisa.

### 2.1 Premissas Básicas

A formulação proposta objetiva a solução de fundação mista em radier estaqueado, restrito apenas a casos de grupo de estacas reforçado pelo radier, permitindo seu emprego em condições de contorno reais, envolvendo solos estratificados, variação de perfil do subsolo em planta, ocorrência de fronteira rígida. Adicionalmente, a rotina simplificada permite a incorporação de fundações mistas numa mesma obra, incluindo fundações diretas, grupos de estacas e radier estaqueados, permitindo a interação com a estrutura.

A rotina considera, num grupo de pilares associados a um radier estaqueado, a contribuição do bloco, além da contribuição das estacas, na transmissão da carga ao maciço de solo de fundação e na estimativa de recalques.

Apenas o carregamento vertical é contemplado, uma vez que este consiste na ação predominante da maior parte das estruturas de edificações correntes. No capítulo anterior foi verificado que tanto Poulos (2001), Randolph (1994) e Bhartiya et al. (2019) conceberam sua formulação de cálculo apenas para cargas verticais. Considerou-se também o radier estaqueado com uma planta simétrica, com centro de gravidade do carregamento externo coincidente com o da fundação mista.

A rotina desenvolvida pela autora é baseada no método de Aoki-Lopes, aplicada ao solo estratificado em presença de um semi-espaco finito (influência da fronteira rígida), com expressões detalhadas no Anexo A.

O método de Aoki e Lopes (1975) estima as tensões e recalques no interior do maciço através de um processo numérico em que as cargas transmitidas por uma estaca isolada ou por um conjunto de estacas são decompostas em um sistema equivalente de cargas concentradas (Figura 20), cujos efeitos são superpostos nos pontos em estudo. Embora concebido originalmente para fundações em estacas, o método se aplica também a fundações diretas e, conseqüentemente, a fundações mistas. As tensões e deslocamentos verticais produzidos por cada uma das cargas

concentradas são obtidos pelas Equações de Mindlin (1936), válidas para um semi-espaço elástico, infinito, homogêneo e isotrópico.

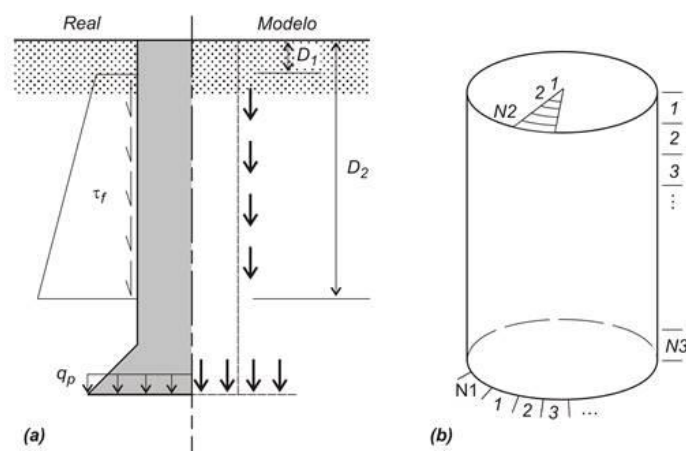


Figura 20. Sistema equivalente de forças concentradas, representando as ações da estaca no solo (Aoki e Lopes, 1975, adaptada de Danziger e Lopes (2021)).

O método considera que a carga atuante no topo da estaca,  $P$ , é dividida numa parcela transferida à ponta,  $P_b$ , e outra de atrito lateral,  $P_l$ . O atrito lateral é considerado como variando linearmente ao longo de cada camada de solo, e a carga na base é uniformemente distribuída (Figura 20). O método de Aoki e Lopes (1975) requer, como dado de entrada, o modo de transferência de carga da estaca. É comum se admitir, para efeitos práticos, que toda a capacidade de carga do solo no fuste é mobilizada antes de iniciada a mobilização da resistência de ponta. Sendo assim, apenas a parcela da carga de trabalho que excede o atrito lateral é transmitida à ponta.

No Capítulo 1 se mostrou que o atrito lateral na transferência de carga de uma estaca inserida num radier estaqueado é mobilizada de baixo para cima, enquanto que numa estaca isolada ele se faz de cima para baixo. Como o recalque do topo do da estaca é igual ao do radier no mesmo ponto, o deslocamento relativo é nulo neste ponto e o atrito unitário também o é. A autora, em sua rotina, partiu de uma transferência de carga de cima para baixo. Esta consideração foi, no início, motivo de grande preocupação da autora, pela possibilidade de ser uma fonte de perda de acurácia da solução. Porém se verá, no próximo capítulo, que a diferença na profundidade de início da mobilização do atrito não deve ser de grande relevância,

uma vez que os resultados da autora forneceram um bom ajuste com resultados experimentais e de análises numéricas mais refinadas, como se verá no Capítulo 3.

Na aplicação do método, o Módulo de Young e o Coeficiente de Poisson dos solos são estimados a partir de ensaios de campo e correlações da literatura, como foi tratado no capítulo 1 pelos demais métodos propostos na literatura. O recalque do solo é previsto no nível da ponta da estaca e deve ser acrescido do encurtamento elástico do fuste (considerando-se o modo de transferência e o Módulo de Young do material da estaca).

Para contornar os casos de maciços estratificados com espessura finita, que não podem ser abordados somente por Mindlin (1936), Aoki e Lopes (1975) sugerem adotar o procedimento de Steinbrenner (1934). O método consiste em calcular o recalque de baixo para cima em etapas, Figura 21.

Primeiramente, calcula-se o recalque no nível indeslocável ( $r_h^\infty$ ) e no topo da camada 2 ( $r_i^\infty$ ), admitindo que todo solo do indeslocável para cima seja do mesmo material da camada 2. O recalque nesta camada será  $r_a$ , dado pela equação 38:

$$r_a = r_i^\infty - r_h^\infty \quad (38)$$

Veja que, para facilidade, neste ponto a autora está mantendo a mesma notação de recalques de Aoki-Lopes (1975), embora no restante do texto o recalque esteja sendo considerado pela variável  $w$ .

O processo é repetido trasladando o indeslocável para o topo da camada calculada anteriormente e utilizando as propriedades do solo imediatamente acima. Calcula-se o recalque  $r_b$  por:

$$r_b = r_i^\infty - r_h^\infty \quad (39)$$

O recalque no nível da aplicação da carga será obtido pela sobreposição dos recalques das camadas, mostrado, graficamente, na Figura 21.



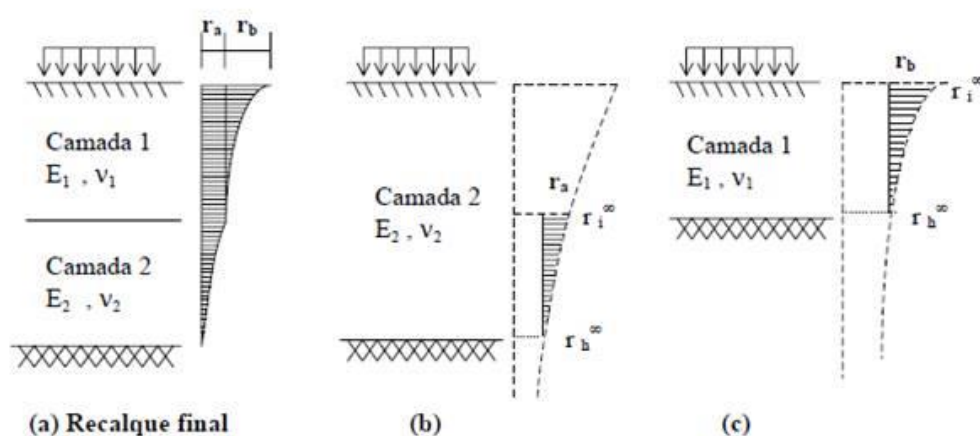


Figura 21. Metodologia de Steinbrenner para solos estratificados (Iwamoto, 2000)

## 2.2 Rotina para a fundação em radier estaqueado, em etapas.

### Etapa inicial (1):

Nesta etapa inicial se considera que as estacas estejam suficientemente afastadas entre si, de forma a não haver interação entre elas. O bloco é considerado flexível.

A premissa inicial de bloco flexível foi assumida em conformidade com os conhecimentos obtidas da pesquisa bibliográfica. A Tabela 3 do capítulo 1 esclarece que a espessura do radier apresenta um efeito desprezível em relação ao recalque total ou à distribuição relativa entre as cargas nas estacas e no radier.

Inicialmente se considera a carga transmitida ao maciço apenas pela base do radier, determinando-se sua rigidez através dos seguintes passos:

### Radier isolado:

- 1) Cálculo do recalque  $w_r$  no centro de gravidade da base do radier, para o carregamento total uniformemente distribuído em sua área, utilizando o programa Aoki Lopes (1975), aplicável tanto a fundações diretas como profundas, com base num perfil geotécnico típico da área em estudo. Veja que nesta etapa inicial se considera um mesmo perfil geotécnico típico em toda a área do radier.
- 2) Cálculo da rigidez  $K_r$  do radier pela relação entre a carga aplicada e o recalque estimado.

$$K_r = \frac{P}{w_r} \quad (40)$$

### Contribuição do grupo de n estacas:

Em seguida se considera apenas a contribuição das n estacas do bloco, nesta fase ainda sem considerar a interação entre elas, ou seja, como se as estacas estivessem muito distantes entre si.

No caso da carga aplicada ser inferior ou, no máximo igual, à carga disponível por atrito lateral na ruptura, considera-se não haver carga transmitida à ponta da estaca. A carga transmitida pelo fuste ao solo será o valor disponível até a profundidade onde o valor resultante da carga disponível por atrito na ruptura se igualar à carga aplicada. Alternativamente, pode-se considerar um diagrama de transferência proporcional ao disponível, até a ponta, sendo a resultante deste carregamento o valor da carga aplicada. Caso a carga aplicada seja superior ao atrito disponível na ruptura, o complemento em relação à carga aplicada é considerado transferido à ponta na situação de serviço.

- 1) Cálculo do recalque do solo no nível da ponta de cada estaca,  $w_p$ , pelo método Aoki-Lopes, seguido do cálculo do recalque elástico do fuste da estaca,  $w_s$ , calculado diretamente como se fora um pilar carregado com diagrama não uniforme.
- 2) A soma das duas parcelas será o recalque no topo da estaca isolada,  $w_e$ ;
- 3) Cálculo da rigidez de 1 estaca e do grupo de n estacas, sendo P a mesma carga resultante aplicada ao radier isolado.

$$K_p = \frac{P/n}{w_p} \quad \text{e} \quad nK_p = \frac{P}{w_p} \quad (41)$$

### Considerando o radier estaqueado:

Como a carga total será compartilhada pelo radier e pelas estacas, com base na equação de equilíbrio e compatibilidade, se tem:

- 1) Cálculo do recalque do radier estaqueado,  $w_{pr}$

$$w_{pr} = \frac{P}{K_r + nK_p} \quad (42)$$

- 2) Cálculo da parcela da carga que vai para o radier,

$$P_r = K_r w_{pr} \quad (43)$$

- 3) Cálculo da parcela da carga que vai para cada estaca,  $P_p$  e para o grupo de estacas,  $nP_p$ :

$$P_p = K_p w_{pr} \quad (44)$$

$$nP_p = nK_p w_{pr} \quad (45)$$

### Etapa (2):

Uma vez estabelecida a partição de cargas na etapa inicial, procede-se a uma segunda estimativa de recalques, agora com o radier estaqueado (conjunto), e as cargas particionadas da etapa anterior, sob a base do bloco, suposto flexível, e nas estacas (transferidas pela ponta e por atrito), estimando-se os recalques por Aoki e Lopes (1975).

- 4) Neste passo se altera o arquivo carga do programa Aoki Lopes, entrando com as cargas particionadas do radier,  $P_r$  e das estacas  $P_p$ , desta vez considerando o radier estaqueado, obtendo-se os recalques nos seguintes pontos em estudo: no centro da base do radier e no topo de cada uma das estacas, lembrando que o recalque da estaca no topo é aquele da ponta somado ao deslocamento elástico do fuste. Sendo a configuração simétrica, várias estacas apresentarão mesmo valor de recalque no topo.

O novo recalque contempla a interação entre as estacas e o radier. O novo recalque sob o centro do radier permitirá a estimativa da sua rigidez,  $K_r$ , nesta segunda etapa, passo 5 a seguir.

O novo recalque do solo na base das estacas (agora com a interação entre elas e o radier), somado ao recalque elástico do fuste de cada uma delas, resultará no novo recalque no topo de cada uma das estacas. Se as estacas tiverem a mesma distância ao centro do radier, o recalque do topo será o mesmo para todas elas. Caso contrário, será considerada a média dos recalques calculados no topo de todas as estacas. Com este recalque médio no topo da estaca típica, será calculado o valor atualizado da rigidez da estaca  $K_p$  no passo 6.

Cabe observar que esta estimativa é apenas aproximada, uma vez que tem como premissa uma placa flexível, resultando em recalques diferentes no centro do bloco e no topo das estacas. Mas esta aproximação é compatível com a contribuição de Poulos (2001) e Randolph (1994) que observaram que a partição das cargas e o recalque médio não dependem da rigidez do bloco.

- 5) Cálculo da nova rigidez do radier,  $K_r^*$ .

$$K_r^* = \frac{P_r}{w_r^*} \quad (46)$$

- 6) Cálculo da nova rigidez da estaca,  $K_p^*$ .

$$K_p^* = \frac{P_p}{nw_p^*} \quad (47)$$

O recalque do radier estaqueado é aproximado, nesta segunda etapa, pelas expressões abaixo:

- 7) Cálculo do novo recalque do radier estaqueado,  $w_{pr}^*$

$$w_{pr}^* = \frac{P}{K_r^* + nK_p^*} \quad (48)$$

- 8) Cálculo da nova partição de cargas, para o radier,  $P_r^*$

$$P_r^* = K_r^* w_{pr}^* \quad (49)$$

- 9) Cálculo da nova partição de cargas, para o grupo de estacas,  $P_p^*$

$$P_p^* = nK_p^* w_{pr}^* \quad (50)$$

A partir deste ponto, para as etapas seguintes, segue o processo iterativo. Com as novas partições (equações 49 e 50), executa-se o programa Aoki-Lopes de estimativa de recalque do radier estaqueado, estimando-se o recalque no centro do radier e o valor médio dos recalques no topo das estacas. Com estes valores e a carga particionada, atualizam-se os valores de rigidez do radier, equação 46, e do grupo de estacas, equação 47. Parte-se para a estimativa do recalque do radier estaqueado, equação 48. Com este novo valor de recalque,  $w_{pr}^*$ , da equação 48, procede-se a uma nova partição, equações 49 e 50, e assim sucessivamente, até que os recalques convirjam com uma pequena tolerância, ou seja,  $w_r \sim w_p$  médio. Nesta situação,  $w_r \sim w_p \sim w_{pr}$ . Após a convergência, tem-se o recalque do radier estaqueado e a partição

das cargas. Com as cargas estimadas, nas estacas e no radier, pode-se estimar também os esforços no bloco.

Cerca de três iterações são, em geral, suficientes para a convergência.

Após esta convergência, têm-se as partições (percentuais) aproximadas finais da carga transferida ao radier e ao grupo de estacas:

$$\% \text{ carga transferida ao radier} = 100 \times \frac{P_r}{P} \quad (51)$$

$$\% \text{ carga transferida ao grupo de estacas} = 100 \times \frac{P_e}{P} \quad (52)$$

O programa base utilizado foi desenvolvido na Universidade de São Carlos e disponibilizado para uso em pesquisa. A autora implementou a rotina que faz as estimativas das iterações de forma automática. Um exemplo da entrada de dados e arquivos associados encontra-se ilustrado no Apêndice B.

Nesta análise as seguintes condições foram contempladas:

- (i) Bloco foi considerado flexível, porém com a aproximação de que o recalque médio sob o bloco fosse igual ao recalque médio do topo das estacas.
- (ii) Estacas com mesmo comprimento (mesma rigidez);
- (iii) Carga centrada no bloco;
- (iv) Há interação entre estacas e entre estacas e radier, exceto na etapa inicial.

Todos os cálculos que não são feitos pelo programa Aoki Lopes (1975) são realizados dentro do próprio algoritmo, que foi desenvolvido em uma planilha Excel, exemplificada no Apêndice C.

A rotina é disponibilizada para emprego na prática, na tentativa de se utilizar o radier estaqueado como alternativa para projetos mais otimizados. Como as investigações do subsolo não costumam ser completas, não permitindo se ter valores acurados do comportamento tensão x deformação do solo a diferentes níveis de

tensões confinantes, o recurso de utilização de um modelo de comportamento refinado e programas como o MEF não se justifica na prática corrente. Randolph (1994) comparou seu procedimento aproximado com análises numéricas, com resultados resumidos na Tabela 4 do capítulo 1, com valores bem próximos e consistentes. O que se sugere é se proceder uma estimativa para limites inferior e superior de rigidezes relativas entre o radier e o solo, por conta das incertezas das correlações com ensaios de campo. Destaca-se, porém, que os modelos numéricos refinados são relevantes nos estudos paramétricos e em pesquisas sobre este assunto. Muitas das conclusões e sugestões de aplicação indicadas no capítulo 1 foram resultado de análises numéricas.

Em resumo, tem-se:

#### ETAPA INICIAL (1)

##### 1) Radier isolado

Programa Aoki Lopes – obtenção do recalque no centro do radier  $w_r$

Algoritmo Excel – obtenção da rigidez  $K_r = P/w_r$

##### 2) Grupo de Estacas

Programa Aoki Lopes – obtenção do recalque na ponta da estaca  $w_p$

Algoritmo Excel – obtenção do recalque  $w_e = w_p + w_s$

obtenção da rigidez  $K_p = (P/n)/w_e$

##### 3) Radier Estaqueado

Algoritmo Excel – obtenção do recalque  $w_{pr} = P/(K_r + n K_p)$

– obtenção da parcela da carga que vai para radier  $P_r = K_r w_{pr}$

– parcela da carga que vai para o grupo de estacas  $P_p = n K_p w_{pr}$

#### ETAPA (2)

##### 1) Radier estaqueado

Programa Aoki Lopes – inserindo as cargas anteriores  $P_r$  e  $P_p$  obtém-se o recalque no centro (base) do radier  $w_{re}$  e na ponta da estaca  $w_{pe}$

Algoritmo Excel – obtenção da nova rigidez do radier  $K_{re} = P_r/w_{re}$

– recalque no topo da estaca típica  $w_{e^*} = w_{pe} + w_s$  ( $w_{pe}$  = média do  $w_p$  das estacas do grupo)

– nova rigidez das estacas  $K_{p^*} = (P_p/n)/w_{e^*}$

– novo recalque do radier estaqueado  $w_{pr^*} = P/(K_{re} + n K_{p^*})$

– nova parcela da carga que vai para radier  $P_{r^*} = K_{re} w_{pr^*}$

– nova parcela da carga que vai para o grupo de estacas  $P_{p^*} = n K_{p^*} w_{pr^*}$

### 3 APLICAÇÃO DA ROTINA A CASOS DOCUMENTADOS NA LITERATURA

Com o objetivo de verificar a adequação da rotina a casos conhecidos da literatura, este capítulo irá apresentar alguns casos de instrumentação documentados e a aplicação de diferentes metodologias, objetivando comparar as aplicações entre si, bem como aos resultados experimentais.

#### 3.1 Caso 1: Campinas – São Paulo – Garcia (2015)

O primeiro caso instrumentado utilizado na calibração do enfoque simplificado é o da tese de doutorado de Garcia (2015). Naquela pesquisa analisou-se, entre outros casos mais simples, o comportamento de um radier estaqueado de 1,85x1,85m, composto por 4 estacas escavadas mecanicamente a trado, com 5 m de comprimento e 0,25 m de diâmetro, executado em solo residual de diabásio da região de Campinas. Essas estacas foram espaçadas de 5 vezes o diâmetro conforme Figura 22.

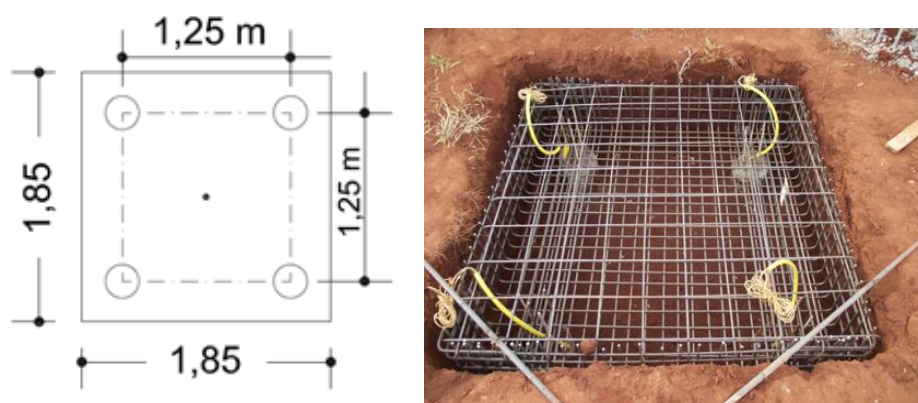


Figura 22. Geometria e armadura do radier estaqueado, Garcia. J.R, (2015)

Esse bloco de fundação foi ensaiado a partir de provas de carga do tipo estática lenta (SML), seguindo as prescrições da NBR12131/2006. As estacas foram instrumentadas em profundidade com strain-gages posicionados no topo e na ponta, com a finalidade de avaliar o mecanismo de distribuição de carga em profundidade, assim como avaliar as parcelas de contribuição de cada elemento (estaca e radier) na capacidade de carga do radier estaqueado. Para melhor entender o comportamento

desse tipo de fundação, Garcia (2015) utilizou análises tridimensionais (3D) por elementos finitos, por meio do software LCPC-Cesar. O modelo constitutivo utilizado foi de Mohr-Coulomb, que leva em consideração o comportamento elasto-plástico do solo. As sondagens apresentam-se na Figura 23. Os parâmetros utilizados encontram-se na Figura 24.

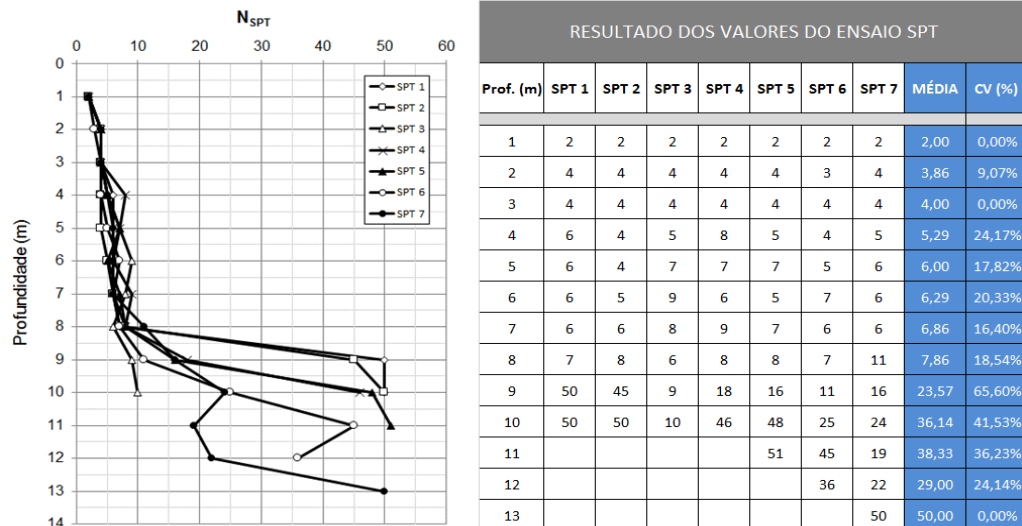


Figura 23. Valores de  $N_{spt}$  em profundidade, Garcia. J.R, (2015)



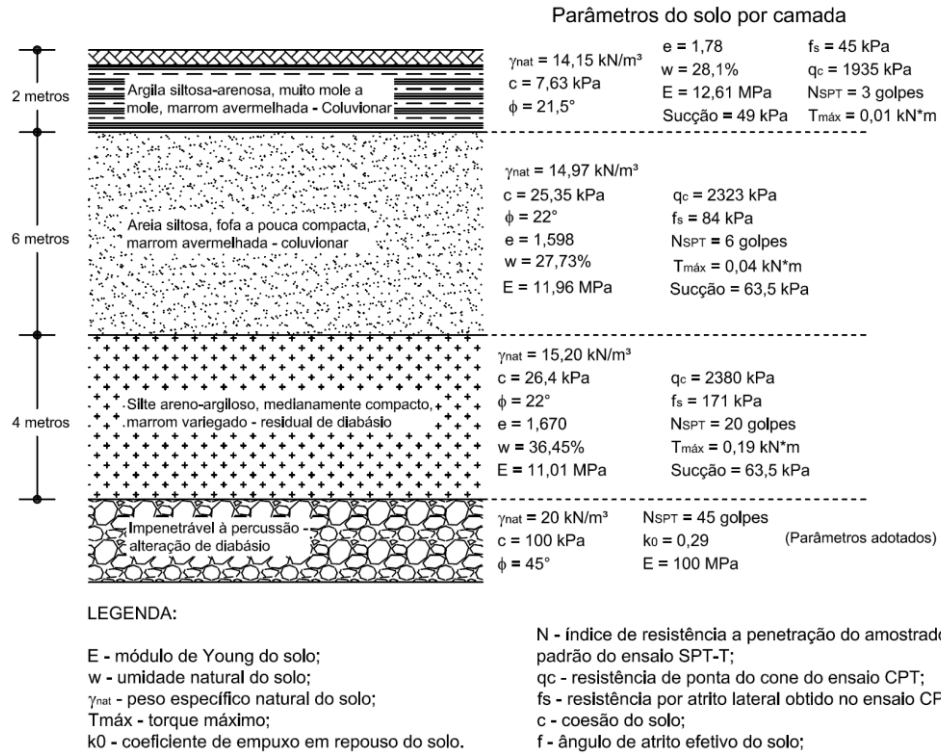


Figura 24. Parâmetros médios do perfil geológico do campo experimental, Garcia, (2015).

Os resultados da prova de carga deste radier estaqueado com 4 estacas está apresentado na Figura 25.

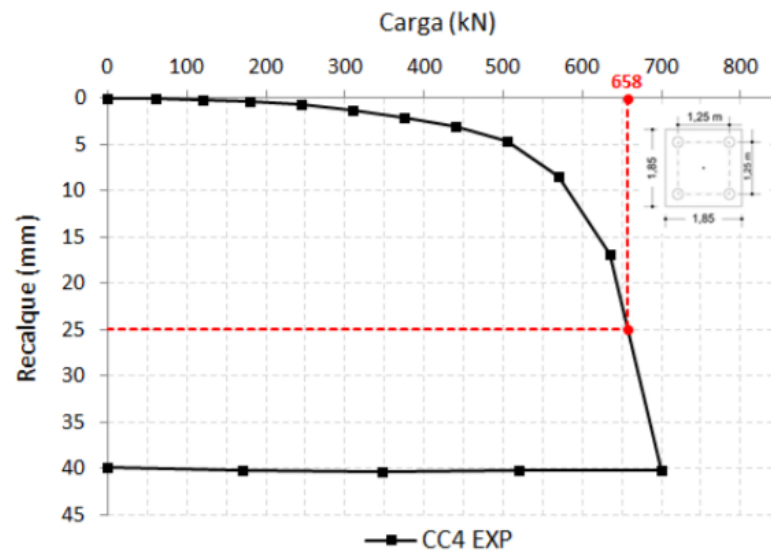


Figura 25. Curva carga recalque do radier estaqueado indicado na Figura 21, Garcia, (2015)

Observa-se que até a carga de 350 kN o comportamento do radier estaqueado apresenta-se aproximadamente linear, com um afastamento da ruptura de um fator de cerca de 2. Por este motivo, optou-se por fazer a estimativa de recalque do radier estaqueado, bem como a repartição de cargas entre o radier e as estacas, para este nível de carregamento, já que tanto os modelos simplificados de Randolph (1994) e colaboradores, como o apresentado no Capítulo 2, são baseados na Teoria da Elasticidade. Como as estacas foram instrumentadas na ponta e no topo, a transferência de carga na estaca é conhecida para a carga atuante, bem como as parcelas de carga resistida pelas estacas (soma das cargas obtidas nas células de carga posicionadas no topo das estacas) como a parcela transferida ao solo superficial (diferença entre a carga total aplicada no nível analisado, 350 kN, e a carga transferida às estacas).

Na aplicação da rotina foram utilizados parâmetros de deformabilidade do solo envolvido no maciço de embutimento do radier estaqueado, fornecidos na Figura 24, ou seja, os mesmos de Garcia (2015). Com os mesmos parâmetros se tem um mesmo padrão para comparação dos resultados.

Todos os cálculos realizados pela autora, sejam aquelas aplicações de métodos estabelecidos por autores citados no Capítulo 1, seja pela rotina simplificada desenvolvida no Capítulo 2, são detalhados em Apêndices. Neste caso, além da metodologia proposta apresentada, onde se considera o radier uma placa flexível com interação entre as estacas e o radier, também foram analisados os seguintes casos: consideração do radier como placa rígida, consideração do radier como placa flexível, aplicação da metodologia de Randolph (1994) utilizando dois enfoques: a formulação da estaca equivalente e para o enfoque da solução aproximada para um grupo de estacas. A seguir são resumidos apenas os resultados que serão comparados aos valores obtidos da prova de carga, resumidos na Tabela 5.

O resultado da primeira linha da Tabela 5 corresponde a uma estimativa de recalque sem uso do programa Aoki-Lopes (1975), mas de uma solução estendida a placas rígidas, pelo o método de Barata (1966), muito empregado em solos residuais no Brasil. Para a estimativa do recalque das estacas, utilizou-se o método de Vesic (1977), também como alternativa ao programa de Aoki-Lopes.

Para a carga  $P$  aplicada diretamente ao solo superficial, considerando-se inicialmente apenas a transferência da carga através do radier, suposto como rígido,

o recalque pode ser estimado pela teoria da elasticidade com uma equação do tipo (Barata,1966):

$$w_r = \lambda c_{\Delta} \frac{P/\acute{a}rea}{E_z} D (1 - \nu^2) \quad (53)$$

onde  $w_r$  é o recalque do radier,  $\lambda$  é o coeficiente de Mindlin,  $c_{\Delta}$  é o coeficiente dependente da forma e da rigidez do elemento,  $P$  é a carga aplicada,  $E_z$  é o módulo de elasticidade do solo (correspondente à região influenciada pelo bulbo de tensões),  $D$  é o diâmetro ou largura do radier e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson. Vale ressaltar que o  $c_{\Delta}$  utilizado foi o referente a uma sapata quadrada rígida.

A rigidez do bloco é definida como o recalque para uma carga unitária que, a partir da equação 53, pode ser escrita como:

$$K_r = \frac{P}{w_r} = \frac{\acute{a}rea E_z}{\lambda c_{\Delta} D (1-\nu^2)} \quad (54)$$

Cabe destacar que, ao invés de se utilizar a expressão de Barata (1966), outros métodos podem ser escolhidos, com base na teoria da elasticidade.

No que se refere às estacas, para a mesma carga  $P$ , considerando-se apenas a transmissão de carga nas estacas, tem-se:

$$w_p = w_{pp} + w_{ps} + w_s \quad (55)$$

onde  $w_{pp}$  é o recalque do solo no nível da ponta da estaca devido à parcela da carga transferida pela ponta,  $w_{ps}$  é o recalque do solo no nível da ponta da estaca devido à parcela da carga transferida por atrito lateral no fuste e  $w_s$  é o recalque elástico do fuste das estacas, cuja soma fornece  $w_p$ , que é o recalque no topo. O recalque da estaca isolada, nesta primeira linha da Tabela 5, foi calculado pelo método de Vesic (1977).

A rigidez de cada estaca é expressa pela mesma equação 41 do capítulo 2, reproduzida abaixo.

$$K_p = \frac{P/n}{w_p}$$

Os cálculos estão exemplificados no Apêndice D.

Após aplicar a mesma rotina descrita no Capítulo 2, mas desta vez utilizando o Método de Barata (1966) e o Método de Vesic (1977) ao invés do programa de Aoki Lopes (1975), referente à placa rígida, foi encontrada uma repartição e cargas para o radier de 12% e 88% para as estacas.

Cabe destacar que, no uso do método de Vesic (1977), bem como na aplicação da rotina de Aoki-Lopes (1975), é necessário que se conheça a transferência de carga para o cálculo do recalque da estaca isolada. Como a transferência de carga varia com o nível do carregamento, a rigidez das estacas também varia com o nível do carregamento.

Para analisar o radier como uma placa flexível, segunda linha da Tabela 5, ainda não considerando a interação entre estacas e entre estas e o radier, procedeu-se da mesma forma que para o radier rígido, mas desta vez o  $c_{\Delta}$  utilizado foi o referente a uma sapata flexível.

Sendo o radier flexível, o recalque do radier será calculado próximo à localização das estacas. Com isso, calcula-se a rigidez inicial do radier com a mesma expressão (40) utilizada no capítulo 2, porém com o fator de forma da fundação flexível. Em função do posicionamento das estacas em relação ao eixo do radier, o recalque do topo da estaca é igual ao recalque do radier apenas na posição das estacas, próximas ao bordo do radier. Assim, a equação de compatibilidade de deslocamentos só ocorre nos pontos de localização das estacas.

Com relação às estacas foi utilizado o método de Vesic (1977) de forma análoga à análise do radier rígido. Para esta alternativa, sem a interação, considerando a placa flexível, o radier contribuiu com 16% e as estacas com 84%, com cálculos parciais apresentados no Apêndice E.

Para analisar o radier como uma placa flexível (considerando a interação entre estacas e radier) utilizou-se a metodologia proposta no Capítulo 2 sem nenhuma alteração, ou seja, utilizando o programa Aoki Lopes (1975). Embora o método Aoki-Lopes tenha sido concebido para a estimativa do recalque de um grupo de estacas, ele pode ser estendido à estimativa de recalque de fundações diretas, com a vantagem, inclusive, de poder incorporar a influência de um conjunto de sapatas de uma mesma obra, justamente o efeito de interação entre elementos de fundação direta, que a maioria dos métodos de cálculo de recalque em sapatas não permite, por considerá-las como isoladas. Para incluir uma sapata, basta considerá-la como

uma fundação profunda assente numa profundidade muito pequena e introduzir uma transferência de carga, por atrito lateral, desprezível.

A grande vantagem da utilização do procedimento de Aoki-Lopes para a estimativa de recalques é que a maior parte das condições de contorno reais do problema, como a ocorrência de perfil estratificado, influência da fronteira rígida, etc, podem ser considerados.

Nesta análise, a contribuição do radier, correspondente à linha 3 da Tabela 5, foi de 25% enquanto as estacas participaram com 75%. Os cálculos se encontram no Apêndice F. Nesta aplicação, a interação entre os elementos aumenta o valor do recalque do radier estaqueado, aumentando a contribuição do radier, na transferência da carga superficial, e reduzindo a contribuição das estacas.

Aplicando a metodologia de Randolph (1994), utilizando a formulação da **estaca equivalente** para o cálculo do grupo de estacas, foram encontrados os valores de contribuição do radier e das estacas como 11% e 89%, respectivamente. Estes cálculos estão apresentados no Apêndice G.

Aplicando a metodologia de Randolph (1994), utilizando a formulação do **grupo de estacas**, para o fator de interação do grupo, foram encontrados os valores de contribuição do radier e das estacas como 10% e 90%, respectivamente. Estes cálculos também estão apresentados no Apêndice G.

Em relação ao método de Randolph para os dois enfoques sugeridos, incorporando o grupo de forma rigorosa ou através do conceito da estaca equivalente, os resultados foram muito próximos, indicando a adequabilidade do método da estaca equivalente para o espaçamento relativo do caso analisado. O método do Randolph (1994) para cálculo de recalque do grupo pelo método da estaca equivalente costuma ser utilizado para pequenos espaçamentos relativos, enquanto o método do radier equivalente, sugerido também pela norma brasileira, é o mais adequado para a estimativa de recalques com maiores espaçamentos relativos entre estacas.

Os resultados experimentais de Garcia (2015) apontaram uma contribuição média devida ao contato radier-solo de 31% e 69% devido às estacas (lateral + ponta). Os resultados numéricos revelaram participação de 22% para o radier e 78% para as estacas.

Tabela 5. Resultados de previsão do comportamento do radier estaqueado, caso instrumentado por Garcia (2015).

Metodologia Simplificada	Repartição de cargas (valores em porcentagem)		Recalque radier estaqueado (mm)
	Radier	Grupo de estacas	
Rotina proposta pela autora, considerando a placa rígida, sem interação entre as estacas.	12	88	1,35
Rotina proposta, considerando a placa flexível, sem interação entre as estacas.	16	84	2,07
Rotina proposta, considerando a placa flexível, com interação entre as estacas	25	75	2,88
Solução de Randolph (1994) para o grupo de estacas como uma estaca equivalente	10	90	4,77
Solução de Randolph (1994), considerando a interação entre as estacas do grupo	11	89	5,01
Resultado da análise numérica, Garcia (2015)	22	78	2,50
Resultado da prova de carga	31	69	1,80

Destaca-se que o método proposto no Capítulo 2, com base na metodologia de Aoki- Lopes (1975), indica resultado de partição de carga compreendido entre o resultado experimental e o numérico de Garcia (2015), indicativo de uma previsão muito boa, em relação aos demais métodos. Para a estimativa de recalque do radier

estaqueado, o resultado da autora foi muito próximo do resultado obtido por Garcia (2015) em sua análise numérica (uma diferença em torno de 15%).

No caso do radier rígido, primeira linha da Tabela 5, a carga transferida para as estacas foi maior e menor para o radier, como esperado e já comentado anteriormente. No caso do radier flexível, o maior deslocamento do radier implica numa maior mobilização de carga no radier, reduzindo a carga mobilizada pelas estacas. Porém, esta diferença é pouco significativa, quanto à repartição das cargas, em conformidade com as observações da literatura. Já os resultados do radier rígido (com recalques iguais) e flexível (com recalques livres), apresentam diferença mais significativa quando calculados no centro do radier estaqueado. Os recalques médios, segundo a literatura consultada, também não apresentam diferenças significativas. Este aspecto poderá ser melhor investigado na continuidade da pesquisa, quando se considerar o efeito da rigidez do radier. Mas a expectativa da autora é de que tal efeito seja pequeno no comportamento do conjunto, corroborando com as conclusões obtidas no capítulo de revisão bibliográfica.

Quando se introduz a interação, aplicação da linha 3 da Tabela 5, os recalques aumentam, face à elevada interação entre estacas e o radier sobre o maciço de solo. O acréscimo de tensões transferido ao solo na superfície do radier aumenta o estado de tensões no maciço, empurrando as estacas para baixo, como se fora uma parcela de atrito negativo. O aumento da tensão cisalhante na face superior das estacas, pelas tensões transferidas pelo radier e pela interação entre estacas, aumenta a transferência de carga para a ponta, aumentando os recalques, reduzindo a rigidez das estacas e transferindo menos carga às estacas, proporcionalmente ao radier. De fato, observa-se que os métodos que contemplam a interação são aqueles que transferem menos carga às estacas e mais carga ao radier. O mesmo pode ser observado nos dois enfoques de cálculo de Randolph, que incluem a interação, mas de forma diferente entre si. Onde o recalque foi maior, na proposta de Randolph do grupo de estacas, mais carga é transferida ao radier.

Cabe destacar que este comportamento é compatível com o tipo de estaca empregado, que é uma estaca broca, escavada. Se fosse uma estaca cravada de deslocamento em solo arenoso, o efeito da execução, para afastamentos usuais da prática, resulta num aumento de tensões horizontais no maciço que aumenta a transferência de carga por atrito da estaca no grupo em relação à de uma estaca isolada, como mostrou Briaud et al. (1989) num ensaio num grupo de 5 estacas e

numa estaca isolada de referência. Briaud et al. (1989) fizeram o ensaio para o grupo, sem contemplar o contato do bloco com o solo, mas a diferença encontrada na transferência de carga do grupo foi muito significativa, com muito mais carga medida na ponta, para a carga de serviço, do que a da estaca isolada.

Já para estacas na argila rijia de Londres, Cooke (1979) observou que o efeito do grupo resultou numa transferência de carga por atrito, no grupo, inferior ao da estaca isolada.

Uma vez que o método simplificado proposto apresentou comportamento adequado quando comparado ao experimental, além de poder reproduzir situações mais próximas das condições reais, presentes na natureza (perfil estratificado, fronteira rígida, possibilidade de incluir perfis de solo residual, solos sedimentares, etc), a autora considera que ele possa ser muito útil para projeto de fundações, que, na prática, são realizados com um cronograma apertado. Nestas situações, o prazo necessário para uma análise numérica, onde os parâmetros do solo e modelo constitutivo não são conhecidos, não se justifica, face à boa acurácia dos modelos simples. De fato, as cargas nas fundações só são conhecidas após o cálculo estrutural, e a construção se inicia pelas fundações, disponibilizando, ao engenheiro geotécnico, um prazo reduzido para a elaboração do projeto. Neste sentido, um método simples, que incorpore as condições de contorno que ocorrem na prática e com resultados adequados, quando comparado aos experimentais, e contemplando a interação com a estrutura, tem grande potencial de aplicabilidade na prática, o que motivou a presente pesquisa.

Em relação aos valores de recalques estimados, algumas observações podem ser destacadas. Na proposta da autora, sem interação entre os elementos de fundações, a situação do radier rígido, em que todo o conjunto recalca por igual, apresentou um menor recalque comparado à proposta de radier flexível, sem interação. O recalque indicado na Tabela 5 corresponde ao valor médio no radier. Quando se incluiu a interação, os recalques aumentaram, como esperado. Com a interação, as tensões transmitidas pelo radier ao maciço de solo tendem a carregar mais a estaca, para uma estaca sem deslocamento, aumentando a carga transferida à ponta e, conseqüentemente, o recalque. Curioso notar que a proposta da autora se aproximou àquela da análise numérica e do valor experimental. Sabe-se da falta de acurácia na determinação do recalque em fundações, uma vez que o solo não é elástico, como assumido nos modelos, e o módulo de elasticidade do solo nem sempre



é reproduzido, de forma acurada, nos ensaios. Apesar de todas estas limitações, os recalques previstos na metodologia proposta foram muito próximos dos recalques medidos e dos estimados de uma forma muito mais refinada.

