

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

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DE REFORÇO DE GRUPO DE  
ESTACAS PELA INTRODUÇÃO DE ESTACAS ADICIONAIS**

**ARY FRANCK BAIA CORDEIRO**

**ORIENTADOR: RENATO PINTO DA CUNHA**  
**CO-ORIENTADOR: MAURÍCIO MARTINES SALES**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.DM – 155/07**

**BRASÍLIA / DF: MARÇO/2007**

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

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DE REFORÇO DE GRUPO DE  
ESTACAS PELA INTRODUÇÃO DE ESTACAS ADICIONAIS**

**ARY FRANCK BAIA CORDEIRO**

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

**APROVADA POR:**

---

**RENATO PINTO DA CUNHA, Ph.D. (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**MAURÍCIO MARTINES SALES, D.Sc. (UFG)  
(CO-ORIENTADOR)**

---

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, Ph.D. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**FAIÇAL MASSAD, D.Sc. (USP)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 28 DE MARÇO DE 2007**

## FICHA CATALOGRÁFICA

CORDEIRO, ARY FRANCK BAIA

Avaliação Numérica de Reforço de Grupo de Estacas pela Introdução de Estacas Adicionais (2007).

xvi, 118 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2007)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Grupo de Estacas

2. Radier Estaqueado

3. Métodos Numéricos

4. Reforço de Fundações

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CORDEIRO, A.F.B. (2007). Avaliação Numérica de Reforço de Grupo de Estacas pela Introdução de Estacas Adicionais. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-155/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 118p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Ary Franck Baia Cordeiro

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Avaliação Numérica de Reforço de Grupo de Estacas pela Introdução de Estacas Adicionais.

GRAU / ANO: Mestre / 2007

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

---

Ary Franck Baia Cordeiro  
CLN 412, Bloco C, Apto. 218 – Asa Norte  
CEP: 70867- 530– Brasília/DF - Brasil

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a Deus, razão da minha vida. Aos meus pais Aristeu e Helena, que sempre me apoiaram e acreditaram em mim; aos meus irmãos Júnior e Patrícia pelo incentivo e ajuda quando mais precisei; e a minha namorada Luciana por acreditar em mim.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus e ao Santo Expedito aos quais sou devoto e que nos momentos de solidão foram fontes de minha energia para continuar nesta caminhada.

A Universidade de Brasília, CAPES e CNPQ pela oportunidade e apoio financeiro.

A Universidade de Sidney pelos programas cedidos.

Ao Professor Renato Pinto da Cunha, pelos ensinamentos transmitidos, pela firmeza, objetividade, incentivo, cobrança, e principalmente pela amizade.

Ao Professor Maurício Martines Sales pela atenção, disponibilidade, amizade e valiosos ensinamentos durante a realização desta pesquisa.

Aos amigos Thania, Sandra e Fábio por todos os momentos difíceis e alegres, ao companherismo e por ter-mos conseguido ser uma família durante essa fase de nossas vidas, pois, estes serão eternos pra mim.

Ao amigo de todas as horas, Marcos Aires pelo apoio na universidade, no bar e na vida que muito me ensinou. A família Aires, pelo apoio logístico e familiar em Goiânia que foram indispensáveis para minha pesquisa.

A minha namorada Luciana pelas revisões e sugestões, além do incentivo e dedicação.

Aos amigos membros da Diretoria: Cássio, Daniel e Marcos.

Aos colegas de turma e de Geotecnia: Josi, Salomé, Lorena, Carmem, Petrônio, Tejada, Geovane, Raul, Alexandre Gil e Paulo Falcão.

## RESUMO

A presente dissertação faz uma revisão geral da evolução do uso do radier estaqueado, as diferenças deste tipo de fundação com os grupos estaqueados convencionais e como esta concepção é importante para avaliar o dano em uma obra. São apresentados os principais danos ocorridos nas fundações estaqueadas e alguns casos reportados na literatura sobre reforço de fundações, previsão de capacidade de carga e recalque. Comenta-se a respeito de dois programas computacionais desenvolvidos especialmente para estas fundações.

Alguns casos hipotéticos de grupos de estacas foram analisados, empregando-se um método misto e um programa em elementos finitos (3-D) para avaliar os comportamentos destes casos. Para os fatores de interação foram observadas algumas divergências entre os resultados obtidos por diferentes metodologias de cálculo, mostrando que se deve ter cuidado ao comparar estes resultados, pois, estes podem ter significativa influência nos resultados das análises.

Foram realizadas análises paramétricas para três grupos originais e destes foram analisadas várias configurações de dano e de reforço, este com propriedades similares e distintas das estacas originais, as quais objetivaram analisar a influência das diversas configurações apresentadas, assim como de cada componente do sistema. Estes resultados são analisados e comparados com as previsões feitas pelo método híbrido (GARP).

E finalmente foram apresentados os resultados das análises de capacidade de carga, de resposta carga x recalque do sistema de fundação e a parcela de carga absorvida por cada elemento de tal sistema nas três situações: grupo intacto, grupo danificado e grupo reforçado, baseados, também, nos fatores de segurança por cada estaca e dos fatores de segurança globais.

## **ABSTRACT**

A review of the evolution of the use of piled raft, the differences of this foundation type with the conventional pile groups and as it these conception is important to evaluate the damage in a foundation. The main damages happened in the foundations are presented and some cases moderated in the literature on reinforcement of foundations, forecast of bearing capacity and settlement. It is commented about two softwares developed especially for these foundations.

Some hypothetical cases of pile groups were analyzed, being used a mixed method and a program in finite elements (3-D) to evaluate the behaviors of these cases. For the interaction factors some were observed divergences among the results obtained by different calculation methodologies, showing that one should be careful when comparing these results, because, these can have significant influence in the results of the analyses.

Parametric analyses were accomplished for three original groups and of these several damage configurations were analyzed and of reinforcement, this with similar properties and different from the original piles, which aimed at to analyze the influence of the several presented configurations, as well as of each component of the system. These results are analyzed and compared with the forecasts done by the hybrid method (GARP).

It is finally presented the results of the analyses of load capacity were presented, of answer “load x settlement” of the foundation system and the portion of absorbed load for each element of the system in the three situations: the intact group, the damaged group and reinforced group, based, also, in safety factors for each pile and of the global safety factors.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1 – CONTEXTO GERAL.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 – OBJETIVOS DA PESQUISA.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.1 – Objetivo Geral.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.2 – Objetivos Específicos.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....</b>	<b>3</b>
<b>2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
<b>2.1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.1 – Sistema de Fundação.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.2 – Filosofia de Projeto.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.3 – Rigidez de Uma Estaca.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.4 – Rigidez ou Flexibilidade de um Bloco.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.5 – Fatores de Interação.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.6 – Fundações Defeituosas.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.7 – Reforço de Fundações Profundas.....</b>	<b>27</b>
<b>3 – METODOLOGIA DE ANÁLISE</b>	<b>29</b>
<b>3.1 – MODELAGEM DE BLOCOS DE ESTACA COM O PROGRAMA GARP.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2 – MODELAGEM DE BLOCOS DE ESTACA COM O PROGRAMA DEFPIG.....</b>	<b>32</b>
<b>3.3 – DEFINIÇÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS.....</b>	<b>33</b>
<b>3.3.1 – Parâmetros que Definem o Carregamento Aplicado.....</b>	<b>35</b>
<b>3.3.2 – Parâmetros que Definem a Fundação.....</b>	<b>37</b>
<b>3.3.3 – Parâmetros que Definem o Solo.....</b>	<b>38</b>
<b>3.4 – DISCRETIZAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS.....</b>	<b>39</b>



<b>3.5 – ANÁLISE PARAMÉTRICA.....</b>	<b>39</b>
3.5.1 – Grupos Intactos.....	39
3.5.2 – Grupos Danificados.....	42
3.5.3 – Reforço com Adição de Estacas.....	45
<b>4 – ANÁLISE DE REFORÇO DE GRUPOS DE ESTACAS</b>	<b>51</b>
4.1 – FATORES DE INTERAÇÃO.....	51
4.2 – GRUPOS DE 4 ESTACAS.....	56
4.2.1 – Grupo com as Estacas Intactas e Danificadas.....	56
4.2.2 – Reforço com Adição de Estacas.....	63
4.2.2.1 – Grupo Reforçado com Estacas Contendo Propriedades Similares.....	64
4.2.2.2 – Grupo Reforçado com Estacas Contendo Propriedades Distintas.....	71
4.3 – GRUPOS DE 3 ESTACAS.....	77
4.3.1 – Grupo Com as Estacas Intactas e Danificadas.....	77
4.3.2 – Reforço com Adição de Estacas.....	81
4.3.2.1 – Grupo Reforçado Com Estacas Contendo Propriedades Similares.....	81
4.3.2.2 – Grupo Reforçado Com Estacas Contendo Propriedades Distintas.....	87
4.4 – GRUPOS DE 6 ESTACAS.....	89
4.4.1 – Grupo com as Estacas Intactas e Danificadas.....	90
4.4.2 – Reforço com Adição de Estacas.....	97
4.4.2.1 – Grupo Reforçado com Estacas Contendo Propriedades Similares.....	98
4.4.2.2 – Grupo Reforçado com Estacas Contendo Propriedades Distintas.....	104
<b>5 – CONCLUSÕES</b>	<b>109</b>
5.1 – OBSERVAÇÕES GERAIS.....	109
5.2 – OBSERVAÇÕES ESPECÍFICAS.....	110
5.3 – CONCLUSÕES.....	112
5.4 – SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	113
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>114</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA</b>	<b>PÁGINA</b>
Tabela 4.1 – Fatores de Segurança dos vários níveis de dano – G4.....	61
Tabela 4.2 – Influência da variação do nível de dano.....	61
Tabela 4.3 – Fator de Segurança para o Grupo reforçado com propriedades similares – G4.....	70
Tabela 4.4 – Volume de concreto utilizado para reforço (Caso 3-G4).....	72
Tabela 4.5 – Porcentagem de acréscimo de momentos em relação ao grupo intacto.....	73
Tabela 4.6 – Acréscimo de carga na estacas 4.....	75
Tabela 4.7 – Fator de Segurança para grupo reforçado com propriedades distintas.....	75
Tabela 4.8 – Fatores de Segurança do Grupo danificado – G3.....	80
Tabela 4.9 – Fatores de Segurança para grupos reforçados com propriedades similares.....	86
Tabela 4.10 – Fatores de Segurança para grupos reforçados com propriedades distintas.....	89
Tabela 4.11 – Fatores de Segurança do grupo danificado na estaca 1.....	94
Tabela 4.12 – Fatores de Segurança do grupo danificado na estaca 3.....	96
Tabela 4.13 – Fator de Segurança para grupo reforçado com propriedades similares – G6.....	103
Tabela 4.14 – Fator de Segurança para grupo reforçado com propriedades distintas – G6.....	106

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
Figura 2.1 – - Radier estaqueado em argila de Frankfurt: (a) vista isométrica esquemática da fundação e superestrutura; (b) vista em planta (modificado de Sommer <i>et al.</i> , 1985).....	8
Figura 2.2 – Mecanismos de Interação em radiers estaqueados (modificado de Hain & Lee, 1978).....	20
Figura 2.3 – Distribuição da Tensões no fuste e na base das estacas de um grupo	22
Figura 2.4 – Exemplo de imperfeições. (a) Imperfeições “Naturais” (b) Imperfeições relativas à técnica construtiva (modificado - Poulos, 2005).....	24
Figura 2.5 – Exemplos de imperfeições devido à inadequada investigação (modificado - Poulos, 2005).....	24
Figura 3.1 – Parâmetros que definem o Carregamento.....	35
Figura 3.2 – Parâmetros que definem a fundação.....	37
Figura 3.3 – Parâmetros que definem o solo.....	38
Figura 3.4 – Malha de Elementos Finitos Discretizada.....	39
Figura 3.5 – Nós de um elemento.....	39
Figura 3.6 – Grupo de 3 estacas Intactas.....	40
Figura 3.7 – Grupo de 4 estacas intactas.....	41
Figura 3.8 – Grupo de 6 estacas intactas.....	42
Figura 3.9 - Estacas danificadas, comprimentos menores que de projeto.....	43
Figura 3.10 – Seções estudadas.....	44
Figura 3.11 – Configurações de reforço para o grupo de 4 estacas.....	46
Figura 3.12 – Configuração generalizada para o grupo 4 estacas.....	47
Figura 3.13 – Configurações de reforço para o grupo de 3 estacas.....	47
Figura 3.14 – Configuração generalizada para o grupo de 3 estacas.....	48
Figura 3.15 – Configurações de reforço para o grupo de 6 estacas.....	49
Figura 3.16 – Configuração generalizada do grupo de 6 estacas.....	49
Figura 4.1 – Análise dos fatores de interação.....	52
Figura 4.2 – Fatores de Interação.....	53
Figura 4.3 – Recalques Normalizados.....	53
Figura 4.4 – Momentos ao longo da placa.....	54

Figura 4.5 – Reação das Estacas.....	55
Figura 4.6 – Porcentagem de carregamento transferido ao bloco.....	55
Figura 4.7 – Geometria do problema do grupo de quatro estacas.....	56
Figura 4.8 – Comportamento do Grupo após o dano.....	57
Figura 4.9 – Momentos na área central da placa.....	58
Figura 4.10 – Momentos principais máximo.....	59
Figura 4.11 – Reação por estaca.....	60
Figura 4.12 – Porcentagem de carga no bloco.....	62
Figura 4.13 – Grupos Reforçados (a) Caso 1 (b) Caso 2 (c) Caso 3 (d) Caso 4 (e) Caso 5.....	65
Figura 4.14 – Deformações ao longo da placa.....	66
Figura 4.15 – Momentos em relação aos vários casos.....	67
Figura 4.16 – Numeração das estacas para reação destas.....	68
Figura 4.17 – Reação das novas configurações.....	68
Figura 4.18 – Porcentagem de carga aplicada no bloco.....	71
Figura 4.19 – Variações nas Propriedades de Reforço.....	72
Figura 4.20 - Momentos por adição do Reforço.....	73
Figura 4.21 - Configuração das Redistribuições das Cargas devido ao Reforço....	74
Figura 4.22 - Reação por estaca.....	74
Figura 4.23 - Porcentagem de carga transferida para estacas.....	76
Figura 4.24 - Grupo 3 estacas Intactas.....	78
Figura 4.25 - Comportamento do Grupo após o dano.....	78
Figura 4.26 - Momentos na área central da placa.....	79
Figura 4.27 - Reação por Estaca.....	79
Figura 4.28 - Percentagem de carga absorvida pelo bloco.....	80
Figura 4.29 - Grupos Reforçados (a) Caso 1 (b) Caso 2 (c) Caso 3 (d) Caso 4.....	82
Figura 4.30 - Deformações ao longo da placa em relação ao Grupo Intacto.....	83
Figura 4.31 - Momentos em relação aos vários casos.....	84
Figura 4.32 - Numeração das estacas para reação destas.....	84
Figura 4.33 - Reação das novas configurações.....	85
Figura 4.34 - Porcentagem de carga transferida ao bloco.....	86

Figura 4.35 - Comportamento em relação aos Recalques Normalizados.....	87
Figura 4.36 - Momentos ao longo da placa.....	87
Figura 4.37 - Reações por estaca.....	88
Figura 4.38 - Porcentagem de carga transferida ao bloco.....	88
Figura 4.39 - Parâmetros que definem a geometria do problema (Grupo 6 estacas).....	90
Figura 4.40 - Grupo 6 estacas Intactas.....	90
Figura 4.41 - Corte Seção Transversal estudada.....	91
Figura 4.42 - Comportamento do Grupo após o dano na estaca 1.....	91
Figura 4.43 - Comportamento do Grupo após o dano na estaca três.....	92
Figura 4.44 - Momentos devido ao dano da estaca 1.....	93
Figura 4.45 - Momentos devido ao dano na estaca 3.....	93
Figura 4.46 - Comportamento de Reação com dano na estaca 1.....	94
Figura 4.47 - Carregamento do bloco com estaca 1 danificada.....	95
Figura 4.48 - Comportamento de reação com dano na estaca 3.....	95
Figura 4.49 - Porcentagem de carga devido ao dano da estaca 3.....	97
Figura 4.50 - Grupos Reforçados (a) Caso 1 (b) Caso 2 (c) Caso 3 (d) Caso 4.....	100
Figura 4.51 - Deformações ao longo da placa em Relação aos Reforços utilizados.....	100
Figura 4.52 - Momentos em relação aos vários casos.....	101
Figura 4.53 - Numeração das estacas para reação do grupo generalizado.....	102
Figura 4.54 - Reação das novas configurações.....	102
Figura 4.55 - Porcentagem de carga transferida para o bloco.....	104
Figura 4.56 - Variações nas Propriedades de Reforço em Relação ao Grupo Intacto.....	104
Figura 4.57 - Momentos por adição do Reforço.....	106
Figura 4.58 - Configuração das redistribuições das cargas devido ao reforço.....	106
Figura 4.59 - Reação por estaca no grupo reforçado com propriedades distintas – G6.....	106
Figura 4.60 - Porcentagem de carga transferida no bloco – G6.....	108