### **3.2 Caso 2: Aichi Prefecture – Japão– Yamashita et al. (2011)**

A Figura 26 ilustra um estudo de caso investigado por Yamashita et al. (2011) e revisitado por Bhartiya et al. (2019). Trata-se de um edifício comercial de 11 andares apoiado sobre um radier estaqueado, PRF, piled raft, retangular. O recalque máximo observado do PRF foi de 18 mm, correspondendo a uma carga aplicada verticalmente, uniformemente distribuída,  $P/A_{\text{área}}$ , de 181 kPa. O radier tinha 83 x 46,5 x 1m e era suportado por 40 estacas de concreto escavadas com bases alargadas. As estacas tinham 27,5 m de comprimento, com diâmetros variando de 1,1 a 1,8 m, e foram construídas com espaçamentos variáveis,  $s_r= 6,3; 7,5; 8,6$  e  $9,6$  m na horizontal, e  $s_c= 16$  e  $11,5$  m no sentido vertical da planta. O subsolo consiste em um depósito aluvial de areia solta a média a uma profundidade de 12 m com os valores de  $N_{\text{SPT}}$  variando de 10 a 25, sobrejacente a uma camada de solo argiloso com areia média a densa com presença de cascalho até uma profundidade de 28 m, com  $N_{\text{SPT}}$  entre 10 e 50. Esta camada, por sua vez, é sobrejacente a um depósito de areia e cascalho denso a muito denso. O lençol freático estava a cerca de 20 m abaixo da superfície do solo. Uma configuração equivalente de radier estaqueado (Figura 26) foi considerada com base na descrição de Yamashita et al. (2011) com um diâmetro médio uniforme de estaca de 1,5m e espaçamento uniforme entre estacas de  $s_r= 8,9$  m (horizontal),  $s_c=14,5$  m (vertical). Constantes elásticas do solo  $E_s=40$  MPa e  $\nu_s=0,3$  foram assumidas, correspondendo a areia de densidade média com base num valor médio de  $N_{\text{SPT}}$  de 30, (Bowles 1996). As constantes elásticas do material do radier estaqueado  $E_p=30$  GPa e  $\nu_s= 0,2$ , correspondentes ao concreto M30, foram empregadas pelos autores. Os mesmos parâmetros foram considerados pela autora.

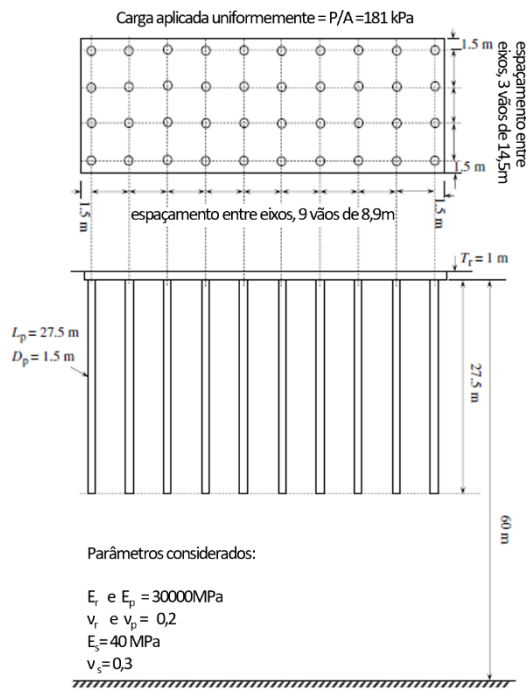


Figura 26. Estudo de caso Bhartiya et al. 2019, adaptado de Yamashita et al. 2011

Vitor e Danziger (2021) revisitaram este caso, cujos resultados foram apresentando numa discussão ao artigo de Bhartiya et al. (2019). Vitor e Danziger (2021) empregaram as equações desenvolvidas por Aoki e Lopes (1975) para estimar o recalque do radier para uma fundação flexível. Também foram utilizados os mesmos parâmetros simplificados do solo e geometria do PRF, de acordo com o estudo de caso investigado por Yamashita et al. (2011). No entanto, a solução de Aoki e Lopes (1975) permite a consideração da camada rígida a 60m do nível do terreno, abaixo do radier, que resulta na redução dos recalques. Os resultados da rotina da autora são apresentados na Tabela 6, para diferentes profundidades  $H$  da camada rígida. A rigidez do solo  $K_r$  sob o radier, sem considerar as estacas, também foi estimada para diferentes valores de  $H$ .

Tabela 6. Influência da camada rígida nos recalques do radier pela rotina da autora, Vitor e Danziger (2021).

H (m)	Recalque médio (m)	$K_s$ (kPa)
60	0.090	1656,069
100	0.119	1262,626

200	0.148	1014,713
500	0.168	890,957
600	0.170	880,239
700	0.172	869,775
1000	0.176	854,620
1300	0.177	846,660

Enquanto Bhartiya et al. (2019) obtiveram  $K_s=866,74$  kPa sem considerar a influência da camada rígida, a solução de Aoki e Lopes (1975) apresenta, de forma clara, um valor de  $K_s$  desta mesma ordem apenas para valores de  $H$  próximos a 700m, com um recalque aproximado de 17,2 cm. Para uma camada de  $H=60$ m o recalque é de cerca de 9 cm. A vantagem da solução de Aoki e Lopes (1975) é que ela pode incluir a influência de um limite rígido e um perfil estratificado do solo.

Considerando o mesmo perfil de solo homogêneo, os parâmetros do solo e a geometria do radier, e ainda, utilizando as equações de Aoki e Lopes (1975), foi estimado o recalque médio e posteriormente a rigidez do radier. A rigidez do radier foi então corrigida usando a equação (25) de Bhartiya et al. (2019), já revisada, a fim de considerar a influência da espessura do radier.

O método de Aoki e Lopes (1975) foi então utilizado para estimar o recalque e a rigidez do radier estaqueado. O recalque do grupo de estacas depende da transferência de carga. Na falta de informações a este respeito, a autora considerou duas possibilidades: i) 10% da carga da estaca transferida para a base da estaca e 90% para o fuste, e ii) 50% da carga da estaca transferida para a base da estaca e 50% para o fuste. Para cada uma delas, foi considerada uma distribuição uniforme e linear do atrito ao longo da estaca. Ao fazer isso, a influência da transferência de carga nas estacas e da distribuição da resistência do fuste pôde ser verificada nas estimativas de recalque. A rotina iterativa da autora foi empregada para analisar o radier estaqueado. A rotina permite estimar a partição da carga transferida ao subsolo pelo grupo de estacas e pelo radier, para um mesmo recalque médio do radier estaqueado.

O cálculo da rigidez do radier e do grupo de estacas permitiu estimar a carga compartilhada pelo radier e aquela compartilhada pelo grupo de estacas. Com o

carregamento transferido pelo radier e pelo grupo de estacas, o recalque do radier estaqueado poderia ser simplesmente avaliado pelas equações de Aoki e Lopes (1975). A Tabela 7 resume os resultados do grupo de estacas do caso citado anteriormente.

Tabela 7. Recalques de grupos de estacas para duas alternativas de transferência de carga, Vitor e Danziger (2021).

H= 60 m		
	Recalque médio (m)	
50% ponta e 50% por atrito no fuste	Uniforme	0,0512
	Linear	0,0525
10% ponta e 90% por atrito no fuste	Uniforme	0,0320
	Linear	0,0340

A Tabela 7 ilustra que quanto maior a carga transmitida à ponta da estaca, maior é o recalque médio. A distribuição de atrito não influencia o recalque médio de forma relevante.

A rotina desenvolvida também é capaz de estimar uma distribuição aproximada da carga suportada pelo radier e aquela suportada pelo grupo de estacas. A Tabela 8 reproduz a solução do radier estaqueado, a distribuição do carregamento e o recalque resultante.

Tabela 8. Solução de radier estaqueado para 2 alternativas de transferência de carga, Vitor e Danziger (2021).

H=60m		
50% ponta e 50% de atrito lateral na estaca para a carga aplicada no radier estaqueado	Recalque (m)	0,03490
	Carregamento suportado pelo radier (%)	50,2
	Carregamento suportado pelas estacas (%)	49,9

10% ponta e 90% de atrito lateral na estaca para a carga aplicada no radier estaqueado	Recalque (m)	0,03020
	Carregamento suportado pelo radier (%)	32,4
	Carregamento suportado pelas estacas (%)	67,6

A Tabela 8 mostra que quanto maior a carga resistida pelo fuste da estaca, menor é o recalque. Foi encontrado um recalque máximo de aproximadamente 30mm por Vitor e Danziger, de 18 mm por Yamashita et. al. (2011) e de 12,3mm por Bhartiya et al. (2019).

Ao verificar o artigo original de Yamashita et al. (2011), a autora observou que a carga média líquida de contato considerada por Yamashita et al. (2011), citada no texto, foi de 145 kPa, e não de 181 kPa, como indicada na Figura 26. Como o comportamento é considerado elástico, o recalque estimado deveria ser corrigido por um fator de  $145/181 = 0,80$ . Se essa redução for considerada, a estimativa de recalque de Vitor e Danziger (2021) é reduzida para cerca de 24mm, 30% superior à análise numérica de Yamashita et al. (2011). Além do ajuste de recalque, Yamashita et al. (2011) chegaram a uma relação de carga transmitida às estacas em relação à carga total de 64%, obtida da análise numérica. A razão encontrada por Vitor e Danziger (2021) foi de 68%, considerando 10% da carga de serviço da estaca transferida à sua ponta. Vitor e Danziger (2021) consideram seus resultados muito consistentes com os de Yamashita et al. (2011), que realizaram uma análise numérica muito mais refinada.

A Tabela 9 apresenta os mesmos resultados ilustrados na Tabela 8, mas para um caso em que o limite rígido é mais profundo, 700m. Esta condição de contorno resulta em um valor de  $k_{rs}$  para o radier muito mais próximo do valor de  $k_{rs}$  obtido por Bhartiya et al. (2019) considerando uma camada infinita.

Tabela 9. Solução de radier estaqueado considerando um limite rígido muito profundo, Vitor e Danziger (2021).

H=700 m		
10% ponta da estaca, 90% fuste da estaca	Recalque (m)	0,09653
	Carregamento suportado pelo radier (%)	54,9
	Carregamento suportado pelas estacas (%)	45,1

O maior recalque causado pela camada rígida mais profunda resultou na redução da carga suportada pelo grupo de estacas e no aumento da carga suportada pelo radier.

Importante ressaltar um aspecto interessante da introdução do método de Aoki e Lopes (1975) na rotina proposta: a possibilidade de inclusão de um perfil de solo não homogêneo.

Embora a solução de Aoki e Lopes (1975) seja baseada no modelo elástico, que é uma aproximação da realidade, ela contempla dois aspectos relevantes não considerados por outras soluções: a estratigrafia e a presença da camada rígida. Esta é, possivelmente, a maior razão de sua aproximação muito boa com resultados experimentais.

### 3.3 Caso3: Caso Hipotético – Poulos et al. (1997)

Um caso hipotético foi apresentado por Poulos et al. (1997). Apesar de simples, este caso é bastante útil, pois se concentra basicamente no comportamento previsto para um determinado conjunto de parâmetros de solo, radier e estacas. Um radier estaqueado de 10mx6m é analisado com três configurações diferentes. Nas duas primeiras configurações o radier está assente sobre 15 estacas e na terceira configuração sobre 9 estacas. O terceiro caso apresenta 9 pilares, sendo 6 carregados com a carga P1 e 3 carregados com a carga P2 (que corresponde ao dobro de P1), conforme Figura 27.

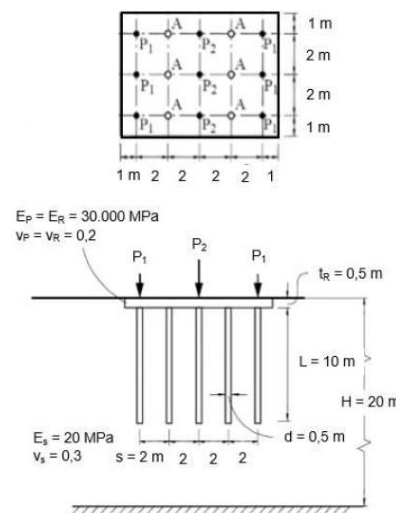


Figura 27. Exemplo hipotético apresentado por Poulos et al. (1997)

Variando a carga total e o número de estacas foi realizado o estudo em 3 cenários distintos, conforme Tabela 10. Também houve variação nos parâmetros conforme Tabela 11.

Tabela 10. Cargas aplicadas nos 3 casos apresentados (Poulos et al., 1997).

Cenários	Nº de estacas	Carga nos pilares P1(kN)	Carga nos pilares P2(kN)	Carga total aplicada (kN)
A	15	1.000	2.000	12.000
B	15	1.250	2.500	15.000
C	9*	1.000	2.000	12.000

\* Nessa análise as estacas marcadas como A na Figura 26 foram desconsideradas

Tabela 11. Parâmetros utilizados nas análises do caso do radier sobre 9 e 15 estacas (Poulos et al., 1997).

D(m)	Ap(m <sup>2</sup> )	B(m)	L(m)	t(m)
0,5	0,196	3.L	10	0,5
H/L	Ep=Er (GPa)	vc	vs	
2	30	0,2	0,3	

D- Diâmetro da seção transversal da estaca; Ap – área da seção transversal da estaca; B – Faixa de domínio da fronteira horizontal; L – Comprimento da estaca; H/L – H, domínio vertical; Ep = Er, Módulo

de Young do Concreto da Estaca e do Radier;  $\nu_c$  – Coeficiente de Poisson do concreto;  $\nu_s$  – Coeficiente de Poisson do solo;  $t$  – Espessura do radier.

Considerando apenas o terceiro caso, pode-se observar na Figura 28 os valores referentes ao recalque médio obtido por diversos autores na literatura.

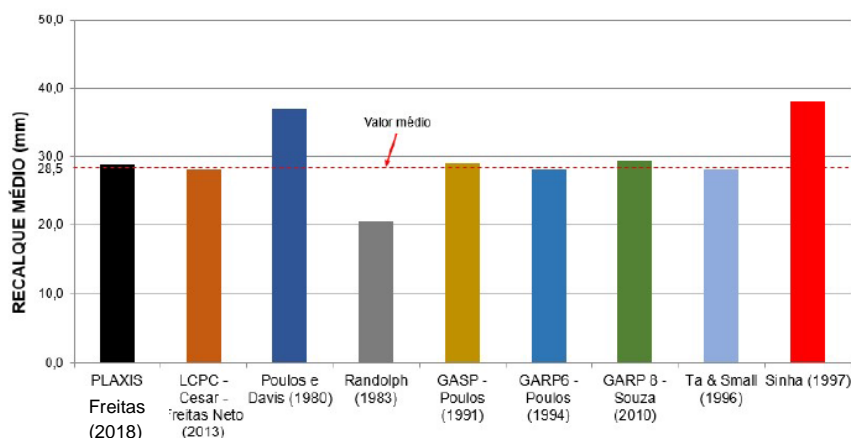


Figura 28. Valores de recalque médio no radier de 9 estacas com carga admissível igual a 12 MN obtidos na literatura e em Freitas, (2018)

Utilizando a metodologia descrita no Capítulo 2 com aplicação do programa Aoki-Lopes foram feitas duas análises: a primeira considerou que 10% da carga da estaca foi transferida para a ponta e 90% para o fuste; a segunda considerou que 50% da carga da estaca foi transferida para a ponta e 50% foi para o fuste. Para ambos os casos foi considerada uma distribuição uniforme do atrito ao longo do fuste.

Na primeira análise foi encontrado um recalque médio de 23 mm. Já na segunda análise foi encontrado um recalque médio de 28 mm. Vale observar que esses valores estão bastante próximos aos encontrados na literatura, em especial, ao valor encontrado por Freitas (2018) que utilizou o programa de elementos finitos PLAXIS e encontrou um recalque da ordem de 28,9 mm. Com relação à partição de cargas, na primeira análise foi estimado 27% da carga total para o radier e 73% para o grupo de estacas. Na segunda análise os valores encontrados foram de 43% e 57% respectivamente. Mais uma vez observou-se que quanto maior a carga transmitida para a ponta da estaca, maior é o recalque médio do radier. As estimativas da autora estão resumidas no Apêndice H. Alguns resultados indicados por Poulos et al. (1997) para diferentes métodos são indicados na Figura 29. Cabe destacar a concordância



muito boa com o que encontrou a autora desta tese para a maior parcela da carga absorvida por atrito, o que é mais provável para a situação de serviço.

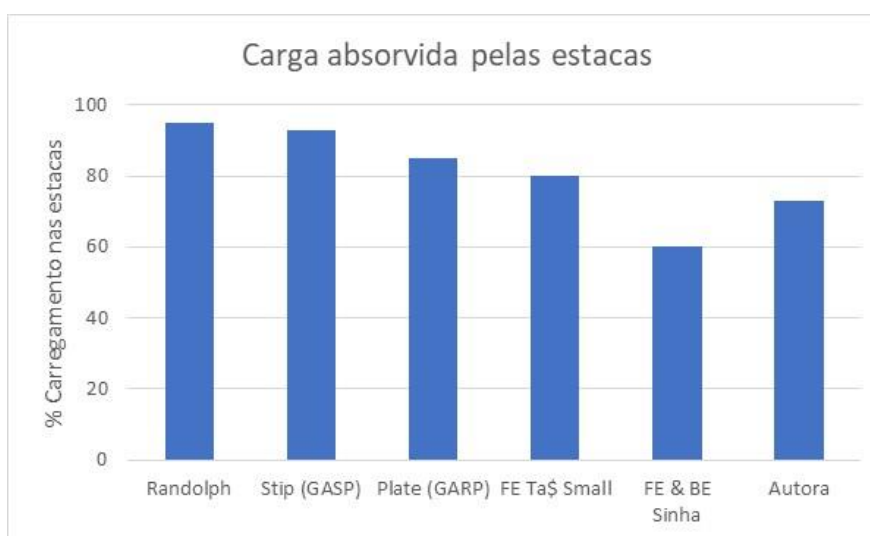


Figura 29. Partição de cargas, resultados comparativos do exemplo hipotético de Poulos et al. 1997, adaptado.

Resumindo os resultados deste capítulo, conclui-se que o método simplificado proposto nesta pesquisa obteve uma boa concordância com casos documentados na literatura. A rotina da autora tem a vantagem de ser simples, de rápida aplicação, com parâmetros que podem ser obtidos de ensaios de campo, através de correlações comumente empregadas em projetos de fundações profundas. O método pode ser enquadrado no enfoque de método para grupo de estacas reforçado por radier, apresentando comportamento que pode ser considerado elástico, para as cargas de serviço. A grande vantagem é incorporar condições de contorno próximas às encontradas na prática, em que o perfil de solo de fundação é estratificado e apresenta uma fronteira rígida a certa profundidade, o que difere da situação de semi-espaço infinito. Os bons resultados apresentados neste capítulo, quando comparados a casos instrumentados e análises numéricas refinadas, sinalizam para seu emprego nos dois casos que serão apresentados nos próximos capítulos, envolvendo a interação solo x estrutura.

#### 4. ANÁLISE DE UM CASO DE OBRA ENVOLVENDO DANOS ESTRUTURAIS

Este caso foi escolhido entre os já analisados no banco de dados da linha de pesquisa em Interação Solo x Estrutura por se tratar de uma edificação em fundações diretas com danos estruturais relevantes. As graves patologias foram registradas numa vistoria muito tempo após o final da construção, face às fissuras que abriam, após serem fechadas, em razão de recalques crescentes com o tempo. Algumas sondagens realizadas por ocasião da vistoria confirmaram as sondagens de projeto.

Rosa (2005) investigou a camada de argila de baixa consistência da região em estudo e, com base na caracterização do subsolo das sondagens e dos parâmetros geotécnicos de compressibilidade obtidos da literatura, realizou estimativas de recalque e seu desenvolvimento com o tempo. Sem o conhecimento prévio do relatório de vistoria, Rosa (2005) procedeu à análise da interação solo x estrutura, com o emprego do modelo de Kelvin para o solo de fundação, contemplando a grandeza dos recalques, através da seleção da rigidez da mola representativa, e da velocidade de recalque, através da obtenção da viscosidade do solo no modelo. Rosa (2005) localizou, em planta, as maiores distorções estimadas, identificou as peças estruturais que mais sofreriam o efeito destas distorções, bem como a localização destas patologias em relação à sua posição em relação às faces das peças estruturais. Os danos previstos confirmaram as patologias registradas por ocasião da vistoria.

Neste capítulo a autora irá revisitar e reprojeter a fundação de Rosa (2005), empregando uma solução em radier estaqueado em trechos da planta de fundações. O objetivo é verificar se um projeto de fundações alternativo seria capaz de reduzir as distorções elevadas de forma a garantir um comportamento satisfatório das fundações,

Com base no reprojeto das fundações e utilizando a planta da estrutura, obtida da documentação do caso de Rosa (2005), a autora realizará uma nova interação solo x estrutura. A expectativa é verificar se, com o reprojeto em radier estaqueado, as novas distorções se situarão numa faixa tolerável, indicativas de bom comportamento para as fundações. Todos os parâmetros do solo investigados por Rosa (2005) serão empregados pela autora, incluindo a viscosidade, de forma a melhor comparar os resultados.

#### 4.1. Características gerais da edificação

Rosa (2005) analisou uma edificação residencial de 5 pavimentos assim caracterizados: um pavimento térreo com garagem, 3 pavimentos tipo e uma cobertura. A edificação tem geometria bastante convencional e é localizada no bairro Jardim Camburi, no município de Vitória, Estado do Espírito Santo. As plantas do projeto podem ser verificadas no Anexo B.

A edificação é composta por sapatas corridas de grande rigidez assentes sobre uma camada de aterro, seguida de uma camada arenosa de pequena espessura, sobrejacente a uma camada de argila de baixa consistência. A figura 30 ilustra um perfil geotécnico com a indicação dos fundos e da frente da edificação.

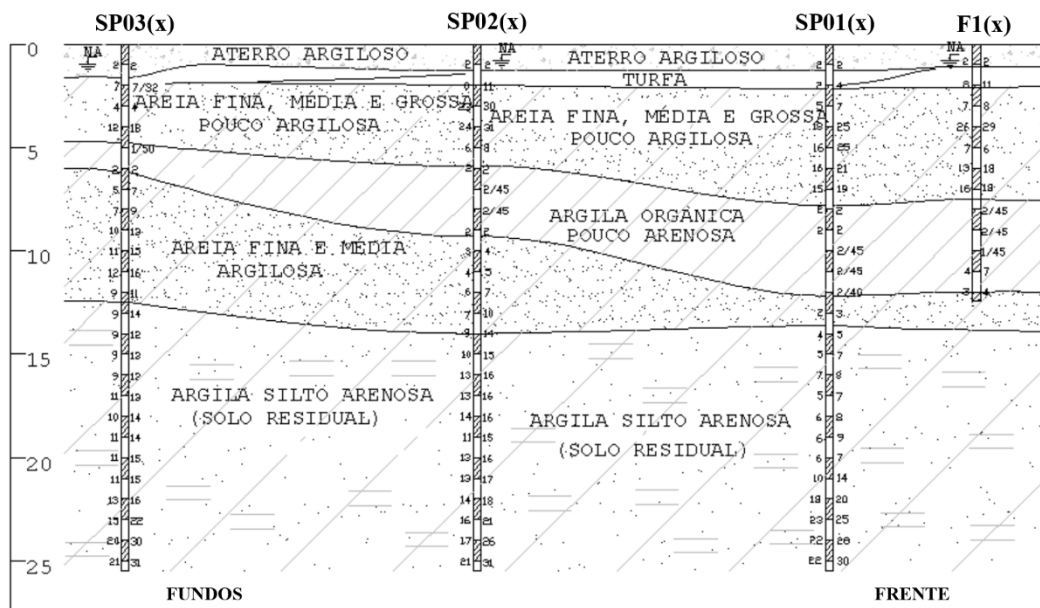


Figura 30. Perfil geotécnico, adaptado de Rosa (2005)

Rosa (2005) verificou que essa região apresenta, principalmente, sedimentos de origem marinha e as argilas apresentam menos de 10% de areia e pequeno teor de matéria orgânica.

## 4.2. Histórico dos problemas verificados

Rosa (2005) apresenta um histórico das patologias e tentativas de reparo, bem como um parecer geotécnico elaborado pela COPPE/UFRJ (Danziger, 2002) para esclarecer as causas dos problemas encontrados na edificação.

As trincas e rachaduras observadas em diversas partes do prédio iniciaram-se ainda na fase de construção, no início da década de 80, e prosseguiram até a elaboração do parecer e da análise de Rosa (2005).

As trincas e rachaduras, apesar de reparadas, reapareciam com o tempo. A construtora reparou os danos que reapareceram, conforme Figura 31 de 2002.



Figura 31. Fissuras nos apartamentos, Rosa (2005)

Trincas, rachaduras e recalques em trechos do piso da garagem foram também observados. Após reparo, as trincas no térreo, bem como nas vigas reforçadas, surgiram novamente.

Foram realizadas medidas de recalque que indicaram a não estabilização.

O parecer resume algumas constatações:

- Grande parte das trincas observadas relacionam-se a recalques distorcionais excessivos da fundação;
- Devido à inclinação de  $45^\circ$  observada na maior parte das trincas, acredita-se que ocorreu um recalque maior na região central do que nas extremidades, conforme ilustrado na Figura 32. As linhas de pilares A e D representam, respectivamente, fundos e frente da edificação. As linhas B e C representam a região central, segundo a Figura 33. A vistoria realizada em julho de 2002 revelou que os apartamentos dos fundos foram mais danificados do que os da frente, ou seja, os recalques distorcionais foram maiores entre as linhas dos pilares A e B do que entre C e D.

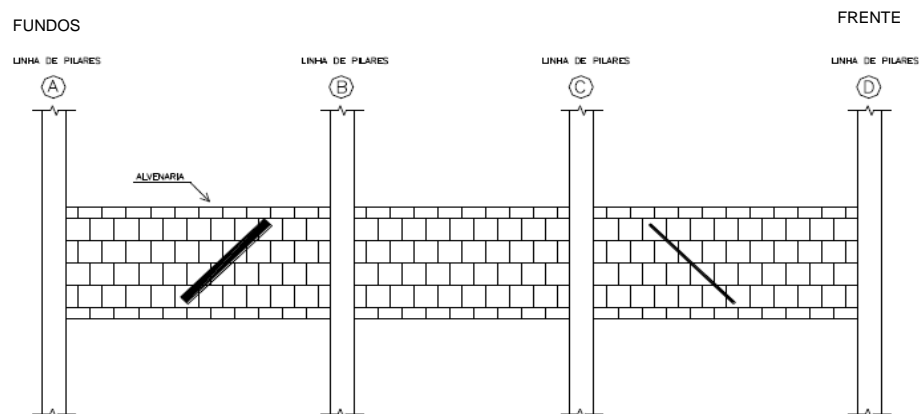


Figura 32. Indicação esquemática das trincas a  $45^\circ$  (adaptado de Rosa, 2005)

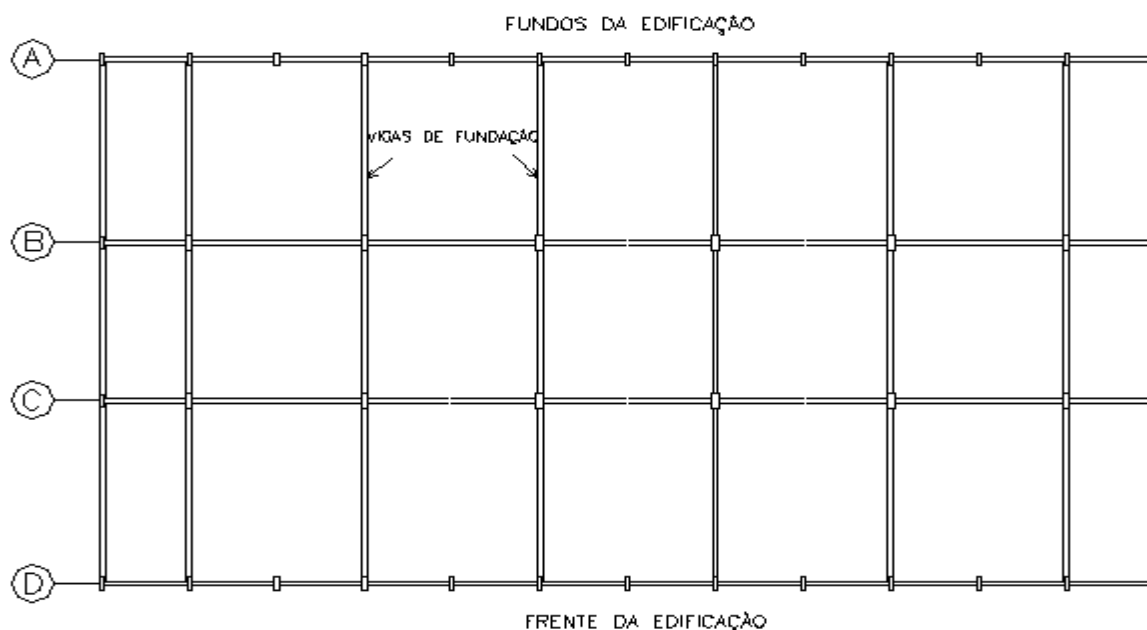


Figura 33. Representação esquemática das linhas de pilares do edifício (adaptado de Rosa, 2005)

- O ressurgimento de trincas e rachaduras revela que as distorções excessivas estão relacionadas à deformação das camadas moles existentes no terreno, em processo de adensamento primário, bem como secundário.
- Observando os perfis individuais de sondagens apresentados no Anexo B, bem como o perfil típico da Figura 30, Rosa (2005) destaca a ocorrência de duas camadas que poderiam gerar recalques consideráveis na edificação. A primeira na profundidade entre 1m e 2 m, que mostra a presença de turfa e/ou argila orgânica. O projeto original determinava a necessidade da remoção desta camada, com substituição por material granular devidamente compactado, conforme ilustra a Figura 34. A camada argilosa entre 5m e 13m não aparecia em alguns trechos do terreno e não poderia ser removida. Face à presença de camadas moles que poderiam gerar recalques apreciáveis, a opção de um projeto em sapatas corridas foi considerada acertada. Esse tipo de fundação forma um conjunto rígido capaz de uniformizar os recalques. No entanto, o projeto não apresentou o desempenho previsto. Isto significa que a rigidez das sapatas corridas não foi suficiente para uniformizar os recalques. Algumas causas desta incapacidade foram apontadas por Rosa (2005), com base nos documentos analisados:

- ✓ não foi feita a remoção da camada mais superficial do terreno, seguida de substituição por material granular bem compactado, conforme especificações do projeto, o que foi caracterizado nas sondagens realizadas após a ocorrência das patologias;
- ✓ a inclusão de 50 cm de aterro, discordante do especificado em projeto, mesmo de pequena espessura, contribuiu para o recalque das camadas moles existentes no terreno;
- ✓ devido a divergências entre projeto e execução, Rosa (2005) relata não ter sido possível afirmar se a estrutura de fundação teria rigidez suficiente para uniformizar os recalques, caso as especificações de projeto tivessem sido obedecidas.

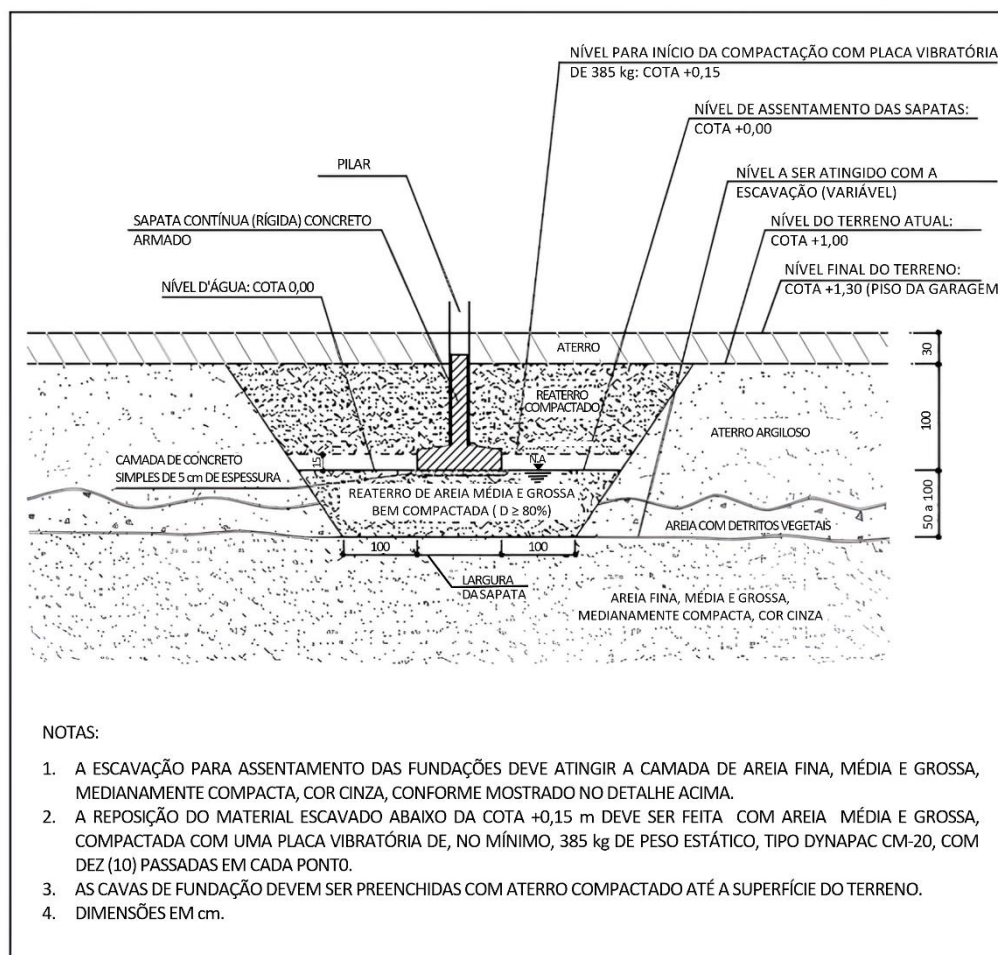


Figura 34. Detalhe do projeto original de fundações do edifício, adaptado de Rosa (2005)

Escavações realizadas em visitas de inspeção detalhadas por Rosa (2005) e 3 furos de sondagens externos ao prédio, bem próximos às fundações, revelaram que a execução não seguiu as especificações propostas no projeto, Figura 35, Rosa (2005).



Figura 35. Sondagem junto às fundações, externamente ao edifício, (Rosa, 2005).

As escavações realizadas junto à base das sapatas mostraram que estas estavam assentes a uma profundidade de 1,80m, enquanto o projeto indicava 1,30m. Daí se presumiu que uma camada de aterro de 50 cm foi acrescentada, pelo que historiou Rosa (2005). O material de aterro também não correspondia ao material especificado no projeto, e sim entulho e turfa conforme ilustra a Figura 36.

Algumas sondagens executadas após a construção verificaram ainda a presença de turfa não removida, em desacordo com as orientações do projeto. Mesmo as sondagens realizadas após a execução que apresentaram melhores características de resistência das camadas superficiais não atingiram as especificações do projeto.





Figura 36. Reaterro junto a uma viga, com presença de turfa, (Rosa, 2005).

Rosa (2005) pondera que o parecer destaca que a cravação de estacas para a construção de dois prédios vizinhos ao fundo e um na lateral, não teria provocado danos na edificação por dois motivos:

- O padrão de rachaduras e trincas seria diferente;
- Em camadas de solos moles, a cravação de estacas teria pequena influência após a cravação e os danos vêm acontecendo desde a construção da edificação (década de 80) até a emissão do parecer.

Desta forma, o parecer concluiu que se tratou de um problema de recalques distorcionais excessivos na fundação com relação direta a deformações das camadas moles existentes no terreno. Uma redistribuição de cargas deve ter ocorrido, reduzindo o valor das cargas nos pilares centrais e aumentando nos pilares periféricos.

O parecer constata também que o projeto geotécnico não foi executado de acordo com o especificado e que não houve influência da cravação de estacas na construção de prédios vizinhos no surgimento de rachaduras e trincas.

### **4.3 Reconstituição do caso em Fundações Diretas**

#### **4.3.1 Estimativa de recalques**

Antes de iniciar sua análise, a autora da presente pesquisa procurou reproduzir a análise de Rosa (2005). Como se pretende comparar o comportamento da fundação direta com uma alternativa em radier estaqueado, foi preciso partir do mesmo modelo geotécnico e estrutural do trabalho anterior de forma a reproduzir as análises anteriores como ponto de partida da análise em radier estaqueado.

Para tal, a autora acompanhou e verificou as análises de estimativa de recalque de Rosa (2005) e procedeu a uma nova modelagem da estrutura. As plantas de forma se encontravam disponibilizadas no trabalho de Rosa (2005), mas não os arquivos com o modelo estrutural.

Rosa (2005) estimou os parâmetros de compressibilidade do solo com base no trabalho de Barata e Danziger (1986). Para a estimativa destes parâmetros, que correspondem aos drenados, se faz necessário o conhecimento das tensões efetivas iniciais do depósito argiloso, bem como os acréscimos decorrentes do carregamento do aterro de 0,5m, conforme executado. Os parâmetros de compressibilidade dependem do nível de carregamento. Rosa (2005) desenvolveu um programa para cálculo dos acréscimos de tensões de fundações diretas a partir da solução de Newmark (1935), considerando a superposição de efeitos das várias sapatas corridas da obra e do aterro executado. A partir dos acréscimos de tensões e dos parâmetros de compressibilidade, foram estimados os recalques, a longo prazo, para cada vertical de sondagem. Com os recalques calculados pontualmente, foi possível, através do Software Surfer, apresentar as curvas de iso-recalques no interior da planta do empreendimento, Figura 37.

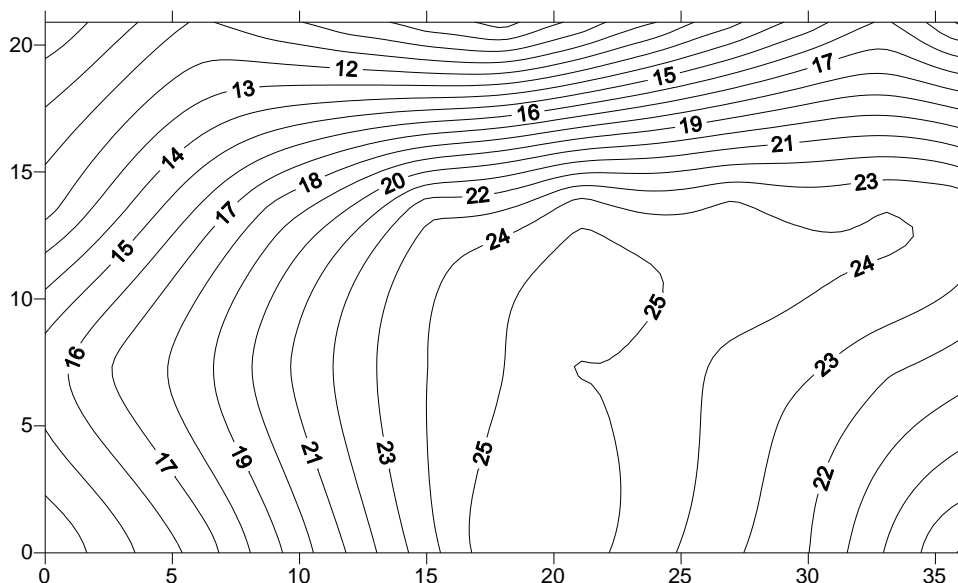


Figura 37. Curvas de iso-recalque (em centímetros) sem considerar a interação solo-estrutura, Rosa (2005).

A origem dos eixos coordenados indicada na Figura 37 corresponde à localização do pilar P30, situado na linha D. A abscissa, da esquerda para o lado direito, representa o comprimento da edificação enquanto a ordenada indica sua largura, ambas em metros. A linha A é a linha horizontal superior, que corresponde aos fundos. Observa-se que nos fundos da edificação, entre as linhas A e B as curvas de iso recalques estão bem mais próximas, sinalizando para maiores recalques distorcionais, confirmando o relatado na vistoria. Entre as linhas C e D, os recalques são maiores, porém mais uniformes.

Com base na figura 37 e da localização dos pilares, Rosa (2005) obteve os valores dos recalques nas verticais de cada um dos pilares da edificação.

#### 4.3.2. Modelo estrutural da edificação

Um novo modelo estrutural foi elaborado pela autora com base nas plantas de forma da edificação, com a utilização de um programa em elementos finitos, SAP, versão 14. As vigas, os pilares e as sapatas corridas foram considerados como elementos de barra e as lajes foram consideradas elementos de placa, conforme Figura 38. A Figura 39 apresenta a localização dos pilares. Como a autora objetiva revisar o projeto, está procedendo uma análise independente daquela realizada por Rosa (2005).

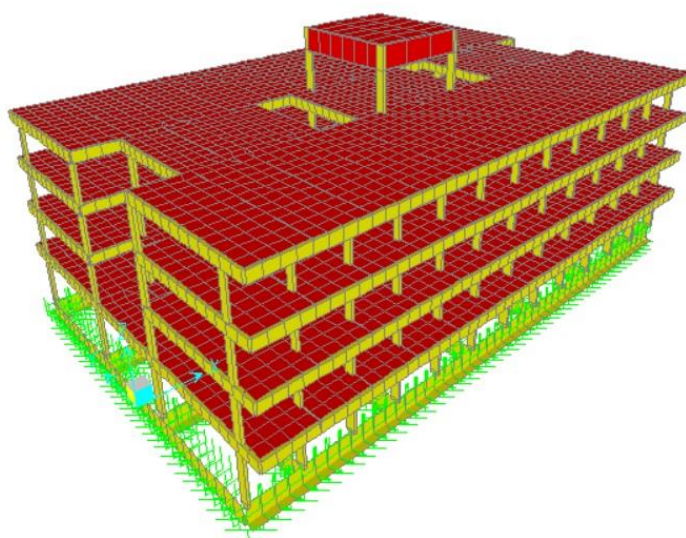


Figura 38. Modelo numérico do edifício analisado

A Figura 39 apresenta a localização dos pilares e a planta de forma do projeto original da fundação.

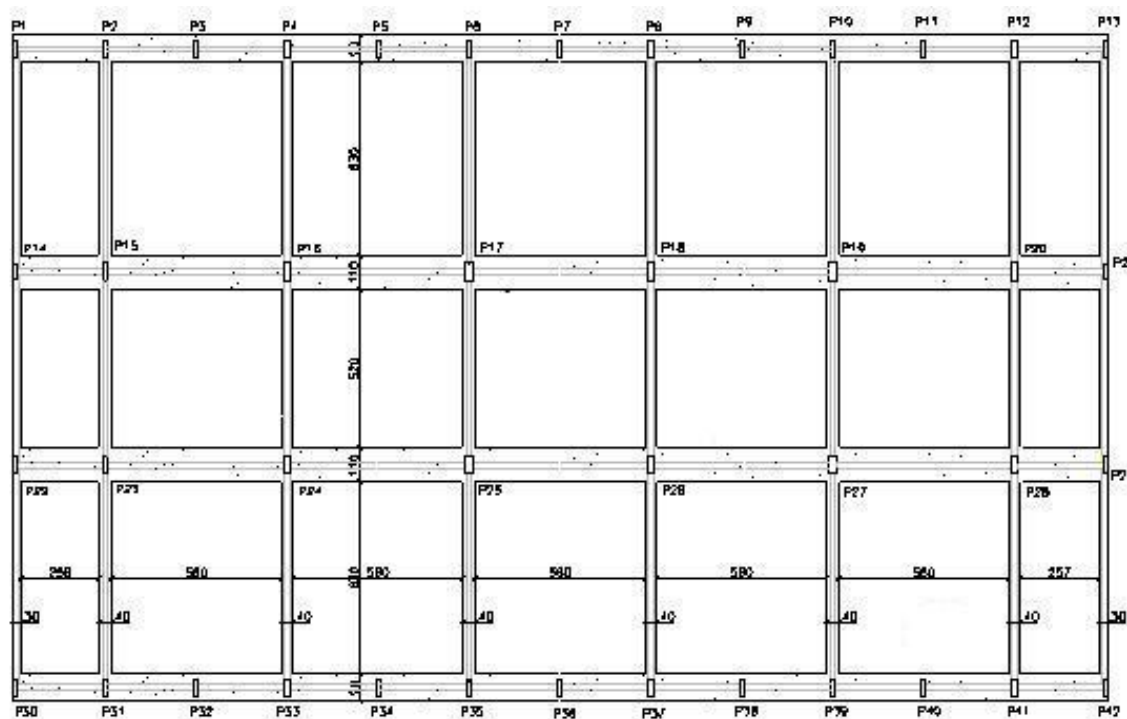


Figura 39. Localização dos pilares e forma da fundação, Rosa (2005)

Com o objetivo de tentar reproduzir as hipóteses de trabalho do projeto original, as seguintes considerações foram utilizadas:

- Concreto estrutural de resistência característica de 15 MPa, íntegro sem fissuração;
- O comportamento da superestrutura foi considerado elástico linear;
- Peso próprio calculado automaticamente pelo programa;
- Revestimento de 1,0 kN/m<sup>2</sup>;
- Alvenaria
- Sobrecarga da cobertura de 1,0 kN/m<sup>2</sup>;
- Sobrecarga das demais áreas: 2,0 kN/m<sup>2</sup>;

Foram estudados dois modelos para análise das cargas da edificação. O primeiro considerou a superestrutura sobre apoios rígidos, indeslocáveis. O segundo modelo tentou reproduzir a situação apontada na ocasião do parecer caracterizado no item anterior: as sapatas posicionadas a 1,8 m de profundidade e o acréscimo de uma camada de aterro de 50 cm de espessura. Nesta etapa foi representado também o modelo visco-elástico do solo, de forma a permitir a verificação do comportamento da edificação ao longo do tempo, com recalques crescentes.

No modelo visco-elástico, para que as cargas atuantes fossem consideradas como crescentes linearmente ao longo do tempo, foi utilizada uma função multiplicadora sobre o carregamento. Até o tempo de 1 ano a função foi considerada crescente (simulando o tempo de construção da edificação). Posteriormente foi considerada a carga constante durante 20 anos, de acordo com a Figura 40.

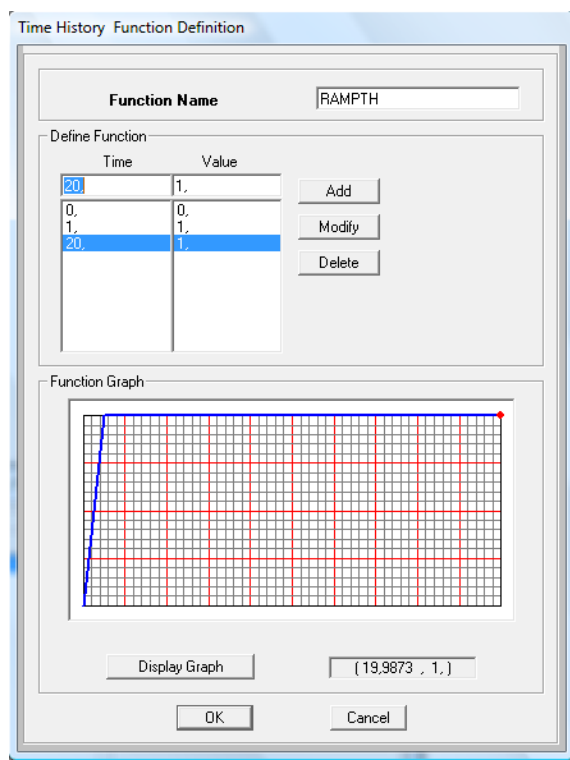


Figura 40. Função multiplicadora do carregamento no tempo.

#### 4.3.3 O modelo de Kelvin

Foi adotado o modelo de Kelvin para descrever o comportamento visco-elástico do solo argiloso compressível presente no terreno da edificação. Pretende-se assim simular uma condição de contorno mais realista para o solo de fundação com a expectativa da previsão de um comportamento mais aproximado da interação solo x estrutura ao longo do tempo.

Na Figura 41 estão representadas a rigidez  $k$  e o coeficiente de amortecimento  $c$ . A rigidez  $k$  está relacionada ao recalque total, ao longo do tempo, ocorrido em cada trecho do solo de fundação estudado. O coeficiente de amortecimento  $c$  busca representar a velocidade do recalque com o tempo, isto é, a forma da curva recalque x tempo. Logo, o amortecimento está correlacionado a velocidade do recalque. Os solos permeáveis de comportamento drenado são denominados solos de compressibilidade rápida, pois não desenvolvem poro-pressão em excesso à hidrostática quando carregados. Nestes, os recalques ocorrem, em geral, simultaneamente à aplicação do carregamento. Desta forma, os solos permeáveis de comportamento drenado apresentam coeficiente de amortecimento reduzido. Em

contrapartida, os solos argilosos, de baixa permeabilidade, apresentam um coeficiente de amortecimento maior, proporcional à lentidão do recalque.

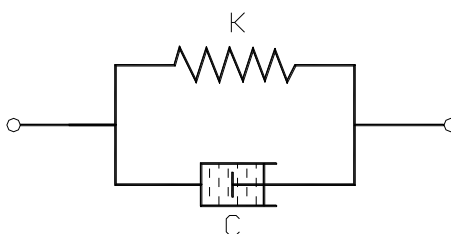


Figura 41. Modelo de Kelvin

Terzaghi e Frölich (1936) propõem na teoria de adensamento que a velocidade de recalque também depende das condições de drenagem e da espessura da camada compressível e não somente da permeabilidade (ou do coeficiente de amortecimento). Rosa (2005) efetuou uma previsão das curvas de recalque ao longo do tempo para todas as sondagens da obra, em função das características geotécnicas de cada uma das verticais dos perfis de sondagem.

A autora verificou os valores de estimativa dos recalques iniciais de Rosa (2005) e partiu da mesma curva de iso-recalques apresentada na Figura 37, para implementar o coeficiente de mola do modelo visco-elástico.

Embora os recalques por adensamento não sejam de natureza elástica, a autora considerou a mesma premissa de Rosa (2005), que é uma aproximação para os casos de argilas pré adensadas. Como, na natureza, as argilas apresentam, a pequenas profundidades, um OCR superior a 1, manteve-se a premissa de validade do modelo de Kelvin, face à convergência dos resultados apresentados por Rosa (2005).

#### 4.3.4 Condições de contorno aplicadas ao modelo

De acordo com o modelo de Kelvin, item 4.3.2, considera-se ainda:

##### a) Coeficiente de rigidez

Com o objetivo de reproduzir a compressibilidade da camada compressível, entre 6 e 10 metros de profundidade, as molas do modelo de Kelvin foram estimadas.

Preliminarmente foi estimada a tensão média atuante no solo de fundação, calculada como o carregamento total da estrutura, ou seja, o somatório das reações nos apoios do projeto original, dividido pela área total das sapatas corridas

(longitudinais e transversais), de acordo com a Figura 39 de locação dos pilares, da seguinte forma:

Somatório das reações nos apoios (a Tabela 12 indica as cargas iniciais do projetista):

1ª (Pilares P1 a P13) e 4ª linhas (Pilar P30 a P42):

$$2 \cdot (550 \cdot 2 + 500 \cdot 11) = 13200 \text{ kN}$$

2ª (Pilares P14 a P21) e 3ª linhas (P22 a P29):

$$2 \cdot (25 \cdot 2 + 95 + 90 + 120 + 115 + 130 \cdot 2) = 14600 \text{ kN}$$

Área total das sapatas corridas:

Longitudinais:  $2 \cdot (36 \cdot 0,9 + 36 \cdot 1,1) = 144 \text{ m}^2$

Transversais:  $(17,8 \cdot 0,4 \cdot 6 + 17,8 \cdot 0,3 \cdot 2) = 53,4 \text{ m}^2$

Tensão média:  $p_m = \frac{13200 + 14600}{144 + 53,4} = \frac{27800}{197,4} = 140,8 \text{ kN/m}^2 \cong 0,15 \text{ MPa}$

O coeficiente de recalque K que é a relação entre a tensão atuante e o recalque, em kN/m<sup>3</sup>, foi determinado na vertical de cada pilar, e entre os pilares esse valor foi interpolado linearmente.

Assim, estimou-se os valores de coeficiente de rigidez das molas representativas do solo para cada nó da estrutura em contato com o solo de fundação, em kN/m, conforme mostrado abaixo:

Sapatas longitudinais:  $k_{long} = K \cdot B \cdot \Delta l$ , sendo:

B: largura das sapatas corridas longitudinais (0,9 m para a 1ª e 4ª linhas, fundos e frente da edificação, e 1,1 m para a 2ª e 3ª linhas, correspondentes ao centro da obra)

$\Delta l$ : comprimento do elemento

Sapatas transversais:  $k_{transv} = K \cdot b \cdot \Delta l$ , sendo:

b: largura das sapatas corridas transversais (0,3 m para as sapatas dos cantos e 0,4 m para as demais)

$\Delta l$ : comprimento do elemento



Cabe salientar que não foram considerados:

- a influência do recalque da camada superficial de aterro, uma vez que a compressibilidade do aterro é rápida e de valor pouco significativo em relação à da camada de argila mole;
- o recalque imediato da camada compressível, em condições não drenadas;
- o recalque por compressão secundária, que se inicia, na realidade, durante o processo de dissipação das pressões neutras
- não foi considerado diretamente nas correlações de Barata e Danziger (1986), embora possivelmente estivesse presente nos resultados dos ensaios analisados pelos autores. As correlações dos autores contemplaram apenas as camadas de argila marinha, supostas normalmente adensadas.

#### b) Coeficiente de viscosidade

O modelo de Kelvin é representado pela associação em paralelo de um elemento de mola, de constante elástica  $k$ , e um elemento amortecedor, de coeficiente de viscosidade  $\eta$ , cuja equação constitutiva é:

$$\sigma = k^* \cdot \epsilon_e + \eta \frac{d\epsilon}{dt} \quad (56)$$

onde  $k^* = K \cdot B$ , sendo  $B$  a largura da sapata.

A equação 56 foi resolvida por Reis (2000) para a condição de contorno de tensão constante e deformação inicial nula. Considerando válida a expressão exponencial para o desenvolvimento do recalque com o tempo, a partir do desenvolvimento Massad (1982), Reis (2000) mostrou que o valor de “ $a$ ” na equação 57, obtida por Reis (2000) é também igual a “ $a$ ” na equação 58 de Massad (1982).

$$\eta = E/a \quad (57)$$

$$a = \frac{2,47 \cdot c_v}{H_d^2} \quad (58)$$

onde  $c_v$  é o coeficiente de adensamento e  $H_d$  é a altura de drenagem. Para o valor de  $c_v$  foi considerado o valor de  $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{seg}$ .

Rosa (2005) estimou os valores de  $\eta$  para as sapatas assentes a 1,8m de profundidade e 50 cm de acréscimo de aterro, conforme valores apresentados na Tabela 12. Esta estimativa foi feita em função do perfil de sondagem de cada vertical

investigada. Cabe destacar que o valor de  $\eta$  depende da compressibilidade do solo, do coeficiente de adensamento e da altura de drenagem.

De forma análoga ao coeficiente de rigidez, o coeficiente de amortecimento  $c$  foi estimado inicialmente, multiplicando-se o valor de  $\eta$ , correspondente à vertical de sondagem mais próxima, pela distância entre os nós consecutivos ( $\Delta l$ ) do modelo da fundação. Como este valor não variava de forma significativa, ao reproduzir a análise de Rosa (2005) a autora selecionou um valor médio entre aqueles da Tabela 5, ou seja,  $9,7 \times 10^5$  (kN x dia/m)/m. Este coeficiente foi multiplicado pelo ( $\Delta l$ ) do elemento para obtenção do amortecimento  $c$  utilizado no programa de elementos finitos. Ressalta-se que Reis e Aoki (2000) consideraram um único valor de viscosidade como representativo de três prédios analisados em Santos.

Tabela 12. Valores de  $\eta$ , Rosa (2005)

Empresa	Sondagem	Valor de $\eta$ $\times 10^5$ (kN x dia/m)/m
Empresa X	SP01	15,9
	SP02	8,4
	SP03	1,2
	SP04	8,6
	SP05	5,4
Empresa Y	F1	16,1
	F2	0,4
	F3	6,9
Empresa Z	SP03	23,9
<b>Média</b>		<b>9,7</b>

#### 4.3.5. Análise dos resultados considerando os apoios indeslocáveis

Neste item serão apresentados os resultados da análise estrutural da edificação, refeita pela autora ao revisitar a análise original de Rosa (2005). O solo de fundação foi representado pelo modelo de Kelvin, como indicado anteriormente. Na

análise numérica foi considerado o tempo ao longo de 20 anos, de forma a reproduzir o desenvolvimento dos recalques com o tempo com a interação solo x estrutura.

As cargas obtidas pela autora considerando os apoios indeslocáveis são comparadas às cargas do cálculo original e a análise determinada por Rosa (2005), apresentadas na Tabela 13. A Tabela 13 apresenta, na sequência, a carga estimada pelo projetista da obra, a carga determinada por Rosa (2005) e a carga obtida da reanálise da autora desta pesquisa.

Observa-se as diferenças na carga de cada um dos pilares e no carregamento total da obra.

Tabela 13. Quadro comparativo de cargas nos pilares considerando apoios fixos.

CARGA NOS PILARES - APOIOS INDESLOCÁVEIS							
	Carga Projetista	Carga Rosa, 2005	Autora		Carga Projetista	Carga Rosa, 2005	Autora
PILAR	ORIGINAL (kN)	SAP(kN)	SAP(kN)	PILAR	ORIGINAL (kN)	SAP(kN)	SAP(kN)
1	550	337	319	22	250	269	216
2	500	554	490	23	950	960	957
3	500	511	523	24	1200	1187	1235
4	500	546	513	25	1300	1237	1327
5	500	508	521	26	1300	1256	1327
6	500	545	505	27	1150	1189	1235
7	500	497	525	28	900	959	957
8	500	545	505	29	250	269	216
9	500	508	521	30	550	337	319
10	500	546	513	31	500	554	490
11	500	510	527	32	500	511	523
12	500	554	490	33	500	546	513
13	550	337	319	34	500	508	521
14	250	269	216	35	500	545	505
15	950	960	957	36	500	497	525
16	1200	1187	1235	37	500	545	505
17	1300	1237	1327	38	500	508	521
18	1300	1256	1327	39	500	546	513
19	1150	1189	1235	40	500	510	527
20	900	959	957	41	500	554	490
21	250	269	216	42	550	337	319
				Demais pontos	-	2972	1485
				TOTAL	27800	30620	28986

Excetuando-se os pilares extremos, mesmo com um modelo simples de análise, as cargas do calculista foram próximas às cargas da análise de Rosa (2005) e da análise da autora. Mesmo que as análises de Rosa (2005) e da autora tenham sido procedidas com modelagem pelo MEF, ambas usaram programas ou versões diferentes, havendo pequenas diferenças nas cargas. Observa-se que o

carregamento total é bem próximo: 30620 kN por Rosa (2005), 28986 kN pela autora e 27800 kN, pelo calculista do projeto.

Devido ao fato de possuir uma geometria bastante regular e um modelo estrutural simples, a diferença de carga total entre o projeto original e o modelo de Rosa, 2005 ficou em torno de 10% e em relação ao modelo da autora, em torno de 4%. Comparando o modelo de Rosa (2005) com o da autora, a diferença foi de 6%.

#### 4.3.6. Análise dos resultados considerando a interação com a estrutura

Nesta etapa as premissas de projeto de Rosa (2005) foram modificadas na análise da autora. Enquanto Rosa (2005) elaborou um programa que analisou o acréscimo de tensões por superposição de efeitos de fundações diretas, a autora utilizou o programa Aoki e Lopes (1975).

Aoki e Lopes (1975) desenvolveram um método para estimativa de tensões e recalques para fundações profundas usando a Teoria da Elasticidade. Apesar do método ter sido concebido para fundações profundas, também pode ser aplicado ao caso de fundações superficiais e com acurácia superior à rotina de Rosa (2005). A autora utilizou os mesmos parâmetros de compressibilidade de Rosa (2005) para as camadas de argila. Destaca-se que Rosa (2005) considerou apenas os recalques nas camadas de argila, muito mais compressíveis que as demais. Já a autora considerou todas as camadas, por conta das características do programa Aoki- Lopes (1975).

Nesta etapa foi representado também o modelo visco-elástico do solo, de forma a permitir a verificação do comportamento da edificação ao longo do tempo de 20 anos.

Após executar o modelo estrutural com a interação com o solo de fundação, a autora comparou seus resultados com aqueles de Rosa (2005).

A Tabela 14 apresenta os recalques a longo prazo determinados por Rosa (2005) e pela autora.

Tabela 14. Comparação entre os valores de recalque sem interação e considerando interação por Rosa (2005) e pela autora.

RECALQUE NOS PILARES SEM INTERAÇÃO			RECALQUE NOS PILARES COM INTERAÇÃO SOLO ESTRUTURA				
	Rosa (2005)	Autora		Rosa (2005)	Autora 1ª análise	Autora 2ª análise	Autora 3ª análise
PILAR	RECALQUE (cm)	RECALQUE (cm)	PILAR	RECALQUE (cm)	RECALQUE (cm)	RECALQUE (cm)	RECALQUE (cm)
1	8,20	10,41	1	9,30	9,60	9,72	9,92
2	9,70	10,70	2	10,30	10,00	9,92	10,60
3	11,20	10,98	3	11,30	10,60	10,51	12,00
4	10,20	11,80	4	12,00	11,90	11,80	12,09
5	9,30	11,40	5	12,50	10,76	10,65	12,20
6	8,40	11,90	6	12,90	11,44	11,33	12,40
7	7,50	11,10	7	13,40	12,16	11,99	12,82
8	9,20	13,50	8	14,00	12,79	12,61	13,48
9	11,00	13,20	9	14,90	13,21	13,04	14,11
10	12,70	13,31	10	15,30	13,31	13,21	14,24
11	14,40	12,70	11	15,70	13,18	13,09	14,07
12	16,20	15,72	12	15,80	12,93	12,85	14,18
13	13,80	13,30	13	15,90	12,68	13,16	14,48
14	11,60	14,20	14	11,70	14,45	14,34	13,81
15	13,80	12,08	15	13,10	15,46	15,35	14,37
16	18,20	18,71	16	15,80	17,00	16,95	16,82
17	22,70	25,01	17	17,80	17,58	17,58	17,49
18	24,70	25,07	18	18,90	17,52	17,53	18,00
19	24,30	21,38	19	19,10	17,45	17,44	17,94
20	24,00	21,56	20	18,50	16,55	16,66	17,65
21	23,80	15,70	21	18,00	16,02	16,38	17,27
22	15,60	13,10	22	13,90	17,62	17,62	16,67
23	17,30	20,16	23	15,50	18,52	18,42	17,70
24	20,60	21,70	24	18,80	19,77	19,70	19,37
25	24,00	22,16	25	21,30	21,51	21,16	20,82
26	25,00	22,22	26	22,40	22,29	21,18	21,57
27	23,60	21,80	27	21,90	21,60	21,30	21,34
28	22,20	22,00	28	20,50	19,70	19,60	19,91
29	21,50	21,70	29	19,70	19,67	19,20	19,45
30	13,10	11,65	30	16,70	17,10	17,00	17,97
31	14,70	17,90	31	18,40	18,90	18,80	18,50
32	16,30	19,80	32	20,20	19,50	19,41	19,72
33	18,70	20,47	33	21,90	22,80	22,59	22,10
34	21,10	23,80	34	23,50	23,80	23,55	23,28
35	23,50	24,94	35	24,60	26,70	26,37	24,94
36	26,00	25,20	36	25,40	27,00	26,50	25,39
37	25,40	24,93	37	25,70	27,00	26,49	25,70
38	24,30	25,50	38	25,50	26,30	25,80	25,41
39	23,20	24,37	39	24,90	25,20	24,91	24,70
40	22,00	22,90	40	24,10	23,70	23,29	23,78
41	20,00	20,90	41	23,20	21,90	21,98	22,61
42	17,90	18,30	42	22,20	22,60	21,97	21,69
<b>Média</b>	<b>17,64</b>	<b>18,08</b>	<b>Média</b>	<b>18,01</b>	<b>17,79</b>	<b>17,69</b>	<b>17,85</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>5,80</b>	<b>5,16</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>4,59</b>	<b>5,05</b>	<b>4,91</b>	<b>4,44</b>
<b>Coef.Varição</b>	<b>0,33</b>	<b>0,29</b>	<b>Coef.Varição</b>	<b>0,25</b>	<b>0,28</b>	<b>0,27</b>	<b>0,24</b>

Cabe observar que a grandeza dos recalques registrados foram os mesmos, bem como a faixa dos valores de coeficiente de variação dos recalques. A análise da

autora, que realizou a análise em 3 etapas consecutivas, mostrou a redução do coeficiente de variação com as iterações sucessivas, o que é algo que tem sido observado com todos os casos analisados do banco de dados.

A Tabela 14 ilustra a comparação dos recalques sem interação e da análise com a interação solo x estrutura (valores de Rosa (2005) e da autora). Destaca-se que a análise com interação solo x estrutura foi realizada por Rosa (2005) sem proceder a iterações sucessivas. Já a autora realizou análises sucessivas até que a diferença entre recalques em iterações sucessivas não ultrapassasse 10% do valor da diferença estimada na análise anterior. A convergência ocorreu na terceira análise.

Nas Figuras 42 e 43 pode-se observar as curvas de iso-recalques apresentadas por Rosa (2005) e pela autora.

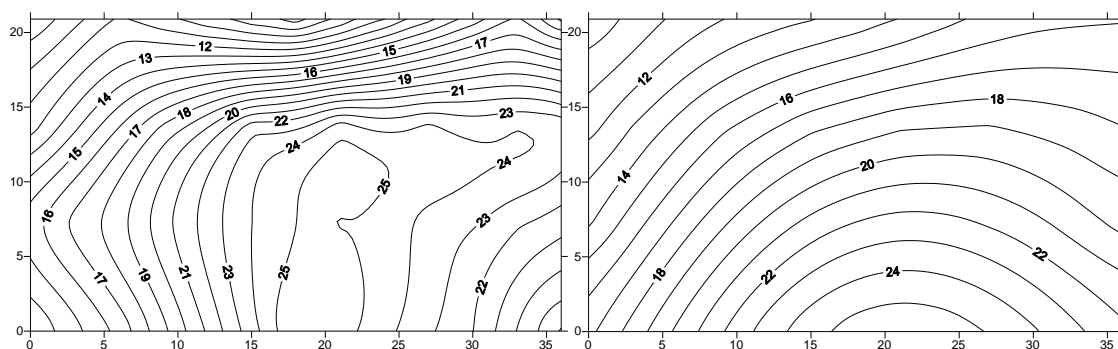


Figura 42. Curvas iso-recalques (a) sem considerar a interação solo-estrutura e (b) considerando a interação para 20 anos, Rosa (2005)

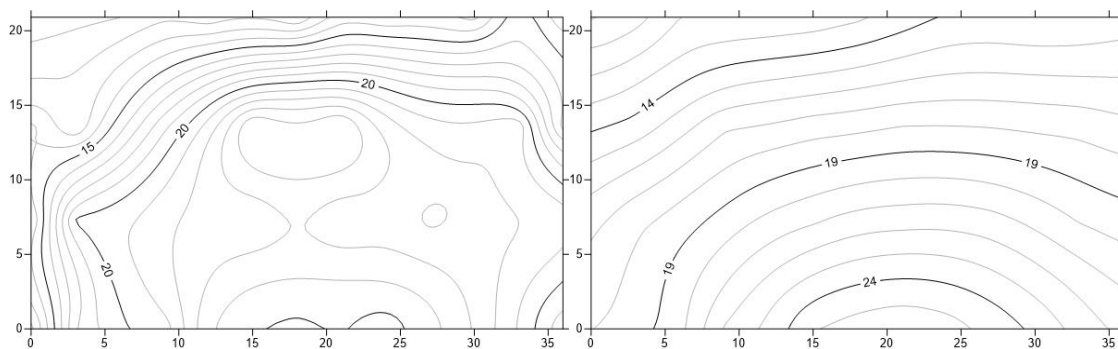


Figura 43. Curvas iso-recalques (a) sem considerar a interação solo-estrutura e (b) considerando a interação para 20 anos, terceira análise

Cabe destacar que a grandeza dos recalques foi a mesma, mas não a distribuição ao longo da planta da obra, principalmente sem a análise da interação.

Isso se deve à melhor caracterização do carregamento pelo programa Aoki-Lopes (1975), uma vez que o programa discretiza de forma detalhada a geometria e o carregamento da fundação, enquanto Rosa (2005) considerou um carregamento médio para todas as sapatas. Após 20 anos, as duas análises indicaram o mesmo panorama. Os recalques são maiores na linha D, reduzindo das linhas D para a linha A, ou seja, maiores na frente e menores nos fundos da obra.

Os resultados referentes a redistribuição das cargas nos pilares, após um período de 20 anos, podem ser observados na Tabela 15.

Tabela 15. Quadro comparativo de cargas nos pilares sem considerar e considerando a interação com a estrutura, valores de Rosa (2005) e da autora.

CARGA NOS PILARES - AMORTECIMENTO E TIME HISTORY						
PILAR	Rosa, 2005		Autora			
	S/interação (kN)	C/interação (kN)	S/interação (kN)	C/interação 1ª análise (kN)	C/interação 2ª análise (kN)	C/interação 3ª análise (kN)
1	337	315	319	317	315	313
2	554	517	490	499	510	514
3	511	474	523	509	495	472
4	546	534	513	525	528	531
5	508	533	521	524	529	530
6	545	625	505	555	617	622
7	497	585	525	542	574	582
8	545	626	505	584	609	623
9	508	538	521	528	532	535
10	546	545	513	527	539	542
11	510	484	527	503	497	481
12	554	516	490	502	511	513
13	337	313	319	317	313	311
14	269	420	216	355	401	418
15	960	917	957	898	906	912
16	1187	1193	1235	1211	1190	1187
17	1237	1240	1327	1280	1253	1233
18	1256	1254	1327	1299	1275	1247
19	1189	1195	1235	1202	1194	1189
20	959	915	957	934	922	910
21	269	438	216	297	389	436
22	269	411	216	286	391	409
23	960	916	957	938	923	911
24	1187	1196	1235	1215	1166	1190
25	1237	1252	1327	1290	1255	1245
26	1256	1270	1327	1301	1287	1263
27	1189	1201	1235	1218	1203	1195
28	959	920	957	936	909	915
29	269	432	216	372	408	430
30	337	397	319	344	369	395
31	554	572	490	515	530	569
32	511	511	523	518	513	508
33	546	536	513	527	530	533
34	508	485	521	508	495	482
35	545	533	505	520	528	530
36	497	473	525	505	494	471
37	545	534	505	515	526	531
38	508	480	521	519	465	477
39	546	527	513	519	520	524
40	510	499	527	517	482	496
41	554	572	490	519	534	569
42	337	419	319	377	405	417
SOMA	27648	28313	27501	27867	28032	28164
MEDIA	658	674	655	664	667	671
Desvio padrão	318,62	301,07	351,59	323,39	306,47	299,49
Coef. Variação	0,48	0,45	0,54	0,49	0,46	0,45

Cabe observar que tanto Rosa (2005) como a autora observaram a redução do coeficiente de variação das cargas ao passar da análise sem interação para a análise



com interação solo x estrutura. A cada nova iteração da autora, este coeficiente ainda reduzia um pouco mais.

No Apêndice H são indicados a determinação dos coeficientes de rigidez e de viscosidade estimados pela autora, em conformidade com o item 4.3.4, com detalhes de uma parte da construção, para indicação ao leitor de como esta análise foi procedida.

A autora realizou três iterações, o que não foi feito por Rosa (2005), que apresentou apenas uma. O procedimento que a autora realizou consiste em, a partir das cargas calculadas com a primeira análise, procede-se o cálculo dos recalques atualizados, com uso do programa Aoki-Lopes, determinando novos coeficientes de rigidez das molas dos apoios. Em relação aos coeficientes de amortecimento, a autora manteve os valores, uma vez que o amortecimento depende da compressibilidade do solo, do coeficiente de adensamento e da altura de drenagem, sendo independente do carregamento.

Após a terceira análise de interação solo x estrutura, a autora chegou à atualização dos recalques e das cargas.

A Tabela 16, a seguir, indicou um acréscimo de até 101,3% em P21 e um decréscimo de até -10,35 % em P36, na análise da autora, após as 3 iterações até a convergência dos recalques. Rosa (2005) obteve menores valores, possivelmente devido ao fato de ter feito apenas 1 análise, sem buscar a convergência dos recalques. Embora os acréscimos tenham sido maiores que os alívios, o somatório total de cargas se manteve constante. Os pontos intermediários entre pilares adjacentes, com a redistribuição de cargas, tiveram um decréscimo de carga, mas o somatório final se manteve constante.

Na Figura 44 observa-se que nos pilares periféricos houve acréscimo, bastante significativo, bem como nas linhas de divisas laterais da edificação. Constata-se ainda uma boa concordância com Rosa (2005) em 13 pilares. Cabe destacar que embora Rosa (2005) tenha estimado as tensões e os recalques de forma distinta da autora, os resultados, em termos médios, da redistribuição das cargas, foram muito semelhantes.

Tabela 16. Acréscimo / alívio nas cargas dos pilares para o modelo com apoio fixo e para o modelo visco-elástico.

CARGA NOS PILARES											
PILAR	Rosa, 2005			Autora							
	S/interação (kN)	C/interação (kN)	Acréscimo (+) Alívio (-) (%)	S/interação (kN)	C/interação 1ª análise (kN)	Acréscimo (+) Alívio (-) (%)	C/interação 2ª análise (kN)	Acréscimo (+) Alívio (-) (%)	C/interação 3ª análise (kN)	Acréscimo (+) Alívio (-) (%)	
1	337	315	-6,5%	319	317	-0,8%	315	-1,4%	313	-1,9%	
2	554	517	-6,7%	490	499	1,7%	510	4,0%	514	4,9%	
3	511	474	-7,2%	523	509	-2,8%	495	-5,4%	472	-9,9%	
4	546	534	-2,2%	513	525	2,2%	528	2,8%	531	3,5%	
5	508	533	4,9%	521	524	0,5%	529	1,4%	530	1,7%	
6	545	625	14,7%	505	555	9,8%	617	22,1%	622	23,0%	
7	497	585	17,7%	525	542	3,1%	574	9,2%	582	10,7%	
8	545	626	14,9%	505	584	15,5%	609	20,5%	623	23,2%	
9	508	538	5,9%	521	528	1,3%	532	2,0%	535	2,6%	
10	546	545	-0,2%	513	527	2,6%	539	5,0%	542	5,6%	
11	510	484	-5,1%	527	503	-4,6%	497	-5,8%	481	-8,7%	
12	554	516	-6,9%	490	502	2,4%	511	4,2%	513	4,7%	
13	337	313	-7,1%	319	317	-0,8%	313	-2,0%	311	-2,5%	
14	269	420	56,1%	216	355	64,0%	401	85,3%	418	93,0%	
15	960	917	-4,5%	957	898	-6,2%	906	-5,4%	912	-4,7%	
16	1187	1193	0,5%	1235	1211	-2,0%	1190	-3,7%	1187	-3,9%	
17	1237	1240	0,2%	1327	1280	-3,6%	1253	-5,6%	1233	-7,1%	
18	1256	1254	-0,2%	1327	1299	-2,1%	1275	-4,0%	1247	-6,0%	
19	1189	1195	0,5%	1235	1202	-2,7%	1194	-3,4%	1189	-3,8%	
20	959	915	-4,6%	957	934	-2,4%	922	-3,7%	910	-4,9%	
21	269	438	62,8%	216	297	37,2%	389	79,7%	436	101,3%	
22	269	411	52,8%	216	286	32,1%	391	80,6%	409	88,9%	
23	960	916	-4,6%	957	938	-2,0%	923	-3,6%	911	-4,8%	
24	1187	1196	0,8%	1235	1215	-1,7%	1166	-5,6%	1190	-3,7%	
25	1237	1252	1,2%	1327	1290	-2,8%	1255	-5,5%	1245	-6,2%	
26	1256	1270	1,1%	1327	1301	-2,0%	1287	-3,0%	1263	-4,8%	
27	1189	1201	1,0%	1235	1218	-1,4%	1203	-2,6%	1195	-3,3%	
28	959	920	-4,1%	957	936	-2,2%	909	-5,1%	915	-4,4%	
29	269	432	60,6%	216	372	71,9%	408	88,5%	430	98,5%	
30	337	397	17,8%	319	344	7,7%	369	15,5%	395	23,6%	
31	554	572	3,2%	490	515	5,0%	530	8,1%	569	16,0%	
32	511	511	0,0%	523	518	-1,0%	513	-2,0%	508	-2,9%	
33	546	536	-1,8%	513	527	2,6%	530	3,2%	533	3,8%	
34	508	485	-4,5%	521	508	-2,6%	495	-5,1%	482	-7,5%	
35	545	533	-2,2%	505	520	2,9%	528	4,5%	530	4,9%	
36	497	473	-4,8%	525	505	-3,9%	494	-6,0%	471	-10,5%	
37	545	534	-2,0%	505	515	1,9%	526	4,1%	531	5,1%	
38	508	480	-5,5%	521	519	-0,5%	465	-10,8%	477	-8,4%	
39	546	527	-3,5%	513	519	1,1%	520	1,3%	524	2,1%	
40	510	499	-2,2%	527	517	-2,0%	482	-8,6%	496	-5,9%	
41	554	572	3,2%	490	519	5,8%	534	8,9%	569	16,0%	
42	337	419	24,3%	319	377	18,0%	405	26,8%	417	30,5%	
TOTAL	27648	28313		27501	27867		28032		28164		

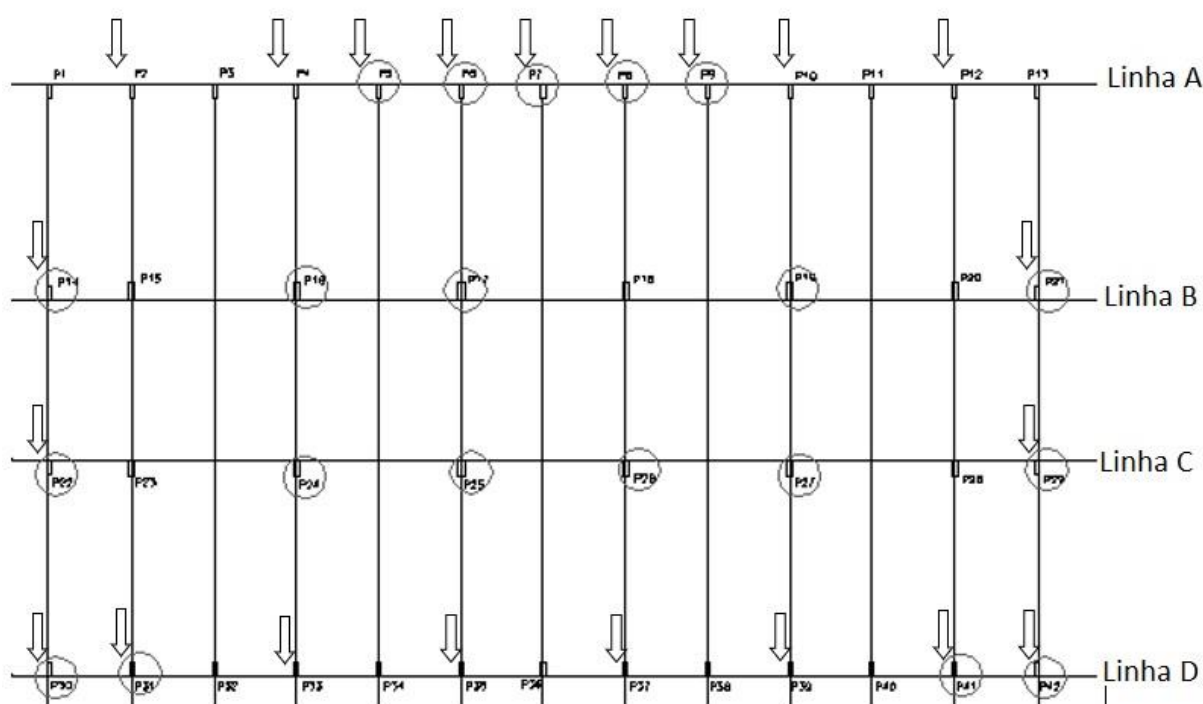


Figura 44. Indicação dos pilares que sofreram acréscimo de carga; Rosa (2005) assinalados com os círculos e da autora assinalados com as setas.

#### 4.4 Alternativa de fundação: radier estaqueado

Pela intensidade das fissuras, as maiores distorções ocorreram entre as linhas A e B, nos fundos da construção. Se a autora iniciasse o reforço na linha B, com recalques superiores aos da linha A, provavelmente haveria uma translação do problema de distorções elevadas para as linhas B e C, que apresentam uma menor distância entre pilares. Por este motivo, a autora decidiu iniciar o trecho com reforço em radier estaqueado na linha D, na parte frontal do prédio, onde suas análises e as de Rosa (2005) indicaram os maiores recalques. Ao reforçar este trecho da frente da edificação, a expectativa é de que haveria uma tendência de transferir mais carga para esta linha, aliviando a linha A. A Figura 44 indicava que o estudo da interação solo x estrutura resultou na sobrecarga na linha A, tanto nas análises de Rosa (2005) como nas da autora. A sobrecarga ocorreu, de fato, no trecho onde a argila de baixa consistência apresentava reduzida espessura e, portanto, onde foram estimados os menores recalques. O radier estaqueado na linha D teria o objetivo de aumentar a rigidez desta linha de maiores recalques.

Assim, de forma a minimizar os recalques na linha D, de P30 a P42, correspondentes à frente da edificação, uma solução em radier estaqueado foi estudada. Foram incluídas estacas e blocos transversais, passando por baixo das sapatas corridas originais, de acordo com a Figura 45. Considerou-se nesta solução alternativa, o acréscimo de 14 estacas na linha D, em elementos pré-moldados de diâmetro de 25 cm e comprimento de 4 m. A opção de estacas longas seria uma opção de muito maior rigidez (e de elevado custo) que ao invés de apenas reduzir as distorções, entre as linhas A e B aumentariam de forma intensa as distorções entre as linhas C e D. A escolha deste pequeno comprimento objetivou a redução dos recalques a níveis toleráveis, não muito pequenos, pois ao invés de apenas reduzir as distorções entre as linhas A e B, aumentaria as distorções entre as linhas C e D. Esta alternativa não teve como objetivo um reforço da fundação, mas sim um projeto alternativo, que poderia ter sido utilizado desde o início do empreendimento como uma opção de fundação. Como a camada arenosa tem maior espessura junto à linha D, cerca de 5 metros, o comprimento reduzido de 4 metros deveria ser o suficiente para transferir a carga da estaca à camada arenosa superficial numa maior extensão, reduzindo as tensões na camada de argila. Esta alternativa prevê a instalação das estacas por prensagem, após a conclusão da fundação direta, com reação na estrutura durante sua etapa de construção, quando os recalques ocorridos seriam ainda bem pequenos. A previsão seria, então, de uma fundação mista, com um radier estaqueado apenas na linha D, entre os pilares P30 e P42. Para isso, seria deixado um bloco sob as sapatas, com os furos para posterior passagem das estacas. Este bloco estaria envolvendo as sapatas lateralmente, segundo o esquema indicado na Figura 45. Esta seria uma solução do tipo radier estaqueado para este trecho da estrutura. Para isto, a autora utilizou a rotina desenvolvida nesta pesquisa, contemplando o trecho dos pilares P30 a P42, numa análise isolada deste trecho, e considerando o recalque após 20 anos. Neste alinhamento D as cargas seriam particionadas entre as estacas e a fundação direta, com a expectativa da redução dos recalques. A partir deste estudo inicial, a autora estimou os coeficientes do modelo de Kelvin como indicado a seguir.

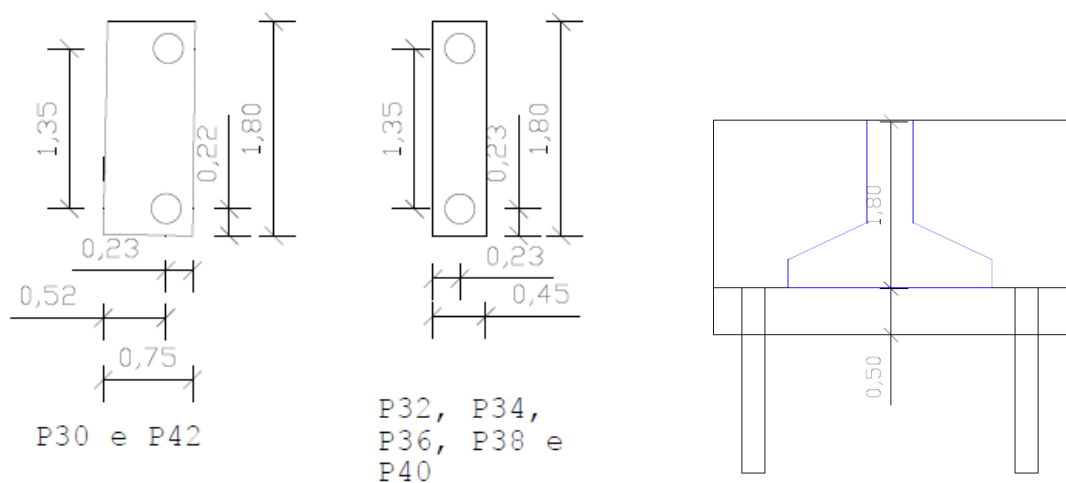
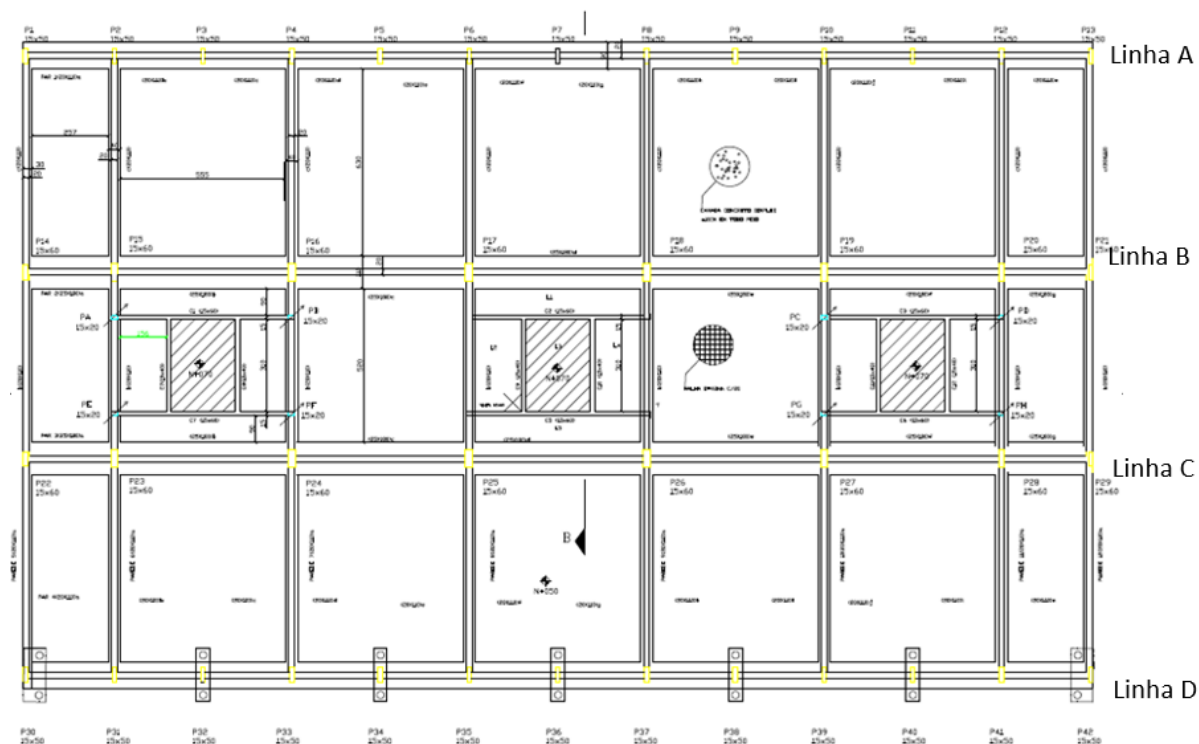


Figura 45. Indicação das novas sapatas e 14 estacas incluídas na linha D.