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Área
a	dimensão do bloco em uma determinada direção
$A_b$	Área da base
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ap	dimensão do pilar na mesma direção
B	Menor dimensão do bloco
c	coesão do solo
c'	Coesão efetiva
cm	Centímetro
D	diâmetro da estaca
DEFPIG	<i>Deformation Analysis of Piles Groups</i>
$E_c$	Módulo de elasticidade do concreto
$E_s$	Módulo de Elasticidade do solo
$f_{ck}$	Resistência do concreto característica de projeto
FS	Fator de Segurança
g	Grama
$g/cm^3$	Gramas por centímetro cúbico
GARP	<i>Geotechnical Analysis of Raft with Piles</i>
$I_z$	recalque normalizado
kg	Quilograma
kgf	Quilograma força
$kgf/cm^2$	Quilograma força por centímetro ao quadrado
kN	Quilo Newtons
$kN/m^3$	Quilo Newtons por metro cúbico
KP	Nova rigidez da estaca, correspondente ao nível de carregamento
kPa	Quilo Pascal
$K_R$	rigidez de um radier

$K_0$	Coefficiente de empuxo no repouso
$KP_0$	Rigidez inicial da estaca
$l$	Largura do bloco
$L$	Comprimento da estaca
$m$	Metro
$mm$	Milímetro
$m^3$	Metro cúbico
$MPa$	Mega Pascal
$N$	número de estaca sob o bloco
$N_{SPT}$	Número de golpes necessários à cravação do amostrador SPT
$NBR$	Norma brasileira
$N_C, N_\gamma, N_q$	fatores de capacidade de carga
$P$	Carregamento aplicado
$P_{adm}$	Capacidade de carga admissível
$P_{m\acute{a}x}$	Carga máxima
$P_{ult}$	Carga última
$P_{total}$	Capacidade de carga de ponta mais capacidade de carga lateral
$P_{trab}$	Carga de trabalho
$PIT$	Pile Integrity Test
$P_k, P_l$	cargas aplicadas no topo das estacas $k$ e $l$ , respectivamente
$PL$	Carga por atrito lateral
$q$	carga uniformemente distribuída
$R$	Raio da estaca
$RF1$ e $RF2$	Parâmetros hiperbólicos para permitir um melhor ajuste à resposta da estaca
$R_C$	raio equivalente do radier/bloco
$K_C$	rigidez do bloco
$K_F$	rigidez do sistema de fundação
$K_P$	rigidez da estaca

$R_p$	raio da estaca
$r_m$	raio de influência da estaca na formulação de Randolph
$r_C$	razão entre a fração do raio do radier equivalente por estaca e o raio de uma estaca
$r_0$	raio da estaca
$S_C, S_\gamma$ e $S_q$	fatores de forma
SRE	Sistema de Radier Estaqueado
SPT	Sondagem de simples reconhecimento à percussão
$t$	altura do bloco
$\alpha_{cp}$	Fatores de interação entre a(s) estaca(s) e o bloco
$\alpha_{kl}$	fator de interação entre as estacas k e l
$\gamma$	Peso específico do solo
$\gamma_w$	Peso específico da água
$\rho_l$	deslocamento sob carga unitária de uma estaca isolada idêntica às que formam o grupo
$\varphi$	ângulo de atrito interno
$\sigma_v$	Tensão vertical
$\phi$	Ângulo de atrito do solo
$\phi'$	Ângulo de atrito efetivo do solo
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\sigma$	Tensão total
$\sigma'$	Tensão efetiva
$\zeta$	fator de geometria



## INTRODUÇÃO

### 1.1. CONTEXTO GERAL

Em anos recentes se tem visto grandes avanços no entendimento da interação entre as estacas de um grupo estaqueado e o solo circundante que em anos anteriores não eram incluídas nos projetos.

Os projetos de uma fundação estaqueada eram geralmente baseados na capacidade aproximada para assegurar que a carga estrutural total possa ser suportada somente pelas estacas, com adequado fator de segurança, embora esta aproximação seja indevidamente conservadora, especialmente nos casos em que o bloco sem estacas é suficiente para garantir um satisfatório nível de segurança. Contudo, é comum para engenheiros de muitos países esta concepção, considerada como prática geral, de não utilização do bloco como elemento participante da fundação.

Com o desenvolvimento deste tipo de sistema fundação, procurou-se utilizar este conceito para casos de estacas danificadas, que podem ser parcialmente ou totalmente introduzidas durante a execução da obra, tanto para as estacas pré-moldadas quanto as moldadas *in loco*.

Há várias circunstâncias nas quais o movimento do solo influencia significativamente no comportamento das estacas que com freqüência tem sido negligenciado ou não reconhecido, e estão causando excessivas deformações nas fundações e possível dano estrutural para o sistema.

As várias hipóteses alternativas de reforço são passíveis de maior crítica dos especialistas em mecânica dos solos. O afastamento entre o comportamento real e o suposto é variável com o tipo de solo e os resultados obtidos com a teoria elástica, devendo ser encarado como ordem de grandeza sem pretender extrair uma precisão que não possui.

Identificar a influência que os diferentes tipos de dano têm sobre o comportamento do conjunto, e como a ação do grupo é modificada quando uma ou mais estacas estão danificadas, são intuits desta pesquisa. Para isto será utilizada a metodologia e ferramental numérico desenvolvido para tipos de fundação em “radier estaqueado”.

Diagnosticado o problema, soluções devem ser elaboradas para procurar resolvê-lo ou minimizá-lo. Porém, devido à complexidade do mesmo, muitos profissionais procuram solucioná-lo sem o conhecimento necessário do comportamento das partes que formam o sistema, como, por exemplo, quando consideram que todo carregamento é suportado somente pelas estacas.

A presente pesquisa procurou apresentar a análise de comportamento de grupos de estacas, possuindo algumas intencionalmente danificadas, além de mostrar algumas propostas de reforço para este grupo em diferentes situações.

## 1.2. OBJETIVO DA PESQUISA

### 1.2.1. Objetivo geral

- Avaliar numericamente o reforço de grupos de estacas pela introdução de estacas adicionais.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Iniciar linha de pesquisa na área de reforço e remediação de fundações profundas;
- Avaliar o comportamento de grupo de estacas em que algumas destas estejam danificadas;
- Avaliar reforço do grupo com a inclusão de estacas adicionais;
- Avaliar ferramentas numéricas simplificadas capazes de simular, de maneira aproximada, o problema de bloco estaqueado, em especial o reforço de fundações em problemas de danos pré-existentes;
- Propor melhorias ou adaptações de métodos de reforço de grupos estaqueados.

## 1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta pesquisa foi estruturada em cinco capítulos. O **Capítulo 1** apresenta o contexto geral da evolução do uso do radier estaqueado, as diferenças deste tipo de fundação com os grupos estaqueados convencionais e como esta concepção é importante para avaliar o dano em uma obra. Os objetivos geral e específicos desta dissertação também são apresentados neste capítulo, juntamente com a estrutura da pesquisa.

No **Capítulo 2** apresenta-se uma revisão bibliográfica das características gerais do sistema radier estaqueado, do seu comportamento e a influência de cada componente no sistema. Um breve histórico da evolução da concepção de projeto e metodologias consagradas de análises são descritos ainda neste capítulo. Por fim, são apresentados os principais danos ocorridos nas fundações estaqueadas e alguns casos reportados na literatura sobre reforço de fundações, juntamente com sua previsão de capacidade de carga e recalque.

O **Capítulo 3** descreve a metodologia numérica adotada na realização de análises

paramétricas, a qual objetiva analisar a influência das diversas configurações apresentadas, tal como de cada componente do sistema. A ferramenta numérica é descrita, mostrando detalhadamente seus parâmetros de análises, modelo e simplificações, e sua utilização por diversos autores.

O **Capítulo 4** apresenta os resultados das análises, para os grupos hipotéticos de 3, 4 e 6 estacas com diversas configurações de níveis de danos demonstrando a relevância da redistribuição das cargas nestes grupos. Por fim, foram apresentadas algumas alternativas de reforços que podem ser tomadas ou evitadas, mostrando em que localização deve ser executada para que se tenha um comportamento mais favorável do grupo, e quais características este novo elemento deve conter.

Finalmente, o **Capítulo 5** relata as principais observações e conclusões oriundas das avaliações e análises realizadas nesta pesquisa, incluindo também algumas sugestões para pesquisas futuras.

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. INTRODUÇÃO

Em consequência do crescimento urbano e a necessidade de se construir obras de grande porte em áreas já congestionadas, surge o desenvolvimento de novas concepções de projeto e a utilização de alternativas para atender as exigências ou desafios técnicos e econômicos (Bacelar, 2003).

É fundamental conceber um projeto de fundações que além de propiciar a segurança da edificação possa também contemplar a otimização dos espaços. Havendo situações nas quais somente os sistemas de fundações rasas não se apresentam como alternativas viáveis ou eficientes quanto aos critérios de capacidade de carga ou de recalques admissíveis, gerando-se, desta forma, a necessidade de acoplar estacas àqueles elementos superficiais (Poulos, 2001).

Nas últimas décadas estes conceitos de fundações superficiais melhoraram com a introdução dos elementos de fundações profundas, tipicamente com estacas, e por essa razão, são denominados “radier/bloco estaqueado” (Katzenbach & Turek, 2005).

O bloco nesse sistema de fundação tem adequada capacidade de carga e, a partir de então, o principal objetivo da introdução dessas estacas é o de controlar ou minimizar os recalques médios ou diferenciais do sistema de fundação (Randolph, 1994).

Esta metodologia também possui grande aplicabilidade nos lugares com solos superficiais de baixa capacidade de suporte e alta compressibilidade, em que é dificultado o uso de fundações

rasas, daí a necessidade de se explorar alternativas de projetos que venham suprir tanto a necessidade de capacidade de carga, quanto à de recalques diferenciais e elevados, com um menor custo e melhor critério técnico (Katzenbach *et al.*, 1997; Sales, 2000; Tan *et al.*, 2004 e El-Mossallamy, 2006). Tradicionalmente, o termo bloco de estacas se refere à forma clássica de fundação, em que somente as estacas são responsáveis por absorver e transferir ao solo todo o carregamento aplicado às fundações, tendo o bloco apenas o papel estrutural de ligar as estacas (Katzenbach *et al.*, 1994).

A consideração do contato do bloco com o solo em um grupo de estacas chamou a atenção de pesquisadores para as possíveis vantagens da associação de mais de um tipo de fundação para compor o sistema. Vale ressaltar que este tipo de sistema propicia uma grande economia em relação às formas tradicionais de fundação e ainda conta com um desempenho ideal quanto à capacidade de carga e recalques.

A utilização do conceito de estacas com a função de suportar carga e não apenas como “elementos redutores de recalque”, vêm ganhando espaço entre as pesquisas na área de fundações. Novos estudos estão sendo feitos explorando as vantagens da associação de um elemento superficial de fundação com certo número “ótimo” de estacas.

Desta maneira, o maior questionamento é como projetar as estacas numa configuração “ótima” para controlar os recalques (Randolph, 1994). Uma abordagem mais eficiente seria adequar o posicionamento das estacas sob a área central do bloco, bem como avaliar suas propriedades, físicas e geométricas, para que estas tenham um melhor desempenho no conjunto.

Alguns estudos utilizam uma nova metodologia de cálculo de projeto, em que se avalia o comportamento do conjunto, bloco mais as estacas, e ambos contribuem com a capacidade de carga do sistema, a fim de se obter obras mais econômicas. Conhecidas como fundação “mista” também se denomina aqui de “radier estaqueado”, embora esta filosofia de comportamento seja distinta da originalmente proposta para sistemas de fundação com tais características.

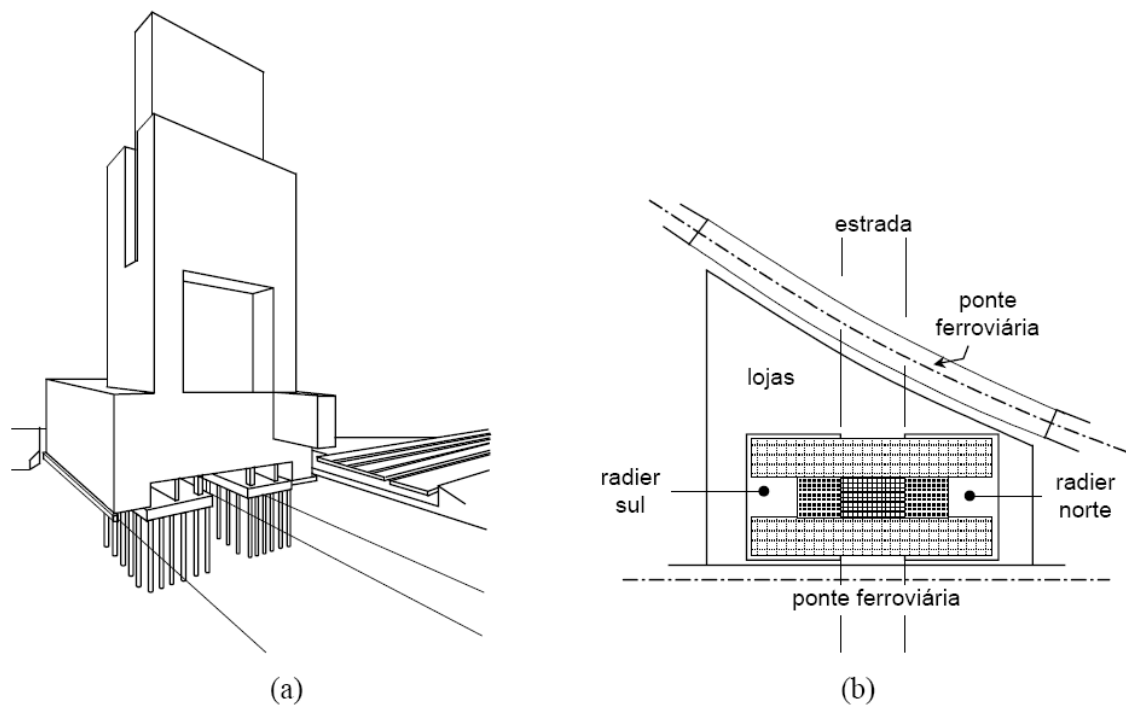
Outra questão que pede uma maior atenção tem sido o desenvolvimento de um modelo analítico para o grupo de estacas, que resultaram em numerosos estudos paramétricos para

investigar a influência da geometria do sistema e das condições do solo no comportamento deste tipo de fundação. Ensaio de campo e em laboratório têm proporcionado bons entendimentos sobre o comportamento de radiers estaqueados e grupos de estacas convencionais. Adicionalmente, existem casos históricos em que extensivas medições de campo foram feitas, e que também são usadas para melhor conhecimento deste tipo de infraestrutura (Tan *et al.*, 2005; Quick *et al.*, 2005; Stephan & Saxena, 2003; El-Mossallamy *et al.*, 2003).

A utilização de blocos estaqueados exige o desenvolvimento e o aprimoramento de métodos de análise e previsão de comportamento da fundação, que levam em consideração os diversos e complexos mecanismos de transferência de carga e de interação entre os elementos que compõem a fundação, incluindo a ação do bloco, da estaca (isolada e em grupo) e do solo circundante.