A linha D foi dividida em 7 trechos (5 centrais e 2 extremos) conforme esquema indicado na parte inferior da Figura 45. As seguintes análises foram feitas:

A) No programa Aoki-Lopes (1975):

Na linha D

- 1) Considerando-se apenas a fundação em sapata isolada em cada um dos trechos indicados no inferior da Figura 45, foi obtido o recalque a longo prazo no centro da sapata deste trecho (apenas a sapata solicitada);

- 2) Considerando-se apenas as 2 estacas, no centro do mesmo trecho, foram estimados os recalques do solo a longo prazo na base das estacas e somados ao deslocamento elástico ao longo do fuste (apenas as estacas solicitadas).
- 3) Com os resultados de 1) obteve-se a rigidez da fundação direta e de 2) a rigidez do conjunto das 2 estacas.
- 4) A partir do algoritmo desenvolvido em Excel, detalhado no capítulo 2, com base nos resultados de 3), obteve-se o recalque no ponto central de cada trecho deste pequeno radier estaqueado. Utilizou-se a rotina da autora, em etapas sucessivas, até que o recalque do centro da sapata/bloco convergisse com o recalque do ponto central entre as estacas. Além do recalque, o algoritmo forneceu a partição das cargas referentes à sapata e às estacas;
- 5) Nos dois trechos de extremidade, a partição de cargas foi de 52% para as estacas e 48% para as sapatas. Nos trechos centrais a partição de cargas resultou em 49% para as estacas e 51% para as sapatas. Face à pequena diferença entre eles, foram ponderados os valores, com peso 2 (2 sapatas extremas) e peso 5 (5 sapatas do trecho central) chegando-se a: 50 % de carga para as estacas da linha D e 50% de carga para a fundação direta.
- 6) Após concluída a linha D, analisou-se no Aoki-Lopes o efeito de todo o grupo de fundações da obra na estimativa de recalques. Todo o carregamento foi transferido às sapatas, exceto na linha D onde metade do carregamento desta linha foi transferido para as estacas e metade à fundação direta corrida. Desta forma foi procedida a estimativa do recalque da nova planta de fundações, obtendo-se os recalques no trecho do radier estaqueado, linha D, contemplando o efeito de todo o grupo.  
Ressalta-se que apesar da necessidade de se proceder às várias iterações em 4), para a linha D, os arquivos do Aoki-Lopes para o recalque do grupo são executados nesta solução alternativa apenas uma vez, já que não houve alteração do carregamento nas demais linhas. Apenas na linha D foram incluídas as cargas particionadas da fundação direta e acrescentadas as cargas particionadas nas estacas. Assim, apesar dos vários passos em 4), a análise final não é trabalhosa.

Interação solo x estrutura.

B) Em seguida, foram introduzidas no programa SAP a geometria da edificação, incluindo a nova planta da fundação com o reforço na linha D. Foram incluídas as molas representativas de cada estaca cujos recalques foram estimados pelo programa Aoki-Lopes (1975) contemplando o conjunto das fundações. Como as estacas estavam assentes em solo arenoso, não foi associado às estacas o efeito viscoso do solo. A cada nó sob as sapatas corridas, bem como sob as sapatas/bloco, foram introduzidos coeficientes de mola e o amortecimento. Quanto ao coeficiente de viscosidade, este foi mantido com um mesmo valor médio da análise anterior, sob todos os nós correspondentes às bases da sapata.

O resultado das análises da interação solo x estrutura com a alternativa de fundação em radier estaqueado, após 20 anos, está apresentado na Tabela 17. A função de carga foi a mesma utilizada por Rosa (2005). A duração da obra foi de 1 ano e a análise se manteve com o carregamento total até os 20 anos.

Tabela 17. Solução com parte em Radier estaqueado, sem interação e com interação solo x estrutura, após os 20 anos

Linha	Pilar	S/interação		C/interação	
		Carga (kN)	Recalque (cm)	Carga (kN)	Recalque (cm)
A	1	388	7,94	398	7,70
A	2	593	9,52	594	8,27
A	3	553	9,57	552	8,81
A	4	609	9,97	610	9,30
A	5	610	9,89	609	9,71
A	6	620	10,10	606	10,16
A	7	658	9,95	660	10,68
A	8	698	12,57	699	11,35
A	9	610	12,34	614	12,01
A	10	622	12,29	621	12,65
A	11	555	12,32	562	13,20
A	12	591	13,44	593	13,75
A	13	387	12,99	396	14,28
B	14	489	11,57	500	9,16
B	15	974	11,88	981	10,17
B	16	1266	12,30	1249	11,99
B	17	1307	14,57	1294	13,29
B	18	1313	14,96	1308	14,03
B	19	1265	16,85	1251	14,21
B	20	981	16,32	979	14,20
B	21	511	15,37	517	13,76
C	22	483	12,35	491	9,06
C	23	984	13,52	980	10,29
C	24	1265	16,22	1252	12,54
C	25	1304	16,98	1306	14,05
C	26	1333	16,94	1324	14,56
C	27	1250	16,73	1257	14,20
C	28	986	16,01	984	13,16
C	29	506	14,09	511	12,53
D	30	285	11,90	285	6,27
D	31	372	13,26	370	7,63
D	32	342	15,32	340	8,83
D	33	351	13,52	352	10,12
D	34	326	15,99	328	11,23
D	35	353	16,01	351	12,38
D	36	323	16,74	322	13,08
D	37	353	15,70	351	13,33
D	38	328	16,23	325	13,08
D	39	350	16,36	348	12,69
D	40	336	14,25	334	11,92
D	41	372	14,47	370	11,09
D	42	296	15,99	296	10,05
		Média	13,70	Média	11,54
		Desvio Padrão	2,47	Desvio Padrão	2,16
		Coef. variação	0,18	Coef. variação	0,19



Considerando apenas os recalques da linha D, P30 a P42, a solução sem a interação solo x estrutura mostrava um recalque médio, na linha D, de 15,0 cm, e a solução com interação resultou num recalque médio, na mesma linha, de 8,4 cm. A soma das cargas dos pilares da linha D, sem a interação solo x estrutura mostrava uma carga total de 2826 kN e com a interação com a estrutura a carga aumentou para 3168 kN. Cabe destacar que a redução do recalque foi de cerca de 44 %, uma vez que metade da carga foi transferida às estacas desta linha. Com a redução do recalque, houve uma maior transferência de carga para a linha D, acréscimo este de cerca de 12%.

As curvas de iso-recalques da solução original, com e sem a interação solo x estrutura foi mostrada na Figura 43, para a análise da autora, e com a inclusão das 14 estacas no radier estaqueado da linha D, com e sem a interação solo x estrutura está indicada na Figura 46. Observa-se que os maiores recalques não mais ocorrem na Linha D, frente da obra, mas sim mais próximo ao centro da edificação. O radier estaqueado na linha D resultou numa alteração do padrão dos recalques e uma certa redistribuição de carga.

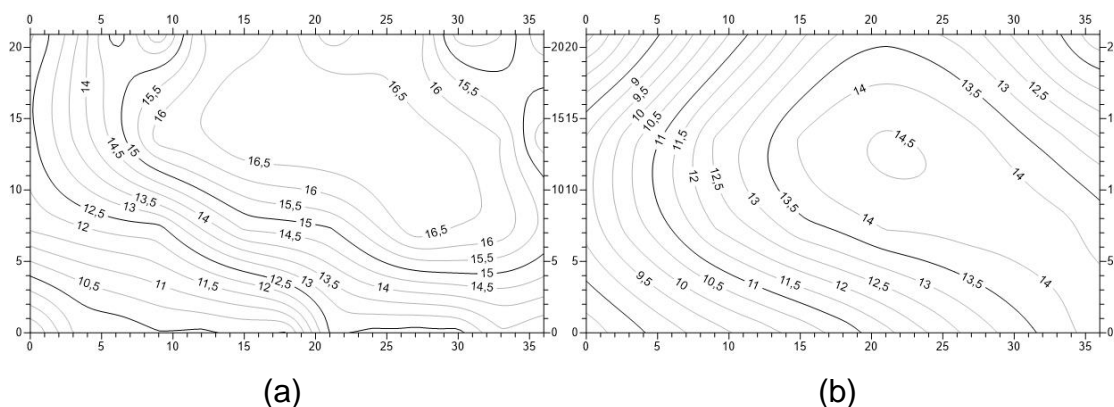


Figura 46. Curvas iso-recalques, com radier estaqueado na linha D, (a) sem considerar a interação solo-estrutura e (b) considerando a interação para 20 anos, terceira análise.

#### 4.4.1 Verificação dos valores extremos de distorção para a solução alternativa com radier estaqueado na linha D.

Rosa (2005) apresentou valores de distorção angular para alguns pontos da edificação. Estes valores foram comparados aos critérios de Bjerrum (1963) que ainda são muito utilizados na prática atual e se encontram na Figura 47.

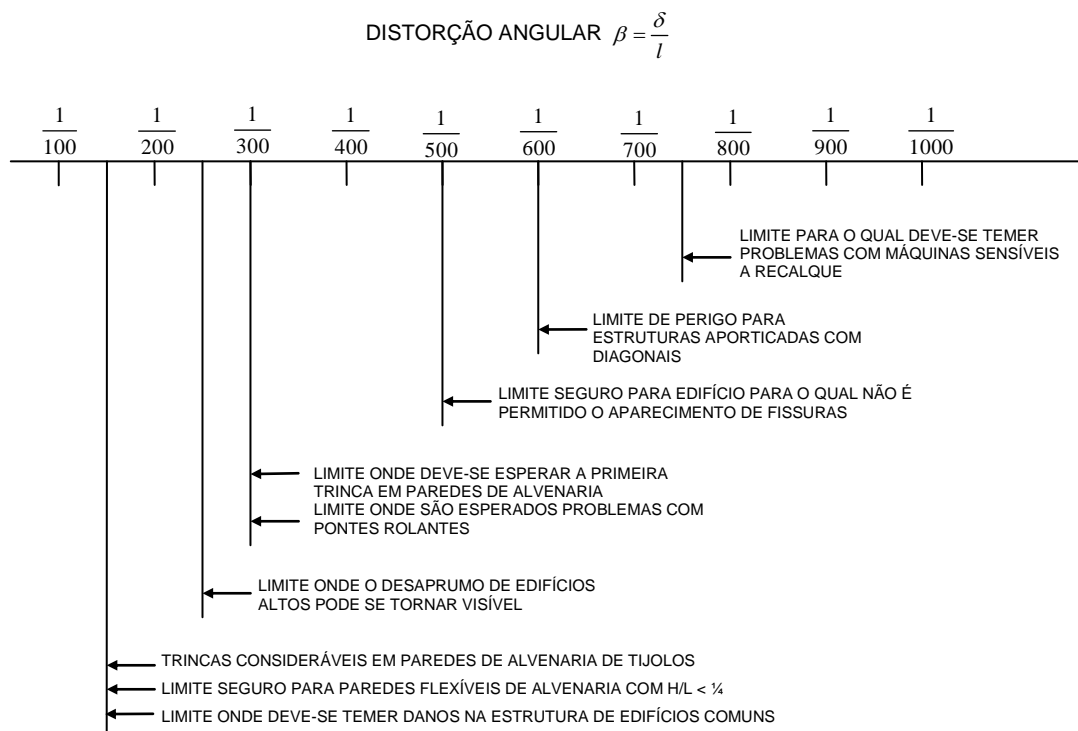


Figura 47. Critérios de danos, Bjerrum (1963)

Dentre os valores apresentados, vale ressaltar os seguintes:

- $\beta = 1/500$ : limite seguro para que sejam evitados danos em paredes de edifícios.
- $\beta = 1/300$ : limite a partir do qual começam a aparecer trincas em paredes de edifícios.
- $\beta = 1/150$ : limite a partir do qual podem ser esperados danos estruturais em edifícios correntes.

Alguns valores de Rosa (2005) foram apresentados na Tabela 18 para comparação com os valores obtidos pela autora. Os pontos de referência, correspondentes aos pilares da estrutura, são aqueles apresentados na Figura 39. É importante destacar que as distorções estimadas por Rosa (2005) se referem ao projeto original da estrutura, apenas em fundações diretas, e estes valores são comparados com a solução da autora, com emprego do radier estaqueado na linha D, conforme apresentado neste item. Mas a autora verificou as distorções de outros trechos, pois a alternativa de projeto pode ter alterado os pontos críticos da estrutura. Foi verificado então, que além dos trechos apontados na tabela abaixo, entre os pilares P4 e P16 foi encontrada uma distorção de  $1/272^{**}$  bem como entre os pilares P6 e P17 encontrou-se uma distorção de  $1/233^{**}$ .

Tabela 18. Valores de distorção angular; Rosa (2005) em fundação direta e Vitor (2023) com radier estaqueado na linha D.

	Apenas fundação direta	Fundação mista (radier estaqueado na linha D)	
	C/interação	S/interação	C/interação
	Rosa, 2005	Autora	Autora
Pilares	Distorção angular	Distorção angular	Distorção angular
P8 – P18	$1/148^*$	$1/305$	$1/272^{**}$
P7 – P18	$1/142^*$	$1/156^*$	$1/232^{**}$
P17 – P25	$1/183^{**}$	$1/261^{**}$	$1/833$
P14 – P23	$1/184^{**}$	$1/237^{**}$	$1/622$
P26 – P37	$1/220^{**}$	$1/588$	$1/591$
P30 – P31	$1/176^{**}$	$1/220^{**}$	$1/221^{**}$
P23 – P24	$1/182^{**}$	$1/222^{**}$	$1/267^{**}$

Os valores de distorção angular assinalados com um asterisco indicam distorções para as quais espera-se danos estruturais segundo Bjerrum (1963). Valores assinalados com dois asteriscos indicam distorções para as quais deve-se esperar trincas nas alvenarias da construção.

Na solução original apenas em fundação direta, distorções acima do limite esperado para a ocorrência de trincas em peças estruturais ocorreram entre os pilares P8 e P18 e P7 e P18. Nos demais pilares indicados na Tabela 18 as distorções esperadas estão fora do limite mais perigoso, para as trincas em peças estruturais, mas que poderiam indicar trincas nas alvenarias, o que comprovou o que de fato

ocorreu na edificação, como foi caracterizado na ocasião da vistoria, 20 anos após o final da construção.

Na solução com parte em radier estaqueado, no alinhamento D, quando não se considerou a interação solo x estrutura, apenas num alinhamento entre dois pilares, o que apresentou também a maior distorção da fundação executada, apresentou distorção bem próxima ao limite de ocorrência de trincas nas alvenarias, e quatro alinhamentos de pilares apresentaram possibilidade de trincas nas alvenarias. Com a inclusão da interação solo x estrutura no reprojeto das fundações deste caso de obra, as trincas em elementos estruturais provavelmente estariam afastadas, restando, em alguns alinhamentos, a possibilidade de trincas nas alvenarias, patologia muito menos grave e mais fácil de reparar.

Cabe destacar que a alternativa de radier estaqueado apenas na linha D, embora tenha reduzido as distorções, não as reduziu para o limite desejado, ou seja, todas com valores inferiores a 1/300.

Outra solução de fundação mista foi então estudada pela autora como uma segunda alternativa à fundação original. Foram incluídas estacas e sapatas transversais de acordo com a Figura 48, nas linhas C e D. Foi considerado o mesmo tipo de estaca, com diâmetro de 25 cm e comprimento de 4 metros. Além da linha D ser dividida em 7 trechos (conforme análise anterior), a linha C foi dividida em 6 trechos. As análises dos trechos em radier estaqueado foram reavaliadas e incluídas posteriormente na análise conjunta, estimando os recalques de todo o conjunto de fundações da obra, sem interação e com a análise de interação solo estrutura, com resultados dos recalques resumidos na Tabela 19.

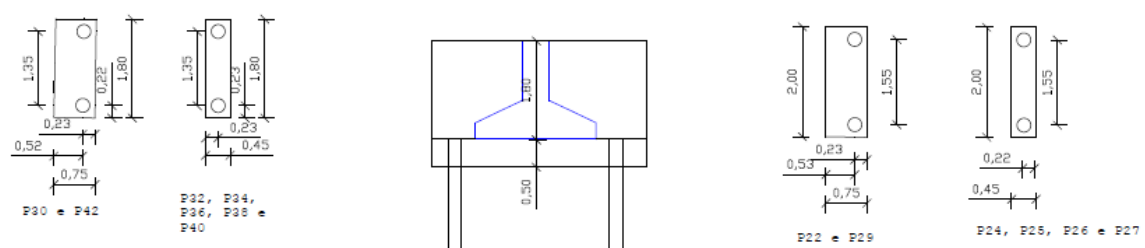
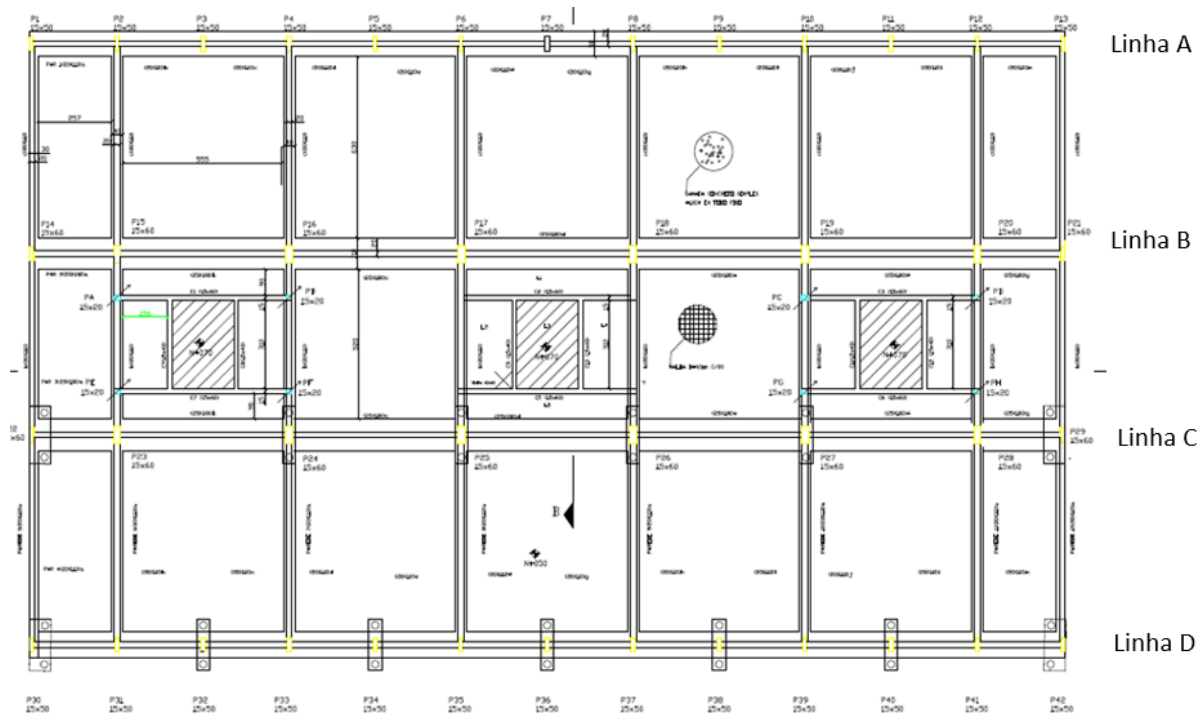


Figura 48. Alternativa 2, com radier estaqueado nas linhas C e D, 26 estacas.

Tabela 19. Segunda solução em fundações mistas, radier estaqueado nas linhas C e

D.

		ESTACAS NAS LINHAS C E D			
		S/interação		C/interação	
Linha	PILAR	Carga (kN)	Recalque (cm)	Carga (kN)	Recalque (cm)
A	1	289	9,20	293	8,30
A	2	482	9,50	481	8,30
A	3	444	9,50	441	8,70
A	4	497	10,30	496	9,60
A	5	498	9,80	495	9,60
A	6	583	11,10	581	10,70
A	7	543	11,30	544	10,90
A	8	581	13,60	582	11,30
A	9	498	13,50	500	11,40
A	10	509	13,00	507	12,10
A	11	446	12,10	450	11,20
A	12	480	13,30	480	11,70
A	13	288	12,90	291	11,90
B	14	404	9,80	409	8,30
B	15	883	10,30	894	8,90
B	16	1173	11,80	1163	9,90
B	17	1213	13,50	1208	11,80
B	18	1219	13,90	1222	13,70
B	19	1171	14,20	1165	12,20
B	20	890	14,10	892	11,40
B	21	426	13,20	427	11,40
C	22	668	10,10	695	8,50
C	23	918	10,70	918	8,90
C	24	1058	12,50	1042	10,40
C	25	1078	14,30	1067	12,10
C	26	1092	14,00	1075	13,50
C	27	1051	13,80	1044	12,10
C	28	919	13,20	920	11,10
C	29	679	13,10	704	10,50
D	30	496	10,30	500	7,90
D	31	590	10,90	587	7,90
D	32	557	11,10	556	8,60
D	33	567	12,70	569	10,20
D	34	540	12,30	544	11,40
D	35	569	13,10	567	11,90
D	36	537	14,50	538	13,00
D	37	569	14,10	568	13,10
D	38	541	14,00	541	13,30
D	39	566	13,90	564	12,60
D	40	551	13,80	551	11,80
D	41	590	13,70	587	11,00
D	42	508	13,30	511	9,90
		<b>Média</b>	<b>12,36</b>	<b>Média</b>	<b>10,79</b>
		<b>Desvio padrão</b>	<b>2,1</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>1,63</b>
		<b>Coef. Variação</b>	<b>0,17</b>	<b>Coef. Variação</b>	<b>0,15</b>

Para esta nova alternativa, com 26 estacas, considerando apenas os recalques da linha C e D, P22 a P42, a solução sem a interação solo x estrutura apresentou um recalque médio, nas linhas C e D, de 12,9 cm, e a solução com interação resultou num recalque médio, nas mesmas linhas, de 10,9 cm. A soma das cargas dos pilares das linhas C e D, sem a interação solo x estrutura mostrava uma carga total de 14075 kN e com a interação com a estrutura a carga passou para 14080 kN. Ou seja, não houve transferência de carga significativa, nesta solução, embora tenha havido uniformização de recalques. A uniformização do recalque em toda a planta levou a uma redução do recalque, neste trecho das linhas C e D de cerca de 26 %.

As curvas de iso-recalques da solução original, com e sem a interação solo x estrutura foi mostrada na Figura 43, para a análise da autora, e com a inclusão das 14 estacas na linha D está indicada na Figura 46. As curvas correspondentes, sem e com interação, acrescentando também mais 8 estacas na linha C, com um total de 26 estacas, está apresentada na Figura 49. Observa-se que houve uma mudança no padrão de recalques das figuras, indicando uma maior uniformização dos recalques à medida em que as alterações no projeto foram sendo introduzidas. Os maiores recalques não mais se encontram junto à linha D, frente da obra, mas se aproximaram para o centro. Com a introdução das estacas, os recalques máximos reduziram ligeiramente, mas o mais relevante é a distribuição dos recalques, tornando-se mais suave, reduzindo as distorções responsáveis pelas patologias.

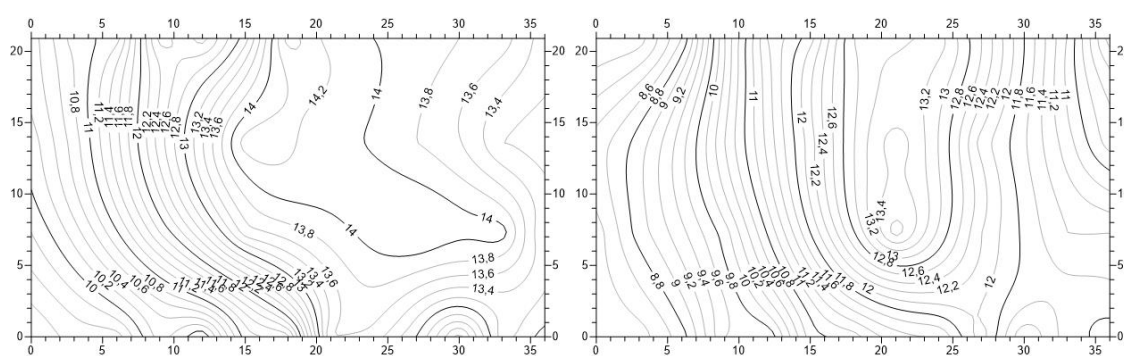


Figura 49. Curvas iso-recalques, com radier estaqueado nas linhas C e D, (a) sem considerar a interação solo-estrutura e (b) considerando a interação para 20 anos, terceira análise.

Mais uma vez, os valores de distorção angular foram analisados e se encontram indicados na Tabela 20. Cabe ressaltar que Rosa (2005) considerou a

estrutura tal qual foi executada (apenas sapatas corridas) e esses valores são comparados à segunda alternativa de solução, incluindo a fundação mista, radier estaqueado, nas linhas C e D.

Tabela 20. Valores de distorção angular; Rosa (2005) em fundação direta e pela autora com radier estaqueado na linha D, e nas linhas C e D.

Pilares	Apenas fundação direta	Fundação mista (radier estaqueado na linha D)		Fundação mista (radier estaqueado nas linhas C e D)	
	C/interação	S/interação	C/interação	S/interação	C/interação
	Rosa, 2005	Autora	Autora	Autora	Autora
	Distorção angular	Distorção angular	Distorção angular	Distorção angular	Distorção angular
P8 – P18	1/148*	1/305	1/272**	1/1433	1/1650
P7 – P18	1/142*	1/156*	1/232**	1/1950	1/1900
P17 – P25	1/183**	1/261**	1/833	1/788	1/1100
P14 – P23	1/184**	1/237**	1/622	1/875	1/1167
P26 – P37	1/220**	1/588	1/591	1/1450	1/1825
P30 – P31	1/176**	1/220**	1/221**	1/1500	1/3000
P23 – P24	1/182**	1/222**	1/267**	1/750	1/1200

Nos valores assinalados com um asterisco deve se esperar danos estruturais na edificação ao passo que nos valores assinalados com dois asteriscos deve-se esperar aparecimento de possíveis trincas nas alvenarias da construção, de acordo com Bjerrum (1963). As distorções de outros trechos foram verificadas, nesta segunda alternativa, mas todas foram inferiores a 1/300.

Observa-se que a solução em radier estaqueado nas duas linhas, C e D, resultou numa redução expressiva das distorções nos pilares que apresentavam uma situação crítica com patologias importantes no projeto original, que foi executado. Possivelmente, uma terceira solução, com radier estaqueado apenas na linha C, já teria indicado uma alternativa satisfatória, ou apenas na linha B, já que as patologias mais severas ocorreram entre as linhas A e B.

A opção da autora em concentrar a solução em radier estaqueado inicialmente na linha D foi pelo fato de nesta linha D terem ocorrido os maiores recalques absolutos. Porém, as maiores distorções ocorreram entre as linhas C e D. Possivelmente, uma solução mais otimizada poderia ter sido a alternativa com radier estaqueado apenas na linha B. A autora chegou a pensar nesta possibilidade, mas vislumbrou que, ao



reforçar a linha B apenas deslocaria as maiores distorções de posição, uma vez que a distância entre as linhas B e C é menor do que entre as linhas A e B.

A opção da autora em estacas curtas se deveu à tentativa de não reduzir drasticamente os recalques na região com uso de estacas, pois o objetivo era o de se uniformizar os recalques, e não reduzir a valores muito baixos, que poderiam levar a distorções maiores, a menos que a solução em radier estaqueado se estendesse a todos os alinhamentos, com um custo muito maior.

Este caso mostra, portanto, que um projeto alternativo, com adição de um pequeno número de estacas curtas absorvendo parte das cargas, numa fundação mista (radier estaqueado), foi capaz de reduzir as distorções a valores baixos, afastando o risco de patologias.

## **5. ANÁLISE DE UM CASO DE OBRA DE FUNDAÇÃO PROFUNDA COM SUBSTITUIÇÃO POR UM RADIER ESTAQUEADO**

Foi escolhido um caso do banco de dados existente, já contemplado com a estimativa de recalques, análise da interação solo x estrutura e comparação dos recalques estimados com os medidos. Trata-se de um caso em fundações profundas analisado na pesquisa de Costa (2003). Como este caso apresentou recalques instrumentados muito reduzidos, a autora irá verificar a possibilidade de otimização do número de estacas, numa análise similar à apresentada por de Sanctis et al. (2002), que partiram de uma obra concluída e verificaram a redução de custo que teria sido obtida, por ocasião do projeto, se uma solução de otimização da fundação tivesse sido estudada como uma alternativa

De Sanctis et al. (2002) apresentaram uma análise de um edifício alto e demonstraram que poderiam otimizar o projeto original e, portanto, o custo das fundações, reduzindo para a metade o comprimento das estacas de um radier estaqueado. Os autores chegaram a uma redução de 25% do recalque diferencial, com a otimização, com um acréscimo de apenas 10% do valor do recalque máximo.

Nesta mesma linha de alternativas de redução de custo, a autora irá apresentar alternativas de fundação empregando radier estaqueado em parte da construção cujo projeto original consistiu num grupo de estacas. Como os parâmetros de compressibilidade do solo foram calibrados por Costa (2003) com os registros de recalques medidos, a autora irá partir deste conhecimento dos parâmetros ajustados e propor alternativas neste caso, de forma semelhante ao estudo de caso do capítulo 4.

Trata-se de dois casos extremos: o anterior tratava de uma obra possuindo graves patologias, em que um projeto com emprego de radier estaqueado, com acréscimo de poucas estacas, levaria a um bom comportamento, enquanto neste capítulo se estudará uma edificação com fundações em grupo de estacas e que, com a redução de estacas, poderia manter um bom comportamento com uma fundação otimizada, de menor custo. Em ambos os casos a rotina desenvolvida pela autora é utilizada, além de se verificar a interação solo x estrutura.

## 5.1. Características gerais da edificação e do solo de fundação

Este caso consiste num edifício de 11 andares situado na Rua José Carlos Nogueira Diniz, nº 35, no bairro Recreio dos Bandeirantes, Zona Oeste do Rio de Janeiro. Este prédio possui uma estrutura composta por um subsolo de 1495 m<sup>2</sup>, um pavimento térreo de 485 m<sup>2</sup>, 9 pavimentos tipos, cada um com 485 m<sup>2</sup>, além de uma cobertura e um telhado.

O projeto arquitetônico inclui varandas em balanço e apresenta uma distribuição de cargas com pilares centrais suportando cargas predominantemente maiores do que os localizados na periferia. As vigas possuem inércia variável no teto do subsolo e 1º andar, e alguns pilares têm origem no 1º andar. As plantas encontram-se no Anexo C.

A estrutura do edifício é composta por pórticos em ambas as direções, com um núcleo central rígido, caracterizando uma concepção estrutural comumente utilizada em edifícios. As fundações são do tipo profunda, em grupos de estacas do tipo Franki, que são assentes em areia, conforme plantas no Anexo C.

Foram realizadas 4 sondagens à percussão no local, com perfil de solo ilustrado na Figura 50. O terreno é composto por camadas de areia fina e média, com grau de compactação médio, com espessura variando entre 11 a 12 metros. Essas camadas estão situadas acima de uma camada de argila mole, que possui aproximadamente 6,0 metros de espessura. Esta camada de argila está apoiada sobre outra camada de areia fina e média, com grau de compactação variando de pouco a moderadamente compacta, com uma espessura de cerca de 5,0 metros, camada de apoio, onde foram assentes as estacas durante a construção.

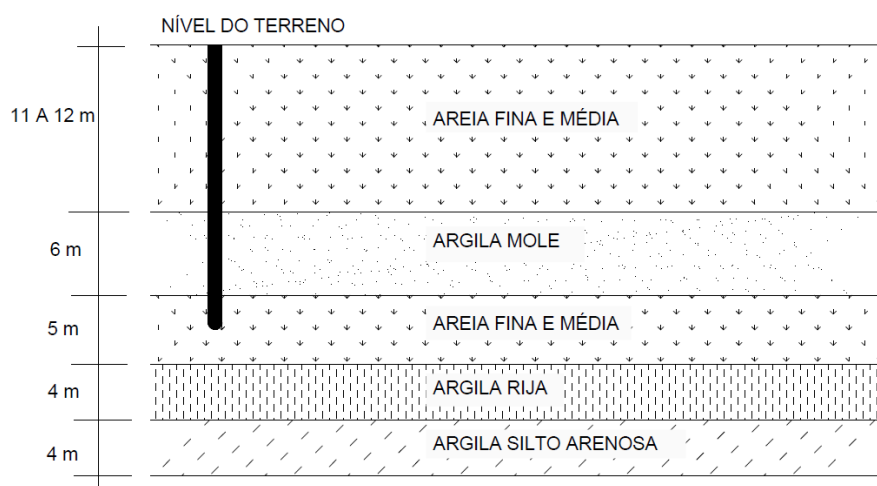


Figura 50. Perfil do subsolo

Logo abaixo desta camada arenosa é possível identificar uma camada de argila de consistência rija. Em maior profundidade é registrada a presença de uma camada de argila silto arenosa, de origem residual, que se estende até a profundidade impenetrável à percussão, localizada a aproximadamente 30 metros da superfície.

## 5.2. Modelo numérico tridimensional

Neste modelo, as vigas e pilares foram discretizados como elementos de pórtico e as lajes como elementos de casca.

Costa (2003) elaborou vários modelos estruturais para cada etapa de instrumentação. A autora irá verificar apenas a situação final da estrutura, com seu maior carregamento.

A Figura 51 ilustra o modelo de Costa (2003) para a estrutura em sua última etapa de instrumentação. Embora nesta etapa a estrutura estivesse toda concretada, com a alvenaria colocada até o 11º andar incluindo o telhado, o revestimento interno concluído até o quinto andar, excluindo as cargas de ocupação. Porém, esta etapa já contempla a grande parte do carregamento, sendo possível comparar, o comportamento da fundação como grupo de estacas e como um radier estaqueado em sua parte central.

Destaca-se também que, enquanto no Capítulo 4 a autora não mais dispunha do modelo estrutural, tendo sido necessário reconstituir todas as análises anteriores de Rosa (2005), para este caso ainda se dispunha dos arquivos relativos à pesquisa de Costa (2003), o que simplificou o trabalho da autora.

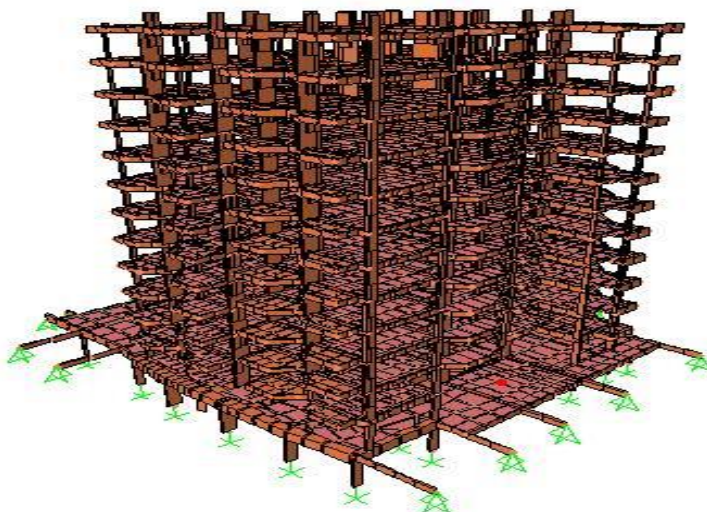


Figura 51. Modelo tridimensional refinado, Costa (2003).

### 5.3. Projeto original de fundações

No projeto original foram empregadas estacas Franki (de 18m de comprimento) totalizando 29 estacas de 52 cm de diâmetro e 27 estacas de 60 cm de diâmetro. A principal característica das estacas Franki é a criação de um bulbo na base da estaca. Esse bulbo aumenta a capacidade de carga da estaca na ponta, permitindo uma cota de assentamento num nível acima do que se teria numa estaca pré-moldada ou metálica.

A Tabela 21 mostra os dados das cargas nos pilares derivadas deste último modelo refinado de Costa (2003), levando em conta inicialmente os apoios rígidos (indeslocáveis) na etapa final da instrumentação da edificação e a análise em apoios deslocáveis.

Esta tabela indica, na coluna 1 a designação dos pilares; na 2 os recalques estimados por Costa (2003) após a calibração dos parâmetros do subsolo com base nos valores experimentais; na coluna 3 encontram-se os valores das cargas nos pilares para a fundação indeslocável (apoios rígidos). Com base nas colunas 3 e 2

foram estimados os coeficientes de mola iniciais. Costa (2003) utilizou também o artigo de Aoki e Lopes (1975) em sua previsão de recalques.

Os recalques estimados por Costa (2003) consideraram os parâmetros do solo após ajuste até que os recalques médios estimados fossem iguais aos recalques médios medidos, considerando, para esta média, todos os pilares com recalques monitorados. A coluna 4 da Tabela 21 contém a carga nos pilares para a situação dos apoios elásticos, após a interação solo x estrutura.

Observa-se que neste caso de obra, como a fundação em grupos de estacas se apoiava em uma camada suficientemente resistente, com baixa compressibilidade, e sobrejacente a solo residual, o efeito da interação solo estrutura na redistribuição das cargas entre os pilares não foi significativa. A menor relação entre as cargas dos apoios elásticos e apoios rígidos foi a do pilar P2A, e a maior relação foi para o pilar P45. Os pilares com relação inferior a 1 apresentaram redução de carga e os superiores a 1 apresentaram acréscimo. Para visualização da localização dos pilares, vide Anexo C. A redistribuição de cargas foi pequena, neste caso, na faixa de -7% a +18%, variação bem inferior ao da obra de Vitória, onde os recalques foram expressivos.

Tabela 21. Resultados da análise, Costa (2003)

Costa, 2003			
Fundação Profunda	Recalques s/interação	Apoio rígido	Apoio elástico
Pilar	cm	P(kN)	P(kN)
2A	0,80392	756	700
3	0,89274	1132	1099
4	0,79037	803	775
5A	0,68713	1426	1438
6	0,93513	694	733
7	0,97812	991	1007
8	0,90224	670	711
9	0,91468	886	891
10A	0,8977	1421	1434
12	1,01191	1840	1918
13	0,98156	2046	1972
14	1,00897	1399	1440
15A	1,05554	1930	1944
16	1,30413	1592	1518
17	1,25251	1293	1237
18	1,15908	610	596
19	1,06202	646	652
20	1,11528	1021	991
22A	1,24394	2207	2190
23	1,036652	1848	1910
24	1,07279	1358	1348
25	1,14884	1036	1000
28	1,03817	2070	2024
29A	1,07206	1010	996
30	1,09388	1474	1464
32	0,93712	1398	1445
33A	1,07015	1702	1711
34A	0,80921	795	798
35	0,95294	853	831
36	0,86087	869	828
37	0,82759	1049	996
45	0,67483	306	361
	<b>TOTAL</b>	<b>39131</b>	<b>38958</b>

Costa (2003) também considerou, na transferência de carga para a estimativa do recalque, que só após a mobilização completa do atrito a diferença de carga, em relação àquela aplicada no topo, foi transferida à ponta. Foi utilizado o mesmo programa desenvolvido pela autora no capítulo 5.

#### **5.4. Alternativa em radier estaqueado**

Para avaliação dos recalques em radier estaqueado, a autora também utilizou o programa Aoki Lopes (1975).

Costa (2003) realizou diversas análises de sensibilidade dos parâmetros, quando da calibração dos recalques estimados e medidos, e verificou que somente a quarta camada do perfil geotécnico, caracterizada por uma argila silto arenosa rija, localizada abaixo da camada arenosa onde foram assentes as bases das estacas, exerceu uma influência significativa nos cálculos dos recalques da solução em grupos de estacas. Quando Costa (2003) procedeu à variação dos parâmetros das demais camadas de solo, as diferenças entre recalques previstos e medidos foram muito pouco expressivas.

Naturalmente que o caso do radier estaqueado não apresentaria o mesmo padrão de comportamento no ajuste de sensibilidade dos parâmetros, uma vez que parte da carga seria aplicada diretamente ao solo superficial. Neste caso, as características de compressibilidade destas camadas mais superficiais teriam efeito diferente, no comportamento do conjunto, em relação ao caso da fundação apenas profunda. Porém, como os dados de instrumentação indicaram o comportamento da fundação pós conclusão, a autora partiu dos parâmetros ajustados de Costa (2003) como ponto de partida para sua alternativa de fundação otimizada.

A Tabela 22 resume os parâmetros ajustados por Costa (2003) para a compressibilidade de todas as camadas do perfil geotécnico, em cada uma das verticais das sondagens realizadas. Cabe destacar que cada uma das sondagens apresentava as quatro camadas caracterizadas no perfil, mas a diferentes profundidades. A coluna 3 indica a profundidade da base de cada camada, conforme considerada por Costa (2003) nas quatro diferentes de sondagem.



Tabela 22. Valores de módulos de elasticidade ajustados, Costa (2003)

Sondagem	Camada	Prof (m)	E (Mpa)	$\mu$
1	1	11	68,58	0,30
	2	17	6,50	0,35
	3	22	83,16	0,30
	4	28	14,78	0,33
2	1	12	64,80	0,30
	2	17	2,44	0,35
	3	22	86,40	0,30
	4	26	13,30	0,33
3	1	12	48,60	0,30
	2	16	3,49	0,35
	3	21	48,60	0,30
	4	26	12,56	0,33
4	1	10	50,76	0,30
	2	16	2,90	0,35
	3	22	64,80	0,30
	4	26	14,26	0,33

O recalque do radier estaqueado será considerado como igual ao recalque do seu centro de gravidade, localizado no nível de sua base, ou seja, no topo das estacas. Neste aspecto a autora se valeu da pesquisa bibliográfica em que, reportando-se à Tabela 3 do capítulo 1 destaca que a espessura do radier apresenta um efeito desprezível em relação ao recalque total ou à distribuição relativa entre as cargas nas estacas e no radier. Portanto, qualquer que seja a espessura escolhida para o radier, seu efeito não comprometeria a estimativa do recalque do radier e da partição de cargas, que é a preocupação da alternativa de projeto, do ponto de vista geotécnico. A autora optou por uma altura do radier de 0,6 m.

A autora também se valeu, em sua análise, de outro aspecto, ressaltado por Mandolini (2003), de que mesmo que o solo no entorno da estaca seja altamente carregado, a redução de tensões que ocorre no maciço com a distância ao fuste faz com que condições elásticas prevaleçam no maciço a alguma distância das estacas. Esta observação justifica a prática comum de projeto de considerar um enfoque linear da interação entre estacas, como é a premissa da rotina da autora, que tem por base a teoria da elasticidade.

O valor corresponde ao recalque do solo no nível de assentamento das estacas, no centro de gravidade das cargas, somado ao deslocamento elástico do fuste das estacas, corresponde ao recalque estimado para cada configuração de estacas estudadas para o radier estaqueado. É importante ressaltar que ao determinar o recalque do solo nesse ponto específico, no nível de assentamento, são

consideradas as influências de todas as estacas e da carga transmitida ao radier na superfície de sua base.

#### 5.4.1. Primeira alternativa em radier estaqueado

Como primeira tentativa a autora optou por um radier estaqueado sob os pilares centrais com área de 18m x 20m e 60 cm de espessura. A Figura 52 ilustra a posição do radier em relação à planta de locação dos pilares, em escala reduzida. A planta de locação dos pilares com maior detalhamento está incluída no Anexo C.

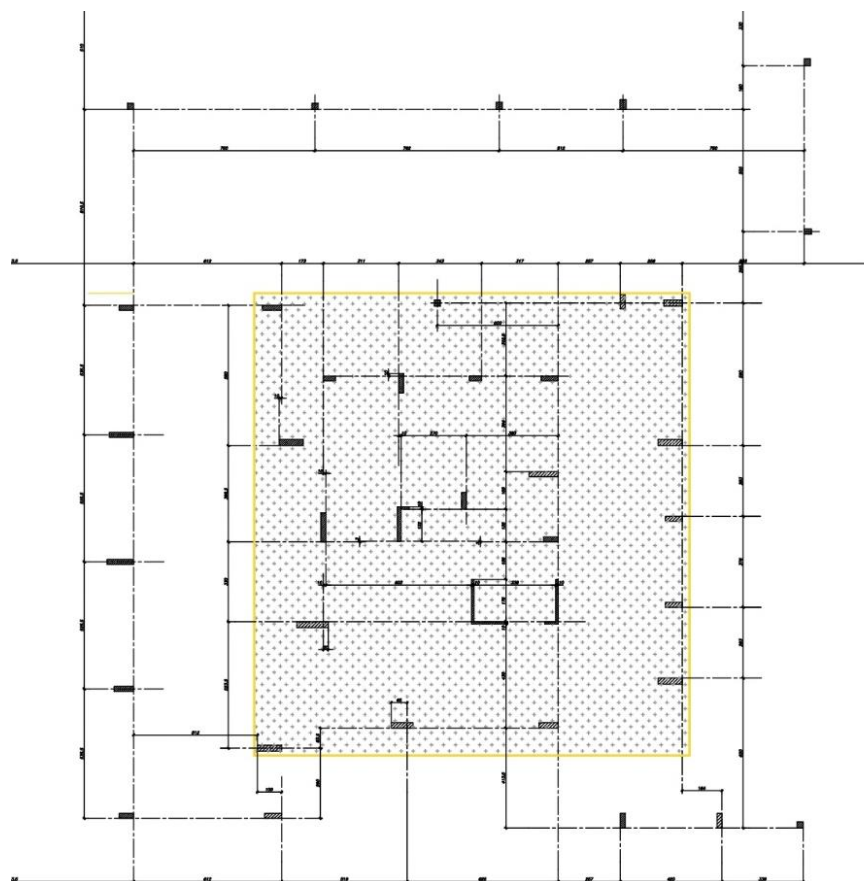


Figura 52. Área da projeção do radier estaqueado posicionado na região com maior concentração de cargas

O centro de gravidade do radier foi posicionado no centro de gravidade das cargas dos pilares a ele associados. Nesta primeira configuração foram previstas 25 estacas do tipo Franki, com mesmo comprimento executado do projeto original, 18,60m de comprimento do NT até o eixo da sua base, suposta esférica, com volume de 450 litros, dispostas em planta como indicado Figura 53. Vale ressaltar que no projeto original, em grupos de estacas, foram utilizadas 17 estacas de 52 cm de diâmetro e 22 estacas de 60 cm de diâmetro, totalizando 39 estacas.

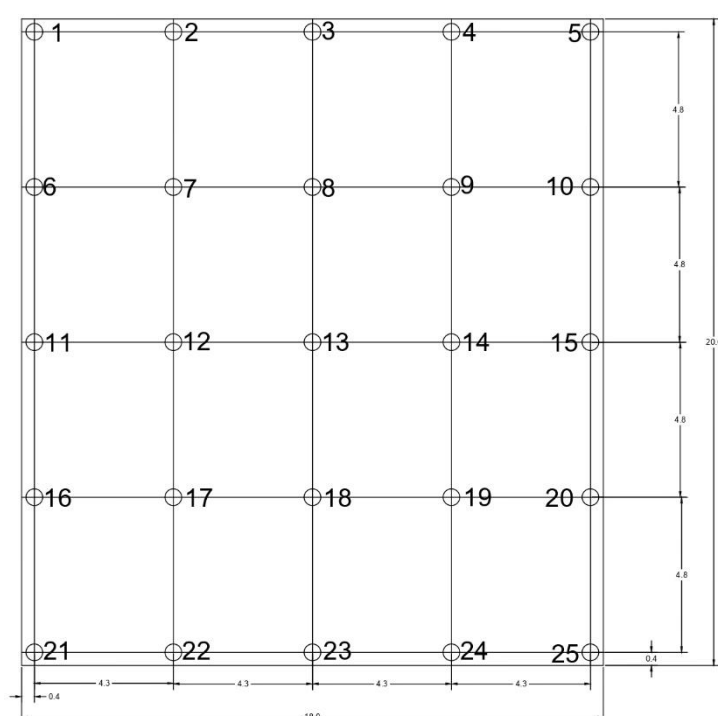


Figura 53. Radier estaqueado com 25 estacas.

Partindo das cargas obtidas por Costa (2003), considerando os apoios rígidos, e dos módulos de elasticidade ajustados, e considerando a rigidez do radier conforme correção de Bhartiya (2020), a autora usou sua rotina e chegando a um recalque médio do radier estaqueado de 7,88 mm e 32% da carga sendo absorvida pelo radier. Ao analisar toda a fundação (radier estaqueado no centro e grupo de estacas ou, na sua maioria, estacas isoladas, na periferia) os recalques estimados, ainda sem a interação solo x estrutura, estão indicados na Tabela 23, na posição de cada um dos pilares, na altura da base do radier.

Tabela 23. Valores de recalque do projeto original e sua comparação à solução alternativa em radier estaqueado com 25 estacas (recalque na base dos pilares)

	Costa (2003)	Autora
Pilar	Projeto Original	Projeto com radier estaqueado 25 $\phi$
	recalque (mm)	recalque (mm)
2A	8,04	8,49
3	8,93	9,40
4	7,90	8,31
5A	6,87	8,92
6	9,35	8,52
7	9,78	9,09
8	9,02	8,87
9	9,15	8,87
10A	8,98	8,32
12	10,12	10,01
13	9,82	9,08
14	10,10	9,33
15A	10,56	10,56
16	13,04	10,26
17	12,53	10,32
18	11,59	11,74
19	10,62	10,93
20	11,15	10,16
22A	12,44	10,71
23	10,37	9,90
24	10,73	9,26
25	11,49	9,15
28	10,38	9,76
29A	10,72	10,14
30	10,93	9,42
32	9,37	10,43
33A	10,70	9,77
34A	8,09	9,44
35	9,53	9,84
36	8,61	9,00
37	8,28	9,29
45	6,75	9,44
<b>Média</b>	<b>9,87</b>	<b>9,59</b>

O valor médio dos recalques indica que, apesar de ter ocorrido uma mudança no padrão de recalques, com acréscimo em alguns pilares e decréscimo em outros, esta solução pode ser ainda otimizada, pois todos os recalques permanecem muito pequenos.

#### 5.4.2. Segunda alternativa em radier estaqueado

Uma segunda configuração em radier estaqueado foi analisada, com as mesmas premissas anteriores, mas agora com apenas 17 estacas, de acordo com a Figura 54. O recalque médio do radier estaqueado obtido foi de 9,31 mm com 42% da carga absorvida pelo radier. Analisando todo o conjunto da fundação (radier estaqueado e estacas fora do radier) os recalques apresentados na Tabela 24 foram encontrados.

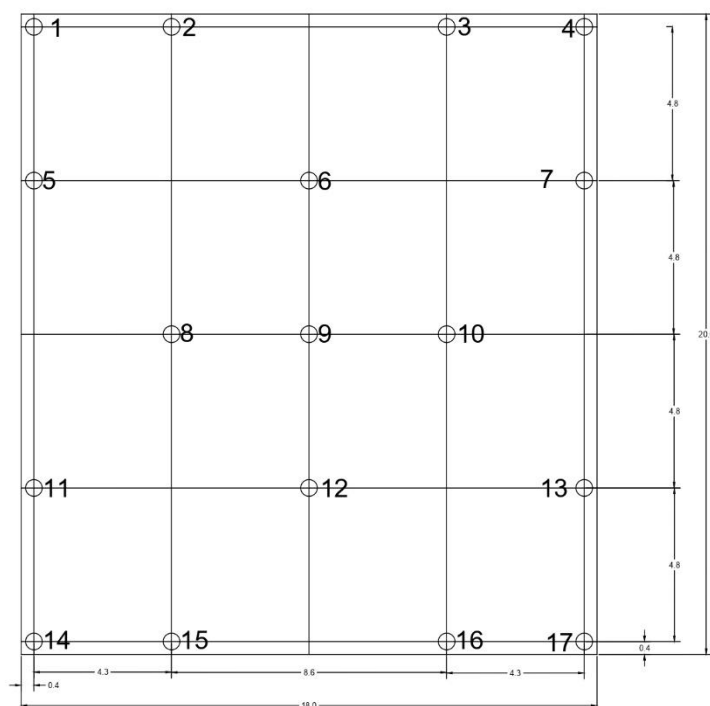


Figura 54. Radier estaqueado com 17 estacas

Tabela 24. Valores de recalque do projeto original comparados à alternativa em radier estaqueado com 25 e 17 estacas (recalques na base dos pilares)

Pilar	Costa (2003)	Autora	Autora
	Projeto Original	Projeto com radier estaqueado 25 $\phi$	Projeto com radier estaqueado 17 $\phi$
	recalque (mm)	recalque (mm)	recalque (mm)
2A	8,04	8,49	9,61
3	8,93	9,40	11,10
4	7,90	8,31	9,75
5A	6,87	8,92	10,63
6	9,35	8,52	11,08
7	9,78	9,09	11,44
8	9,02	8,87	11,23
9	9,15	8,87	10,66
10A	8,98	8,32	10,46
12	10,12	10,01	11,15
13	9,82	9,08	10,24
14	10,10	9,33	11,50
15A	10,56	10,56	11,40
16	13,04	10,26	11,86
17	12,53	10,32	12,78
18	11,59	11,74	13,58
19	10,62	10,93	11,85
20	11,15	10,16	10,83
22A	12,44	10,71	11,75
23	10,37	9,90	12,35
24	10,73	9,26	11,59
25	11,49	9,15	10,18
28	10,38	9,76	11,03
29A	10,72	10,14	10,96
30	10,93	9,42	11,81
32	9,37	10,43	11,42
33A	10,70	9,77	11,30
34A	8,09	9,44	10,34
35	9,53	9,84	9,63
36	8,61	9,00	9,24
37	8,28	9,29	9,01
45	6,75	9,44	8,54
<b>Média</b>	<b>9,87</b>	<b>9,59</b>	<b>10,95</b>

Os valores ainda reduzidos de recalque justificam uma maior redução do número de estacas.

#### 5.4.3. Terceira alternativa em radier estaqueado

Uma terceira configuração, agora com apenas 9 estacas, foi estudada, conforme Figura 55. O recalque médio do radier estaqueado foi de 14,14 mm e a partição de carga para o radier foi de 62%. Entretanto, houve 6 estacas carregadas até cerca de duas vezes a carga usual de projeto, ou seja, com possibilidade de plastificação das estacas. Esta alternativa foi, então, descartada.

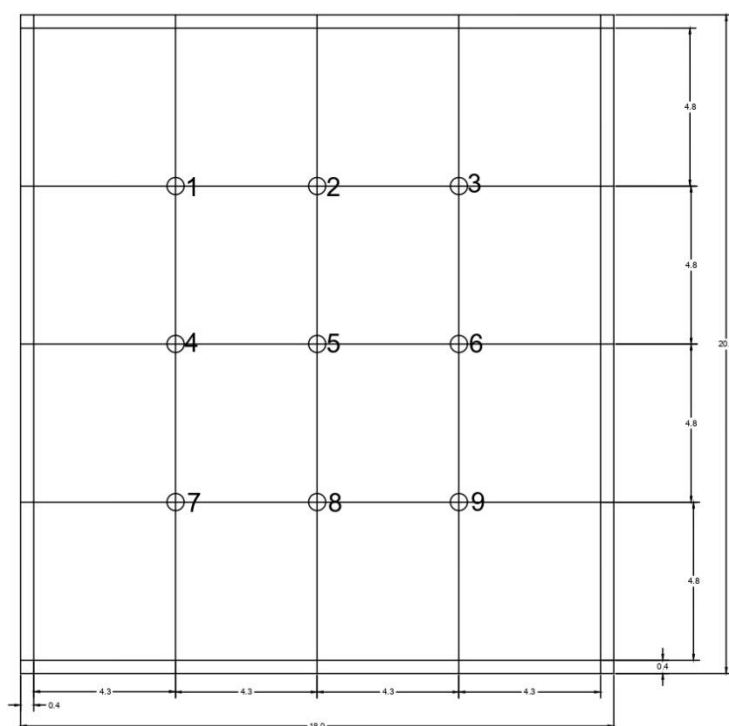


Figura 55. Radier estaqueado com 9 estacas

#### 5.4.4. Quarta alternativa em radier estaqueado

Uma quarta configuração, agora com 13 estacas, também foi analisada com locação das estacas indicada na Figura 56. O recalque médio do radier estaqueado foi de 10,83 mm e a partição de carga para o radier foi de 50%. Entretanto, 3 estacas foram carregadas com carga de cerca do dobro da carga admissível estrutural para este tipo de estaca. Um resumo dos resultados obtidos em cada uma das análises está reunido na Tabela 25.

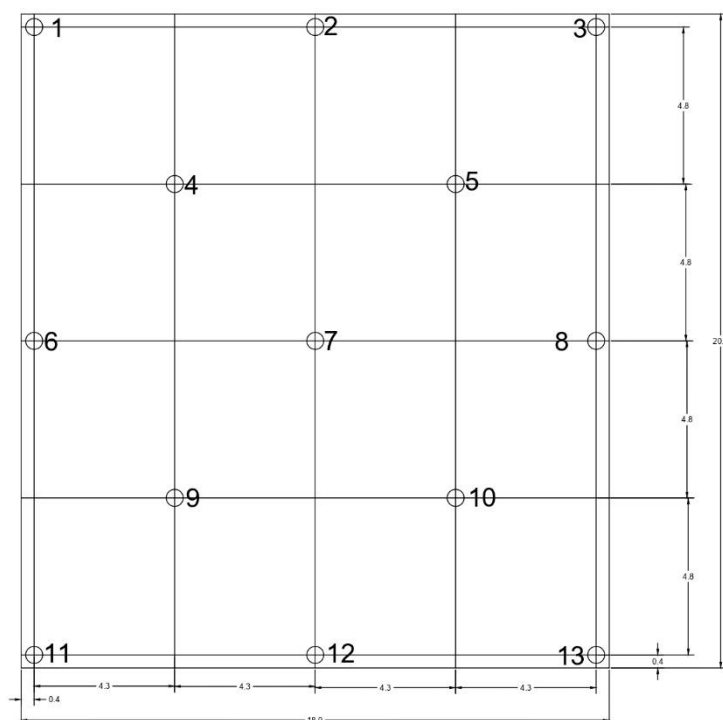


Figura 56. Radier estacado com 13 estacas

Tabela 25. Comparação dos modelos de radier estacado.

Nº estacas	Recalque (mm)	% carga radier	P <sub>media</sub> da estaca
25	7,88	32	1065 kN
17	9,31	42	1167 kN
13	10,83	50	1312 kN
9	14,14	62	1372 kN
0	43,01(médio) 89,66 (máximo)	100	—

Para este caso específico em que  $L/d = 18,6/0,52 = 36$ , a influência do acréscimo do número de estacas na redução do recalque relativo, radier estacado/radier isolado, pode ser melhor observada na Figura 57, e a influência do número de estacas na carga absorvida pelo radier na Figura 58.





Figura 57. Recalque normalizado em função do número de estacas do radier estaqueado.

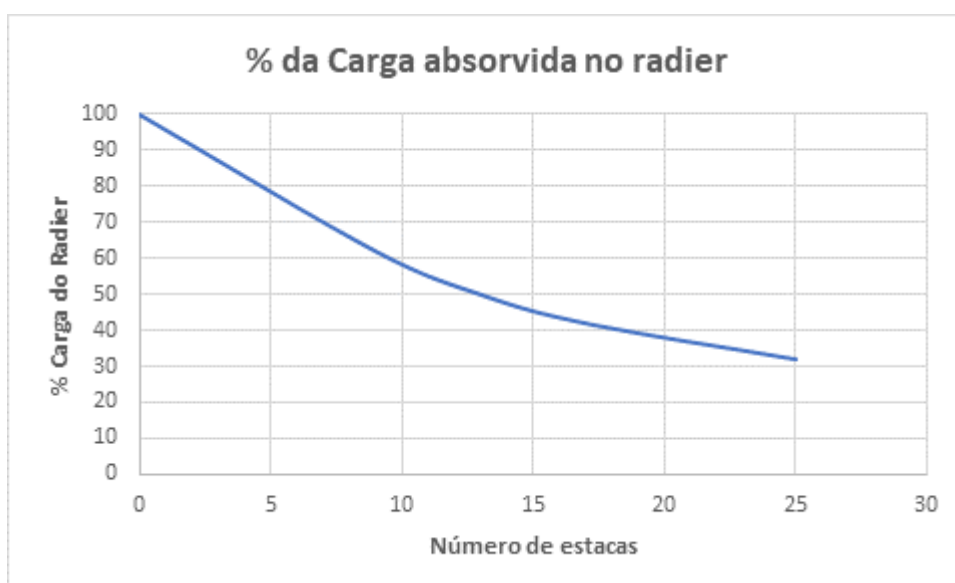


Figura 58. Porcentagem da carga absorvida no radier em função do número de estacas

Quando se interpola o valor de  $L/D$  de 36, deste caso de obra, na Figura 11 de Katzenbach et al. (1998), chega-se a um valor de recalque normalizado pelo recalque do radier sem estacas, inferior ao obtido da Figura 57, para 9 estacas, por exemplo.

Esta verificação é consistente, uma vez que a estaca tipo Franki, com uma base alargada, apresenta uma maior parcela de ponta e, portanto, tendência a recalques maiores do que uma estaca de seção transversal constante, que foi a analisada na Figura 11.

Os valores de carga média nas estacas apresentados na Tabela 25 correspondem à porcentagem da carga total transmitida às estacas, dividida pelo número de estacas. Porém, como o programa permite que se considere a variação espacial do solo, tanto da estratigrafia vertical como na horizontal, a rotina em seu desenvolvimento considera a média dos valores de recalque na cota da base do bloco, suposto como rígido. Mas como cada estaca está mais próxima de uma determinada sondagem em planta, a transferência de carga e a estimativa de seu recalque no topo é diferente para cada uma das estacas. Apesar da rotina estimar, na partição de cargas, a rigidez média de uma estaca equivalente a todas elas, cada uma apresenta uma rigidez diferente, e a carga de cada estaca, individualmente, é diferente pois dependerá do deslocamento no seu topo e de sua rigidez específica. Esta é outra vantagem da rotina: permite contemplar a estratigrafia vertical, a influência da camada rígida, além da estratigrafia horizontal. A Tabela 22 indica bem isso, cada uma das profundidades e parâmetros de cada camada costuma variar ao longo do plano horizontal.

Caso esse mesmo radier não fosse estaqueado, o recalque médio calculado seria da ordem de 43mm e o recalque máximo encontrado 112,60 mm. Ao analisar toda a fundação (radier estaqueado e estacas fora do radier) os recalques apresentados na Tabela 26 foram encontrados.

Tabela 26. Valores de recalque considerando o projeto original, o radier estaqueado com 25 e com 17 estacas e ainda o radier sem estacas.

Pilar	Costa (2003)	Autora	Autora	Autora
	Projeto Original	Projeto com radier estaqueado 25 $\phi$	Projeto com radier estaqueado 17 $\phi$	Projeto com radier sem estacas
	recalque (mm)	recalque (mm)	recalque (mm)	recalque (mm)
2A	8,04	8,49	9,61	8,71
3	8,93	9,40	11,10	28,39
4	7,90	8,31	9,75	27,96
5A	6,87	8,92	10,63	25,44
6	9,35	8,52	11,08	50,90
7	9,78	9,09	11,44	53,46
8	9,02	8,87	11,23	51,75
9	9,15	8,87	10,66	48,54
10A	8,98	8,32	10,46	9,72
12	10,12	10,01	11,15	44,99
13	9,82	9,08	10,24	37,33
14	10,10	9,33	11,50	56,35
15A	10,56	10,56	11,40	10,72
16	13,04	10,26	11,86	55,63
17	12,53	10,32	12,78	65,67
18	11,59	11,74	13,58	63,90
19	10,62	10,93	11,85	57,09
20	11,15	10,16	10,83	39,19
22A	12,44	10,71	11,75	51,58
23	10,37	9,90	12,35	61,61
24	10,73	9,26	11,59	112,60
25	11,49	9,15	10,18	76,63
28	10,38	9,76	11,03	76,42
29A	10,72	10,14	10,96	10,99
30	10,93	9,42	11,81	54,29
32	9,37	10,43	11,42	89,66
33A	10,70	9,77	11,30	35,72
34A	8,09	9,44	10,34	9,09
35	9,53	9,84	9,63	9,89
36	8,61	9,00	9,24	9,50
37	8,28	9,29	9,01	8,79
45	6,75	9,44	8,54	41,55
<b>Média</b>	<b>9,87</b>	<b>9,59</b>	<b>10,95</b>	<b>43,25</b>

Utilizando o programa Surfer, várias curvas de iso-recalques, considerando todas as alternativas de fundação para a edificação, foram produzidas como: recalques obtidos por Costa (2003), recalques obtidos considerando apenas o radier sem estacas, recalques obtidos considerando o radier estaqueado com 25 estacas e ainda recalques obtidos considerando apenas 17 estacas. As curvas são apresentadas nas Figuras 59 e 60.

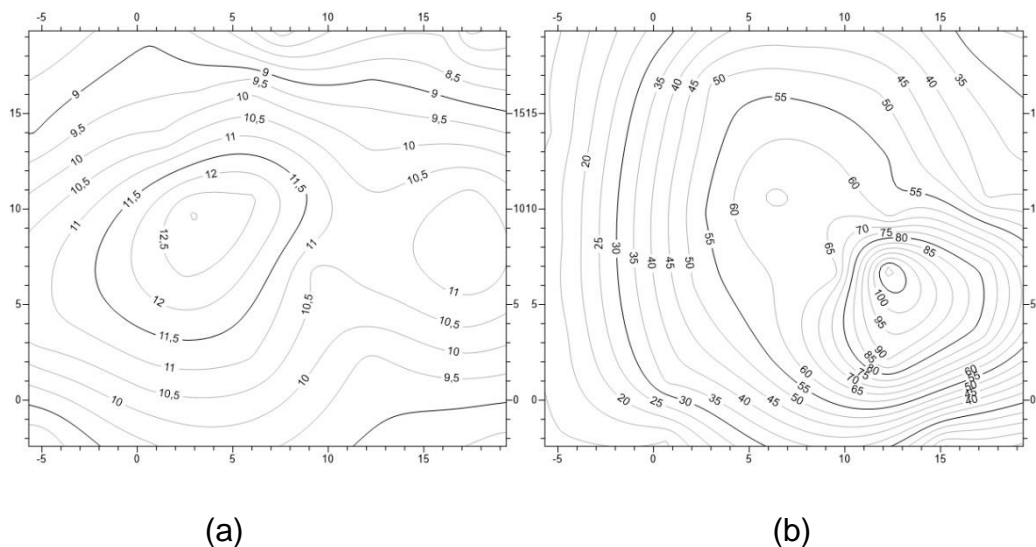


Figura 59. Curvas de iso-recalques, em mm, considerando recalques obtidos por Costa (2003) em (a) e pela autora considerando o radier sem estacas em (b).

Observa-se que, o radier sem estacas, em conjunto com os grupos de estacas periféricas, resulta num recalque máximo de 113 mm, ou 11 cm, próximo ao pilar P24.

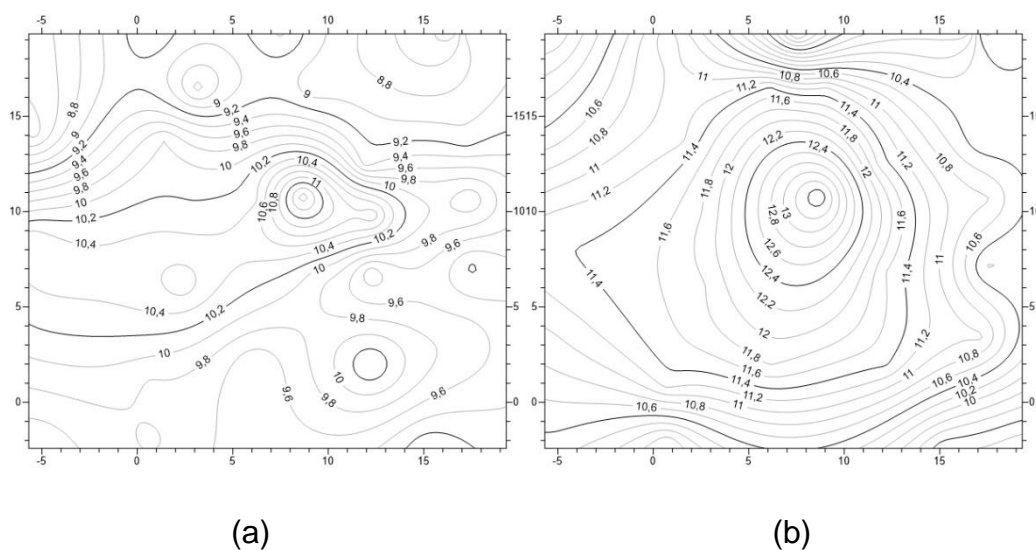


Figura 60. Curvas de iso-recalques, em mm, considerando recalques do radier estaqueado com 25 estacas (a) e com 17 estacas (b).

Analisando todos os modelos procedeu-se a escolha do modelo de radier estaqueado com 17 estacas para análise da interação solo estrutura. Este modelo resultou em recalques ainda pequenos, com um espaçamento entre estacas de no

máximo de 9,6m. Haveria de ser verificado também o custo do bloco, que com 60 cm de espessura, irá aumentar o consumo de armadura para o menor número de estacas, com maior espaçamento. Esta altura do bloco é muito pequena para um espaçamento de até 9,6m entre estacas. Mas esta questão, de natureza estrutural, não está sendo abordada nesta pesquisa. A preocupação da pesquisa é com o recalque médio e a partição de cargas, que a literatura indica não ser função da espessura do radier.

### **5.5. Interação da fundação em radier estaqueado com a estrutura**

Para a implementação da interação solo estrutura, as molas características da fundação para a opção de 17 estacas, sob cada pilar, foram calculadas como sendo a carga do pilar dividida pelos recalques encontrados anteriormente pelo programa Aoki Lopes (1975) da Figura 60b, na localização de cada um dos pilares da estrutura. Esta figura contempla a bacia de recalques prevista para o conjunto de fundações, sem contemplar a interação com a estrutura. Com estes apoios elásticos a estrutura foi analisada e novas cargas obtidas nos pilares. A tendência da interação é a redistribuição de cargas, aumentando aquelas dos apoios mais rígidos e reduzindo às dos apoios que mais recalcam.

Após a primeira análise, foi realizada uma segunda iteração, ou seja, com a redistribuição de cargas resultante da interação solo x estrutura, os recalques foram estimados novamente para o conjunto de fundações da obra, ou seja, foram atualizados, para estas novas cargas, através de nova execução do programa Aoki-Lopes (1975). Para estas novas cargas e recalques atualizados, novos coeficientes de rigidez dos apoios dos pilares foram determinados, numa análise sucessiva (segunda iteração). Para estas duas iterações sucessivas, os resultados das cargas são resumidos na Tabela 27 e dos recalques na Tabela 28. Seguem as explicações:

Tabela 27. Cargas para: coluna 2, apoios rígidos, Costa (2003); coluna 3, obtida pela autora em sua primeira iteração; coluna 4, obtida pela autora em sua segunda iteração

Pilar	Cargas Costa(2003)	Cargas Autora 1ª Interação	Cargas Autora 2ª Interação
2A	700	687	692
3	1099	1067	1041
4	775	772	777
5A	1438	1276	1176
6	733	725	713
7	1007	981	986
8	711	667	678
9	891	889	896
10A	1434	1381	1382
12	1918	1904	1891
13	1972	2084	2067
14	1440	1406	1402
15A	1944	1949	1935
16	1518	1732	1722
17	1237	1293	1291
18	596	565	578
19	652	643	654
20	991	1080	1082
22A	2190	2400	2376
23	1910	1764	1753
24	1348	1356	1354
25	1000	1169	1170
28	2024	2018	2013
29A	996	1046	1050
30	1464	1456	1451
32	1445	1316	1323
33A	1711	1699	1703
34A	798	755	705
35	831	872	879
36	828	858	856
37	996	1001	1007
45	361	337	355
<b>Média</b>	<b>1217</b>	<b>1223</b>	<b>1218</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>484,30</b>	<b>501,64</b>	<b>495,90</b>
<b>Coef.Variação</b>	<b>0,398</b>	<b>0,410</b>	<b>0,407</b>

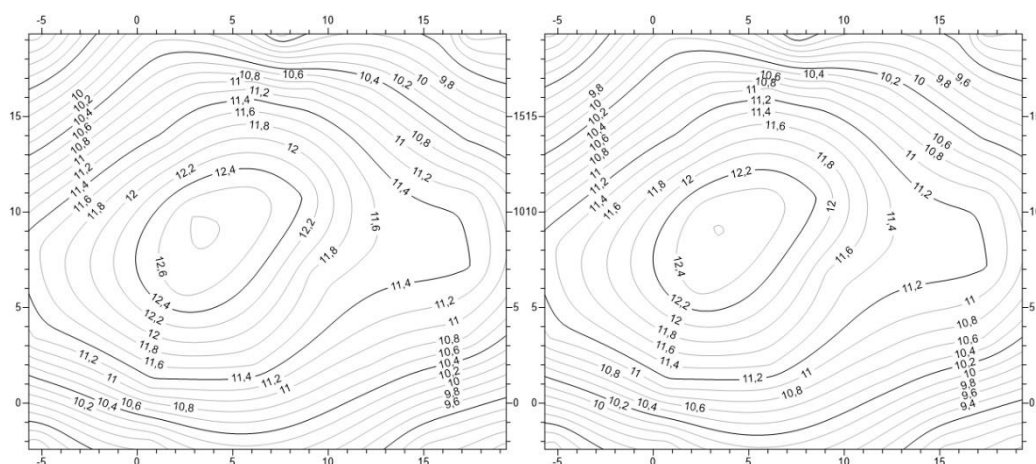
Na Tabela 27, os resultados das análises das colunas 3 e 4, da autora, contemplam a interação solo x estrutura.

Tabela 28. Recalques encontrados pela autora para o radier estaqueado para as cargas de Costa (2003) em apoios indeslocáveis, coluna 2. Recalques estimados atualizados após primeira redistribuição das cargas (primeira iteração) da interação solo x estrutura, coluna 4.

Pilar	Recalques Autora sem interação (mm)	Recalques Autora 1ª Interação (mm)	Recalques Autora 2ª Interação (mm)
2A	9,61	8,50	8,35
3	11,10	10,10	9,93
4	9,75	9,20	9,04
5A	10,63	8,70	8,55
6	11,08	11,10	10,91
7	11,44	11,20	11,01
8	11,23	11,00	10,81
9	10,66	10,60	10,42
10A	10,46	10,10	9,93
12	11,15	11,50	11,30
13	10,24	10,40	10,22
14	11,50	11,50	11,30
15A	11,40	11,50	11,30
16	11,86	12,80	12,58
17	12,78	12,70	12,48
18	13,58	12,40	12,19
19	11,85	11,60	11,40
20	10,83	11,30	11,11
22A	11,75	12,70	12,48
23	12,35	11,70	11,50
24	11,59	11,50	11,30
25	10,18	11,40	11,20
28	11,03	10,80	10,61
29A	10,96	11,20	11,01
30	11,81	11,60	11,40
32	11,42	10,80	10,61
33A	11,30	11,30	11,11
34A	10,34	8,90	8,75
35	9,63	9,70	9,53
36	9,24	8,90	8,75
37	9,01	8,50	8,35
45	8,54	9,10	8,94
<b>Média</b>	<b>10,95</b>	<b>10,76</b>	<b>10,57</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>1,28</b>	<b>1,24</b>	<b>1,22</b>
<b>Coef. Variação</b>	<b>0,117</b>	<b>0,115</b>	<b>0,105</b>

Observa-se que a cada análise, colunas 2, 3 e 4, os recalques se uniformizam, com tendência de coeficiente de variação decrescente, a cada nova análise. A média de recalques se mantém, entre 10 a 11 mm.

As curvas de iso-recalques são apresentadas na Figura 61, para a primeira e segunda iteração, ambas contemplando a interação solo x estrutura.



(a)

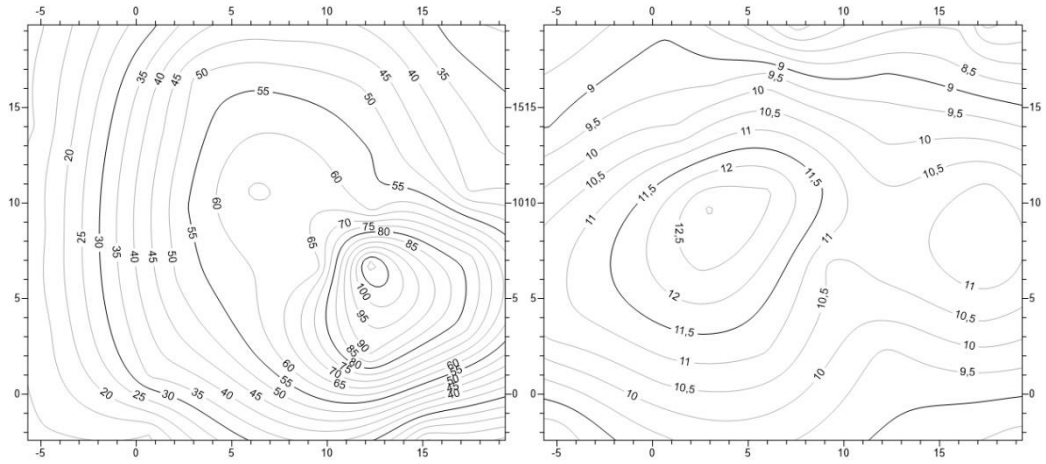
(b)

Figura 61. Curvas de iso-recalques considerando recalques (em mm) do radier estaqueado com 17 estacas, na primeira iteração (a) e na segunda iteração (b).

Ao observar a Figura 61, conclui-se não ser mais necessária uma próxima análise, uma vez que as curvas (a) e (b) da figura são muito próximas, apresentando um mesmo padrão de comportamento.

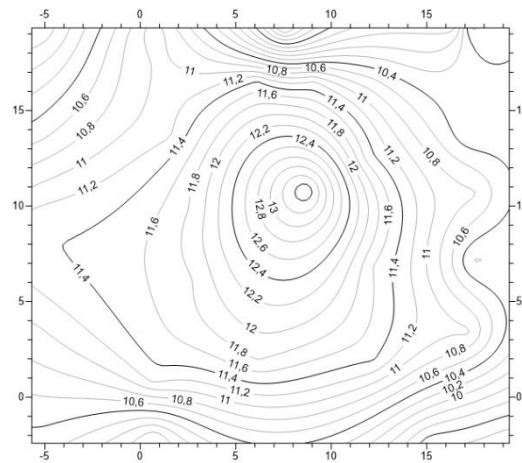
Incluindo, finalmente, na Figura 62, em a) a fundação apenas em radier, em b) apenas em grupos de estacas (solução executada, análise Costa (2003)), em c) radier estaqueado com 17 estacas, em d) radier estaqueado com 17 estacas com interação solo estrutura, primeira iteração e e) radier estaqueado com 17 estacas com interação solo estrutura, segunda iteração, conclui-se:





(a)

(b)



(c)

(d)

(e)

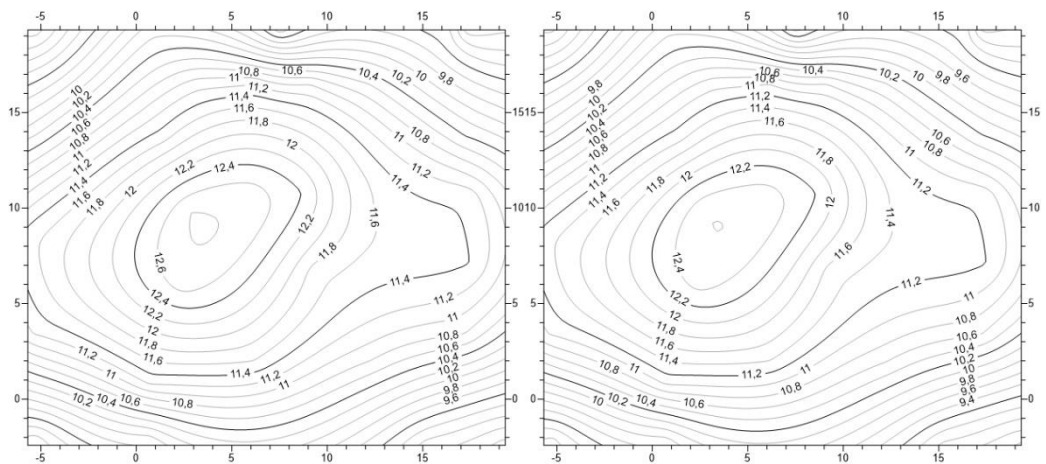


Figura 62. Comparação entre as análises de (a) a (e), recalques em mm.

A análise com radier no centro da edificação sem adição de estacas, caso a), resulta em recalque de 10cm, acima do tolerável. As curvas de iso-recalques com diferenças de 5mm num trecho muito curto em planta, sinaliza trechos de maiores distorções. A solução (b) executada em grupos de estacas, com 56 estacas, apresenta um recalque máximo, contemplando a interação solo x estrutura, de 13 mm. Ao otimizar o projeto para 17 estacas, contemplando a interação solo x estrutura, análise (e), o maior recalque foi da ordem de 12,6 mm, ou seja, solução praticamente idêntica, e com padrão de comportamento muito semelhante. Pode-se concluir, como destacado na literatura, que a partir de um certo número de estacas, não há um efeito mensurável da redução de recalque com o acréscimo do número de estacas. A Figura 11 do capítulo da pesquisa bibliográfica e a Figura 57 ilustram esta conclusão.

A diferença entre a solução (c) e (e), com o radier estaqueado de 17 estacas sem e com interação, resulta num recalque máximo de 13,6 mm contra 12,6 mm, que embora também sejam resultados praticamente idênticos, são diferenças ainda maiores do que o resultado de Costa (2003) com 56 estacas e a solução de 17 estacas da autora, em radier estaqueado, ambos com interação. A conclusão que se chega é que os projetos correntes de grupos de estacas apresentam possibilidade de otimização e redução de custos, para alternativas em radier estaqueado. Ainda, a análise com interação solo x estrutura, caminha no sentido de possibilitar uma economia ainda maior no custo das fundações.

Finalmente, ao comparar o comportamento do recalque do radier isolado, com 17 estacas, do comportamento do mesmo radier em conjunto com os demais pilares da obra, sem interação e com interação solo x estrutura, chega-se na Tabela 29, para este caso específico. Muito mais relevante do que a interação solo x estrutura, na avaliação do recalque deste caso de obra, é a influência da interação entre fundações de uma mesma obra. Neste caso, como os recalques já eram pequenos, o efeito da interação solo estrutura foi muito pequeno.

Tabela 29. Comparação das estimativas de recalque em mm.

Nº estacas	Apenas radier estaqueado (mm)	Radier interagindo com grupo de estacas periféricas	Radier interagindo com grupo de estacas periféricas e com a interação com a estrutura
17	9,31	13,6	12,6

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

A rotina proposta pela autora foi desenvolvida visando seu emprego em radier estaqueado na filosofia projeto com enfoque de grupo de estacas reforçado pelo radier. Esta rotina tem a vantagem de poder ser aplicada a casos de perfis estratificados e leva em consideração à posição da fronteira considerada como rígida, ou seja, aquela abaixo da qual os recalques são desprezíveis. É possível contemplar também a variação da estratigrafia no plano horizontal.

Quanto à calibração da rotina concebida nesta tese com casos instrumentados ou casos contemplados com análise numérica refinada, observou-se na pesquisa que:

- i) A partição de cargas entre o radier e as estacas foi muito próxima àquela obtida dos casos instrumentados.
- ii) A partição de cargas também foi muito próxima quando comparada àquela obtida por métodos numéricos refinados, de acesso não disponível aos projetistas no dia a dia de sua prática profissional.
- iii) A estimativa de recalques do radier estaqueado obtido pela proposta é tão acurada quanto a de propostas envolvendo análises pelo MEF mais refinadas. Em vários casos calibrados, a estimativa dos recalques pela rotina da autora se aproximou mais dos recalques medidos do que outras propostas da literatura.
- iv) Confirmou-se o que foi documentado na literatura, ou seja, a partição de cargas e os recalques médios do radier estaqueado não apresentam diferenças significativas quando se considera a placa rígida ou a placa flexível.

Em relação à aplicação em reprojatos de estudos de caso, iniciando-se pela obra originalmente em fundações diretas, cabe concluir que:

- v) Na reprodução das análises de Rosa (2005), apesar da autora utilizar um método para estimativa do recalque mais acurado do que a solução de empregada por Rosa (2005), quando se incluiu a interação solo x estrutura o padrão de recalque foi muito similar. Esta é uma indicação da grande relevância da interação solo x estrutura na uniformização do recalque.