Na maioria dos casos, o objetivo principal de se estaquear uma fundação é limitar o recalque, particularmente o recalque diferencial, que é um dos principais fatores causadores de danos estruturais.

Este tipo de sistema de fundação já vem sendo utilizado em alguns países, principalmente na Europa, para suportar uma grande variedade de estruturas como superestruturas de pontes, edifícios e plantas industriais de grande porte. Sendo atualmente reconhecido como uma alternativa econômica à utilização de uma fundação convencional totalmente estaqueada (El-Mossalamy & Franke, 1997), Figura 2.1.



**Figura 2.1 - Radier estaqueado em argila de Frankfurt: (a) vista isométrica esquemática da fundação e superestrutura; (b) vista em planta (modificado - Sommer *et al.*, 1985).**

A fundação quando calculada de maneira tradicional como um “bloco de estacas”, ou seja, onde somente as estacas seriam responsáveis por transferir os esforços ao solo, levaria a carregamentos bastante elevados e em alguns casos inaceitáveis para as estacas da periferia do “bloco”. Entretanto, a análise da fundação, dentro de um enfoque de “radier estaqueado”, pode mostrar que uma parcela da carga poderia ser absorvida pelo contato do radier com o solo, e a interação entre todos os elementos do sistema de fundação implicaria numa redução das cargas previstas para as estacas periféricas e dos esforços internos. Além disso, os diversos fatores que influenciam no comportamento do conjunto, como a posição e quantidade de estacas, podem atingir eficiências elevadas para este sistema quando comparadas com os sistemas “tradicionais”.

Na concepção tradicional de projeto de grupos de estacas, o número de estacas é encontrado dividindo-se o carregamento total pela capacidade de carga de trabalho individual da estaca, buscando-se garantir um fator de segurança mínimo (“médio”) igual a dois para todas as estacas. Quando se analisa a influência da rigidez do bloco, mas ainda dentro da concepção tradicional, geralmente encontram-se carregamentos mais elevados nas estacas periféricas, o que, em muitos projetos, leva a um aumento do número de estacas para se garantir um fator de segurança (FS) mínimo de dois a todas as estacas (Sales *et al.*, 2002).



Na metodologia de radier estaqueado busca-se encontrar uma configuração de estacas ligadas a um elemento horizontal que assegure níveis de carga de trabalho, recalques total e diferenciais para o conjunto, não se preocupando, entretanto, com a carga atuante em uma estaca em particular. Assim, é muito freqüente a situação em que uma ou mais estacas estejam suportando carregamentos próximos ou iguais ao valor último de resistência da estaca, mesmo estando o sistema de fundação, como um todo, com um FS aceitável.

A utilização de estacas para reduzir os recalques totais ou diferenciais vem se propagando no meio técnico, o que leva a elaboração de projetos mais arrojados, que proporcionam maior economia no projeto final de fundação e, portanto, da própria construção, sem afetar significativamente a segurança e eficiência dos sistemas de fundação (Poulos, 2001).

No projeto de um radier estaqueado, as estacas normalmente têm sido dispostas uniformemente como num grupo de estacas embora algumas regras intuitivas tenham sido propostas para reduzir os recalques diferenciais. Kim *et al.* (2001) apresentaram uma técnica de otimização para a distribuição das estacas com o objetivo de reduzir os recalques diferenciais de um radier estaqueado. Nessa técnica, os diâmetros, comprimentos e número de estacas são pré-definidos, enquanto a posição das mesmas no radier é determinada por um processo de otimização.

Nas últimas décadas vários pesquisadores necessitaram de uma melhor compreensão de como seria o comportamento de uma fundação que envolvesse estacas e também uma parte superior horizontal em contato com a camada superficial do terreno. O estímulo inicial deste interesse era saber qual o papel do bloco na resposta carga-recalque de um grupo de estacas, uma vez que o bloco de ligação do mesmo estava em contato com o solo.

Com isso, a análise isolada do comportamento de cada elemento estrutural deixou de ser realizada, voltando-se agora para uma avaliação do sistema como um todo, onde os efeitos de interação bloco-estaca-solo são tratados simultaneamente a fim de obter uma melhor modelagem e resposta do problema.

Nos projetos convencionais de fundação profunda, a contribuição dos blocos na transferência das cargas ao solo tem sido totalmente desprezada, assim como sua capacidade de suporte, e utilizada somente para transferir carga para as estacas (Katzenbach *et al.*, 1997).

A maior eficiência (também originada pela contribuição do bloco em contato com o solo) do sistema de grupo de estacas quando comparado com o grupo de estacas tradicional vem proporcionando o seu crescente uso nos projetos de fundações profundas. Porém, a eficiência dos sistemas estaqueados não está diretamente ligada ao número de estacas sob o mesmo.

Discussões sobre a vantagem do emprego da metodologia de radier estaqueado foram feitas em diversos artigos, como em Poulos, (1998), Cunha *et al.*, (2000), Sales, *et al.*, (2001), entre outros.

Vários trabalhos (Fleming, 1991; Clancy & Randolph, 1994 e Poulos, 2001) já demonstraram que a existência de um número ótimo de estacas leva este sistema de fundação estaqueada a trabalhar em condições ideais de segurança e eficiência. Entretanto, estes trabalhos foram realizados sobre circunstâncias não comuns na prática de projeto de fundações, tais como: solos homogêneos, carregamentos verticais e horizontais, tratados isoladamente, o que faz com que ainda haja algumas dúvidas quanto ao funcionamento desse sistema, principalmente pela pouca divulgação de seus princípios de comportamento e análise.

Estas condições ideais de segurança e eficiência também devem ser levadas em consideração mesmo quando, por questões geológicas ou estruturais, um ou mais membros deste grupo encontram-se em situação inadequada de utilização. Devendo ser avaliada a nova redistribuição dos carregamentos neste grupo, com participação de todos os elementos verticais e horizontais, avaliando a necessidade ou não de reforço no sistema.

Os reforços de fundação representam uma intervenção no sistema solo-fundação-estrutura existentes, visando modificar seu desempenho. Tal intervenção faz-se necessária nos casos em que as fundações existentes se mostrem inadequadas para o suporte das cargas atuantes.

Sendo necessário reforçar, dentre outros casos, quando ocorrer um aumento no carregamento e este novo valor não puder ser absorvido sem riscos e reduções consideráveis nos coeficientes de segurança, ou ainda, quando alguns de seus membros, se tratando de grupos de estacas, encontram-se parcial ou totalmente danificados.

Vários fatores podem ser causadores do mau desempenho de uma fundação, como por

exemplo, a má qualidade das investigações geotécnicas (quando existir investigação), má interpretação dos resultados destas investigações, qualidade da execução, alteração da carga atuante, entre outros. Destacando-se ainda que esses desempenhos inadequados possam ser causados por um único fator ou pela combinação de dois ou mais fatores.

O relato de casos de patologia tanto em obras de grande porte como de pequeno porte não é freqüente, chegando a conhecimento público somente os casos catastróficos, o que dificulta uma avaliação quantitativa da real extensão do problema.

Neste trabalho o termo “grupo de estacas” será adotado para definir que o bloco de ligação entre as estacas está em contato com o solo, fazendo assim o papel de elemento superficial da fundação, participando da distribuição de carga ao solo.

## **2.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

### **2.2.1 Sistema de Fundação**

Na presente pesquisa será adotado o conceito de sistema de fundação, o qual se pode definir como a associação final criada pela união dos elementos estruturais e o próprio solo que os circunscribe. Em que cada um destes elementos interage com os outros e com o próprio solo em questão.

A interação entre os elementos da infra-estrutura e o solo circunvizinho exige uma visão integrada dos diferentes materiais que compõe um sistema, ou seja, sistemas estruturais mais sistemas geotécnicos ou maciço de solo. Sendo o maciço de solo um conjunto formado por um certo número de elementos ocupando continuamente o espaço físico delimitado pela superfície do terreno e a superfície do indeslocável (Aoki & Cintra, 1996).

Uma das vantagens em considerar a interação solo-estrutura são as possibilidades de estimar os efeitos da redistribuição de esforços nos elementos estruturais, a forma e a intensidade dos recalques diferenciais, tornando os projetos mais eficientes e confiáveis (Iwamoto, 2000).

O termo “bloco estaqueado” ou “radier estaqueado” será empregado para definir a fundação composta por um bloco associado a uma ou mais estacas, para suportar os esforços de um dos pilares de uma obra.

Será considerado o contato do bloco com o solo, ou seja, fazendo assim o papel de elemento superficial de fundação. Neste trabalho será utilizado o conceito de que ambos os elementos, tanto o bloco quanto as estacas possuem capacidade de carga, e que o fator de segurança adotado é o global do sistema (bloco mais estacas).

A transferência das cargas estruturais ao solo se faz por três formas: pela base do elemento horizontal, como nas fundações superficiais, e também ao longo do fuste e da ponta do elemento vertical, como em fundações profundas.

Esse tipo de solução para a fundação é adotado quando a capacidade de carga de suporte do terreno para fundações superficiais é de qualidade razoável, mas os recalques totais e diferenciais esperados possam ser elevados. A introdução de algumas estacas sob o bloco tem como objetivo reduzir os valores de recalques a níveis aceitáveis, além de participar do conjunto de reações de carga.

Na maioria dos casos em que as estacas formam parte da fundação para prédios e outras estruturas, a primeira razão para a inclusão das estacas será a de redução dos recalques. No entanto, mais recentemente Cunha *et al.* (2006) expandiram o termo de radier estaqueado para qualquer fundação em que haja em projeto a previsão de “divisão” de carga entre o bloco e as estacas. Embora esta não seja a filosofia original de radier estaqueado, o princípio de comportamento do sistema é idêntico ao “original”.

### 2.2.2. Filosofias de Projeto

Podem ser consideradas três filosofias de projeto para radier estaqueado (Randolph, 1994):

- Convencional: o termo “convencional” abordado é para a fundação projetada em que a carga da superestrutura é transmitida para o topo das estacas e em seguida diretamente ao solo, sem participação do bloco;
- *Creep Piling*: são projetos nas quais as estacas são usadas para que na carga de trabalho, suportem entre 70 a 80% de sua capacidade máxima de carga. Portanto, alguma deformação plástica devendo ser notada;
- Controle de Recalques Diferenciais: nesta forma de projeto, poucas estacas são utilizadas e estrategicamente posicionadas, em geral na região central da fundação, a fim de

reduzir ou anular os recalques diferenciais.

Comparando com as tradicionais fundações estaqueadas (grupo de estacas) em que a carga da superestrutura é admitida ser transferida para o solo somente pelas estacas, as fundações de radier estaqueado refletem uma nova abordagem de cálculo, mais complexa, porém mais econômica do ponto de vista executivo. Desta forma, a porção de carga entre a estaca e o radier é considerada e a capacidade de carga do conjunto das estacas é igual ou maior que a capacidade de carga das estacas isoladas (Katzenbach & Turek, 2005).

O aumento de técnicas analíticas de fundações estaqueadas tem, permitido de modo crescente, sofisticados e econômicos projetos, fazendo com que o número total de estacas possa ser minimizado. Mandolini (2003) discute regras simples para decompor a carga última vertical entre o radier estaqueado e a carga última de seus componentes, como são obtidos pela teoria de capacidade de carga convencional.

Sales *et al.* (2002), apresentaram comparações entre alguns aspectos do dimensionamento tradicional de “Blocos de Estacas” com uma forma diferente de considerar todo o sistema de fundação, como um “Radier Estaqueado”, em que se considera o contato solo-bloco e todos os efeitos que este contato traz às interações entre os elementos de fundações envolvidos. Apresentaram ainda, a otimização dos valores máximos estimados para a segunda metodologia que confirmam a economia desta óptica de cálculo.

A abordagem conservativa surge devido a limitações de conhecimento para a interação do grupo de estacas, bloco, o solo, e a incomum metodologia de validação de análises para esse complexo problema tridimensional. Conseqüentemente, abordagens convencionais geralmente resultam em instalação de mais estacas que o necessário, que automaticamente tende a menores níveis de recalques totais que poderia ser suportado pela estrutura.

Em projetos de estaqueamento tradicional, o número de estacas é geralmente decidido em termos de capacidade de carga requerida. Neste caso, o comportamento do sistema de fundação geralmente continua essencialmente em regime elástico, com as estacas distribuídas uniformemente sob a área de fundação, e carregam bem abaixo de sua capacidade última.

Em outro extremo, a fundação superficial é calculada com suficiente capacidade de carga para

suportar o carregamento requerido, mas nem sempre ocorre, e desta forma somente umas poucas estacas serão incluídas para reduzir o nível de recalque diferencial. Estas estacas podem ser carregadas em sua capacidade última, vindo a servir para reduzir as pressões de contato e, por esta razão, os recalques máximos que são maiores na parte central do radier (Randolph & Clancy, 1994).

Burland *et al.* (1977) sugerem que o espaçamento entre as estacas em um grupo poderia ser maior, levando a um pequeno número de estacas que é requerido para reduzir os recalques do radier, a níveis razoáveis. Estes recalques, no entanto, podem ser suficientes para mobilizar a capacidade completa das estacas.

Padfield & Sharrock (1983) também discutiram um projeto econômico para o sistema de radier estaqueado que faz uso de estacas como redutores de recalque. Eles sugeriram que uma resposta rígida deva ser considerada para as estacas centrais do radier, e uma resposta menos rígida para as da periferia.

O uso de grupo de estacas somente na área central para um radier flexível foi proposto por Fleming *et al.* (1985) e Randolph (1994). Randolph sugeriu que uma flexibilidade relativa do radier poderia minimizar os recalques diferenciais. Isso pode ser alcançado pela instalação de um pequeno grupo de estacas na área central do radier, reduzindo a pressão de contato naquela zona.

Em virtude da complexidade das condições de contorno local, não é fácil desenvolver empiricamente uma metodologia de projeto para as “estacas redutoras de recalque” que possa ser aplicado em locais distintos (Horikoshi & Randolph, 1996). Mas, devido a recentes desenvolvimentos a respeito das abordagens numéricas, têm surgido informações detalhadas a respeito do comportamento da fundação de radier estaqueado.

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

da interação da estrutura (Hain & Lee, 1978).

A abordagem de projeto via radier estaqueado depende da estimativa para recalque, primeiramente sem estacas e, em seguida, com uma variação do número de estacas abaixo do radier. O cálculo do provável recalque para a estrutura é sempre árduo para se estimar com precisão, devido às propriedades de deformação não lineares do solo e também devido à falta de investigação de campo e ensaios laboratoriais para estimativa da rigidez do solo inalterado.

Com os avanços das técnicas de ensaios em campo e em laboratório, essa dificuldade será reduzida. Adicionalmente conta-se atualmente com a ajuda via retro-análise do monitoramento de estruturas em verdadeira grandeza.

Outra dificuldade com o projeto de radier estaqueado é a necessidade de métodos analíticos diretos para se estimar o comportamento do sistema, indo para idealizações mais simplistas como o solo elástico ou elástico perfeitamente plástico. De modo dispersos, as estacas abaixo do radier levam a um problema com relação a altos valores da curva de momento (Randolph, 1983).

Dentre outras vantagens o Sistema de Radier Estaqueado, apresentam-se:

- Redução para os recalques diferenciais;
- Aumento de estabilidade global da infraestrutura, e;
- Otimização de custo de toda a fundação.

Katzenbach *et al.* (2006) apresentam o desenvolvimento de projetos de fundações profundas, especialmente os SREs (Sistemas de Radiers Estaqueados) devido à sua economia e segurança. O projeto para um SRE necessita de um pouco mais de esforço do engenheiro em termos de cálculo computacional, mas reduz o tempo de construção e material. Com o conceito de SRE, a fundação de um edifício pesado (alto), até mesmo em subsolo difícil, é possível de maneira mais econômica.

Mandolini (2003) apresentou algumas diretrizes para dar suporte aos engenheiros na seleção de um procedimento de projeto apropriado, que garante em termos ótimos, um comportamento satisfatório de segurança e de custo, que leva em consideração a capacidade última das estacas em função do tamanho do bloco. E que depois de fixado o requisito de

comportamento para a fundação é possível definir um valor crítico para a largura do radier e conseqüentemente selecionar um projeto apropriado.