- vi) Apesar da simplicidade do modelo de Kelvin empregado, as alternativas de reprojetado com a inclusão inicialmente de 14 estacas, na primeira solução, e de 26 estacas, na segunda solução, puderam quantificar a redução do recalque no trecho em radier estaqueado e a melhoria do desempenho que a construção teria experimentado com o acréscimo de algumas estacas, mesmo curtas. A redução da distorção observada no reprojetado, com o acréscimo de 26 estacas curtas, já seria significativa e suficiente ao bom desempenho das fundações.
- vii) Embora a literatura recomende o emprego de um número reduzido de estacas longas, ao invés de um maior número de estacas curtas, neste caso de obra o emprego de estacas longas não seria uma solução indicada. O acréscimo de estacas longas só seria justificável se esta solução fosse estendida às sapatas de todas as linhas. A solução desejada não objetivou a redução dos recalques a níveis reduzidos, mas a melhoria de comportamento, a níveis desejados. Daí a opção pelo emprego de estacas curtas.

Para a obra no Recreio dos Bandeirantes, com o modelo do solo já aferido inicialmente por Costa (2003) com base na instrumentação por ele acompanhada, pode-se concluir:

- viii) Foram inicialmente desenvolvidas 4 soluções de redução do número de estacas como alternativas ao grupo de estacas. Observou-se que a solução original, de grupo de estacas, com 56 estacas, apresentou um recalque semelhante à solução de 25 estacas em radier estaqueado, sinalizando que há um número limite acima do qual o grupo de estacas não apresenta vantagem de redução de recalques em relação a um radier estaqueado, mesmo com uma redução expressiva no número de estacas. Isso mostra um espaço muito extenso para a otimização de projetos correntes.
- ix) Observou-se que um radier sem estacas apresentou um recalque, quando se considerou o radier sem a interação com os pilares periféricos, de cerca de 41 mm, reduzindo para 14 mm, com 9 estacas, 11 mm, com 13 estacas, 9 mm com 17 estacas e 7,9 mm com 25 estacas. Naturalmente que a

porcentagem de carga no radier diminui com o acréscimo do número de estacas, variando de 100%, 62%, 50%, 42% e 32%, respectivamente.

- x) Quando se interpola o valor de  $L/D$  de 36, deste caso de obra, na Figura 11 de O'Brien et al, chega-se a um valor de recalque normalizado pelo recalque do radier sem estacas, inferior ao obtido da Figura 57, para 9 estacas, por exemplo. Esta verificação é consistente, uma vez que a estaca tipo Franki, com uma base alargada, apresenta uma maior parcela de ponta e, portanto, tendência a recalques maiores do que uma estaca de seção transversal constante, que foi a analisada na Figura 11.
- xi) A análise com radier no centro da edificação sem adição de estacas, caso a), resulta em recalque de 10cm no grupo, acima do tolerável. A solução executada em grupos de estacas, com 56 estacas, apresenta um recalque máximo, contemplando a interação solo x estrutura, de 13 mm. Ao otimizar o projeto para 17 estacas, contemplando a interação solo x estrutura, análise, o maior recalque foi da ordem de 12,6 mm, ou seja, solução praticamente idêntica, e com padrão de comportamento muito semelhante. Pode-se concluir, como destacado na literatura, que a partir de um certo número de estacas, não há um efeito mensurável da redução de recalque com o acréscimo do número de estacas.
- xii) Além dos projetos correntes de grupos de estacas apresentarem bastante espaço para otimização e redução de custos, para alternativas em radier estaqueado, a análise com interação solo x estrutura caminha no sentido de possibilitar uma economia ainda maior no custo das fundações.
- xiii) No estudo deste segundo caso de obra observou-se que muito mais relevante do que a interação solo x estrutura, na avaliação do recalque deste caso de obra, é a influência da interação entre fundações de uma mesma obra, ou seja, o efeito do grupo.
- xiv) Finalmente, conclui-se que o projeto de um radier estaqueado deve contemplar a influência de todo o grupo de estacas periféricas nas fundações dos pilares fora da torre central da obra, além do efeito da interação solo x estrutura. Para o segundo caso de obra observou-se que o acréscimo da influência dos grupos de estacas periféricos teve um efeito no acréscimo de recalques do conjunto superior ao efeito da interação solo x estrutura na redução dos recalques.

- xv) Observou-se que a ferramenta desenvolvida nesta pesquisa é simples, fácil de ser empregada, possibilitando levar em consideração as condições de contorno reais de variação na estratigrafia do solo na direção vertical e horizontal e a influência da condição de fronteira rígida. Nos dois casos de obra analisados, seu emprego foi capaz de: melhorar o desempenho do primeiro caso, pela adição de algumas estacas a um projeto de fundações rasas e otimizar as fundações do segundo caso, pela retirada de parte das estacas adotadas no projeto original.

Como sugestões para pesquisas futuras:

- i) Analisar o primeiro caso de obra pelo MEF considerando um modelo constitutivo incorporando a plasticidade do solo.
- ii) Analisar o primeiro caso de obra com diferentes alternativas de solução em radier estaqueado, incluindo estacas apenas na linha B, apenas nas linhas B e C, e distribuindo as estacas nas 3 linhas, B, C e D, variando o número total de estacas.
- iii) Analisar o primeiro caso de obra com emprego de estacas longas, distribuídas ao longo de todas as sapatas.
- iv) Verificar a influência da transferência de carga das estacas no grupo, diferente da transferência de carga da estaca isolada, e seu efeito na estimativa do deslocamento elástico do fuste.
- v) Incluir a influência das cargas aprisionadas na estaca antes do carregamento, como cargas residuais ou atrito negativo atuantes entre a instalação e o carregamento. Estas cargas aprisionadas alteram a transferência de carga das estacas isoladas e também das estacas em grupo.

## REFERÊNCIAS

ALNUAIM, A. M., et al. Performance of micropiled raft in clay subjected to vertical concentrated load: Centrifuge modeling. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6122/2022: Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16903/2020: Estacas – Prova de carga estática – Métodos de ensaio*. Rio de Janeiro, 2006.

AOKI, N.; LOPES, F. R. Estimating stresses and settlements due to deep foundations by the theory of elasticity. In: PAN AMERICAN CSMFE, 5., 1975, Buenos Aires. Proceeding [S.l.], 1975. v. 1, p. 377-386.

BARATA, F.E. Ensaio de Placa para Fixação de Taxa Admissível de Fundações Diretas. In: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 1966, Belo Horizonte, MG, Brasil, 1966.

BARATA, F.E.; DANZIGER, B.R., Compressibilidade de Argilas Marinhas Moles Brasileiras, Anais do VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Porto Alegre. 14p.,1986

BARATA, F.E., DANZIGER, B.R.; PAIVA, R.F., Compressibilidade de Argilas Sedimentares Moles Brasileiras – Ampliação de Banco de Dados e Extensão da Análise, Anais do XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, v. 1, pp. 272-280, São Paulo, 2002

BERNARDES, H. C. Análise do comportamento de um radier estaqueado com base em instrumentação de fundações e pilares. Tese de DSc, UNB, 2023.

BERNARDES, H. et al. Analysis of the Geotechnical Behavior of a Piled Raft in Tropical Lateritic Soil Based on Long-Term Monitoring of Columns, Piles, and Raft Soil Interface. *Canadian Geotechnical Journal*, 2023.



BHARTIYA, P. et al. Settlement Estimation of Piled Rafts for Initial Design. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE, 2019.

BHARTIYA, P. et al. Erratum for Settlement Estimation of Piled Rafts for Initial Design by Priyanka Bhartiya, Tanusree Chakraborty, and Dipanjan Basu. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE, 2020.

BJERRUM, L. Allowable settlement of structures, Proceedings European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesbaden, Germany, Vol. III, 1963

BRIAUD, J.; TUCKER, L.; NG, E. Axially loaded 5 pile group and single pile in sand. In: Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Vol. 2, pp. 1121-1124). Rotterdam: Balkema, 1989.

BURLAND, J. B.; BROMS, B.; DE MELLO, V. F. B. Behaviour of foundations and structures. In Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, vol. 1, pp. 495–548, 1977.

BURLAND, J. B. Invited special lecture: Piles as settlement reducers. In Proceedings of the 19th National Conference on Geotechnics, Associazione Geotecnica Italiana, Pavia, pp. 21–34, 1995.

BUTTERFIELD, R.; DOUGLAS, R.A. Flexibility coefficients for the design of piles and pile groups. CIRIA: Technical Note 108, London, CIRIA, 1981.

CABRAL, V.E. *Contribuição à Confiabilidade de Estacas Cravadas através de um Estudo de Caso com Aplicação da Teoria Bayesiana*. 2008. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

CASTELO, R.R.; POLIDO, U.F. Tentativa de Sistematização Geotécnica dos Solos Quaternários de Vitória, ES”, Anais do Simpósio sobre Depósitos Quaternários das Baixadas Litorâneas Brasileiras: Origem, Características Geotécnicas e Experimentos de Obras, Vol. 2, pp 3.1 – 3.23, Vitória, 1988.

CLANCY, P.; RANDOLPH, M.F. Analysis and design of piled raft Foundations. Accepted for publication in *Int. J. Num. & Anal. Methods in Geomechanics*, 1993.

COMODROMOS, E. M. et al. Contribution to the design methodologies of piled raft foundations under combined loadings. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016.

COOKE, R.W. Influence of residual installation forces on the stress transfer and settlement under working loads of jacked and bored piles in cohesive soils. In *Symposium on Behavior of Deep Foundation (Publication STP 670, pp. 231-249)*. West Conshohocken: ASTM, 1979.

CORDEIRO, A.F.B. *Modelagem Física de Radiers Estaqueados com e sem Estacas Defeituosas Assentes em Areia*. 2017.188f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

COSTA, R. V. *Interação solo-estrutura estudo de casos de obra envolvendo monitoramento dos recalques desde o início da construção*. 2003. 247 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2003.

DANZIGER, F.A.B., 2002, “Parecer Geotécnico sobre os Problemas Verificados no Edifício de Vitória, ES”, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 22p.

DANZIGER, B. R.; LOPES, F. R., *Fundações em estacas*, Rio de Janeiro: *Elsevier*, 2018.

DÉCOURT, L. The standard penetration test. State-of-the-art-report. Proceedings of the XIIIICSMFE, Rio de Janeiro, v. 4, p. 2405-2416, 1989.

DÉCOURT, L. Prediction of Load-Settlement Relationships for Foundations on the Basis of the SPT- T. *Ciclo de Conferencias Internacionales*, Leonardo Zeevaert, UNAM, Mexico, 1995.

DE SANCTIS, L.; RUSSO, G. Analysis and Performance of Piled Rafts Designed Using Innovative Criteria. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* - J GEOTECH GEOENVIRON ENG. 2008.

DE SANCTIS, L. et al. Some remarks on the optimum design of piled raft. In: Proceedings of the International Deep Foundations Congress (pp. 405-425), Orlando. Reston: ASCE, 2002

EC7 - Eurocode 7: Geotechnics. Preliminary draft for the European Communities, Geotechnik, 1990.

EL-GARHY, B. et al. Behavior of raft on settlement reducing piles: Experimental model study. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 5, pp. 389-399, 2013.

FLEMING, W.G.K., WELTMAN, A.J., RANDOLPH, M.F. and ELSON, W.K. *Piling Engineering* (2nd Edition), Surrey University Press, 1992.

FREITAS, A.P.S. *Comportamento de radiers estaqueados como fundações de aerogeradores de energia eólica*. 2018. 258f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

GARCIA, J. R. *Análise Experimental e Numérica de Radiers Estaqueados Executados em Solo da Região de Campinas/SP*. 2015. 359f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

GARCIA, J. R.; ALBUQUERQUE, P. J. R. DE. Analysis of the contribution of the block-soil contact in piled foundations. *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 16, n. 6, p. 1 – 22, 2019.

GUSMÃO, A.D., Aspectos Relevantes da Interação Solo-Estrutura em Edificações, Solos e Rochas, 17, n. 1 (abril), pp. 47-55, São Paulo, 1994.

HORIKOSHI, K.; RANDOLPH, M.F. A Contribution to Optimal Design of Piled Rafts. *Geotechnique* Vol. 48, No. 3, pp. 301-317, 1988.

IWAMOTO, R. K. *Alguns aspectos dos efeitos da interação solo-estrutura em edifícios de múltiplos andares com fundação profunda*. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

KATZENBACH, R.; ARSLAN, U.; MOORMAN, C. and REUL, O. Pile draft foundation: Interaction between piles and raft. *Darmstadt Geotechnics* (Darmstadt University of Technology), no. 4, pp. 279–296, 1998.

LAMBE, T. W. Predictions in soil engineering. *Geotechnique*, v.23, n.2, p 149-202, 1973.

LEE, J.; PARK, D.; PARK, K. Estimation of load-sharing ratios for piled rafts in sands that includes interaction effects. *Computers and Geotechnics*, 63, 306-314, 2015.

MANDOLINI, A. Design of piled rafts foundations: Practice and development. Proc., Geotech. Int. Seminar Deep Foundation on Bored and Auger Piles, BAP IV, Van Impe and Haegeman, eds., 59– 80, 2003

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

MASSAD, F. Método Gráfico para o Acompanhamento da Evolução dos Recalques com o Tempo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 7. Anais. v. II, p. 321-331. Recife, 1982.

MAYNE, P.W.; POULOS, H.G. Approximate displacement influence factors for elastic shallow foundations. *Journal of Geotechnical & Geo Environmental Engineering* 125 (6), 453-460, 1999.

MEIGH, A.C. The Triassic rocks, with particular reference to predicted and observed performance of some major foundations. *Geotechnique*, Vol. 26, No.3, 1976.

MINDLIN, R. D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid. *Physics*, 7, p. 195-202, 1936.

NEWMARK, N. M. Simplified computation of vertical pressures in elastic foundations. University of Illinois: Engineering Experiment Station. Circular 24, v. 33, n 4, 1935.

NGUYEN C. et al. Settlement of piled rafts with different pile arrangement schemes via centrifuge tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(10), 1690-1698, 2013

O'BRIEN et al., ICE Manual of Geotechnical Engineering, BGA, V.2, Chapter 56: Rafts and piled rafts, p.853-886, 2012

POULOS, H. G. Piled raft foundations: design and applications. *Geotechnique*, v.51, n.2, p.95-113, 2001.

POULOS, H.G.; DAVIS, E.H. Pile foundation analysis and design. New York: John Willey & Sons, 1980.

POULOS, H. G.; SMALL, J. C.; TA, L. D.; SINHA, J.; CHEN, L. Comparison of some methods for analysis of piled rafts. Proc., 14<sup>th</sup> Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1119—1124, 1997.

RANDOLPH, M.F. A Theoretical Study of the Performance of Piles. Ph.D. thesis, University of Cambridge, 1977.

RANDOLPH, M.F. Design of piled raft foundations. Proc. Int. Symp. on Recent Developments in Laboratory and Field Tests and Analysis of Geotechnical Problems, Bangkok: 525-537, 1983.

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

RANDOLPH, M.F.; WROTH, C.P. Analysis of deformation of vertically loaded piles. J. Geot. Eng. Div, ASCE 104(12): 1465-1488, 1978.

RANDOLPH, M.F.; WROTH, C.P. An analysis of the vertical deformation of pile groups. Geotechnique 29: 423-439, 1979.

RANDOLPH, M.F.; CLANCY, P. Efficient design of piled rafts. Proc. of 2nd Int. Geot. Sem. on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent, 119-130, 1993.

REIS, J. H. C.; AOKI, N., Análise de interação solo-estrutura em maciço de argila mole, Seminário de Interação Estrutura-Solo em Edifícios, São Carlos, SP.14 p, 2000.

ROSA, L.M.P. *Interação solo estrutura – análise de um caso de obra envolvendo danos estruturais*. 2005. 121f. Dissertação de M.Sc., Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2005.

RUSSO, G. (1998). Numerical analysis of piled rafts. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 22, pp. 477-493.

SALES, M. M.; SMALL, J. C.; POULOS, H. G. Compensated piled rafts in clayey soils: behavior, measurements, and predictions. *Canadian Geotechnical Journal*, 47, 327–345, 2010.

SOARES, W.C. *Radier Estaqueado com Estacas Hollow Auger em Solo Arenoso*. 2011. 296f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

SOARES, W. C.; COUTINHO, R. Q.; CUNHA, R. P. Piled raft with hollow auger piles founded in a Brazilian granular deposit. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014

Vol.52(8), pp.1005-1022, 2015.

SOARES, W. C.; COUTINHO, R. Q.; CUNHA, R. P. Behaviour of instrumented hollow auger pile groups in sandy soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, p. 1-20. 2021.

STEINBRENNER, W. Tafeln sur Setzungsberechnung. *Die Strasse*, v.1, p.121, 1934.

TERZAGHI, K.; FRÖHLICH, O.K., *Theorie der Setzung von Tonschichten*, Vienna, Deuticke, 1936.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. *Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas*. Oficina De Textos. São Paulo, 568 p., 2010.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. *Fundações Volume 1: Critérios de Projeto – Investigação do subsolo – Fundações superficiais*. 2 ed, Oficina de textos, São Paulo, 2014

VESIC, A. S. *Design of Pile Foundations*, National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Practice No. 42, Transportation Research Board, Washington,DC, 68 pp, 1977.

VIGGIANI, C. Pile groups and piled rafts behaviour. In *DeepFoundations on Bored and Auger Piles* (eds van Impe, W. F. andHaegman, W.). Rotterdam: Balkema, pp. 77–90, 1998.

VITOR A.K.; DANZIGER R.B. Discussion of Settlement Estimation of Piled Rafts for Initial Design by Priyanka Bhartiya, Tanusree Chakraborty, and Dipanjan Basu, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE, 2021.

YAMASHITA, K.; YAMADA, T.; HAMADA, J. Investigation of settlement and load sharing on piled rafts by monitoring full-scale structures. *Soils and Foundations* - Tokyo - 2011.

## APÊNDICE A – Aplicação de Bhartiya et al (2020).

Cálculos da aplicação proposta por Bhartiya (2020) com a correção da expressão de  $K_{rs}$ , conforme Figuras 63 e 64.

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled 'ErrataKrs-Bhartiya (1) - Excel'. The formula bar shows the formula for cell E16:  $1,73^{*cs} \log(Lr/Tr)^{*0,5} (1-nis2)/(1-nr2) 1-(Tr/Br)^3 e-30(Es/Er) krs$ . The spreadsheet contains the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	cs	0,865									
2	Lr	83									
3	Br	46,5									
4	Tr	1									
5	nis	0,3									
6	nir	0,2									
7	Es	40000									
8	Er	30000000									
10	$1,73^{*cs} \log(Lr/Tr)^{*0,5} (1-nis2)/(1-nr2) 1-(Tr/Br)^3 e-30(Es/Er) krs$										
11		1,496	1,385	0,948	1,000	0,961	1,888	VALOR CONFERE COM A ERRATA			
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											
23											

Below the main calculation, there is a table for  $Tr$  (m) and  $k_c$  values:

$Tr$ (m)	$k_c$
0,1	2,329
0,5	2,031
1	1,888
1,5	1,799
5	1,504
10	1,294

Figura 63. Cálculo da rigidez do radier,  $K_{rs}$ , sendo este retangular

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled 'ErrataKrs-Bhartiya (1) - Excel'. The formula bar shows the formula for cell G19:  $1,73^{*cs} \log(Lr/Tr)^{*0,5} (1-nis2)/(1-nr2) 1-(Tr/Br)^3 e-30(Es/Er) krs$ . The spreadsheet contains the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	cs	0,85									
2	Lr	8,74									
3	Br	8,74									
4	Tr	0,5									
5	nis	0,3									
6	nir	0,2									
7	Es	20000									
8	Er	30000000									
10	$1,73^{*cs} \log(Lr/Tr)^{*0,5} (1-nis2)/(1-nr2) 1-(Tr/Br)^3 e-30(Es/Er) krs$										
11		1,471	1,115	0,948	1,000	0,980	1,525	VALOR CONFERE COM A ERRATA			
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											
23											

Below the main calculation, there is a table for  $Tr$  (m) and  $k_c$  values:

$Tr$ (m)	$k_c$
0,1	1,904
0,5	1,523
1	1,324
1,5	1,189
5	0,547
8	0,062

At the bottom of the spreadsheet, there is a note: "NAO FUNCIONA PQ TR É MAIOR QUE B".

Figura 64. Cálculo da rigidez do radier,  $K_{rs}$ , sendo este circular.



## APÊNDICE B – Exemplo de entrada de dados no programa Aoki-Lopes.

O uso do programa é relativamente simples, como pode ser observado na Figura 65. A entrada de dados ocorre por meio de arquivos já preparados, não durante a execução do programa em si. Nos arquivos obra.dat, carga.dat, pontos.dat e solo.dat, encontram-se os valores relativos à obra, às cargas aplicadas, aos pontos para os quais os recalques serão calculados e às propriedades do solo, respectivamente. Uma vez que todos esses dados são inseridos e os cálculos são realizados, os resultados são então armazenados no arquivo results.dat.

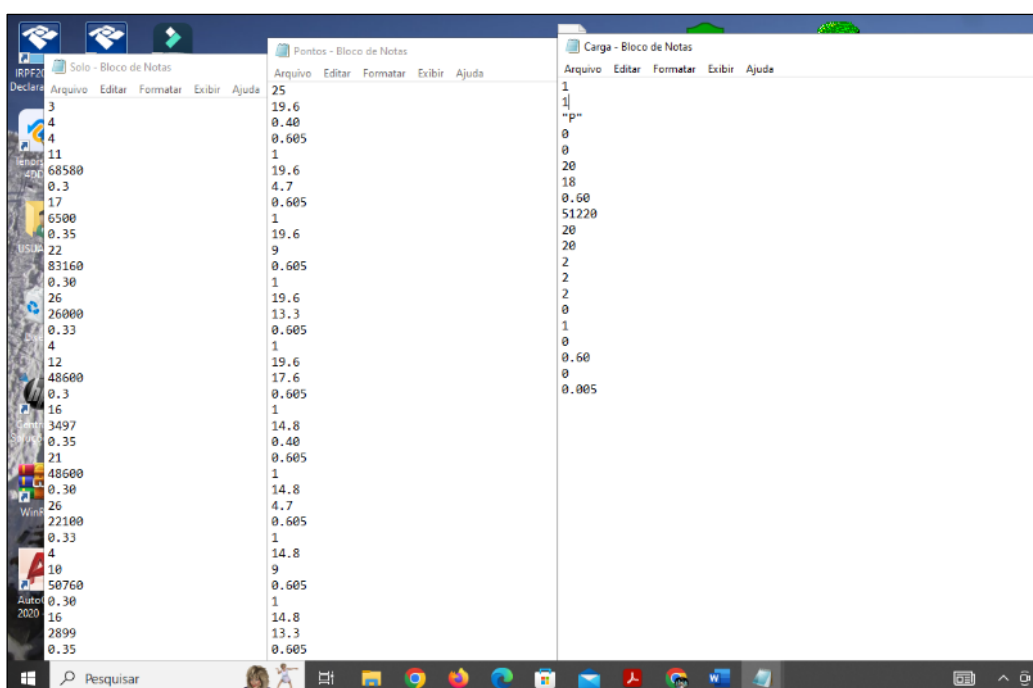


Figura 65. Arquivos solo.txt, pontos.txt e carga.txt.

## APÊNDICE C – Planilha em Excel do algoritmo.

O algoritmo foi desenvolvido em excel seguindo as etapas descritas no Capítulo 2. Neste exemplo foram realizadas 2 iterações até a convergência dos resultados. Este exemplo se refere ao caso de Vitória de Rosa (2005) detalhado no Capítulo 4. Mais detalhadamente se refere a um trecho da Linha D (que foi dividida em 7 trechos), conforme Figuras 66, 67 e 68.

Aos leitores que desejarem acesso às planilhas entrar em contato com a autora através do email: [karinavittor@hotmail.com](mailto:karinavittor@hotmail.com).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	PARTIÇÃO DE CARGAS																
2	P =		1094,5														
3																	
4	SAPATA		RADIER ESTAQUEADO		RADIER 2												
5	Recalque	0,123	Recalque	0,045975491	P novo	409,107											
6	Rigidez	8898,37			%P	37,4%											
7																	
8	ESTACAS		ESTACAS 2														
9	Recalque de uma estaca+ws	0,073418	P novo grupo	685,39288													
10	Número de estacas	2	P por estaca	342,696													
11	P por estaca	547,25	%P grupo	62,6%													
12	Rigidez da estaca	7453,89															
13	Rigidez do grupo de estacas	14907,79															
14																	
15																	
16	ws calculado		0,000418														
17																	
18																	
19																	
20																	
21																	
22																	

Figura 66. Algoritmo aplicado a um trecho da linha D, cálculo inicial.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	PARTIÇÃO DE CARGAS							
2								
3	RADIER 1			RADIER ESTAQUEADO			RADIER 2	
4	P	409,11					P novo	379,216
5	Recalque	0,0839		Recalque	0,078		%P	34,6%
6	Rigidez	4876,13						
7								
8	ESTACAS 1			ESTACAS 2				
9	P	342,696					P novo grupo	715,2838
10	Recalque de uma estaca+ws	0,074526					P por estaca	357,642
11	Numero de estacas	2					%P grupo	65,4%
12	Rigidez da estaca	4598,72						
13	Rigidez do grupo de estacas	9197,44					Pponta	125,748
14							Plateral	231,894
15								
16	ws calculado	0,00022						
17								
18								
19								
20								
21								
22								

Figura 67. Algoritmo aplicado a um trecho da linha D, 1º Iteração.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	PARTIÇÃO DE CARGAS							
2								
3	RADIER 1			RADIER ESTAQUEADO			RADIER 2	
4	P	379,22					P novo	361,490
5	Recalque	0,0831		Recalque	0,079215		%P	33,0%
6	Rigidez	4563,37						
7								
8	ESTACAS 1			ESTACAS 2				
9	P	357,642					P novo grupo	733,0097
10	Recalque de uma estaca	0,077300					P por estaca	366,505
11	Numero de estacas	2					%P grupo	67,0%
12	Rigidez da estaca	4626,67						
13	Rigidez do grupo de estacas	9253,35						
14								
15								
16	ws calculado	0,000234						
17								
18								
19								
20								
21								
22								

Figura 68. Algoritmo aplicado a um trecho da linha D, 2º Iteração.

## APÊNDICE D – Aplicação da metodologia de placa rígida.

Utilizando a metodologia descrita no item 3.1, seguem planilhas referentes aos cálculos, Figuras 69 e 70. Após 6 iterações obteve-se uma contribuição do radier de 12,02% e as estacas contribuindo com 87,98%.

The image shows two Excel spreadsheets side-by-side, representing the initial and first iteration of a rigid plate analysis. The left spreadsheet (sheet 812) contains the following data:

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2	P		350				
3							
4	Bloco	$\Delta h$	0,011195				
5		Sbloco	31263,07				
6							
7	Estaca	w0	0,001735				
8		Sestaca	50428,12				
9							
10	$\phi$ conjunto		0,001502				
11							
12	Pbloco	46,96661		%bloco	13,42%		
13							
14	Pestaca	75,75835		%estaca	86,58%		
15							
16				$\Sigma$	100,00%		

The right spreadsheet (sheet J18) shows the results after the first iteration:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2	Bloco									
3	P1	46,9666143			P	350				
4	$\Delta P$	13,7228968								
5	C $\Delta$ rigida	0,82			$\phi$ conjunto	0,001324				
6	$\lambda$	1								
7	$\Delta h$	0,0015023			Pbloco	41,38714		%bloco	11,82%	
8	Sbloco	31263,0662	ok		Pestaca	77,15322		%estaca	88,18%	
9										
10	Estaca									
11	P1	75,7583464							100,00%	ok
12	topo	75,7583464								
13	a 2m	70,505187	5,253159							
14	a 5m	28,6896348	41,81555							
15										
16	wpp	0,00096273								
17	Cs	0,01645542								
18	wps	0,00012995								
19	area1	146,263533								
20	area2	148,792233								
21	ws	0,00020722								
22										
23	w0	0,0012999								
24	Sestaca	58280,0921								
25										
26										

Figura 69. Planilhas para cálculo da contribuição do radier e estacas – Análise com placa rígida, inicialmente e 1ª iteração.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2	Bloco									
3	P1	42,0601011			P	350				
4	ΔP	12,2892918								
5	CΔrigida	0,82			φ conjunto	0,00134537				
6	λ	1								
7	Δh	0,00134536			Pbloco	42,060352	%bloco	12,02%		
8	Sbloco	31263,0662	ok		Pestaca	76,984912	%estaca	87,98%		
9										
10	Estaca									
11	P1	76,9849747					Σ	100,00%	ok	
12	topo	76,9849747								
13	a 2m	71,7318153	5,253159							
14	a 5m	29,9162631	41,81555							
15										
16	wpp	0,00100389								
17	Cs	0,01645542								
18	wps	0,00012995	ok							
19	area1	148,71679								
20	area2	152,472118								
21	ws	0,00021152								
22										
23	w0	0,00134537								
24	Sestaca	57222,1646								
25										
26										

Figura 70. Planilha para cálculo da contribuição do radier e estacas – Análise com placa rígida, 6ª iteração.

## APÊNDICE E – Aplicação da metodologia de placa flexível.

Utilizando a metodologia descrita no item 3.1, seguem planilhas referentes aos cálculos, Figuras 71, 72 e 73. Após 6 iterações obteve-se uma contribuição do radier de 15,93% e as estacas contribuíram com 84,07%.

D21						D25					
	A	B	C	D	E		A	B	C	D	E
1						1					
2						2	P	350			
3						3					
4				ATRITO LATERAL		4	P/4	87,5			
5						5					
6	$10 \cdot (1 - \cos \theta) \cdot \rho$	0,62539	kg		0,6	6	topo	87,5			
7						7					
8	Cv efetiva na ponta de estaca	73,21		camada argila		8	a 2m	82,24684			
9				TI	3,344	9					
10	$C_{\text{con}} \cdot (1 + 2 \cdot k_0) \cdot C_v \cdot \text{ponta} / 3$	54,93		camada areia		10	a 5m	40,43129			
11						11					
12	E	11960,00		TI	17,747	12					
13						13	wpp	0,001357			
14	$1/4 \cdot \rho \cdot (2 \cdot (1 + v)) \cdot (c \cdot q \cdot \text{tg} \theta)$	101,006				14					
15						15	Cs	0,016455			
16	$3/8 \cdot \rho \cdot \sin \theta$	1,14269				16					
17	$(90 - \theta) \cdot \text{tg} \theta$	0,47951				17	wps	0,000130			
18	$e^{-\mu \cdot \text{tg} \theta}$	1,63528				18					
19	$\rho \cdot q$	1,48256				19	area1	169,7468			
20	$\rho \cdot q \cdot \cos \theta$	2,18759				20	area2	184,0172			
21	$\rho \cdot \sin(\theta/2) \cdot \sin \theta$	0,36336				21					
22	l anterior	5,3492				22	ws	0,000248			
23						23					
24	Nc	21,702				24	wo	0,001735			
25						25					
26	$q_{\text{rup}} \cdot \rho \cdot \cos \theta$	1192,01				26					
27						27					
28	$q_{\text{rup}} \cdot \rho \cdot \sin \theta$	58,5278		Ql, rup	47,0687						
29											
30		Qrup	105,596								
31											
32											
33											
34											

Figura 71. Planilhas para cálculo da contribuição do radier e estacas – Análise com placa flexível, recalque inicial das estacas.

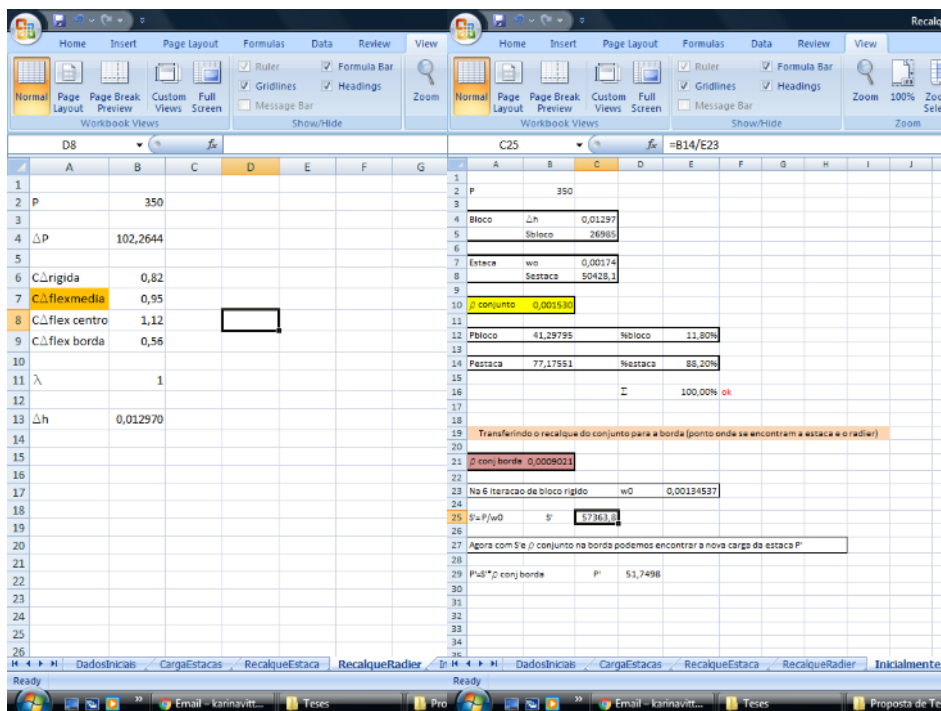


Figura 72. Planilhas para cálculo da contribuição do radier e estacas – Análise com placa flexível, recalque inicial do radier.

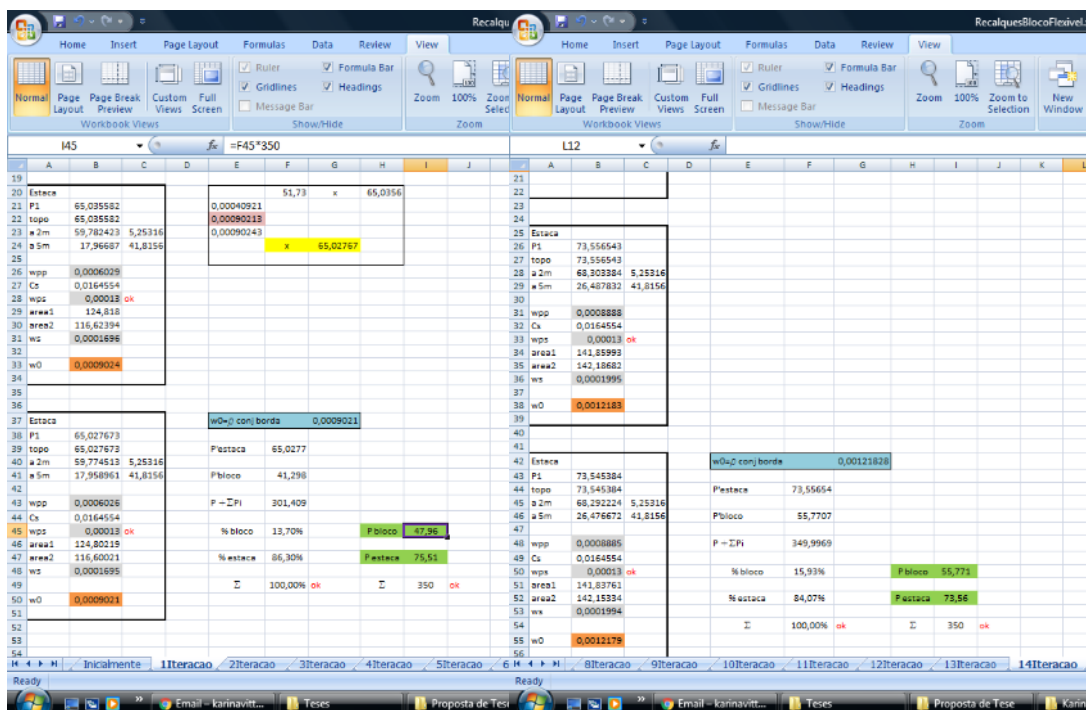


Figura 73. Planilhas para cálculo da contribuição do radier e estacas – Análise com placa flexível, 6ª iteração.

## APÊNDICE F – Aplicação da metodologia de placa flexível com programa Aoki-Lopes.

A partir da aplicação da metodologia descrita no item 3.1 foi utilizado o programa Aoki-Lopes. Este forneceu o recalque do radier no ponto especificado (ponto 3, onde as estacas e radier devem apresentar o mesmo recalque), Figura 74.

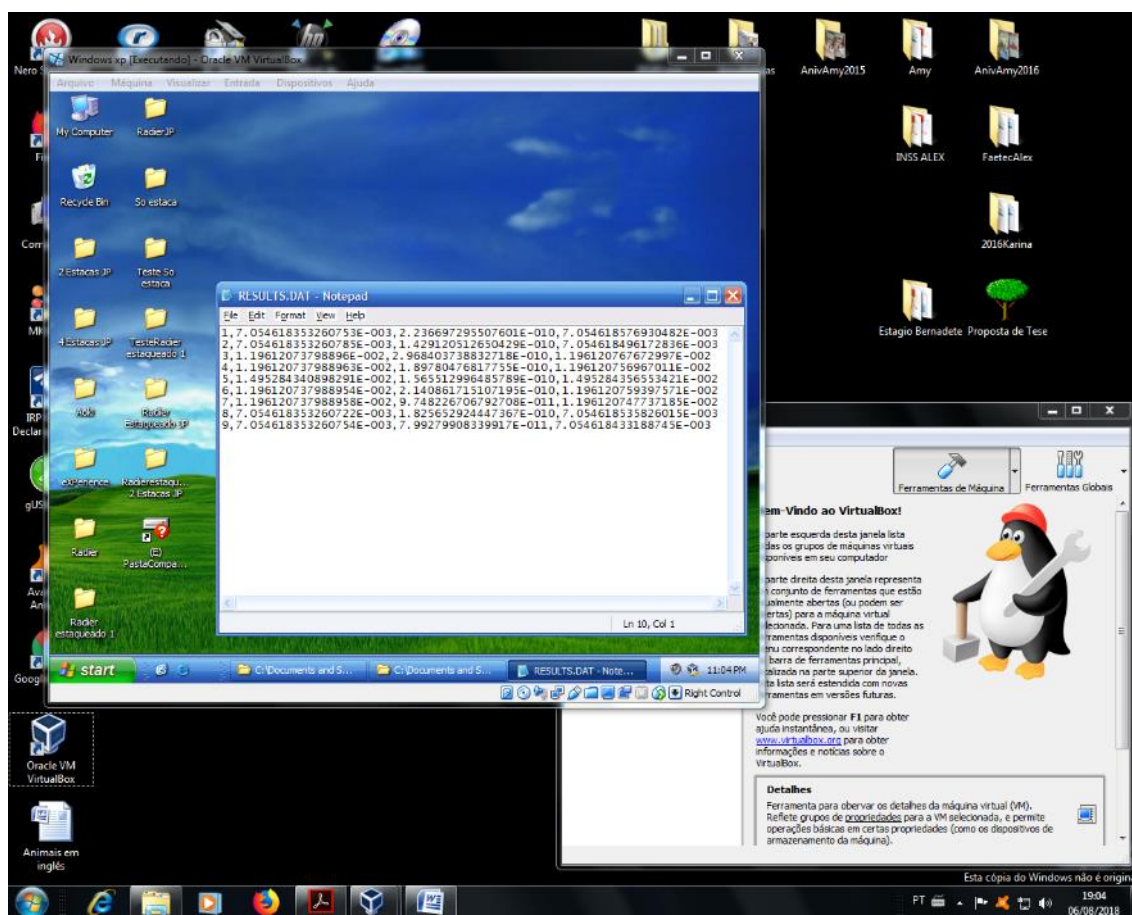


Figura 74. Resultado do programa Aoki-Lopes para o radier

Da mesma forma, segue o resultado do programa para as estacas (cálculo do recalque) na Figura 75.



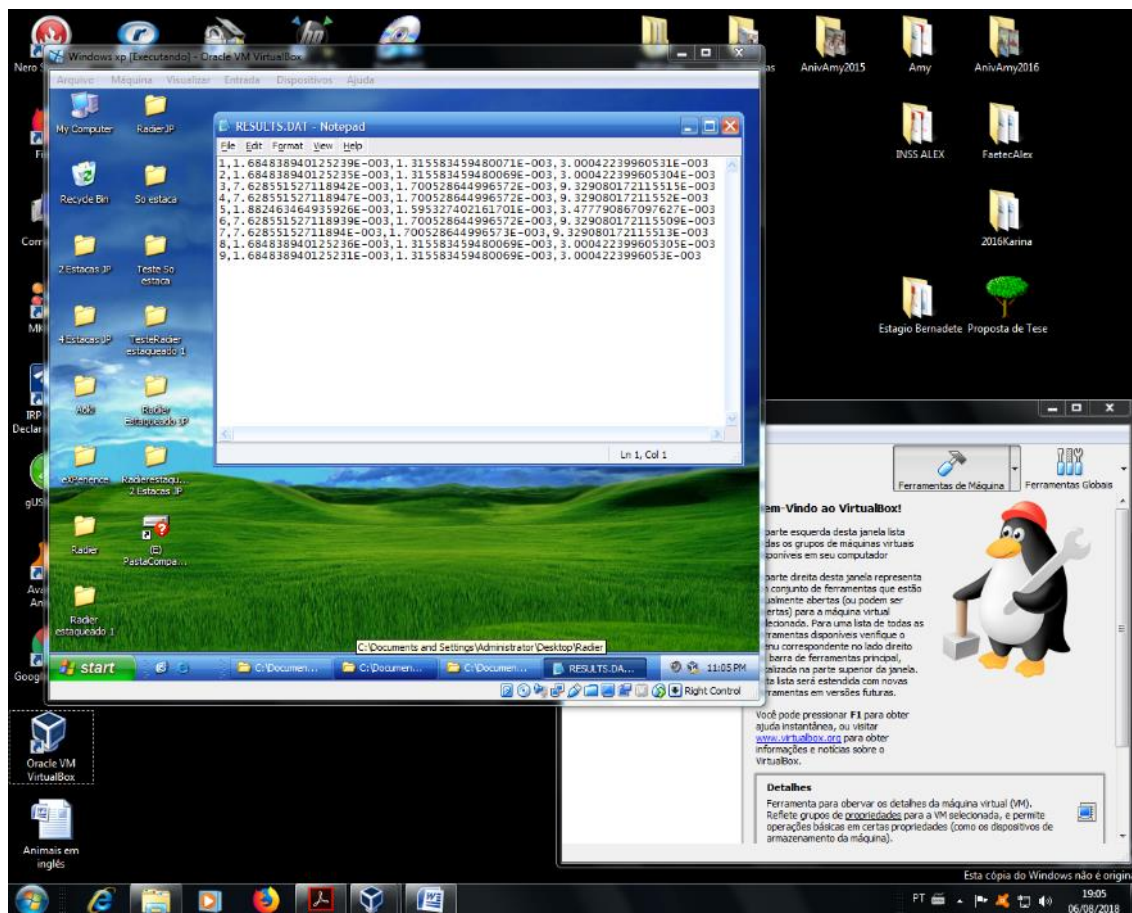


Figura 75. Resultado do programa Aoki-Lopes para as estacas

De posse dos resultados anteriores, utilizando a metodologia apresentada no item 3.2.1 foram calculados:

- i) As rigidezes (do radier e das estacas)
- ii) O recalque do conjunto
- iii) A parte da carga referente ao radier e as estacas

Utilizando novamente o programa, mas desta vez para o radier estaqueado, a partir dos resultados até então obtidos, foram realizadas sucessivas iterações até que o recalque no ponto especificado fosse o mesmo (para a estaca e para o radier). Após 5 iterações, o recalque dos pontos 3, 4, 6, 7 referentes à locação de cada uma das 4 estacas, foi o mesmo para os pontos 12,13,15 e 16 referente ao radier conforme Figura 76.

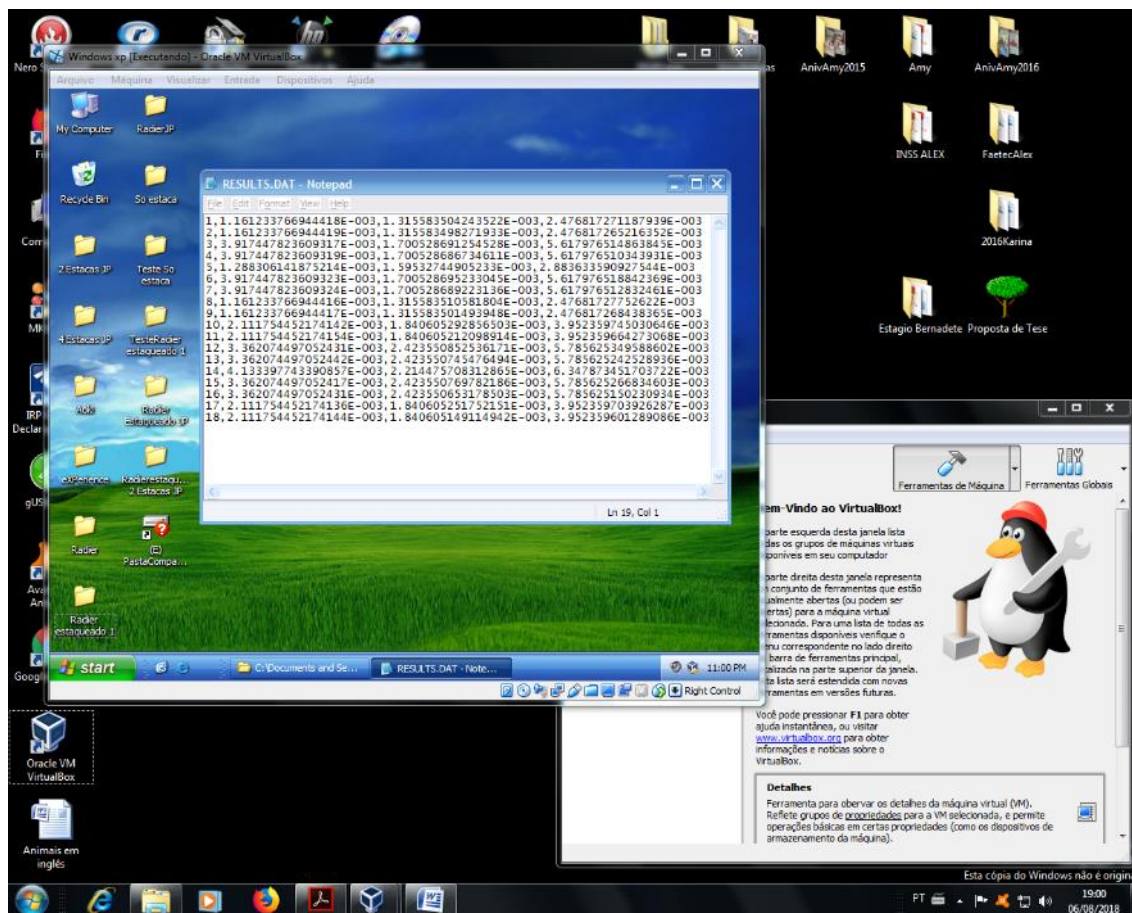


Figura 76. Resultado do programa Aoki-Lopes para o radier estaqueado

De posse deste recalque, o cálculo dos itens anteriores desta foi refeito e se obteve, como repartição das cargas, 24,95% para o radier, enquanto as estacas contribuíram com 75,05%.

## APÊNDICE G – Aplicação da metodologia de Randolph (1994).

Utilizando a metodologia descrita no item 3.1, chegou-se ao valor de contribuição do radier de 45,7% e das estacas de 54,28%, conforme Figura 77, considerando o **grupo de estacas**.

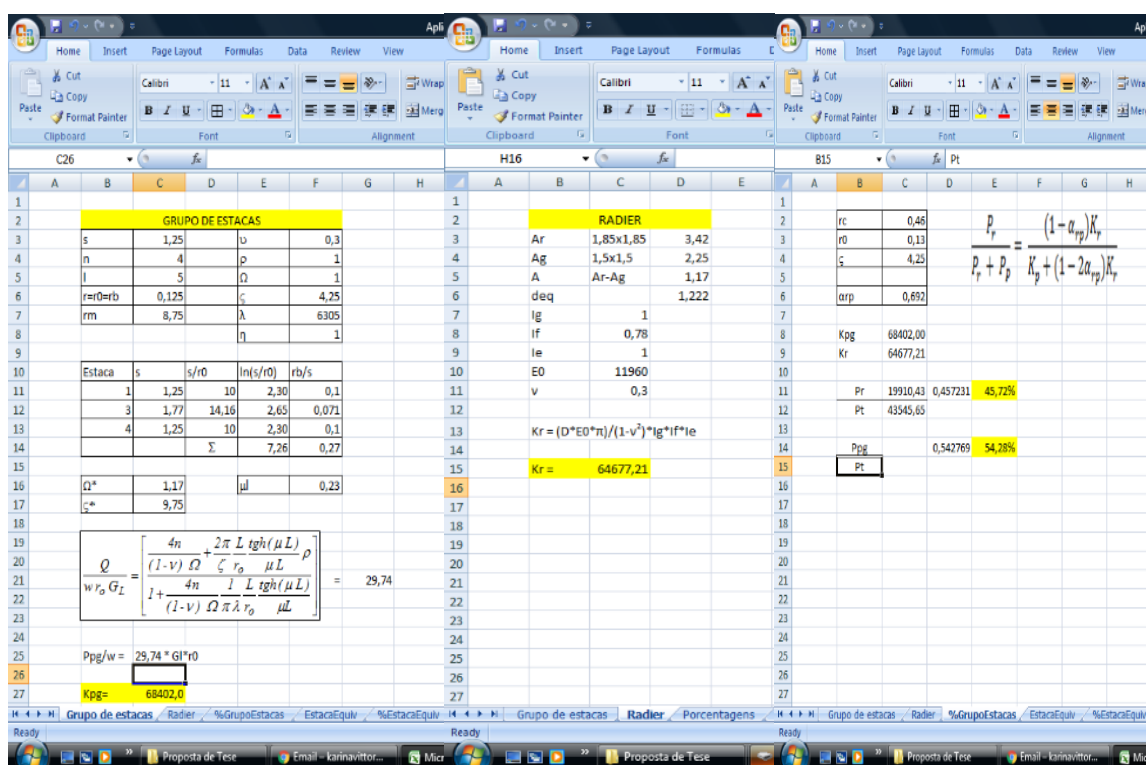


Figura 77. Aplicação do método de Randolph (1994) – Grupo de estacas

Ao se considerar o enfoque de Randolph de substituir o grupo de estacas por uma **estaca equivalente**, tem-se que o radier contribuiu com 35,2% e as estacas 64,8%, conforme Figura 78.

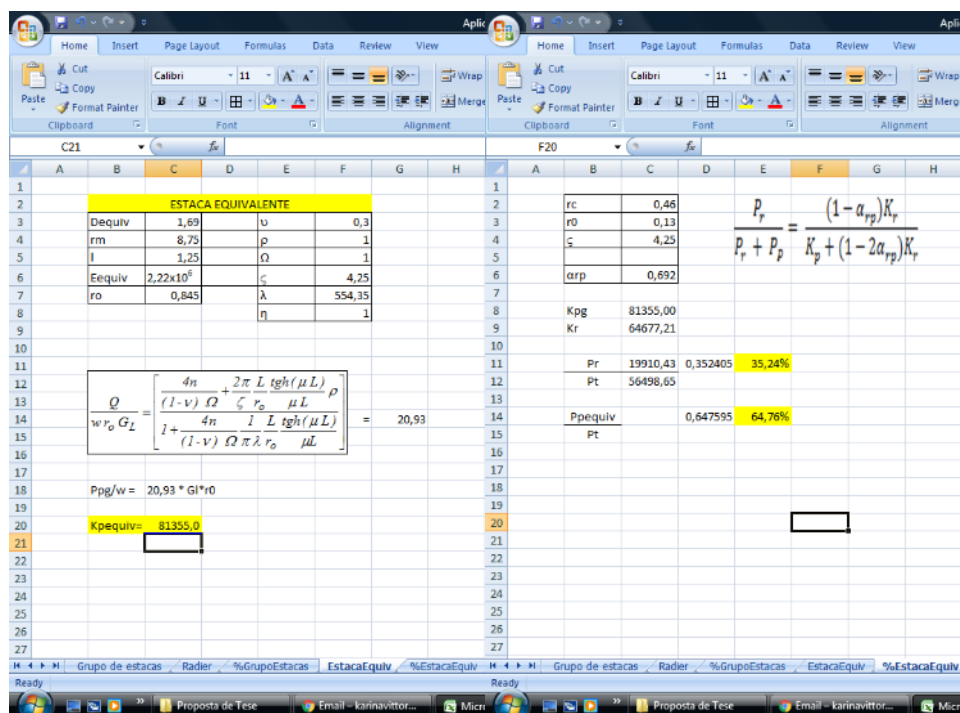


Figura 78. Aplicação do método de Randolph (1994) – Estaca Equivalente

## APÊNDICE H – Estimativas Poulos et al. 1997.

Utilização da metodologia descrita no item 4.3 para cálculo da partição de cargas entre radier e estacas, conforme Figuras 79, 80 e 81. Aplicação do algoritmo onde apenas 2 iterações foram necessárias.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	12000																
2	P =		12000														
3																	
4	RADIER			RADIER ESTAQUEADO			RADIER 2										
5	Recalque	0,04677		Recalque	0,015475576		P novo	3970,642									
6	Rigidez	256574,73					%P	33,09%									
7	Correção rigidez	256574,73															
8																	
9	ESTACAS			ESTACAS 2													
10	Recalque de uma estaca+ws	0,01883					Pgrupo1	4931,14482	Pgrupo2	3098,219							
11	Número de estacas	6					P por estaca	821,857	P por estaca	1032,738							
12	P por estaca	1000					Pponta	410,929	Pponta	516,369							
13	Rigidez da estaca	53106,74					Plateral	410,929	Plateral	516,369							
14	Rigidez do grupo de estacas	318640,47					F1	41,093	F1	51,637							
15							F2	41,093	F2	51,637							
16	ESTACAS																
17	Recalque de uma estaca+ws	0,02997					%P grupo	66,91%									
18	Número de estacas	3															
19	P por estaca	2000															
20	Rigidez da estaca	66733,40															
21	Rigidez do grupo de estacas	200200,20															
22																	

Figura 79. Algoritmo para determinação da partição de cargas, caso hiipotético de Poulos et al.1997, fase inicial.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	PARTIÇÃO DE CARGAS																
2																	
3	RADIER 1			RADIER ESTAQUEADO			RADIER 2										
4	P	3970,64															
5	Recalque	0,0261		Recalque	0,031650420		P novo	4815,037									
6	Rigidez	152131,87					%P	40,13%									
7	Rigidez Corrigida	152131,87															
8																	
9	ESTACAS			ESTACAS 2													
10	Recalque de uma estaca+ws	0,03269					Pgrupo1	4774,328	Pgrupo2	2410,633							
11	Número de estacas	6					P por estaca	795,721	P por estac	303,545							
12	P por estaca	821,857					Pponta	397,861	Pponta	401,772							
13	Rigidez da estaca	25140,94					Plateral	397,861	Plateral	401,772							
14	Rigidez do grupo de estacas	150845,67					F1	39,786	F1	40,177							
15							F2	39,786	F2	40,177							
16	ESTACAS						%P grupo			59,87%							
17	Recalque de uma estaca+ws	0,040678															
18	Número de estacas	3															
19	P por estaca	1032,738															
20	Rigidez da estaca	25388,12															
21	Rigidez do grupo de estacas	76164,35															
22																	

Figura 80. Algoritmo para determinação da partição de cargas, caso hipotético de Poulos et al.1997, 1ª iteração.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	PARTIÇÃO DE CARGAS																
2																	
3	RADIER 1			RADIER ESTAQUEADO			RADIER 2										
4	P	4815,04															
5	Recalque	0,0282		Recalque	0,030693096		P novo	5240,723									
6	Rigidez	170746,01					%P	43,67%									
7	Rigidez Corrigida	170746,01															
8																	
9	ESTACAS			ESTACAS 2													
10	Recalque de uma estaca+ws	0,031947					Pgrupo1	4586,938	Pgrupo2	2172,337							
11	Número de estacas	6					P por estaca	764,490	P por estac	724,112							
12	P por estaca	795,721					Pponta	382,245	Pponta	362,056							
13	Rigidez da estaca	24907,55					Plateral	382,245	Plateral	362,056							
14	Rigidez do grupo de estacas	149445,29					F1	38,224	F1	36,206							
15							F2	38,224	F2	36,206							
16	ESTACAS						%P grupo			56,33%							
17	Recalque de uma estaca+ws	0,03406															
18	Número de estacas	3															
19	P por estaca	803,545															
20	Rigidez da estaca	23592,03															
21	Rigidez do grupo de estacas	70776,09															
22																	

Figura 81. Algoritmo para determinação da partição de cargas, caso hipotético de Poulos et al.1997, 2ª iteração.

**APÊNDICE I** – Estimativas dos coeficientes de rigidez e viscosidade no caso de Vitória, Rosa 2005.

Utilização da metodologia descrita no item 4.3.4 para cálculo dos coeficientes de rigidez utilizados no programa de elementos finitos SAP versão 14, conforme Figuras 82 e 83.

De acordo com o programa entra-se com o coeficiente de amortecimento  $c$  ao invés do coeficiente de viscosidade  $\eta$ .

O coeficiente de amortecimento utilizado foi  $c = 5,82 \times 10^5$  KN dia/m representativo para toda a edificação.

Linha	recalque	tensao adm	K	B	ΔL	k
<b>PRIMEIRA LINHA</b>						
P1	0,082	150	1829,268	0,9	0,6	987,8049
P2	0,097	150	1546,392	0,9	0,6	835,0515
P3	0,112	150	1339,286	0,9	0,6	723,2143
P4	0,102	150	1470,588	0,9	0,6	794,1176
P5	0,093	150	1612,903	0,9	0,6	870,9677
P6	0,084	150	1785,714	0,9	0,6	964,2857
P7	0,075	150	2000	0,9	0,6	1080
P8	0,092	150	1630,435	0,9	0,6	880,4348
P9	0,11	150	1363,636	0,9	0,6	736,3636
P10	0,127	150	1181,102	0,9	0,6	637,7953
P11	0,144	150	1041,667	0,9	0,6	562,5
P12	0,162	150	925,9259	0,9	0,6	500
P13	0,138	150	1086,957	0,9	0,6	586,9565
<b>SEGUNDA LINHA</b>						
P14	0,116	150	1293,103	1,1	0,6	853,4483
P15	0,138	150	1086,957	1,1	0,6	717,3913
P16	0,182	150	824,1758	1,1	0,6	543,956
P17	0,227	150	660,793	1,1	0,6	436,1233
P18	0,247	150	607,2874	1,1	0,6	400,8097
P19	0,243	150	617,284	1,1	0,6	407,4074
P20	0,24	150	625	1,1	0,6	412,5
P21	0,238	150	630,2521	1,1	0,6	415,9664
<b>QUARTA LINHA</b>						
P30	0,131	150	1145,038	0,9	0,6	618,3206
P31	0,147	150	1020,408	0,9	0,6	551,0204
P32	0,163	150	920,2454	0,9	0,6	496,9325
P33	0,187	150	802,139	0,9	0,6	433,1551
P34	0,211	150	710,9005	0,9	0,6	383,8863
P35	0,235	150	638,2979	0,9	0,6	344,6809
P36	0,26	150	576,9231	0,9	0,6	311,5385
P37	0,254	150	590,5512	0,9	0,6	318,8976
P38	0,243	150	617,284	0,9	0,6	333,3333
<b>TERCEIRA LINHA</b>						
P22	0,156	150	961,5385	1,1	0,6	634,6154
P23	0,173	150	867,052	1,1	0,6	572,2543
P24	0,206	150	728,1553	1,1	0,6	480,5825
P25	0,24	150	625	1,1	0,6	412,5
P26	0,25	150	600	1,1	0,6	396
P27	0,236	150	635,5932	1,1	0,6	419,4915
P28	0,222	150	675,6757	1,1	0,6	445,9459
P29	0,215	150	697,6744	1,1	0,6	460,4651

Figura 82. Coeficiente de rigidez nas linhas longitudinais da edificação.

CoeficienteRigidez [Modo de Exibição Protegido] - Excel

Arquivo Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Ajuda Diga-me o que você deseja fazer

Q31 =-M31\*O31\*P31

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	SAPATAS DO CANTO									SAPATAS DO MEIO										
2		recalque	tensao adm	K		B	$\Delta L$	k			recalque	tensao adm	K		B	$\Delta L$	k			
3	P1	0,082	150	1829,268		0,3	0,7	384,1463		P2	0,097	150	1546,392		0,4	0,7	432,3897			
4	P14	0,116	150	1293,103		0,3	0,7	271,5517		P15	0,138	150	1086,957		0,4	0,7	304,3478			
5	P22	0,156	150	961,5385		0,3	0,7	201,9231		P23	0,173	150	867,052		0,4	0,7	242,7746			
6	P30	0,131	150	1145,038		0,3	0,7	240,458		P31	0,147	150	1020,408		0,4	0,7	285,7143			
7																				
8	P13	0,138	150	1086,957		0,3	0,7	228,2609		P4	0,102	150	1470,588		0,4	0,7	411,7647			
9	P21	0,238	150	630,2521		0,3	0,7	132,3529		P16	0,182	150	824,1758		0,4	0,7	230,7692			
10	P29	0,215	150	697,6744		0,3	0,7	146,5116		P24	0,206	150	728,1553		0,4	0,7	203,8835			
11	P42	0,179	150	837,9888		0,3	0,7	175,9777		P33	0,187	150	802,139		0,4	0,7	224,5989			
12										P6	0,084	150	1785,714		0,4	0,7	500,00			
13										P17	0,227	150	660,793		0,4	0,7	185,022			
14										P25	0,24	150	625		0,4	0,7	175			
15										P35	0,235	150	638,2979		0,4	0,7	178,7234			
16																				
17										P8	0,092	150	1630,435		0,4	0,7	456,5217			
18										P18	0,247	150	607,2874		0,4	0,7	170,0405			
19										P26	0,25	150	600		0,4	0,7	168			
20										P37	0,254	150	590,5512		0,4	0,7	165,3543			
21																				
22																				
23										P10	0,127	150	1181,102		0,4	0,7	330,7087			
24										P19	0,243	150	617,284		0,4	0,7	172,8395			
25										P27	0,236	150	635,5932		0,4	0,7	177,9661			
26										P39	0,232	150	646,5517		0,4	0,7	181,0345			
27																				

Pronto

Pesquisar

POR 09:13  
PTB2 06/12/2023

Figura 83. Coeficiente de rigidez nas linhas transversais da edificação.



## ANEXO A - Método Aoki-Lopes

### A.1. Introdução

O método de Aoki e Lopes (1975) se propõe a substituir as cargas transmitidas por uma estaca ao terreno, tanto por fuste como por ponta ou base, por um conjunto de cargas concentradas, cujos efeitos serão superpostos no ponto em estudo. O método permite analisar estacas cilíndricas ou prismáticas, mas apenas as fórmulas para o primeiro tipo serão apresentadas no item A.3. A carga de fuste é dividida em  $N_1 \times N_3$  cargas concentradas e a carga de base em  $N_1 \times N_2$  cargas concentradas. Os recalques calculados por essas cargas – com as Equações de Mindlin (1936) – são somados no ponto em estudo:

$$w = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} w_{i,j} + \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{k=1}^{N_3} w_{i,k} \quad (59)$$

Onde:

$w_{i,j}$  são os recalques induzidos pelas forças concentradas devidas à carga na base;

$w_{i,k}$  são recalques induzidos pelas forças equivalentes ao atrito lateral (carga de fuste).

O mesmo vale se se desejam acréscimos de tensão devidos a uma estaca:

$$\{\sigma\} = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \{\sigma\}_{i,j} + \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{k=1}^{N_3} \{\sigma\}_{i,k} \quad (60)$$

### A.2. Equações de Mindlin

Os efeitos das cargas concentradas (tanto em termos de recalque como de tensões) são calculados com as Equações de Mindlin. Para cada carga é preciso conhecer (Figura A.1):

- o valor da força concentrada, Q;
- a profundidade da força, c;

- as coordenadas do ponto em estudo B (x, y, z), sendo o eixo z na vertical da força Q;
- a distância horizontal do ponto B ao eixo da força, r;
- o Módulo de Young e o Coeficiente de Poisson do meio.

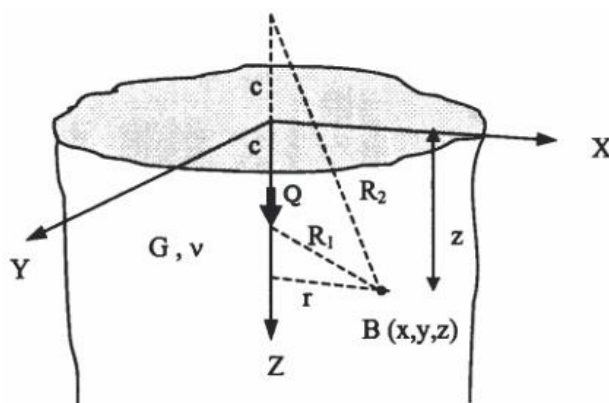


Figura 84. Parâmetros da Equação de Mindlin (1936).

A equação para o recalque (no ponto **B**) é:

$$w = \frac{P}{16\pi G(1-\mu)} \left[ \frac{3-4\mu}{R_1} + \frac{8(1-\mu)^2 - (3-4\mu)}{R_2} + \frac{(z-c)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\mu)(z+c)^2 - 2cz}{R_2^3} + \frac{6cz(z+c)^2}{R_2^5} \right] \quad (61)$$

### A.3. Discretização (Divisão) em Cargas Concentradas

O cálculo das cargas concentradas substitutas é feito por um conjunto de equações apresentadas a seguir. O método considera que a carga atuante no topo da estaca,  $Q_0$ , é dividida numa parcela transferida à ponta,  $Q_b$ , e outra de atrito lateral,  $Q_1$ . Admite que o atrito lateral varia linearmente ao longo de cada camada de solo, definindo-se  $f_2$  como o valor do atrito lateral na profundidade  $D_2$  e como  $f_1 = \xi f_2$  na profundidade  $D_1$ . A carga na base é suposta uniformemente distribuída (Figura A.2).

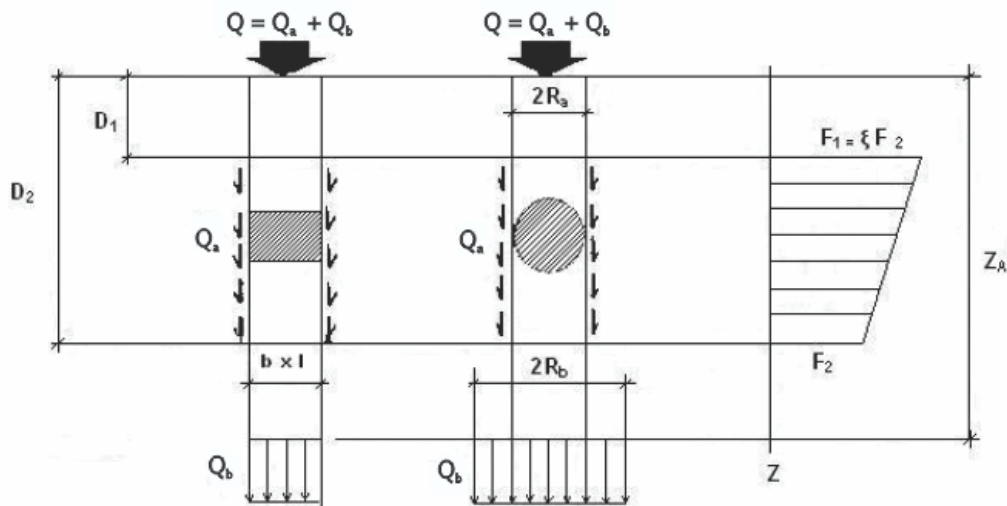


Figura 85. Distribuição da carga ao longo de estaca prismática e cilíndrica (Aoki e Lopes, 1975).

A estaca é definida pelas coordenadas cartesianas do centro de sua base ( $X_A$ ,  $Y_A$ ,  $Z_A$ ), pelo seu raio de fuste,  $R_S$ , e de base,  $R_B$ . Sua profundidade é  $Z_A$ .

#### (a) Carga de ponta ou base

Como a carga de base em é dividida em  $N_1 \times N_2$  cargas concentradas, cada uma vale (Figura A.3):

$$Q_{i,j} = \frac{Q_b}{N_1 N_2} \quad (62)$$

aplicada no ponto  $I_{i,j}$ , centróide de uma subárea (onde  $i$  e  $j$  são as variáveis que indicam a localização desse ponto), a uma profundidade

$$c = Z_A \quad (63)$$

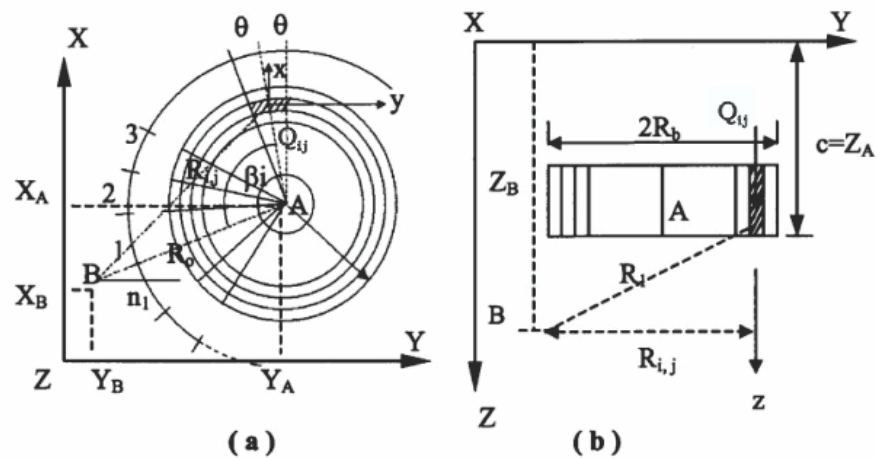


Figura 86. Discretização da base de estaca cilíndrica (Aoki e Lopes, 1975).

Outros dados geométricos são obtidos com:

$$x_B = X_B - X_A - \rho_{i,j} \sin(\beta_i - \alpha_2) \quad (64)$$

$$y_B = Y_B - Y_A + \rho_{i,j} \sin(\beta_i - \alpha_2) \quad (65)$$

$$z_B = Z_B \quad (66)$$

$$r_{i,j} = (r_0^2 + \rho_{i,j}^2 - 2 r_0 \cdot \rho_{i,j} \cdot \cos \beta_i)^{1/2} \quad (67)$$

Onde

$$r_0 = [(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2]^{1/2} \quad (68)$$

$$\rho_{i,j} = \frac{2 \sin \theta}{3\theta} \frac{R_B}{\sqrt{j \cdot n_2}} \cdot [j\sqrt{j} - (j-1)\sqrt{j-1}] \quad (69)$$

$$\beta_i = \frac{180}{n_1} (2i - 1) \quad (70)$$

$$\theta = \left(\frac{180}{n_1}\right)^0 = \left(\frac{\pi}{n_1}\right) rd \quad (71)$$

$$\alpha_2 = \arctan \frac{X_A - X_B}{Y_A - Y_B} \quad (72)$$

**(b) Carga de fuste**

A carga de fuste é dividida em um sistema de cargas concentradas, com valor  $Q_{i,k}$  aplicadas no ponto  $I_{i,k}$ , na profundidade  $c_k$  (Figura A.4). A circunferência de raio  $R_s$  é dividida em  $n_1$  partes iguais, e o trecho do fuste onde há atrito lateral ( $D_2 - D_1$ ) é dividido em  $n_3$  partes iguais. Sendo  $i$  e  $k$  as variáveis que indicam a localização do ponto  $I_{i,k}$ , na superfície do fuste, segue que

$$Q_{i,k} = \frac{(D_2 - D_1)}{2n_3} \left[ 2f_1 - \frac{2k-1}{n_3} (f_1 - f_2) \right] \quad (73)$$

$$f_1 = \xi f_2 \quad (74)$$

$$f_2 = \frac{2P_s}{n_1(1+\xi)(D_2 - D_1)} \quad (75)$$

O parâmetro  $x$  dá a forma do diagrama de atrito: se  $x = 1$ , diagrama retangular (atrito constante com  $z$ ); se  $x \sim 0$ , triangular com base para baixo; se  $x \sim \infty$ , triangular com base para cima; se  $x =$  um outro número qualquer, diagrama trapezoidal.

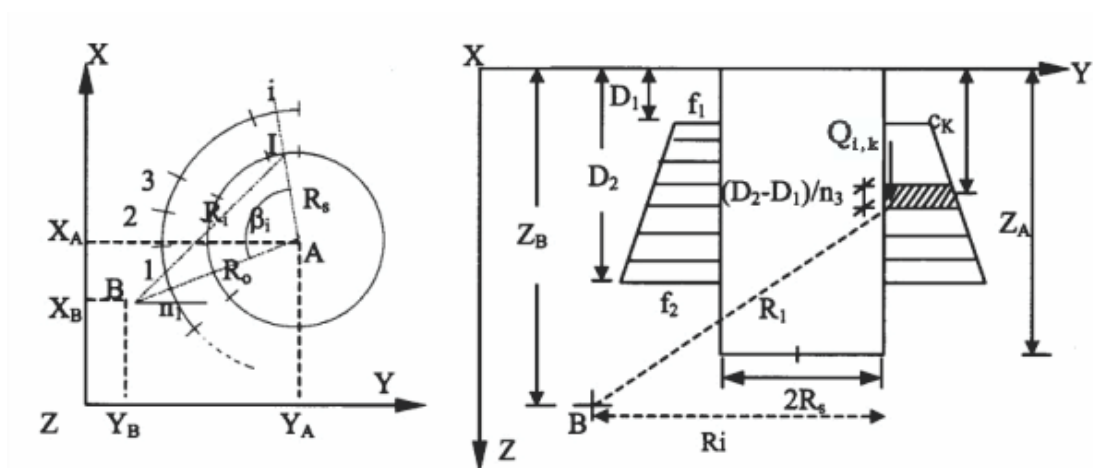


Figura 87. Discretização do fuste de estaca cilíndrica (Aoki e Lopes, 1975).

Outros dados geométricos são obtidos com:

$$c_k = D_1 + \frac{D_2 - D_1}{n_3} (k - 1) + \frac{\frac{(D_2 - D_1)}{n_3} \left[ f_1 + (f_1 - f_2) \cdot \frac{1 - 3k}{3n_3} \right]}{2f_1 - (f_1 - f_2) \cdot \frac{2k - 1}{n_3}} \quad (76)$$

$$x_B = X_B - X_A - R_s \sin(\beta_i - \alpha_2) \quad (77)$$

$$y_B = Y_B - Y_A + R_s \sin(\beta_i - \alpha_2) \quad (78)$$

Onde

$$\beta_i = \frac{360 \cdot i}{n_1} \quad (79)$$

$$\alpha_2 = \arctan \frac{X_A - X_B}{Y_A - Y_B} \quad (80)$$

$$r_i = (r_0^2 + R_s^2 - 2 r_0 \cdot R_s \cdot \cos \beta_i)^{1/2} \quad (81)$$

#### A.4. Programação

O processo de cálculo passa, então, por 3 fases:

- (i) cálculo do valor das cargas substitutas e de suas posições em relação ao ponto em estudo;
- (ii) cálculo dos efeitos dessas cargas (recalques e/ou acréscimos de tensão) com as Equações de Mindlin;
- (iii) soma dos efeitos no ponto em estudo.

Os cálculos podem ser feitos com um programa de computador ou com planilha eletrônica.

O método pode ser expandido ainda para:

- (a) mais de um diagrama de atrito lateral (caso de mais de uma camada oferecendo atrito à estaca);
- (b) camada compressível finita abaixo da ponta (presença de fronteira rígida ou indeslocável), abordado no item a seguir;
- (c) mais de uma camada abaixo da ponta (meio estratificado), abordado também no item a seguir;
- (d) mais de uma estaca (caso de grupo).

#### A.5. Fronteira Rígida e Meio Estratificado – Artífício de Steinbrenner

Para a análise de um maciço com fronteira rígida ou estratificado, Aoki e Lopes sugerem a adoção do artifício de Steinbrenner (1934).

### Fronteira Rígida

Inicialmente, esse procedimento permite tratar um meio de espessura finita, lembrando que as equações de Mindlin valem para um semi-espço infinito. Para tanto, basta subtrair, do recalque no ponto em estudo, o valor do recalque no nível da fronteira rígida ou indeslocável (Figura A.5). O recalque  $w_{i,\infty}$ , na profundidade  $i$  e o recalque  $w_{h,\infty}$ , na profundidade  $h$  que corresponde à profundidade da fronteira indeslocável, são calculados pelas Equações de Mindlin. Como no nível do indeslocável o recalque pode ser considerado nulo, o recalque no nível  $i$  é obtido pela diferença:

$$w_i = w_{i,\infty} - w_{h,\infty} \quad (82)$$

### Meio Estratificado

O procedimento de Steinbrenner pode ser generalizado para o caso em que existam várias camadas até o nível indeslocável. Basta se proceder ao cálculo da Equação (A.24) de baixo para cima. Admite-se que todo o maciço de solo, do nível indeslocável para cima, seja do mesmo material da camada 2 da Figura A.5b. Calcula-se, em seguida, o recalque, no nível do indeslocável e, depois, no topo da camada 2. O recalque da camada 2 será:

$$w_2 = w_{i,\infty} - w_{h,\infty} \quad (83)$$

O procedimento é repetido, bastando considerar, numa nova etapa, o nível indeslocável no topo da camada cujo recalque foi calculado. Utilizam-se, neste caso, as características do solo imediatamente acima, e calcula-se o recalque  $w_1$ , como ilustrado na Figura A.5.

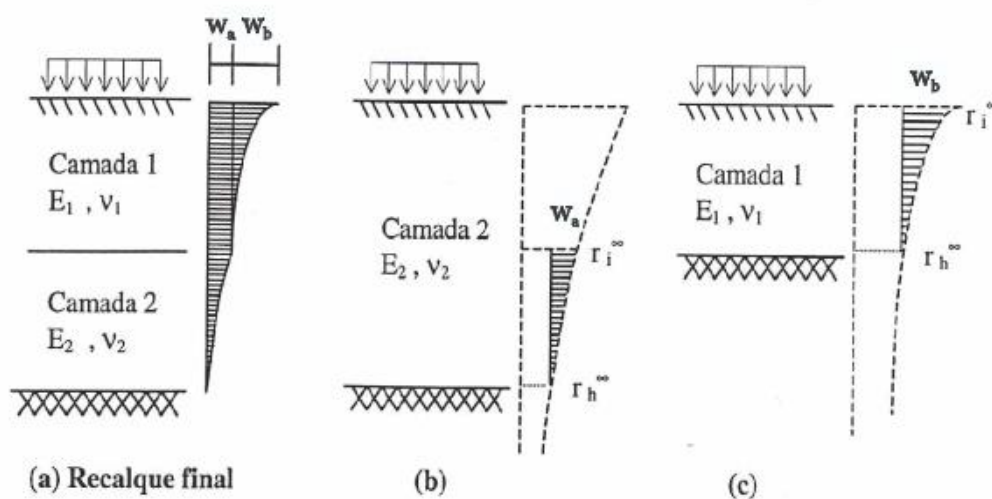


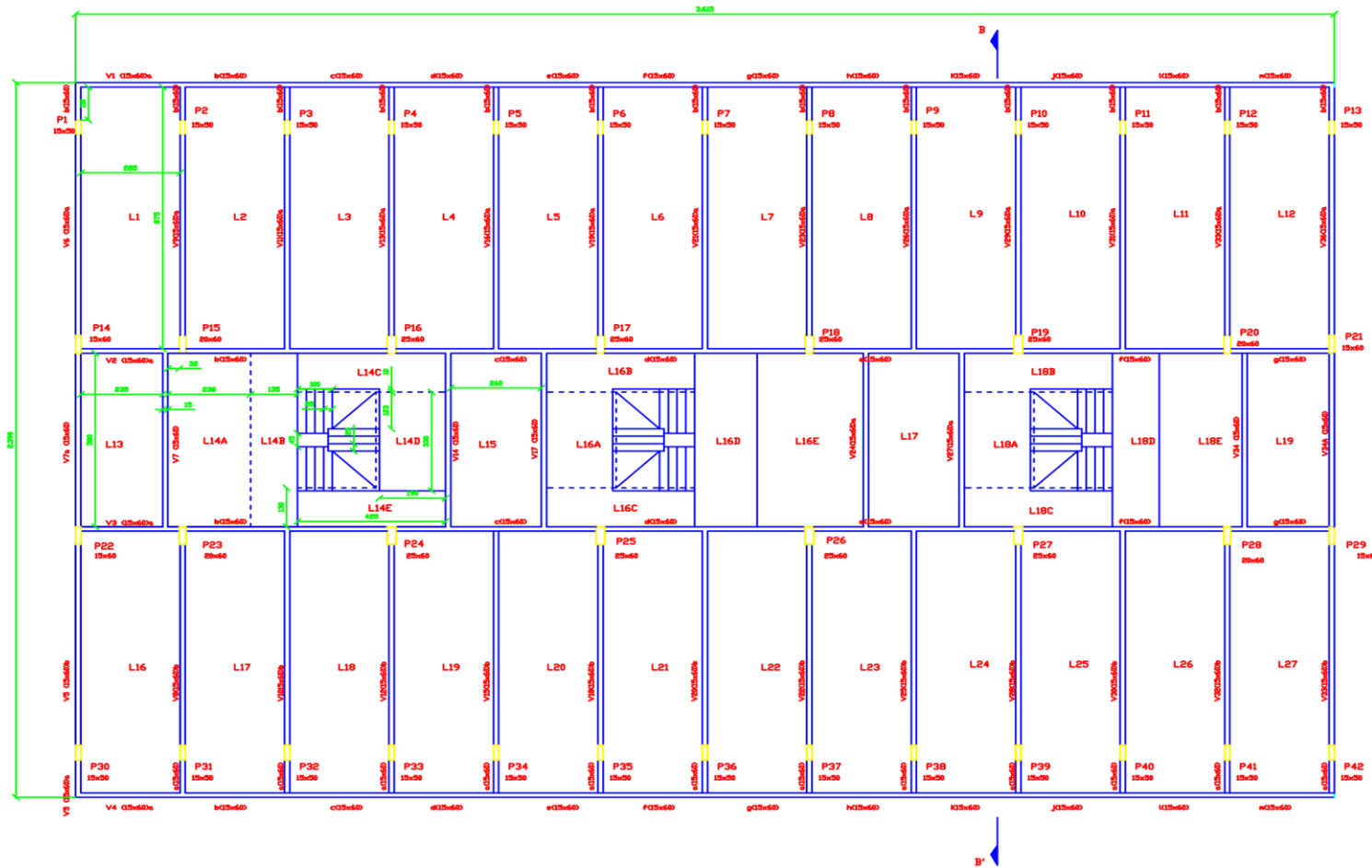
Figura 88. Procedimento de Steinbrenner, adaptado de Mota (2009).

### A.6. Algoritmo

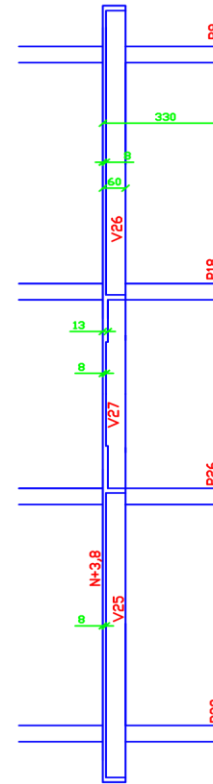
Danziger e Lopes (2018) apresentam um algoritmo com as possibilidades de mais de uma estaca (grupo de estacas), de mais de uma camada abaixo da ponta (meio estratificado) e de mais de um diagrama de atrito lateral por estaca.