### 2.2.3. Rigidez de uma Estaca e Fundações Estaqueadas

Entende-se por rigidez da fundação a relação entre a carga aplicada ao elemento de fundação e o deslocamento nele produzido.

Em um problema de fundações mistas um dos objetivos a serem alcançados é basicamente a determinação das rigidezes do conjunto.

Randolph (1983) propôs um processo que considera separadamente a rigidez do grupo de estacas e a rigidez do bloco, como mostra a Eq. 2.1. Esse método baseia-se na utilização de fatores de interação entre a (s) estaca (s) e o bloco,  $\alpha_{cp}$ .

A rigidez da fundação é dada por:

$$K_F = \frac{R_p + R_c(1 - 2\alpha_{cp})}{1 - \alpha_{cp}^2 \frac{K_c}{K_p}} \quad (2.1)$$

Sendo,

$$\alpha_{cp} = \frac{\ln(r_m/r_c)}{\ln(r_m/r_0)} = \frac{1 - \ln(r_c/r_0)}{\zeta} \quad (2.2)$$

Onde:

$K_F$ : é a rigidez do sistema de fundação;

$K_p$ : é a rigidez da estaca;

$K_c$ : é a rigidez do bloco;

$\alpha_{cp}$ : é o fator de interação entre as estacas e o bloco;

$R_p$ : é o raio da estaca;

$R_c$ : é o raio equivalente do radier/bloco;

$r_m$ : é o raio de influência da estaca, definido como sendo a distância a partir do seu eixo onde a deformação cisalhante do terreno pode ser considerada praticamente nula;



$r_c$ : a razão entre o raio do radier equivalente por estaca e o raio de uma estaca.

$r_0$ : é o raio da estaca;

$\zeta$ : pode ser expresso como um fator de geometria;

Essas expressões são válidas somente para solos tipo Gibson que apresentam módulos de cisalhamento e elástico crescendo linearmente com a profundidade. O parâmetro é dado por  $\ln(r_m/r_0)$ . De maneira geral a Eq. 2.3 mostra:

$$r_m = \{0,25\mu + \zeta[2,5\rho(1 - \mu) - 0,25]\} \quad (2.3)$$

Para as estacas flutuantes,  $\xi = 1$ , tem-se:

$$\zeta = \ln\left(2,5\rho(1 - \mu) \frac{1}{r_0}\right) \quad (2.4)$$

Se o radier tem área A, com “n”estacas,  $r_c$  será:

$$r_c = \left(\frac{A}{\pi.n}\right)^{1/2} \quad (2.5)$$

No caso de fundações que trabalham basicamente por resistência lateral, a contribuição do bloco de coroamento de um grupo de estacas pouco altera o valor calculado de sua rigidez. A carga transferida para a estaca é reduzida na proporção de carga absorvida pelo bloco.

No caso de fundações que trabalham basicamente por resistência da base a inclusão de algumas poucas estacas aumenta substancialmente a rigidez da fundação.

A rigidez transversal da estaca,  $E_E I_E$ , é o produto do módulo de elasticidade da estaca  $E_E$  pelo seu momento de inércia,  $I_E$ . O  $I_E$  é função apenas da geometria da estaca, enquanto o módulo de elasticidade da estaca é uma grandeza de determinação prática complexa, além de variar com o nível de deformação da mesma. Esta rigidez pode também ser chamada de rigidez estrutural do material da estaca, sendo que, a mesma, reflete o comportamento estaca.

Sales (2000) utilizou um “limite de escorregamento” ao invés do “truncamento de carga”

procurando, dessa forma, garantir a compatibilidade de deslocamentos na interface solo-estaca até que a tensão cisalhante na interface atinja um valor limite máximo. Quando essa tensão é alcançada em algum elemento, a compatibilidade de deslocamentos entre a estaca e o solo deixa de existir, podendo a estaca deslizar em relação ao solo adjacente. Retroanálises de provas de carga em sapatas estaqueadas mostraram que após a total mobilização da carga limite das estacas, a resposta carga-recalque do conjunto alterou-se bastante e as sapatas passaram a comandar o processo de recalque. Na simulação desta segunda etapa do comportamento da fundação, o emprego de um “limite de escorregamento” foi muito mais eficiente do que o tradicional procedimento de simplesmente limitar (“truncar”) a carga máxima atuante na estaca.

Inicialmente, estudou-se a influência da rigidez do radier na distribuição dos recalques. A rigidez de uma estaca ( $K_p$ ) pode ser determinada por meio da Equação 3.4, que simula a variação de rigidez para um comportamento não-linear de uma estaca:

$$K_p = K_{p0} \left[ 1 - RF_1 \left( \frac{P}{P_{ult}} \right)^{RF_2} \right] \quad (3.4)$$

Onde:

$K_p$ : Nova rigidez da estaca, correspondente ao nível de carregamento;

$K_{p0}$ : Rigidez inicial da estaca;

$P$ : Carregamento aplicado;

$P_{ult}$ : Carga máxima da estaca em compressão;

$RF_1$  e  $RF_2$ : Parâmetros hiperbólicos para permitir um melhor ajuste à resposta da estaca.

Para se obter um comportamento elástico-perfeitamente plástico, adotar os valores de 0 (zero) e 1 (um), respectivamente, para os parâmetros  $RF_1$  e  $RF_2$ , ou seja, a rigidez inicial não se altera até atingir a carga última.

Chow (1991) apresentou um modelo numérico que foi descrito para uma análise linear elástica para um grupo de estacas enterradas em um solo não homogêneo com o bloco em contato com o solo. Na maioria dos casos analisados, em estudos paramétricos, o uso de um perfil de solo homogêneo equivalente tende a subestimar a rigidez para os grupos. O efeito do bloco não incrementou a rigidez para o grupo significativamente e esse efeito tem diminuição significativa no perfil de solo não-homogêneo estudado. O perfil de solo não-homogêneo

resultou em uma significativa redução para do carregamento pelo o bloco da estaca com um correspondente incremento nos carregamentos de carga pelas estacas individuais.

Poulos (1999) mostra o reconhecimento da rigidez para a estrutura e que esta afetar a distribuição para os recalques ao longo da fundação, e que a distribuição para a carga estrutural e momentos também seriam afetados pela flexibilidade da fundação.

#### 2.2.4. Rigidez ou Flexibilidade de um Bloco

A NBR 6118:2003 sugere, para blocos rígidos, espaçamento mínimo entre estacas de 2,5 vezes a 3 (três) vezes o diâmetro destas. A norma considera o mesmo critério usado para sapatas rígidas para classificar os blocos em rígidos ou flexíveis, ou seja, quando se verifica a expressão a seguir o bloco é considerado rígido:

$$t \geq \frac{(a-a_p)}{3} \quad (3.3)$$

Onde:

t: é a altura do bloco;

a: é a dimensão do bloco em uma determinada direção;

a<sub>p</sub>: é a dimensão do pilar na mesma direção.

#### 2.2.5. Fatores de Interação

Segundo Poulos (1988), o fator de interação é o incremento fracionário em deslocamento de uma estaca devido à presença de uma estaca vizinha carregada, ou seja, é a relação entre o recalque adicional causado em uma estaca devido a uma outra estaca próximo a esta que devido a continuidade parcial do solo, arrasta a estaca vizinha, quando ambos estão submetidos à mesma carga.

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

$$\alpha_{kl} = \frac{\text{recalque adicional na estaca } k \text{ devido à carga unitária aplicada na estaca } l}{\text{recalque da estaca } k \text{ sob carga unitária}} \quad (2.6)$$

A análise de um radier estaqueado requer a consideração de quatro interações desenvolvidas

entre os elementos da fundação mista. A Figura 2.2 mostra cada uma dessas interações.

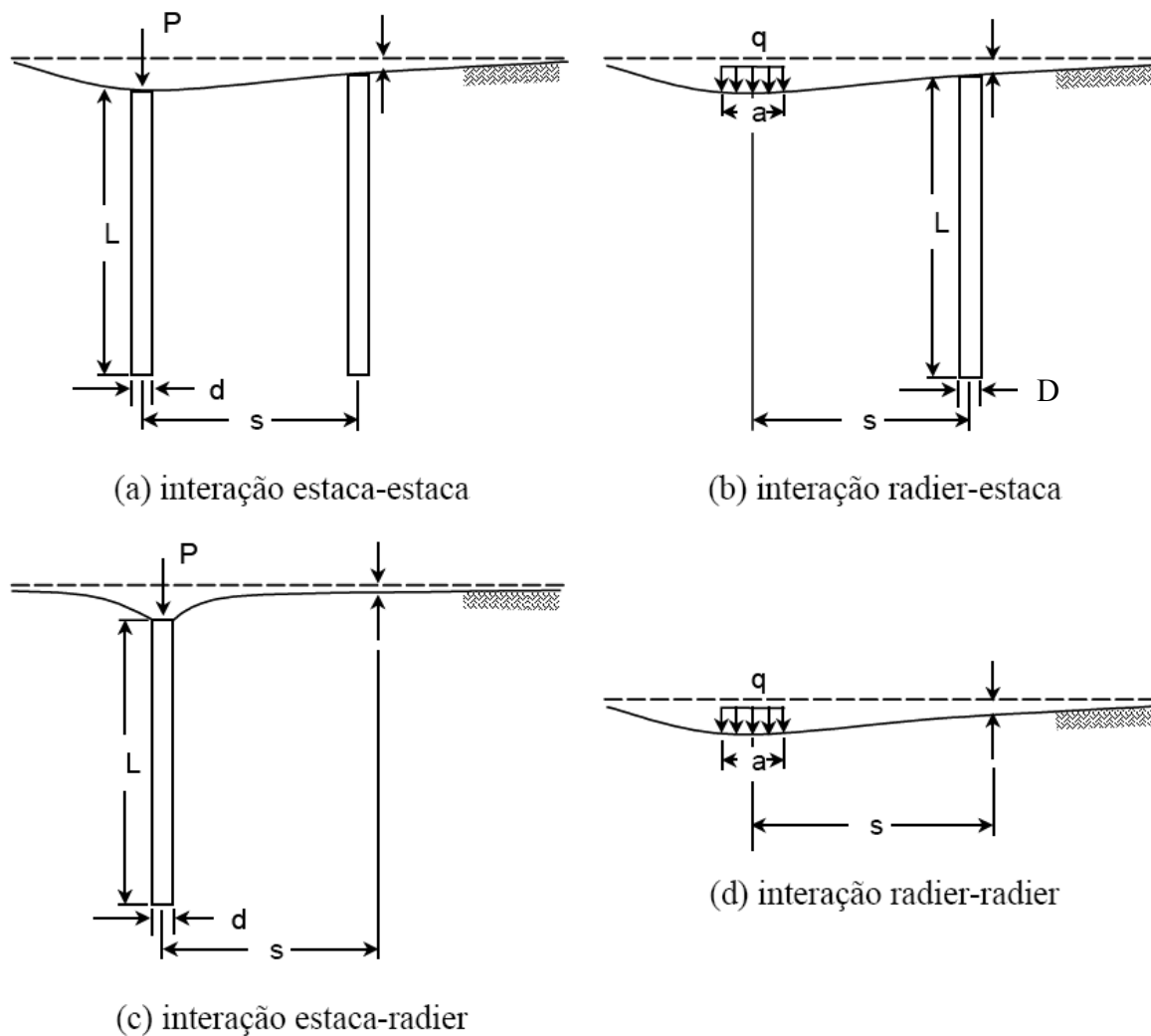


Figura 2.2 – Mecanismos de Interação em raiders estaqueados (modificado de Hain & Lee, 1978).

Poulos & Davis (1980) apresentam diversas situações que influenciam no comportamento do grupo por estarem relacionados aos fatores de interação entre as estacas.

- Estacas flutuantes;
- Efeito de uma camada finita;
- Efeito do alargamento da base;
- Efeito do coeficiente de Poisson;
- Efeito do módulo de solo não-uniforme;
- Efeito de deslizamento;
- Estaca de resistência de ponta em camada rígida;
- Efeito de uma camada compressível para estaca suportada pela camada.

No caso de fundações profundas convencionais o assunto desperta pouco interesse, diante dos pequenos valores de recalque que normalmente ocorrem em blocos pequenos. Já para as fundações superficiais e também para as fundações em radier estaqueado, que estão sendo recentemente utilizadas no Brasil o assunto é relevante.

Há hoje em dia duas maneiras de se proceder. Uma delas é levar em conta a rigidez da estrutura no cálculo dos recalques. A outra é projetar a fundação para recalques iguais de todos os pilares. E, portanto, recalques diferenciais teóricos nulos. Esta hipótese corresponde, na prática, à idealização dos projetistas estruturais que fazem previsões das cargas dos pilares admitindo apoios rígidos.

Kuwabara (1989) apresentou alguns comportamentos que ocorrem em grupos estaqueados, como o de força de arraste máxima nas estacas do grupo decresce significativamente à medida que o espaçamento entre as estacas decresce;

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

Considerando o grupo constituído por N estacas idênticas, como apresentado na Figura 2.3, Poulos (1980) sugeriu que o deslocamento de uma estaca k do grupo, admitindo-se o comportamento tensão-deformação do solo e do material da estaca descrito pela teoria da elasticidade linear, seja dado por meio da seguinte combinação:

$$\rho_k = \rho_l \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N P_l \alpha_{kl} + \rho_l P_k \quad (2.7)$$

Onde:

$\rho_l$  = deslocamento sob carga unitária de uma estaca isolada idêntica às que formam o grupo;

$P_k, P_l$  = cargas aplicadas no topo das estacas k e l, respectivamente. Admitindo-se que o bloco

de coroamento é flexível, a resultante  $P_G$  pode ser considerada igualmente subdividida entre as estacas do grupo, por exemplo,  $P_k = P_l = P_G / N$ .

$\alpha_{kl}$  = fator de interação entre as estacas  $k$  e  $l$ , espaçadas entre si da distância  $s$ , como definido na Equação 2.6.

A estaca é dividida em certo número de elementos uniformemente carregados e efeitos de interação entre duas estacas são avaliados por meio do fator de interação.

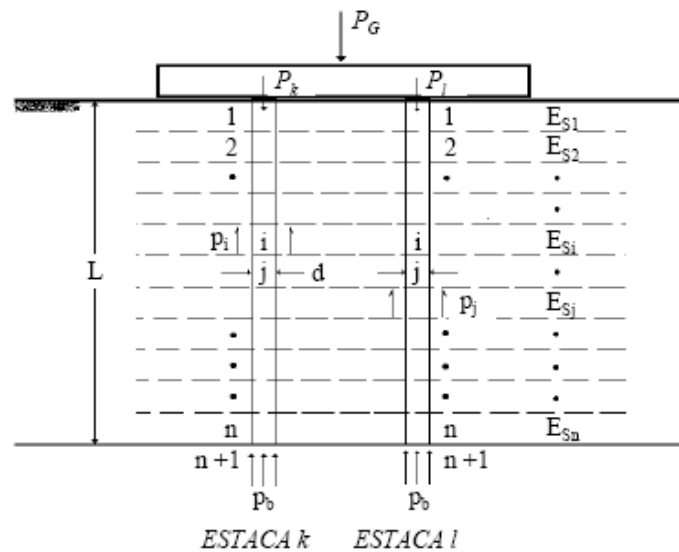


Figura 2.3 - Distribuição de tensões no fuste e na base das estacas de um grupo.

Muitas variáveis podem influenciar os fatores de interação, e estas, o comportamento do sistema de fundação radier estaqueado, tais como a heterogeneidade do solo, o fator de rigidez estaca-solo, o atrito lateral da estaca, além da resistência de ponta das estacas.

Uma grande variedade de métodos numéricos foi apresentada recentemente. Análises rigorosas são apontadas para fundações de radier estaqueado. Entretanto, esses métodos são limitados quanto a recursos computacionais requeridos para o tamanho do grupo de estacas.

Procura-se evitar nas análises teóricas do comportamento de estacas e grupos de estacas problemas com a interação entre os elementos de fundação (Butterfield & Banerjee, 1971). A interação entre estacas tende a ser subestimada por métodos aproximados. Essa baixa interação pode ser mais relevante em prática onde a natureza não-linear dos solos tende a deformações próximas à da estaca (Randolph & Wroth, 1979).

Akinmuru (1980) descreveu uma investigação experimental em escala laboratorial mostrando o estudo que relaciona a capacidade de carga resultante do estaqueamento como uma combinação do grupo e do tipo de estaca. Dos resultados descritos nesse trabalho sobre o efeito do bloco da estaca sobre a capacidade do sistema, os seguintes aspectos devem ser deduzidos:

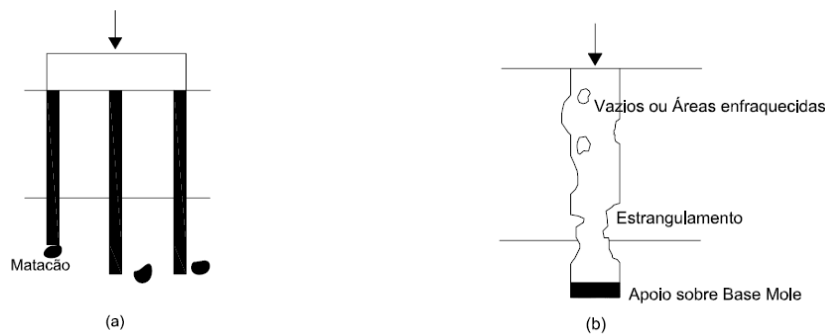
- Na interação entre o bloco, grupo de estacas e solo em um sistema de estaca flutuante, a capacidade de carga última para estas estacas não é uma simples soma algébrica para a capacidade separada para o bloco e o grupo de estacas verticais;
- Em areias, as estacas flutuantes têm maior capacidade que esta soma;
- Devido à interação, momentos são induzidos nas estacas, e há um aumento de atrito ao longo do fuste de cada uma destas. O efeito disto tem sido definido em termos para o fator de interação  $\alpha$ . A percentagem da capacidade de mudança para o bloco causado pela interação não é significativa. As mudanças em ambas as capacidades, da estaca e bloco tem sido ser influenciado pelo comprimento da estaca e o tamanho do bloco.

#### **2.2.6. Fundações Defeituosas**

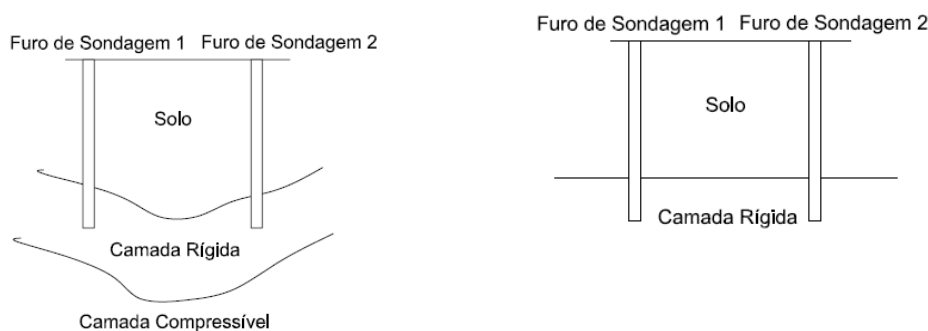
Não é freqüente o relato de casos de problemas tanto em obras de grande como de pequeno porte, o que dificulta as estatísticas reais sobre o assunto. Somente sabe-se dos casos catastróficos que chegam ao conhecimento de todos. Técnicas têm sido desenvolvidas para avaliar a natureza, localização e extensão do defeito na estaca, em grupos que o problema é detectado (Poulos, 1997; Mota & Fialho, 2000).

A experiência alemã relatada por Knigmüller e Kirsch (2004), referente a 25 anos de ensaios de integridade (*low strain test*) naquele país indica um percentual de 15% das estacas ensaiadas como resultados que levantam dúvidas, e 5% com indicação de problemas acima de qualquer discussão, necessitando de medidas de remediação. Apresentaram ainda problemas com estacas testadas que 30% dos problemas detectados são referente ao concreto pobre, 21% referente ao comprimento de estaca insuficiente, 14% com estrangulamento e 35% relacionados a fissuras estruturais.

Dois fatores principais podem influenciar no comportamento das estacas, ou seja: as imperfeições “naturais”, causadas por circunstância geológica e as imperfeições causadas pela construção das estacas, como mostra a Figura 2.4 (a) e (b). Problemas envolvendo má investigação e análise de subsolo também são fatores primordiais para a eficiência da estrutura, Figura 2.5 (Poulos, 2005).



**Figura 2.4 - Exemplo de imperfeições. (a) Imperfeições “Naturais” (b) Imperfeições relativas à técnica construtiva (modificado - Poulos, 2005).**



(a) Perfil Real com 2 furos de sondagem a uma profundidade inadequada (b) Perfil de subsolo interpretado incorretamente

**Figura 2.5 - Exemplos de imperfeições devido à inadequada investigação (modificado - Poulos, 2005).**

As “imperfeições naturais” surgem da geologia local, podendo criar significativos problemas para a fundação quanto à redução da capacidade de carga e rigidez da estaca isolada ou do grupo de estacas, quando, por exemplo, uma pequena porção de solo mole encontra-se na base da estaca.

A influência do comportamento carga-recalque com ambos os defeitos, tanto o estrutural (como o “estrangulamento” da estaca), quanto o geotécnico (como uma camada de solo mole abaixo da base da estaca) é o de gerar possíveis e grandes danos à estrutura.

Para estacas isoladas, a presença de “defeitos geológicos” leva a redução da rigidez na base da estaca, em se tratando de apoio sobre solo mole, a possibilidade da redução da capacidade de



carga, pois quando se considera o caso da estaca apoiada sobre “matação” tem-se um aumento desta rigidez. Se o problema da estaca se dá devido a um defeito estrutural, o incremento de recalque pode ocorrer de maneira repentina.

Com o “defeito geotécnico” a aparente perda de capacidade de carga é caracterizada por um maior incremento no recalque. Para cada tipo de defeito, relações típicas têm sido desenvolvidas para uma estaca simples, entre a redução na rigidez, a extensão do defeito e o nível de carga aplicada. Essas relações estão sendo usadas para se analisar o comportamento de grupos de estacas contendo algumas estacas defeituosas.

A habilidade do grupo para redistribuir as cargas das estacas com defeito, para as estacas intactas, resulta em um menor nível na redução da rigidez axial do conjunto do que para o caso de estacas isoladas defeituosas. Entretanto, a presença de estacas defeituosas geralmente implicará no desenvolvimento de deflexão lateral e rotação do grupo, e a indução de momentos nas estacas, devido ao surgimento de uma pequena carga horizontal aplicada (Poulos, 1999b).

Estes são dos muitos fatores que influenciam no comportamento das fundações, que por sua vez diretamente influenciam no comportamento da superestrutura. Dentre outros fatores que influenciam o comportamento da infra-estrutura pode-se citar:

- Má caracterização do comportamento do solo;
- Análise e projeto de fundações inadequadas;
- Má execução das fundações;
- Falta de controle das fundações;
- Degradação dos materiais constituintes das fundações.

Durante a construção, os solos se acomodam com a nova carga imposta a este. Quando se constrói em rochas, pedregulhos e areias, os recalques da construção são praticamente os completados ao final da construção. Entretanto, para argilas e siltes, os recalques se apresentam ao longo de muitos anos. Uma vez concluído o recalque final, não mais ocorrerá grandes deformações periódicas, a menos que o estrato se altere.

As variações das propriedades das diversas camadas do solo, se não identificadas podem provocar recalques diferenciais excessivos, causando danos estruturais, o que torna necessário o monitoramento e o reparo até que os recalques sejam controlados. A previsão dos recalques poderia sempre ser feita na fase de projeto, tornando-o econômico, programando o monitoramento e reparar algumas distorções.

Após a construção, qualquer coisa que perturbe o equilíbrio entre o solo e a estrutura pode promover redistribuição das tensões. Obras como túneis, mineração e escavações profundas, ou qualquer outra alteração de carregamento – próximo às fundações antigas, por exemplo - pode promover novo movimento em todo o solo, fazendo com que se inicie um processo de dano na (s) estaca (s).

A resposta de um edifício quanto aos recalques é fundamentalmente dependente da continuidade, ductilidade e rigidez de sua estrutura e do comportamento do solo.

Não há nenhuma regra simples para distinguir entre as causas de movimento de recalques absolutos, diferenciais e distorsão angular em edifícios. A avaliação correta, só pode ser feita com experiência e seguindo a boa prática e inspeção. As causas mais prováveis podem ser determinadas por um processo de eliminação, tais como, examinar toda parte da estrutura e toda possível causa de colapso de estrutura, consultar mapas geológicos, verificar registro de todos os comportamentos individuais e manter a mente aberta para possíveis causas. Se os indícios não são consistentes com movimento do solo, devem ser feitas investigações adicionais para distinguí-los.

Apesar de, em geral, o custo das fundações não ser de grande peso para o custo global da obra, considerando-se situações correntes da condição do subsolo, este custo poderá vir a ser elevado, pelo transtorno gerado com alguma patologia ou mau desempenho das fundações.

Desta forma, finaliza-se aqui com a observação de que a etapa mais complexa é a de identificação das causas e mecanismos responsáveis pelo mau desempenho da estrutura, e sua posterior correção.

### 2.2.7. Reforço de Fundações Profundas

O termo “underpinning” (reforço, em inglês) é um termo genérico para descrever o processo de modificar uma fundação existente por adição de elemento de suporte. Isso pode ser feito de várias maneiras, tais como instalação de estacas de aço ou estacas de concreto.

Não há solução geral para todos os casos de reforço de obra. É freqüente a existência de situações peculiares no projeto, no cálculo ou na destinação da obra, exigindo soluções engenhosas e criativas.

Quando identificado que as fundações encontram-se com defeito estrutural ou “defeito geotécnico”, o sistema de fundações, em muitos casos, necessita ser reforçado, o que dependerá de uma retro-análise para verificação do desempenho de todo o grupo, que em muitas vezes não é feito pelo projetista responsável.

Além destes problemas as fundações devem ser reforçadas quando a fundação, que foi satisfatória durante certo período, deixou de sê-lo devido à deterioração ou a uma modificação das cargas ou das condições de apoio, ou, ainda, quando a fundação foi mal projetada ou mal executada e se faz necessário fazer um reforço para que a mesma trabalhe de maneira satisfatória com os carregamentos que estejam realmente atuando naquele sistema (Golombek, 1998). Vale citar que alguns exemplos de reforço de fundações são apresentados em Golombek (1998); Sales e Costa (2000); Zaclis *et.al.* (1998); Presa e Sobral (1998); Cunha *et al.* (2001).

Em função da grande variabilidade de situações, as fases de um reforço e os tipos de soluções adotadas são muito variáveis, e de difícil sistematização. Porém, nos reforços de fundações que podem ser previstos e projetados, como os casos de alteração de estrutura, ou construção de um novo subsolo, etc., poder-se-ia sugerir: escoramento da estrutura existente; execução de novas fundações; ligações das novas fundações às antigas ou à estrutura, e o posterior acompanhamento da obra. Entretanto em situações de desempenho insuficiente das fundações projetadas, o problema só é detectado, na maioria das vezes, com a obra praticamente pronta, e nem sempre se tem tempo e condições de se adotar certos tipos de soluções como reforços estruturais ou geotécnicos (Sales e Costa, 2000).

A maioria dos projetos convencionais de estaqueamento é baseada em procedimentos de natureza empírica, embora algumas configurações sejam fundamentadas em formulações teóricas, que possam ter sido propostas para reduzir os recalques diferenciais.

Randolph (1994) mostrou, com base na análise de resultados obtidos anteriormente por Randolph & Clancy (1993), via método dos elementos finitos, que os recalques diferenciais podem ser eficientemente reduzidos ao se distribuir um número ótimo de estacas sob radier. Estes autores e muitos outros enfatizaram o tema de radiers estaqueados. O presente trabalho continua nesta mesma linha de pesquisa, com uma pequena mudança no foco da análise: Adotando-se os mesmos procedimentos numéricos usados para simular sistemas de radier estaqueado atualmente na previsão do comportamento (e remediação) de grupos de estacas defeituosas, como por exemplo, o grupo de estacas em que uma estaca sofreu algum dano durante seu processo de execução.

Na realidade, o problema de simulação e remediação de grupos de estacas com estacas defeituosas é análogo ao de um projeto convencional de radier estaqueado. Deve-se determinar a distribuição de carga e momentos entre os componentes do sistema (radier, estaca e solo), inclusive as estacas danificadas, e deve se prever o comportamento depois de sua remediação, por inclusão de estacas de reforço com distintas rigidezes. Não é fácil resolver o problema, e se tornou um desafio para os projetistas de fundação, para a região Central e outras regiões do Brasil, em anos mais recentes. Soma-se a isto a falta de metodologias de reforço e previsão do comportamento de blocos defeituosos, com uma ou mais estacas subutilizadas.

### **METODOLOGIA DE ANÁLISE**

Neste capítulo são apresentadas descrições mais detalhadas dos procedimentos e ferramentas utilizadas para a realização das análises.

Foram feitas análises prévias para verificar a influência dos fatores de interação no comportamento do grupo, em que foram testados diferentes valores da relação profundidade da camada com o comprimento da estaca.

Posteriormente foram realizadas análises para os grupos de 3, 4 e 6 estacas em três estágios. No primeiro estágio, o grupo encontra-se intacto e suas propriedades físicas e geométricas são adotadas como limitadores comparativos para as etapas seguintes.

No segundo estágio quando são variadas parametricamente as propriedades físicas e geométricas das estacas, simulando o dano causado durante a execução da obra. Foi verificado, para um mesmo grau percentual de dano, qual dano apresenta maiores reflexos para o grupo. E por último, no terceiro estágio, verificam-se alternativas de solução, tanto para reforço com propriedades similares, quanto para reforço com propriedades distintas das estacas originais.

A filosofia do projeto tem como foco principal o uso de estacas dispostas de forma adequada sob a região do bloco, com o objetivo de minimizar ou controlar o comportamento quando o grupo se encontra danificado.

### 3.1. MODELAGEM DE BLOCOS DE ESTACAS COM O PROGRAMA GARP

A metodologia de análise adotada neste trabalho para obtenção dos valores de recalque, momentos e esforços de reação em radiers estaqueados foi desenvolvida com base na utilização do programa de simulação numérica GARP, versão 7.0.

O programa GARP, *Geotechnical Analysis of Raft with Piles* (Poulos, 1994), na versão utilizada neste trabalho (Sales, 2000), considera o radier como elementos planos de placa, que são analisados pelo Método dos Elementos Finitos, MEF; enquanto as estacas são substituídas por molas utilizando o Método dos Elementos de Contorno, MEC, levando em conta todas as formas de interação entre elementos próximos. Este programa já foi apresentado e validado nos artigos originais (Poulos, 1994a; Poulos, 1994b; Sales, 2000; Poulos, 2006), apresentando um desempenho do tipo “aproximado” para suas respostas.

O programa GARP foi modificado por Poulos e Small (1998) e adotado para avaliar o comportamento do elemento de fundação quando submetido a um carregamento vertical ou momentos. Neste programa, o radier é representado por uma placa de comportamento linear elástico; o solo como um meio contínuo e elástico; e as estacas como molas de comportamento elasto-plástico, podendo ser analisado em um comportamento não-linear.

As estacas interagem entre si e com o radier por meio de fatores de interação. As tensões limites de contato sob a placa, a capacidade de carga, à compressão e à tração das estacas podem ser especificadas. É possível também analisar radiers de forma irregular, sejam estes simétricos ou não, levando-se em consideração cargas distribuídas, concentradas e momentos nas duas direções do plano da placa.

O programa GARP foi escrito em linguagem FORTRAN 77 para simular o comportamento de fundações estaqueadas. Além disso, o programa permite simular o comportamento somente da placa, do grupo de estacas com ou sem o contato do bloco com o solo sob carregamento vertical em meios estratificados (semi-espaco ou estrato de espessura finita). Pode ser executado com número máximo de 20 camadas e, em cada camada, até 10 subcamadas horizontais. O carregamento vertical pode ser concentrado em um nó. Além disso, pode ser distribuído em toda ou parte da placa.