**ANEXO B – Plantas edificação residencial do caso em Vitória, item 4.1**



CORTE BB'



NDTAS GERAIS

Fck=150Kg/cm<sup>2</sup>

ESPESSURA DAS LAJES:

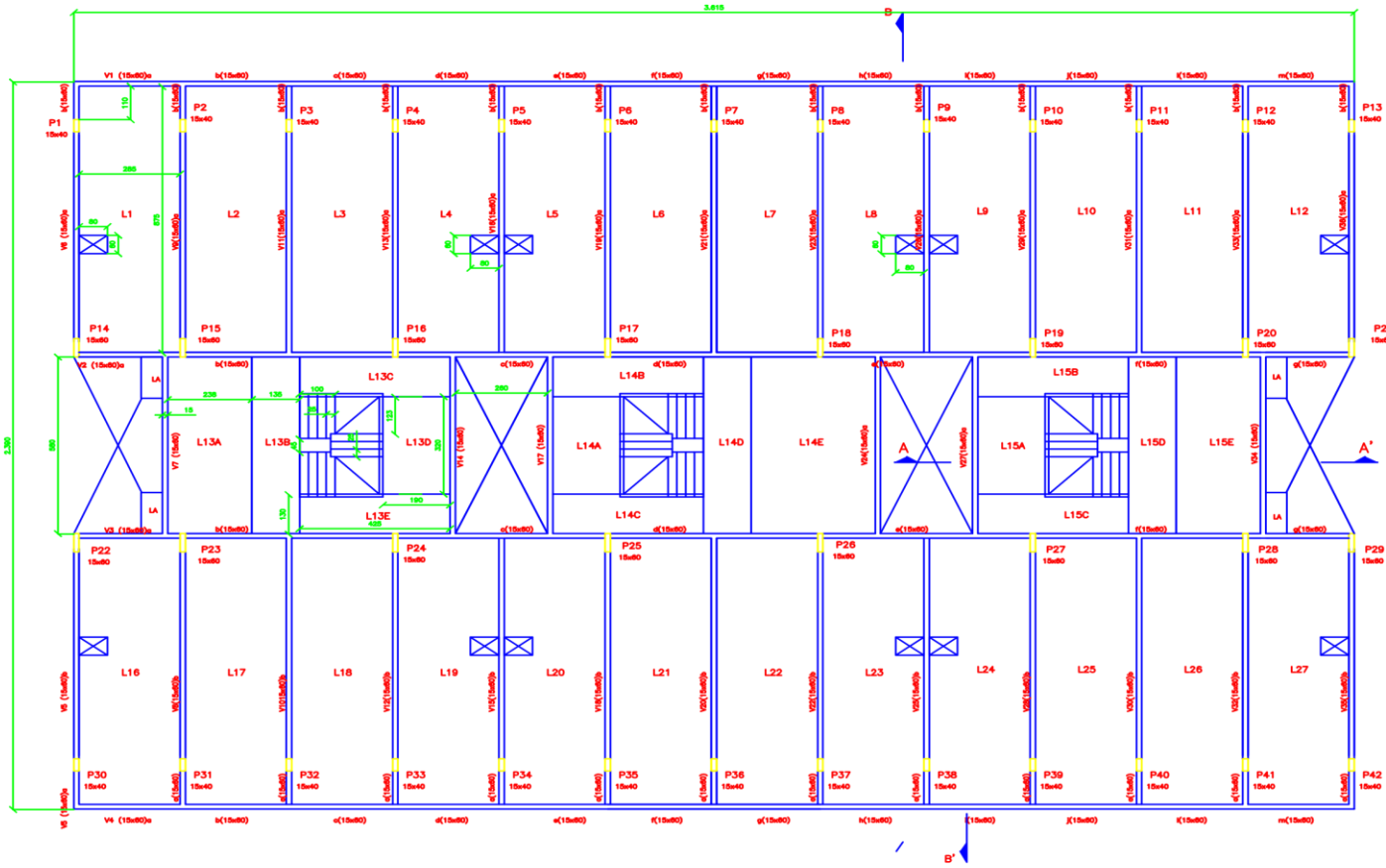
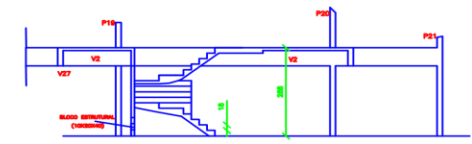
11cm - L1 a L12 e L16 a L27

8cm - L13- L15 - L17 - L19

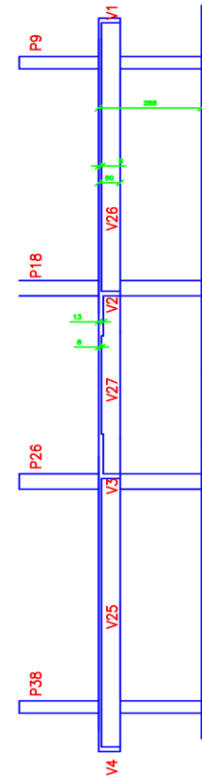
10cm - L14-L14D - L16A -L16E- L18A- L18E

15cm - L14C-L14E - L16B -L16C- L18B- L18C

25cm - L14B -L16D- L18D



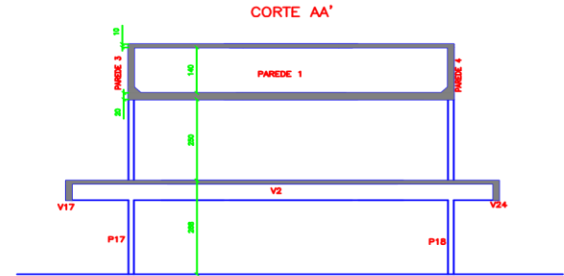
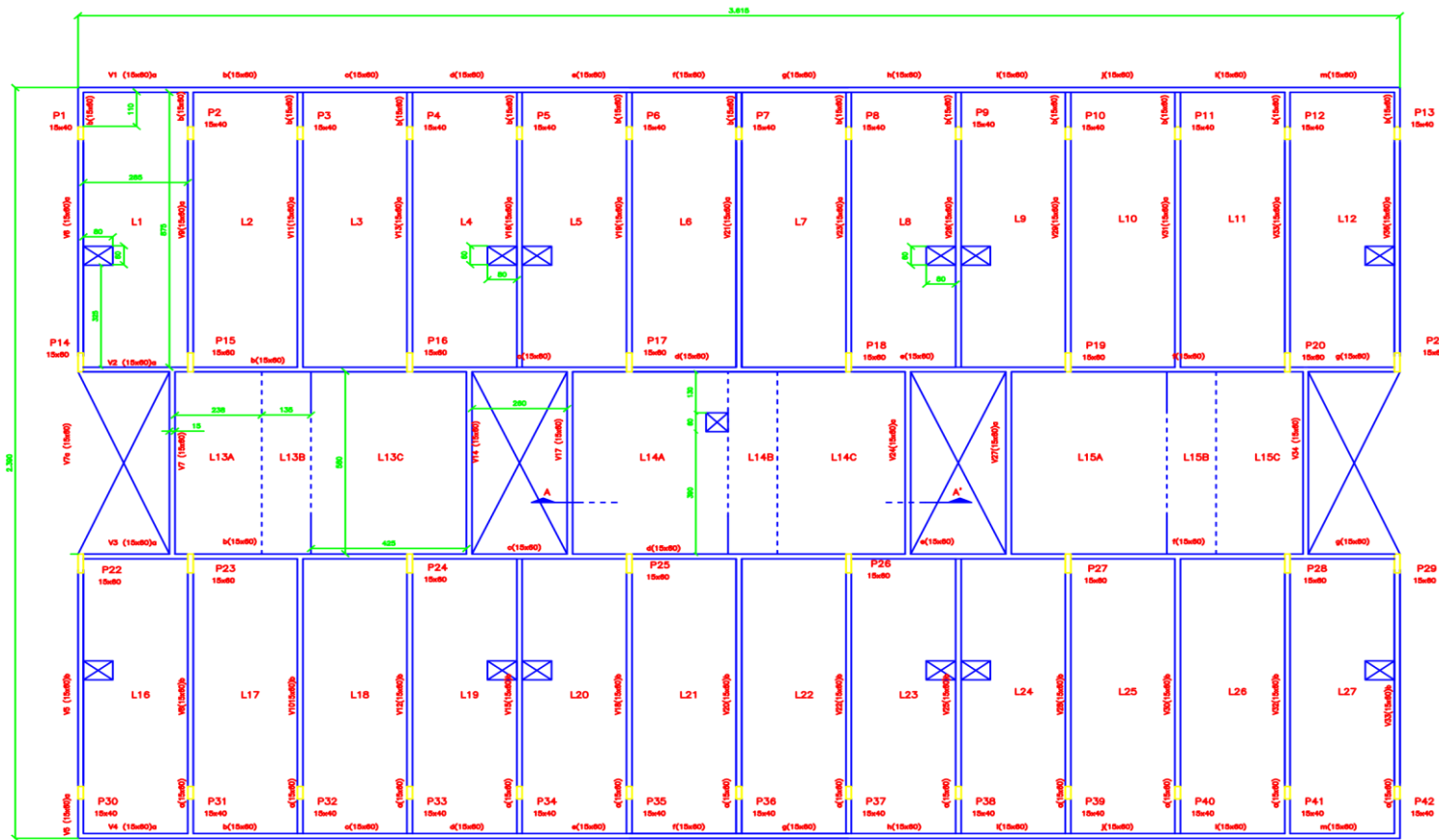
CORTE B' B'



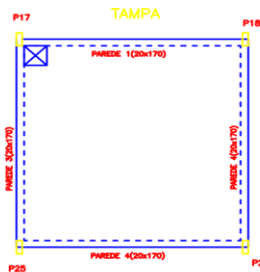
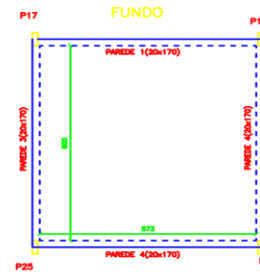
NOTAS GERAIS

- ESPESSURA DAS LAJES:
- 11cm - L1 e L12 e L16 e L27
  - 8cm - LA
  - 10cm - L13A - L13D - L14A - L14E - L15A - L15E
  - 15cm - L13C - L13E - L14B - L14C - L15B - L15C
  - 25cm - L13B - L14D - L15D

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL
EDIFÍCIO - VITÓRIA, ES
FORMA DO 2º E 3º TETO



CAIXA D' ÁGUA - FORMA



NOTAS GERAIS

ESPESSURA DAS LAJES:

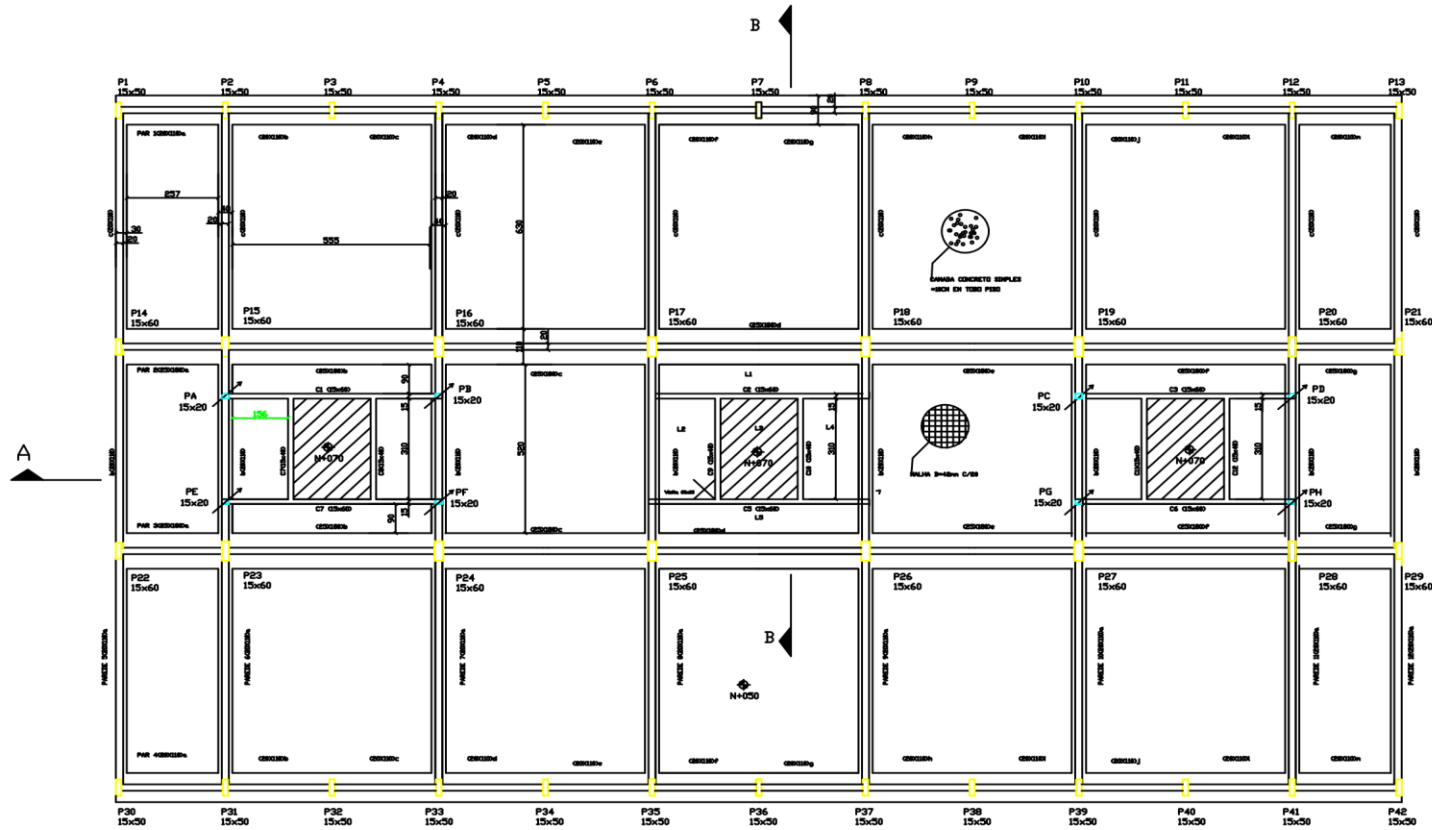
9.5cm - L1 a L12 e L16 a L27

15cm - L13B - L14B - L15B

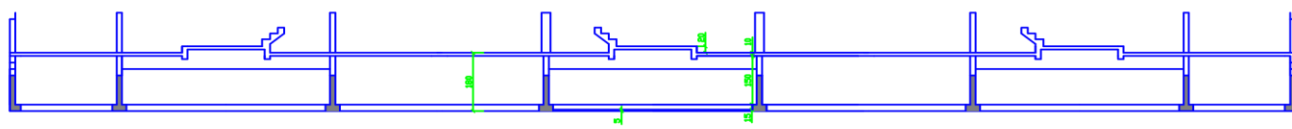
9cm - L13C - L14A - L15A

7cm - L13A - L14C - L15C

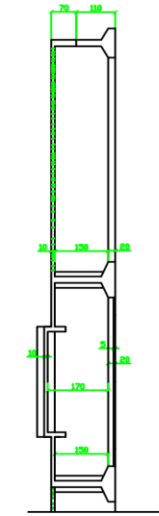
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL
EDIFÍCIO - VITÓRIA, ES
FORMA DO 4º TETO E CAIXA D' ÁGUA



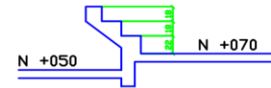
CORTE AA



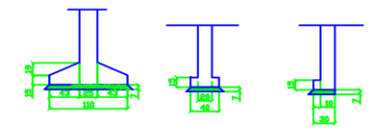
CORTE BB



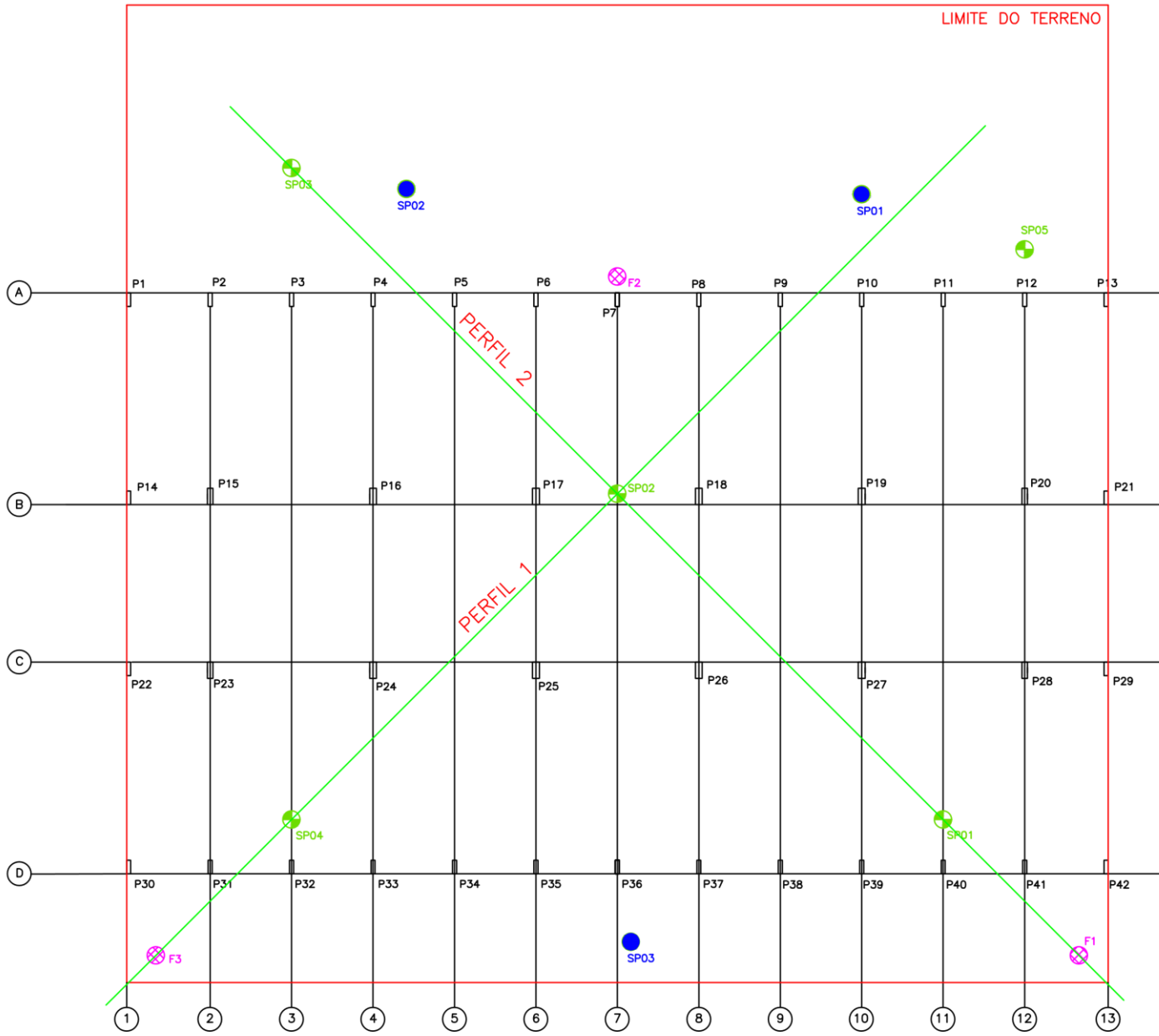
DETALHE A  
ESC. 1:20



DETALHE DAS FUNDAÇÕES  
ESC. 1:25

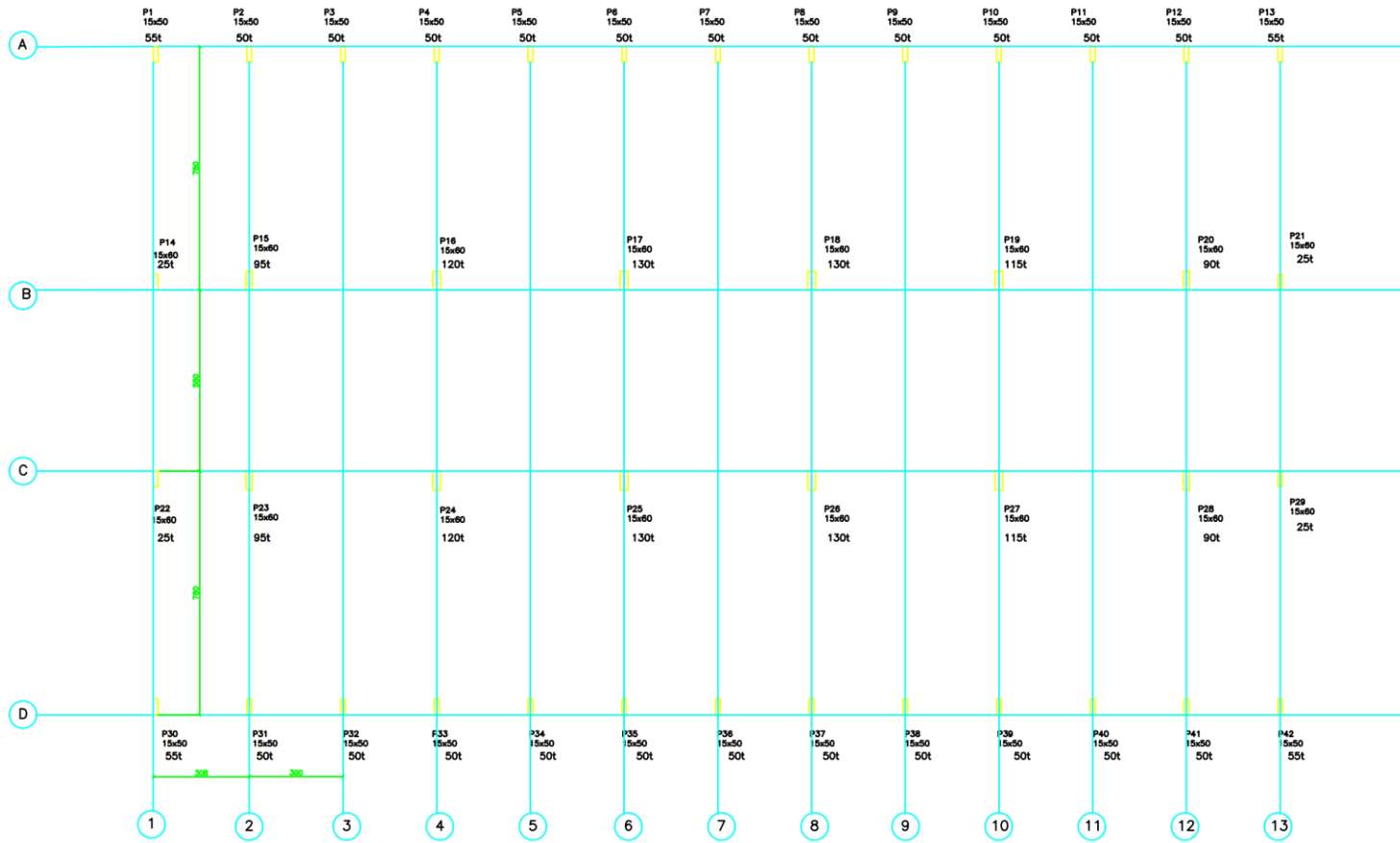


UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL
EDIFÍCIO - VITÓRIA, ES
FORMA DAS CINTAS E FUNDAÇÃO

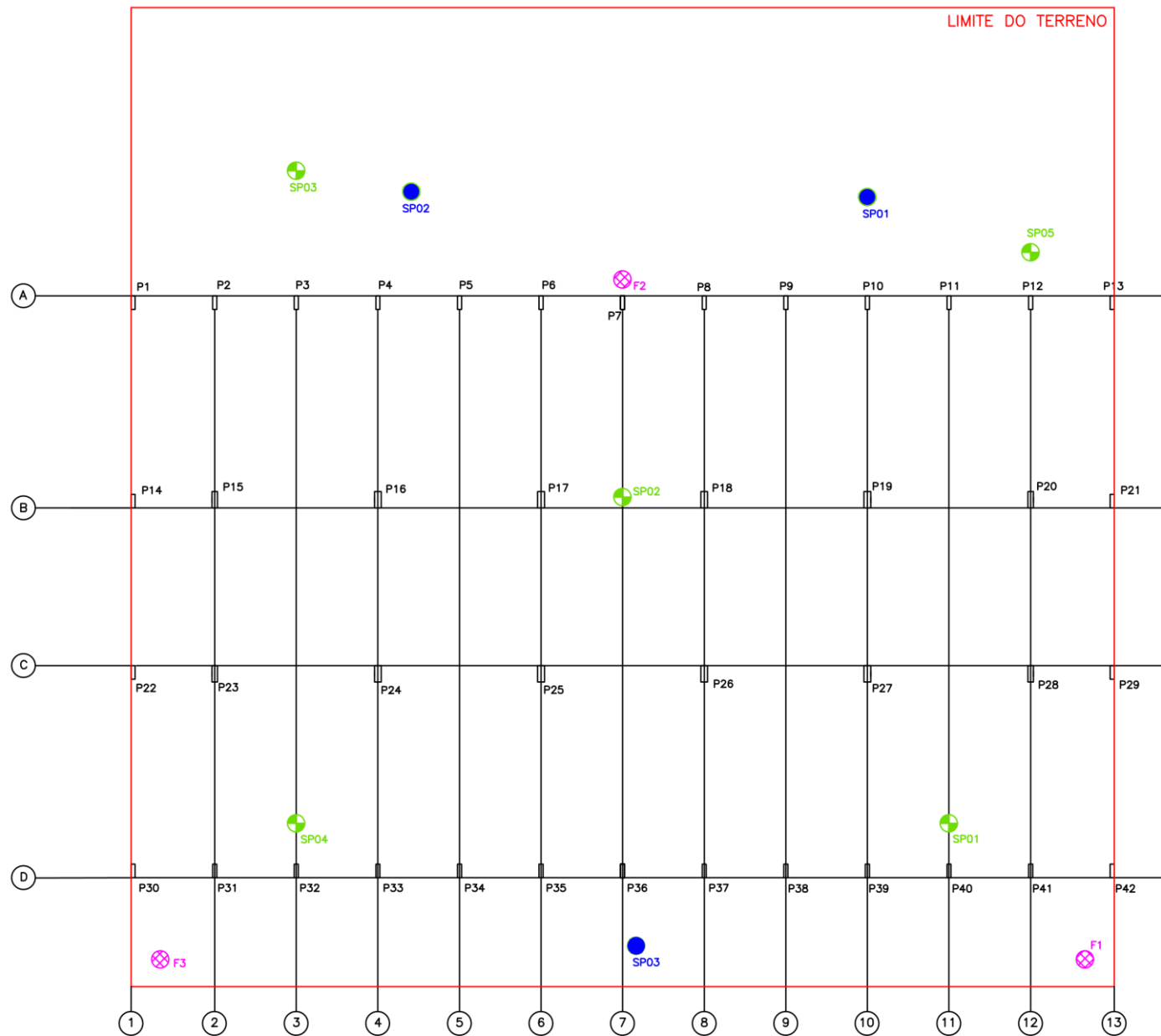


- LEGENDA
- SONDAGENS EMPRESA X
  - SONDAGENS EMPRESA Y
  - SONDAGENS EMPRESA Z

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL  
EDIFÍCIO - VITÓRIA, ES  
LOCAÇÃO DOS PERFIS GEOTÉCNICOS



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL
EDIFÍCIO - VITÓRIA, ES
LOCAÇÃO E CARGAS DOS PILARES

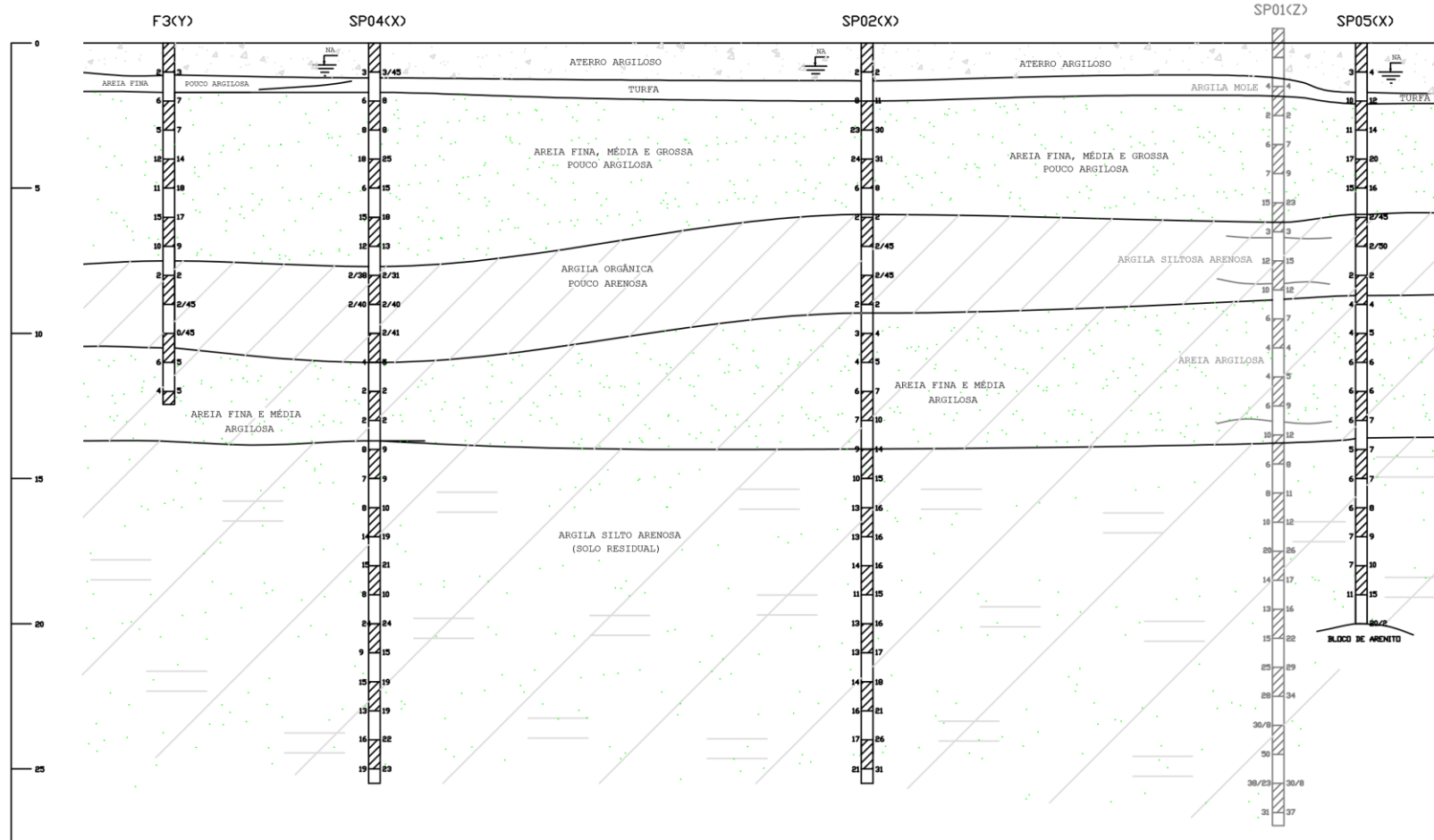


- LEGENDA
- SONDAGENS EMPRESA X
  - SONDAGENS EMPRESA Y
  - SONDAGENS EMPRESA Z

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL  
EDIFÍCIO - VITÓRIA, ES  
LOCAÇÃO DAS SONDAGENS



# PERFIL GEOTÉCNICO 1

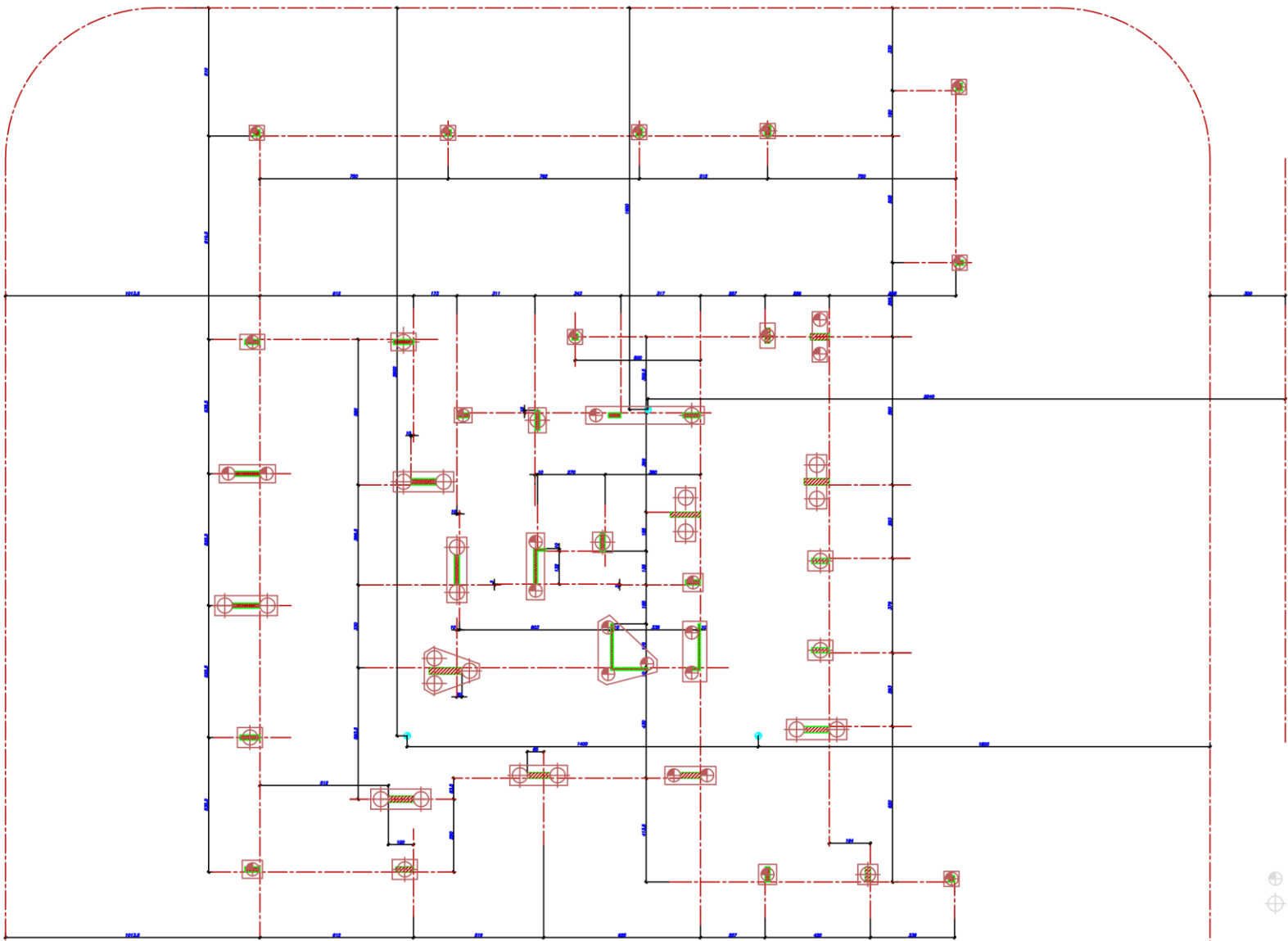


UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
 MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL  
 EDIFÍCIO - VITÓRIA, ES  
 PERFIL GEOTÉCNICO 1

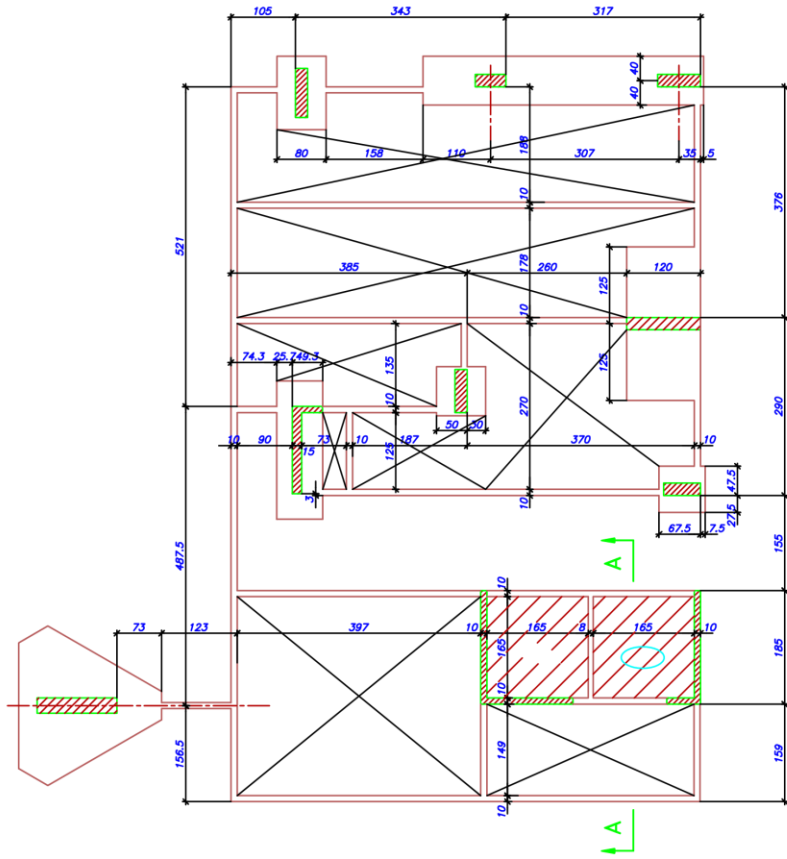


**ANEXO C – Plantas edificação residencial do caso no Recreio, item 5.1.**

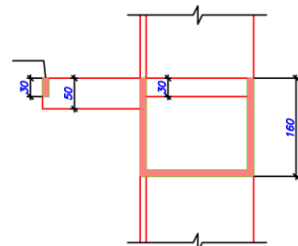




UFF - UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE		PPGEC

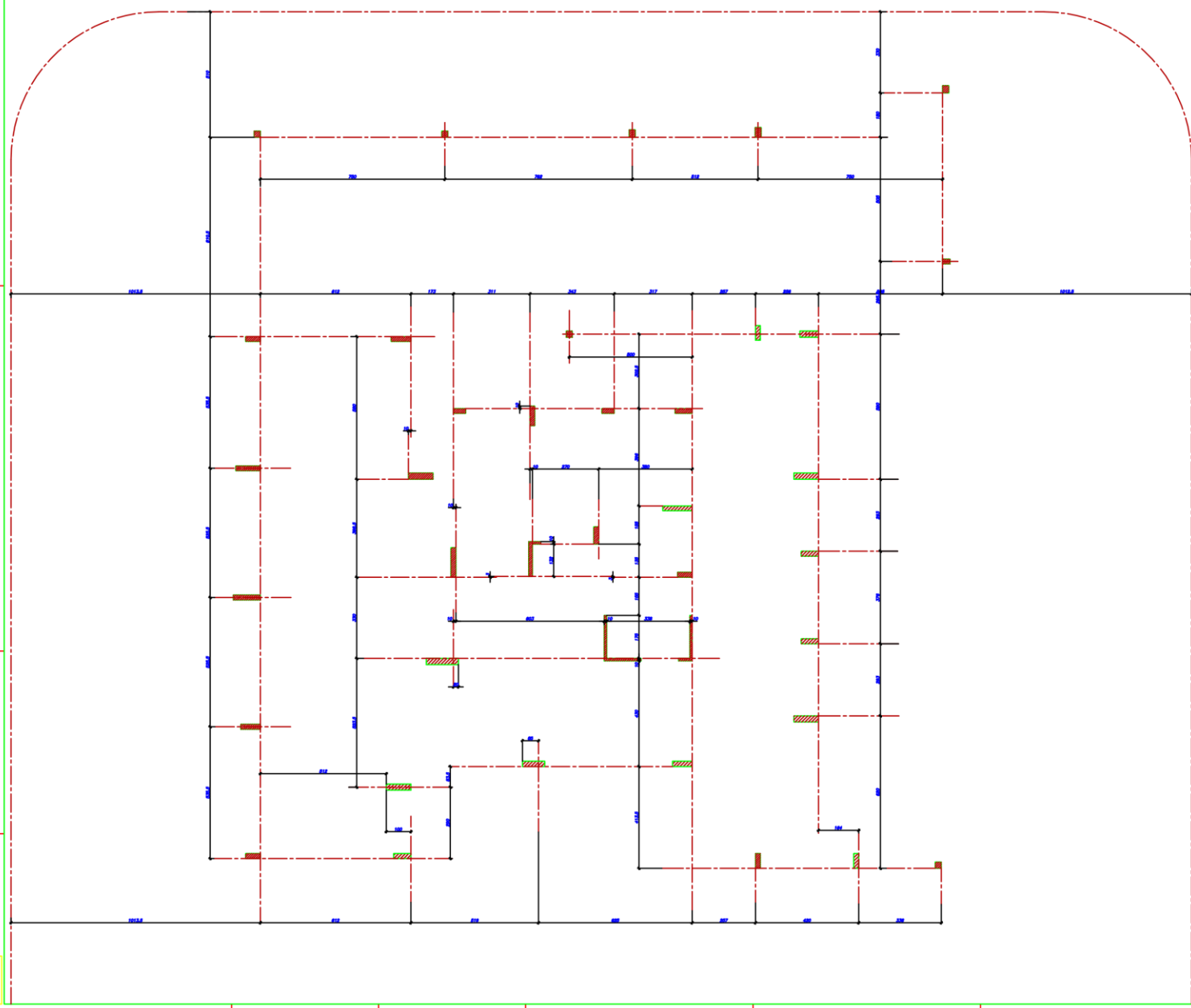


A

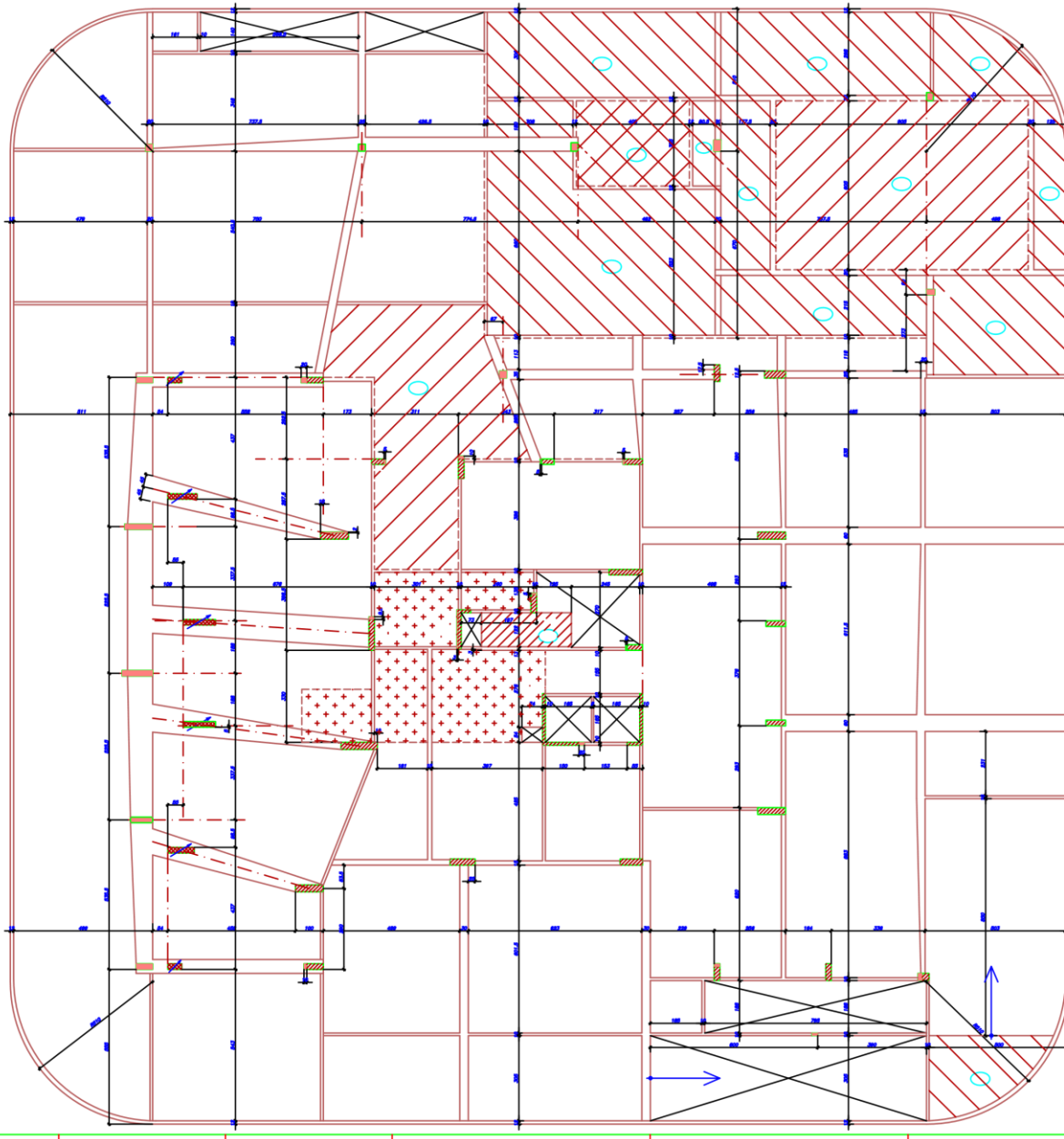


CORTE A-A

UFF - UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE		PPGEC



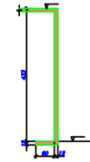
UFF - UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE		PPOEC	



MURO 1/MURO 3/MURO 4/MURO 6 - 12x332



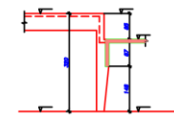
MURO 7 - 12x445



MURO 5 - 12x217



ELEVAÇÃO DO P46



UFF - UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE		PP/GECC