A saída de dados do programa apresenta:

1. O detalhamento das características do radier;
2. O perfil do solo, incluindo elementos e camadas para cada módulo de solo que podem ser subsequentemente alterados;
3. O carregamento aplicado e o movimento do solo em todos os nós do radier, juntamente com as coordenadas de cada nó;
4. Os detalhes da localização, a rigidez e a capacidade última das estacas;
5. O resultado para as análises com incremento local especificado, bem como para os nós e elementos especificados. Inclui ainda:
  - a. Deformações verticais no nó;
  - b. Pressões de contato abaixo do elemento;
  - c. Momentos, nas direções X, Y e momento torsor ( $M_{XY}$ ) no nó.
6. Um resumo da magnitude e localização dos recalques máximos e mínimos, além de momentos, também máximos e mínimos;
7. A carga atuante sobre cada estaca e a porcentagem desta por estaca;
8. A proporção de carga total que é transferida para as estacas.

Dentre as desvantagens citam-se:

1. Montagem manual da malha de elementos finitos da placa;
2. Não refinamento (automático) da malha nos locais mais solicitados;
3. Necessidade de outro programa para cálculo da rigidez e dos fatores de interação, em uma das opções;
4. A ausência de outros modelos constitutivos mais complexos para o solo e para as estacas.

Outra vantagem da utilização deste programa é a consideração do método de elementos de contorno (MEC), no solo, está na simplicidade da entrada de dados para a descrição do problema, bem como no fato de exigir um tempo de processamento bastante reduzido quando comparado com outros métodos numéricos mais sofisticados, como o Método de Elementos Finitos (MEF), por exemplo.

### 3.2. MODELAGEM DE BLOCOS DE ESTACAS COM O PROGRAMA DEFPIG

Os fatores de interação entre as estacas e a rigidez destes elementos são obtidos mediante a utilização do programa DEFPIG (*Deformation Analysis of Piles Groups*), criado por Poulos (1990). Neste programa, determinam-se as rigidezes e os fatores de interação de um grupo convencional de estacas submetido a um carregamento generalizado. Estes valores são dados de entrada no programa GARP. A rigidez axial e lateral é mantida constante com a profundidade, e a distribuição de carga é calculada mediante a utilização das equações de Mindlin para um meio elástico-linear, isotrópico e homogêneo (Poulos e Davis, 1980). É possível considerar a heterogeneidade do solo de forma simplificada, por meio da variação do módulo de elasticidade.

O programa permite optar tanto por cálculos assumindo homogeneidade lateral do solo, (Poulos, 1988), quanto para perfis heterogêneos (Randolph, 1985), para o cálculo dos fatores de interação.

O diâmetro do fuste, o coeficiente de Poisson do solo e da estaca, bem como o número de elementos ao longo da estaca em que esta foi dividida, são requeridos para compor a geometria do problema. A descrição da distribuição do módulo de elasticidade do solo, se este é homogêneo, se varia linearmente com a profundidade, ou se estes valores são impostos para cada camada, identificam as propriedades do solo.

O Módulo de elasticidade do material subjacente à camada de solo, espessura da camada de solo, módulo de elasticidade do material da estaca, momento de inércia da seção da estaca, além do número de espaçamento que serão calculados os fatores de interação, também são parâmetros de entrada para este programa.

São apresentadas duas metodologias de cálculo para a determinação dos fatores de interação e como estas metodologias influenciam no comportamento do sistema. Será chamado de “Metodologia 1” quando relacionado à metodologia de cálculo utilizada para homogeneidade lateral do solo, Poulos (1988) que é obtida da teoria da elasticidade. A “Metodologia 2” é utilizada para representar a referente as expressões aproximadas de Randolph (1985) .



### 3.3. DEFINIÇÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS

Cada caso estudado é definido pela carga, tipo de fundação, tipo de dano e o tipo de reforço considerado. Cada um desses fatores é caracterizado por certo número de parâmetros que serão definidos a seguir.

Para procurar alcançar os objetivos já mencionados da pesquisa, é necessário um melhor entendimento do comportamento do sistema.

Diversos aspectos condicionantes deste problema podem ser facilmente considerados na entrada de dados do programa, tais como: a carga aplicada (nível de carregamento); os parâmetros geométricos (diâmetro, comprimento das estacas, número de elementos, o número de camadas de solo e respectivas espessuras); e os parâmetros mecânicos da fundação e dos diferentes tipos de solo (módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson).

Na solução do problema é relevante ressaltar as duas hipóteses admitidas em relação ao comportamento mecânico do bloco, ou seja, flexível ou rígido. Em ambos os casos, assume-se que a base do bloco está diretamente assente sobre a superfície do terreno da fundação, e que em relação à geometria, para a modelagem do bloco, foram utilizados elementos de placa de oito nós.

As propriedades dos materiais que formam esses elementos foram definidas em termos dos respectivos módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson, admitindo-se como elástico-linear para as estacas e o bloco e, além disso, isotrópico para o solo.

A determinação dos parâmetros geotécnicos de análise exige o conhecimento de valores representativos das propriedades da deformabilidade do solo ( $E_s$  e  $\nu_s$ ), que podem ser obtidos por ensaios de laboratório: como ensaios triaxiais, ensaios de campo ou correlações empíricas, como por exemplo, correlações com o  $N_{SPT}$ . Logo, a idealização do perfil stratigráfico e a determinação dos valores dos parâmetros geotécnicos são mais importantes na previsão do comportamento de estacas do que a escolha do método de análise. Isso sugere que uma previsão satisfatória do recalque de fundação depende, essencialmente, de uma cuidadosa e adequada interpretação dos parâmetros geotécnicos obtidos por ensaios de campo ou laboratório (Poulos, 1968). Considera-se também, que a escolha do método de análise tem

grande importância, pois se deve procurar um modelo que possua maior compatibilidade representativa do que se pretende analisar, caso contrário, pode-se chegar a conclusões não reais, que dependerão de uma análise minuciosa destes resultados.

Com isso, é importante o conhecimento prévio do nível de deformações impostas ao solo durante a execução de ensaios de campo e de laboratório, considerando-se a não-linearidade das curvas tensão-deformação, ou seja, a variação dos módulos de elasticidade é de suma importância para a previsão do comportamento próximo do real do grupo estudado, pois estes são verificados em seus estados de limites últimos.

Existem diversos fatores que interferem no comportamento real do conjunto estaca-solo, dentre eles, merecem destaque:

- a) Propriedades físicas do solo e da estaca;
- b) Tipo de execução da estaca;
- c) Espaçamento das estacas;
- d) Ordem de execução;
- e) Nível de carregamento aplicado.

A formulação apresentada neste trabalho para análise numérica do problema, incorpora apenas a influência de alguns fatores através de hipóteses simplificadoras, a saber:

- a) Admite-se a estaca trabalhando no regime elástico-linear;
- b) Admite-se que as estacas estão totalmente imersas em um semi-espaço, elástico linear e isotrópico;
- c) A perturbação devido à presença das estacas no espaço semi-infinito é desprezada;
- d) O solo e as estacas estão livres de tensões iniciais decorrentes da instalação das mesmas;
- e) Admite-se que a superfície das estacas é rugosa, de forma que inibe o deslizamento na região da superfície de contato estaca-solo;
- f) O peso próprio do bloco é desprezado;
- g) As estacas estão sujeitas apenas a carregamentos verticais.

### 3.3.1. Parâmetros que Definem o Carregamento Aplicado

Nos problemas analisados o carregamento pode ser definido por meio da intensidade  $q$  de uma carga uniformemente distribuída em um elemento da placa, representando o pilar de chegada à fundação (Figura 3.1).

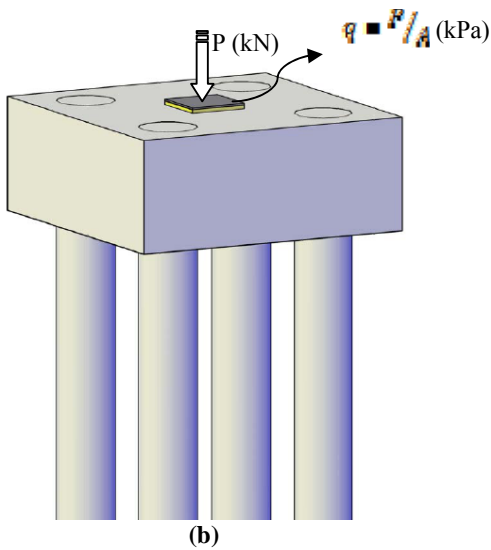
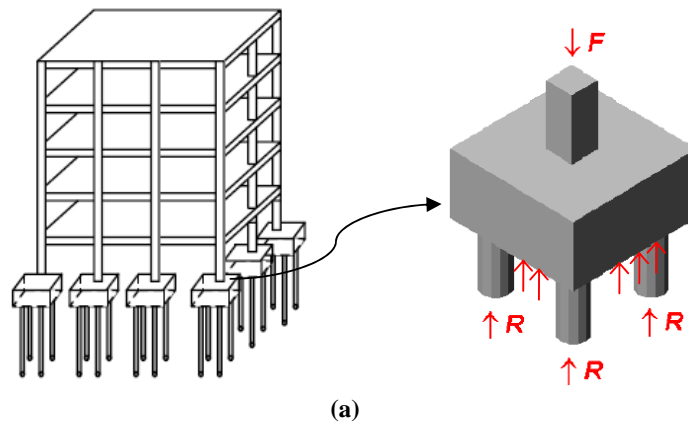


Figura 3.1 - Parâmetros que definem o Carregamento.

Este carregamento está relacionado com a capacidade de carga admissível do grupo estudado. E quando dividido pela área em que será aplicada, tem-se a tensão aplicada neste sistema.

O nível de carregamento é proporcional para cada grupo analisado e está baseado no cálculo da tensão admissível para todas as estacas mais o bloco. Para a fundação superficial têm-se as equações a seguir.

Para capacidade de suporte do solo abaixo do bloco, foram utilizadas as Fórmulas Teóricas de Terzaghi, Equação 3.1:

$$P_{ult} = c.N_c.S_c + \frac{1}{2}.\gamma.B.N_\gamma.S_\gamma + q.N_q.S_q \quad \text{onde: } q = \gamma'.Z \text{ (profundidade de apoio da placa)} \quad (3.1)$$

Em que  $c$  é a coesão do solo;  $\gamma$ , o peso específico do solo onde se apóia a fundação;  $B$ , a menor largura do bloco;  $N_c$ ,  $N_\gamma$ ,  $N_q$ , os fatores de carga (funções do ângulo de atrito interno  $\phi$ ); e  $S_c$ ,  $S_\gamma$  e  $S_q$ , os fatores de forma.

Os fatores de carga podem ser obtidos pelos Métodos Teóricos (Meyerhof) dado pelas Equações 3.2, 3.4 e 3.4.

$$N_c = \frac{1}{\tan \phi'}.(N_q - 1) \quad (3.2)$$

$$N_q = e^{(\pi \tan \phi')} . k_p \quad \text{onde: } k_p = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (3.3)$$

$$N_\gamma = \frac{1}{2} . \tan \phi' \left( \frac{k_{p\gamma}}{\cos^2 \phi'} - 1 \right) \quad \text{onde: } k_{p\gamma} = 3 . \tan^2 \left[ 45^\circ + \frac{(\phi' + 33^\circ)}{2} \right] \quad (3.4)$$

Para a capacidade de carga do solo ao redor da estaca, quanto à compressão:

$$P_{total} = P_p + P_l \quad (3.5)$$

Onde:

$$P_p = \sigma'_{vb} . N_q . A_b \quad (3.6)$$

$$P_l = A_l \cdot \sigma'_v \cdot K_s \cdot \tan \phi' \quad \text{onde: } K_s = 0,35 \quad (3.7)$$

Para tração, temos:

$$P_{total} = P_l \quad (3.8)$$

Conhecido o valor de  $q_{ult}$ , tanto para os elementos verticais quanto para o elemento horizontal, a carga admissível do conjunto  $P_{adm}$  será dada por:

$$P_{adm} = \frac{P_{ult}}{FS} \quad (3.9)$$

$$P_{adm-grupo} = \frac{P_{ult-bloco} + N \cdot P_{ult-estaca}}{FS}$$

Onde:

N: é o número de estaca sob o bloco;

FS: é o fator de segurança global, e igual a dois.

Para o sistema estaqueado foi utilizado um nível de carregamento proporcional ao grupo analisado, ou seja, um nível igual à capacidade de carga admissível do grupo (Equação 3.10).

$$P_{trab} = P_{adm-grupo} \quad (3.10)$$

### 3.3.2. Parâmetros que Definem a Fundação

A fundação é constituída por dois tipos de elementos: um horizontal, a placa; e outro vertical, a estaca (Figura 3.2).

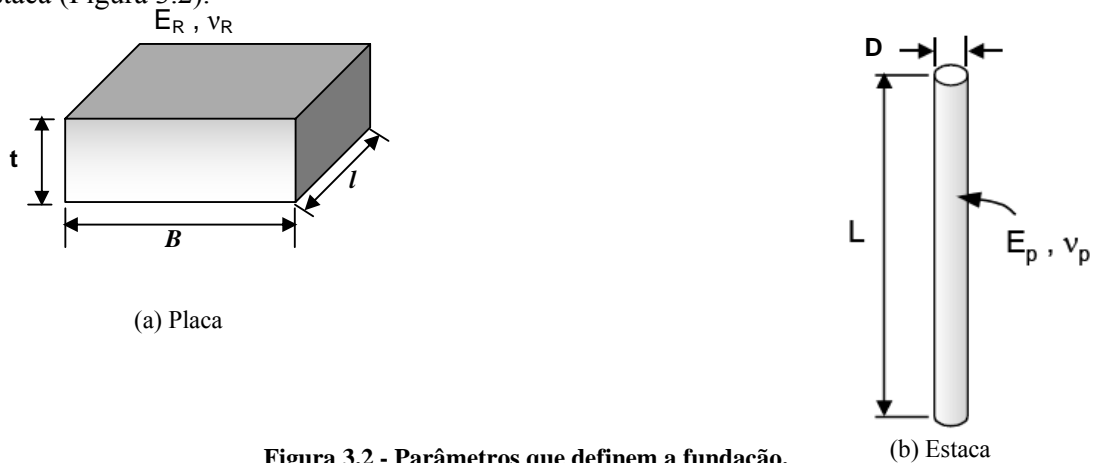


Figura 3.2 - Parâmetros que definem a fundação.

Para se fazer uma análise paramétrica para avaliar o comportamento de reforço num grupo de estacas foram consideradas várias configurações para os blocos estaqueados. Adicionalmente, os blocos tiveram uma variação nas dimensões para simular o efeito da rigidez ou flexibilidade do mesmo. O bloco é definido pela largura ( $I$ ), base ( $B$ ), espessura ( $t$ ), módulo de elasticidade ( $E_R$ ) e coeficiente de Poisson ( $\nu_R$ ).

Assim como o bloco, as estacas possuíam várias configurações na sua geometria, definida pelo diâmetro ( $D$ ), comprimento ( $L$ ) e suas propriedades, como o módulo de elasticidade ( $E_P$ ) e o coeficiente de Poisson ( $\nu_P$ ).

O dano nas estacas foi simulado alterando seu módulo de elasticidade ( $E_P$ ), pois este tem influência direta na rigidez do sistema.

### 3.3.3. Parâmetros que Definem o Solo

O solo estudado consiste de uma camada elástica linear, isotrópica, de espessura  $H$  (Figura 3.3). Os parâmetros elásticos (módulo de elasticidade  $E_S$  e coeficiente de Poisson  $\nu_S$ ) são considerados constantes para toda a massa, o que pode caracterizar um meio homogêneo ou um meio estratificado, representado por um meio homogêneo equivalente (Poulos, 1979; Yamashita *et al.*, 1987).

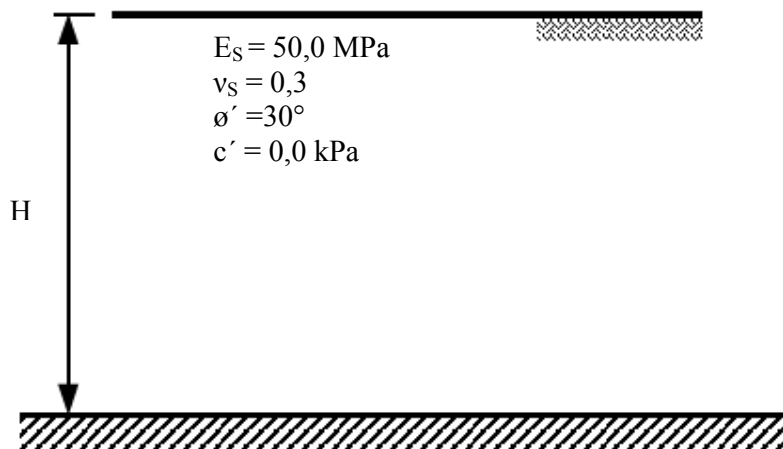


Figura 3.3 – Parâmetros que definem o solo.

### 3.4. DISCRETIZAÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

A malha de elementos finitos discretizada em cada um dos grupos é feita manualmente, mantendo estas o mais regular possível (Figura 3.4). Cada elemento possui oito nós e o tamanho deste elemento varia de acordo com o grupo estudado (Figura 3.5).

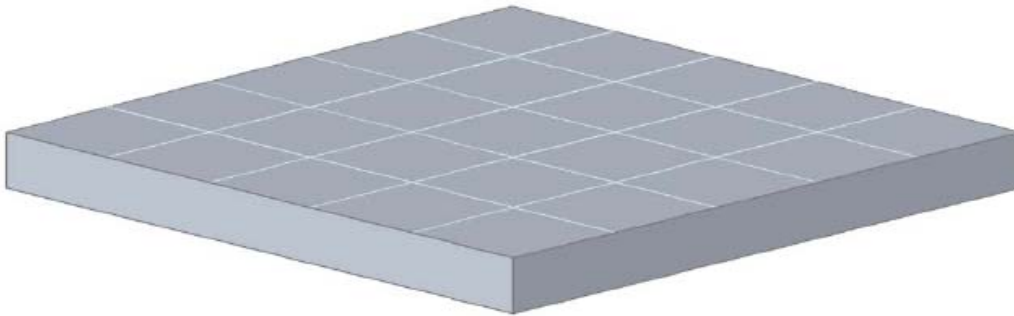


Figura 3.4 – Malha de Elementos Finitos Discretizada.



Figura 3.5 – Nós de um elemento.

A malha de elementos finitos para análise do grupo de quatro estacas tem 64 nós e 49 elementos para a modelagem do bloco. O contato entre a base do bloco e o conjunto estacas/solo é modelado de tal forma que os deslocamentos calculados sejam compatíveis em ambas as superfícies.

### 3.5. ANÁLISE PARAMÉTRICA

#### 3.5.1 Grupos Intactos

Foram analisados três grupos que foram simulados nas mesmas condições de solo. Os grupos de três e de quatro estacas foram simulados como blocos rígidos e para o grupo de seis estacas como grupo flexível.

Os grupos intactos de três e de quatro estacas são compostos por blocos rígidos e quadrados com carga aplicada no centro de gravidade do conjunto das estacas, entre as três estacas ou das quatro estacas.

O detalhamento da malha de elementos finitos do problema de três estacas é apresentado na Figura 3.6.

Legenda:

Unidades em centímetros (cm)

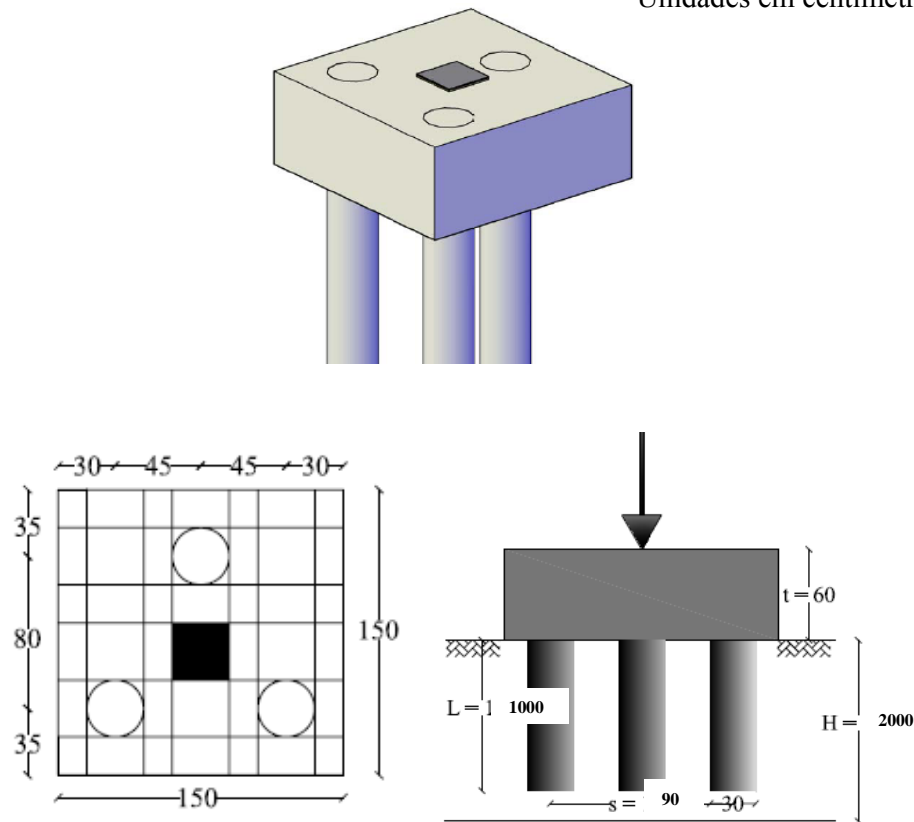
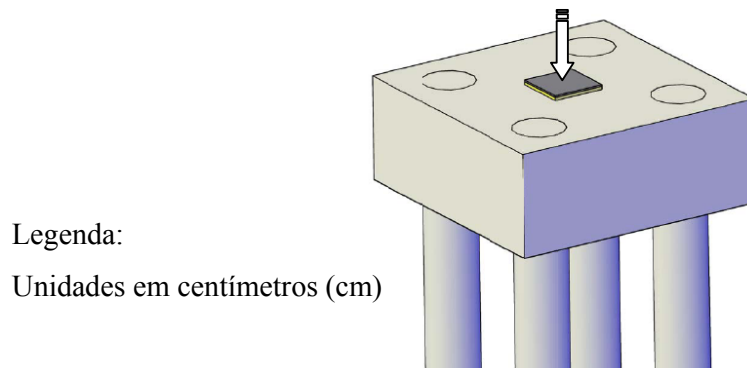


Figura 3.6– Grupo de 3 estacas Intactas.

Para a análise do grupo de quatro estacas a Figura 3.7 apresenta o detalhe geométrico do problema.





Legenda:

Unidades em centímetros (cm)

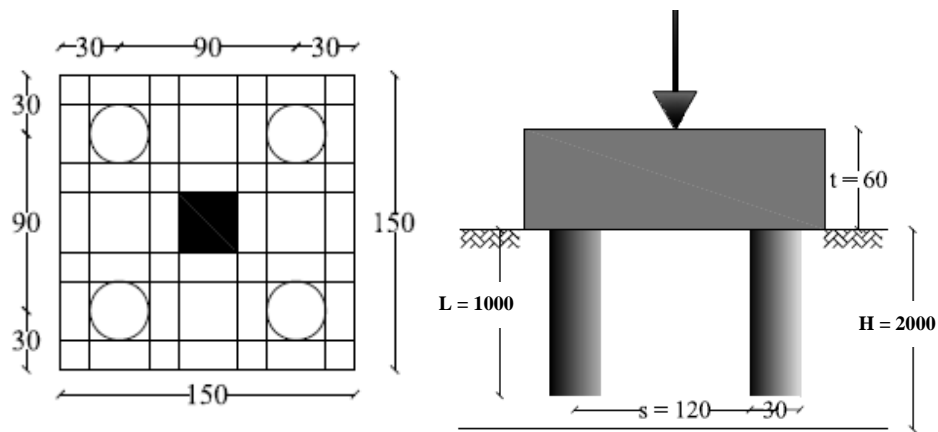
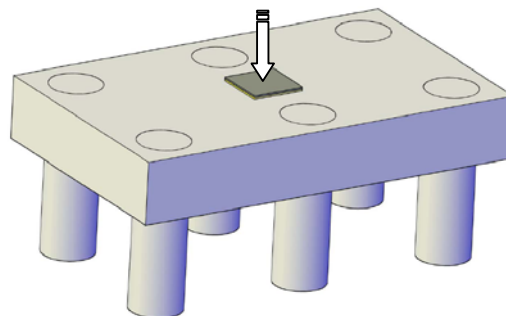


Figura 3.7 – Grupo de 4 estacas intactas.

O grupo intacto de seis estacas é composto de bloco flexível (Equação 3.3) e retangular com carga aplicada no centro do bloco. O grupo é apresentado com mais detalhes na Figura 3.8.



Legenda:

Unidades em centímetros (cm)

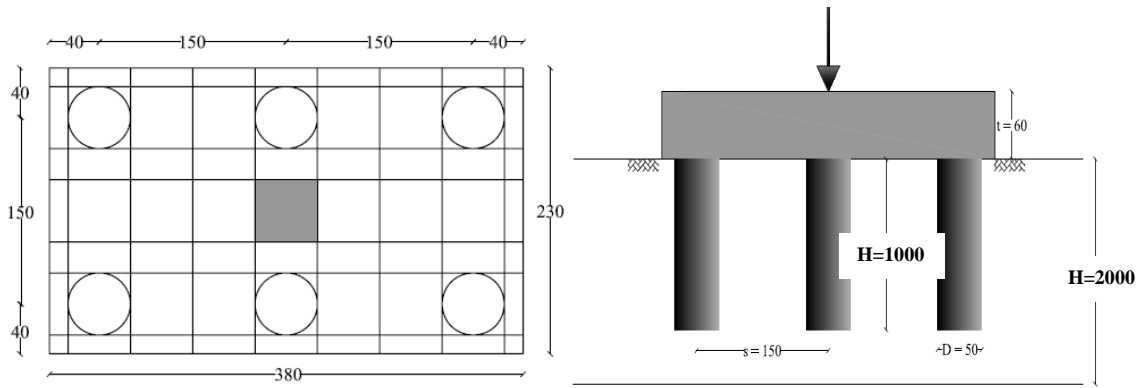


Figura 3.8 - Grupo de 6 estacas intactas.

### 3.5.2. Grupos Danificados

De modo a avaliar a influência de uma estaca em um grupo em que esta esteja danificada, foi simulado um dano como sendo do tipo estrutural, através da variação do módulo de elasticidade e do comprimento da mesma.

A rigidez é dada pela Equação 3.11:

$$K_p = \frac{P}{\rho} \quad (3.11)$$

Como, Segundo Poulos & Davis (1990):

$$\rho = \frac{PI}{E_s D} \quad (3.12)$$

Então tem-se,

$$\frac{P}{\rho} = K_p = \frac{E_s}{I} \cdot D \quad (3.13)$$

Onde:

K: é a rigidez da estaca;

P: é a carga axial aplicada;

$\rho$ : é recalque no topo da estaca;

D: é o diâmetro da estaca;

$E_s$ : é o módulo de elasticidade do solo.

$$I = I_o R_K R_h R_v \quad (3.14)$$

$I_o$ : é o fator de influência de recalque para estaca incompressível em um semi-espaço;

$R_K$ : é fator de correção para estaca compressível;

$R_h$ : é o fator de correção para profundidade finita da camada sobre a base rígida;

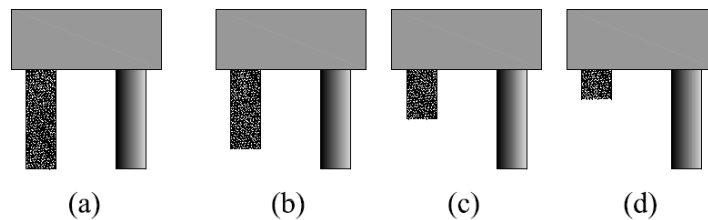
$R_v$ : é a correção para o coeficiente de Poisson do solo;

$H$ : é a profundidade total da camada de solo, espessura da camada.

Com a variação do módulo de elasticidade, simula-se um dano estrutural no elemento de estaca, que poderia ser causado por um concreto de má qualidade, surgimento de vazios ao longo da mesma.

Outro dano que foi simulado nesta etapa foi o de um evento que ocorre em muitos casos práticos de obra, que é o de comprimento executado menor que o de projeto de algumas estacas.

Foi variado o módulo de elasticidade em 80, 50 e 30% do valor equivalente ao da estaca íntegra. No caso de estacas com menores comprimentos, os percentuais acima se referem ao comprimento de estaca íntegra. A Figura 4.9 mostra como foram avaliados estes danos relativos ao comprimento da estaca.



**Figura 3.9 – Estacas danificadas, comprimentos menores que de projeto.**

Os danos simulados das configurações estudadas são apresentados a seguir.

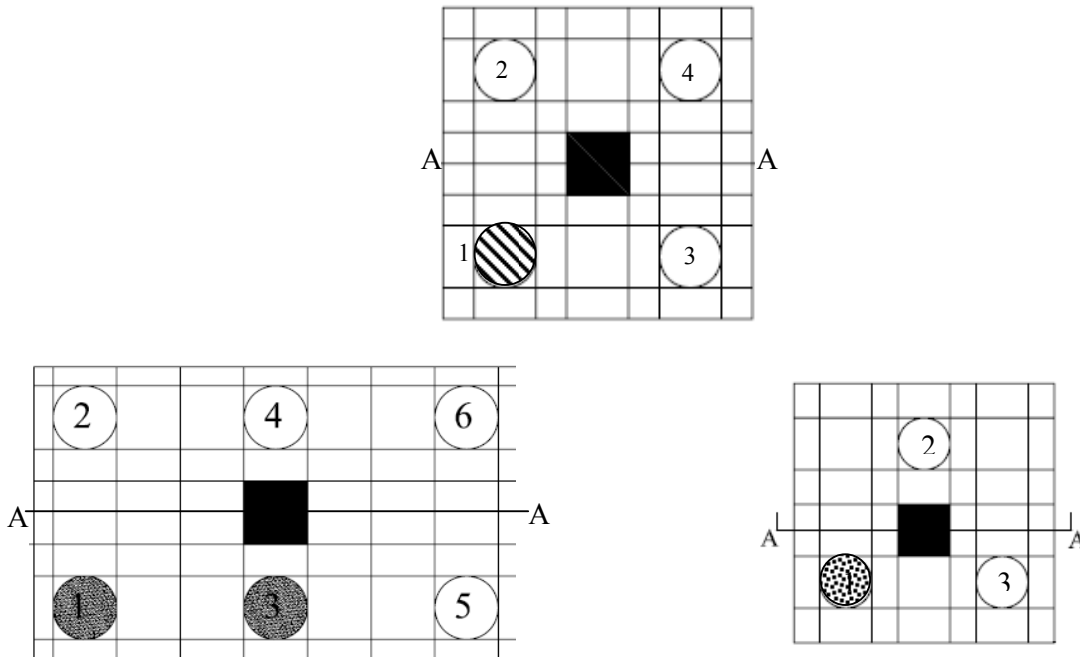


Figura 3.10 – Seções estudadas.

O objetivo desta etapa foi avaliar qual dos tipos de dano possui maior influência no grupo, ou seja, para os mesmos níveis percentuais o que irá atribuir maiores recalques absolutos e diferenciais ao sistema, e algumas alternativas de como se proceder com a medida de reforço.

As distribuições de recalque na seção A-A de cada arranjo de estacas foram expressas em termos de um fator de recalque normalizado ( $I_z$ ), como definido pela Equação 3.15.

$$I_z = \frac{\rho E_s D}{P} \quad (3.15)$$

Onde:

$I_z$ : é o Recalque Normalizado;

$\rho$ : Recalque no topo da estaca;

$E_s$ : Módulo de elasticidade do solo;

$D$ : Diâmetro da estaca;

$P$ : Carga aplicada.

Os momentos são dados de saída do *GARP* utilizado em toda a extensão da placa. Os esforços de reação também são saídas do *GARP* e serão apresentados para cada estaca, nas diversas

configurações, além da porcentagem de carga transferida às estacas e ao bloco, para que possam ser calculados os fatores de segurança das estacas e do bloco.

### **3.5.3. Reforço com Adição de Estacas**

Nesta etapa investigou-se que tipos de reforços apresentariam o melhor comportamento. Primeiramente, são analisados os reforços de estacas que apresentam propriedades iguais às estacas intactas e, em seguida, e de acordo com a melhor resposta de comportamento, são feitas algumas alterações.

Para os reforços são utilizados os casos de maiores níveis de dano, caso extremo, para que se possa comparar a eficiência dos reforços e, em seguida, as alterações destes.

Procurou-se desta forma alterar o comprimento, o diâmetro, o módulo de elasticidade da nova estaca a ser adicionada, tendo como referência as estacas íntegras, além da melhor configuração para este novo elemento.

Para os grupos estudados, foram procuradas as soluções, tanto para as configurações de reforço para elementos com as mesmas propriedades físicas e geométricas, quanto para propriedades distintas, em vários níveis percentuais para avaliar sua eficiência no comportamento do conjunto, para os recalques e fatores de segurança.

Os reforços com mesmas propriedades são apresentados em diferentes alternativas de solução. Os recalques, momentos, esforços de reação e a porcentagem de carga distribuída entre as estacas e o bloco também são apresentados para todas as alternativas de solução.

As alternativas de solução são apresentadas nas Figuras 3.14, 3.15 e 3.16 e na tentativa de melhor comparar os esforços de reação das estacas para os vários casos apresentados, são mostrados grupos genéricos de cada caso original.

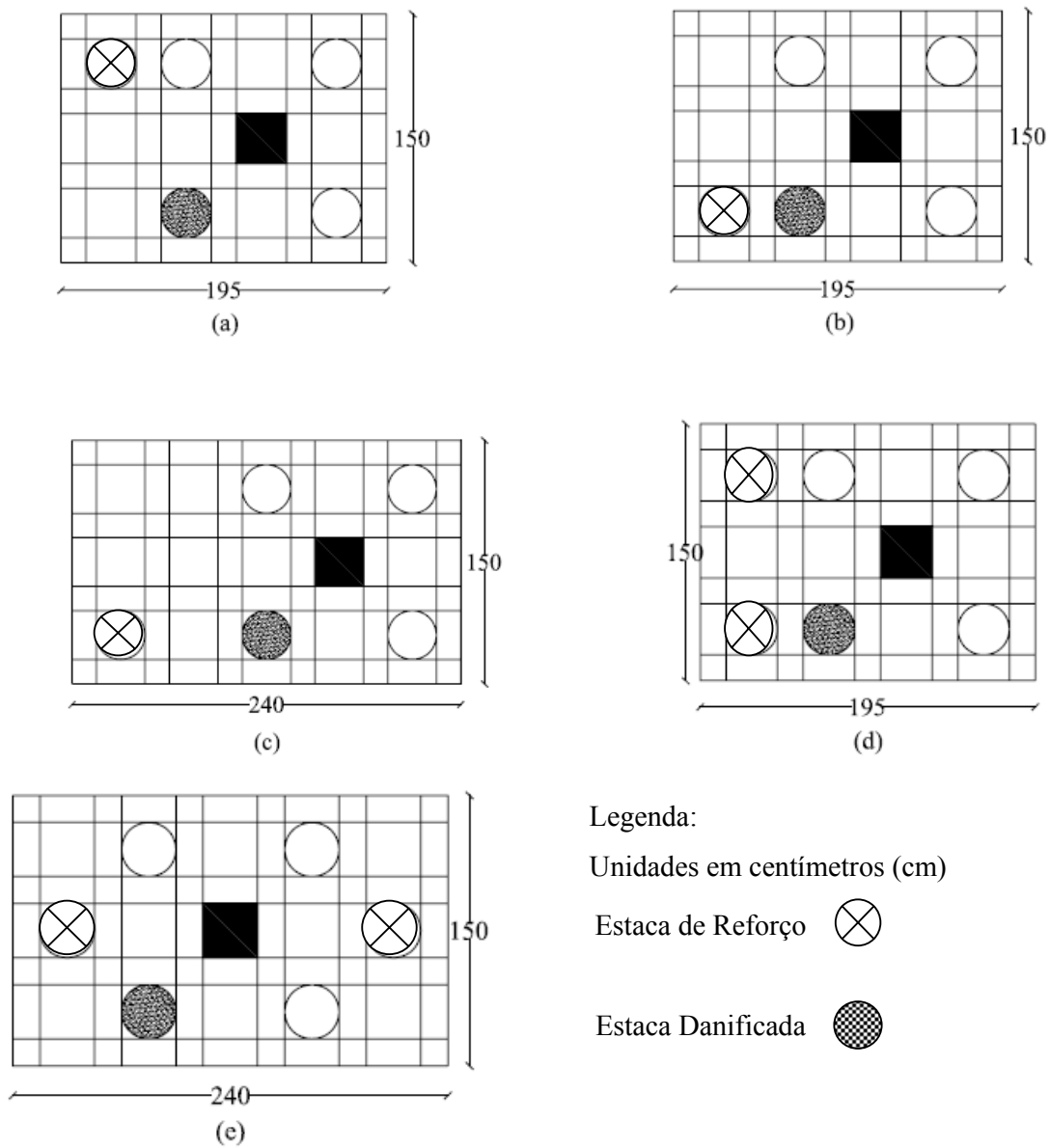


Figura 3.11 – Configurações de reforço para o grupo de 4 estacas.

O grupo genérico do grupo de 4 estacas intactas é apresentado na Figura 3.13. Este grupo visa analisar a mesma numeração de estaca em diferentes situações, e comparar seu desempenho, avaliando o fator de segurança e verificar se esta se encontra próximo ou não da ruptura.

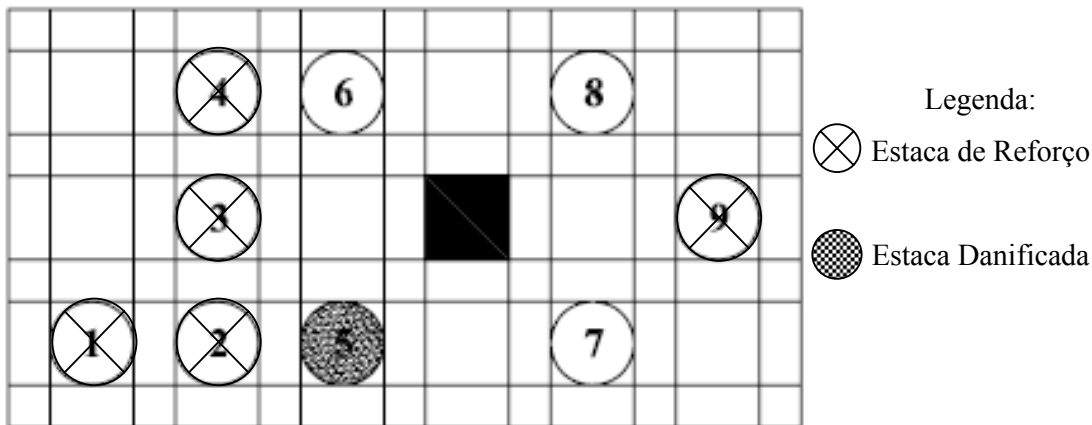


Figura 3.12 – Configuração generalizada para o grupo 4 estacas.

Para o grupo de 3 estacas originais temos:

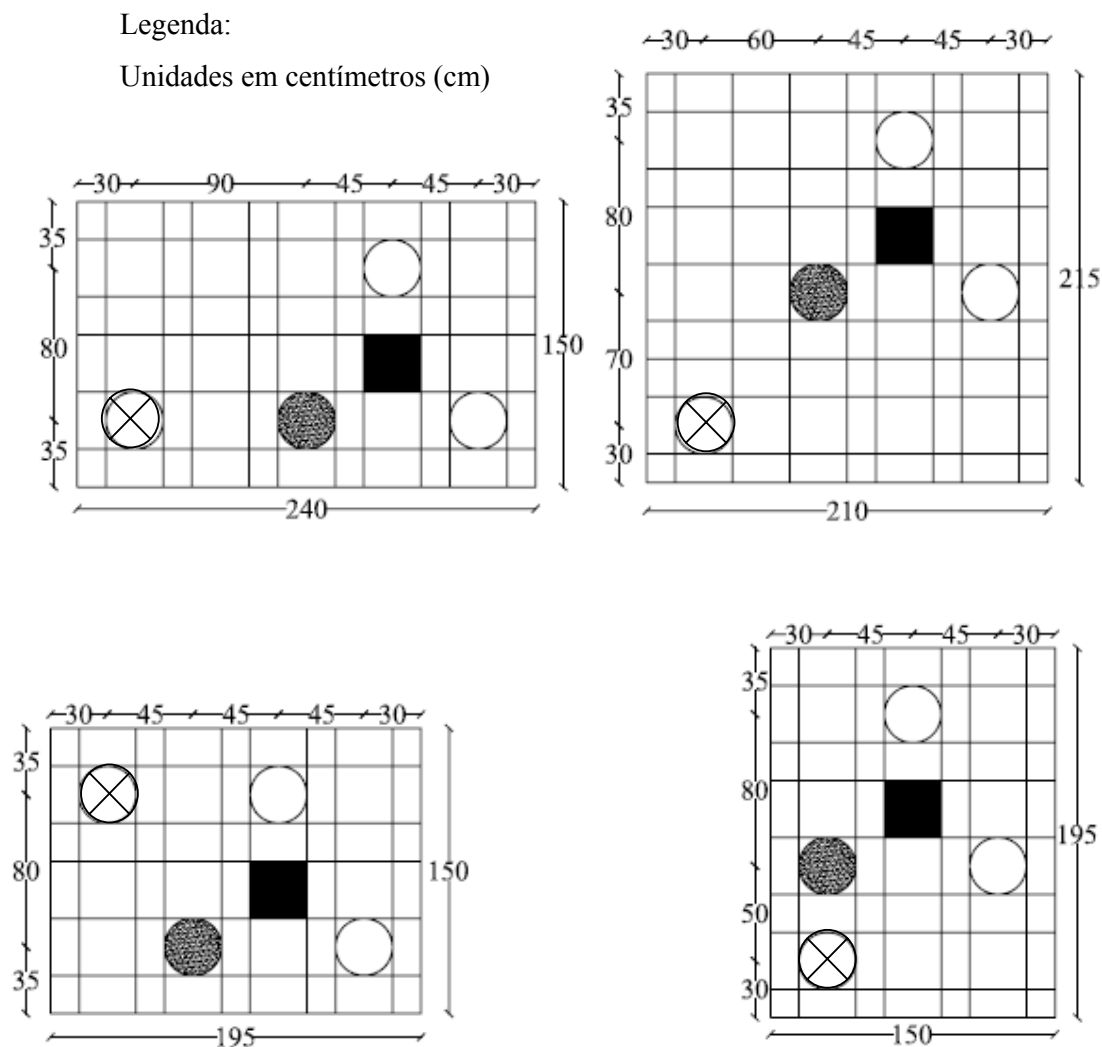


Figura 3.13 – Configurações de reforço para o grupo de 3 estacas.

Para a configuração genérica para o grupo de 3 estacas originais são mostradas na Figura 3.15.

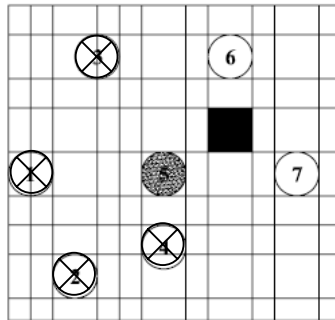
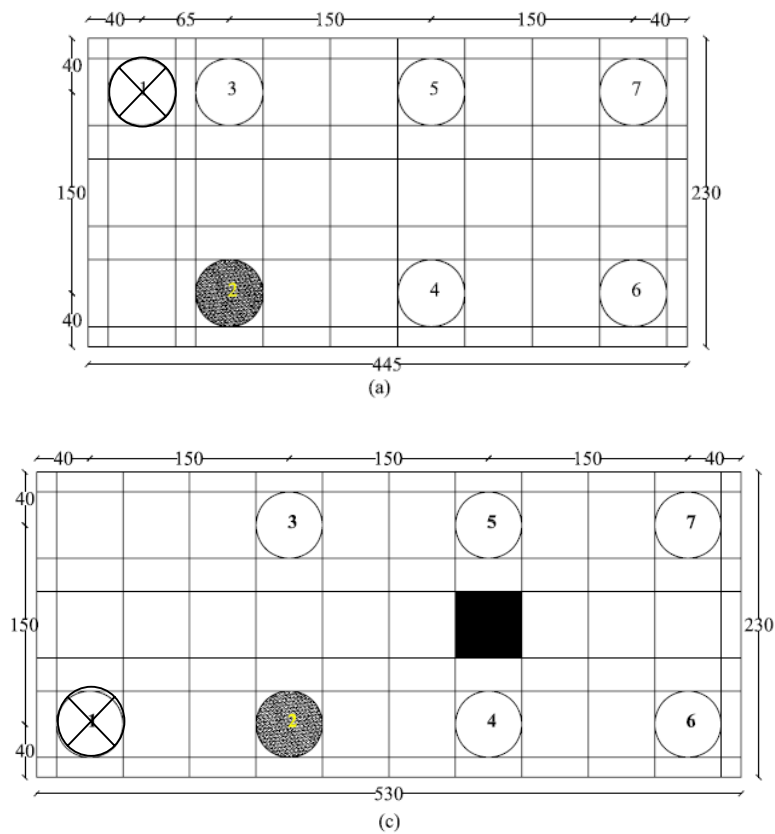
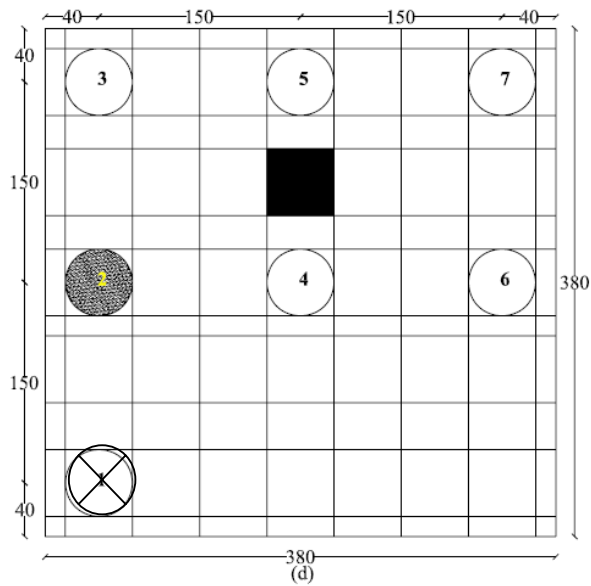


Figura 3.14 - Configuração generalizada para o grupo de 3 estacas.

E para o grupo de 6 estacas, tem-se:





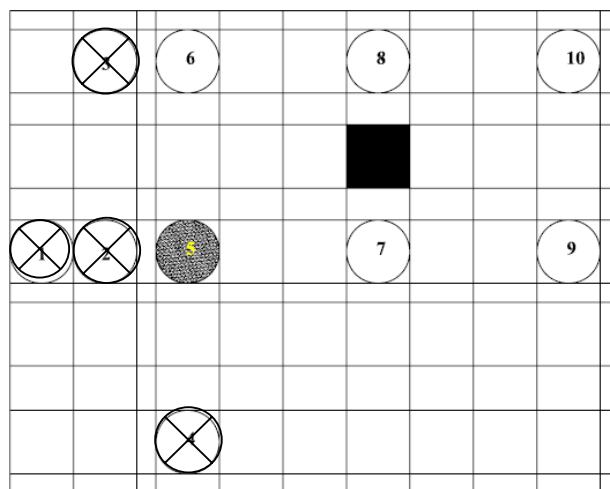


Legenda:  
 Unidades em centímetros (cm)

**Figura 3.15 – Configurações de reforço para o grupo de 6 estacas.**

Para todas as situações são apresentados o nível de carga transferido para a placa em função do nível de dano ou a nova configuração, apresentada assim, como o fator de segurança em todas estas configurações.

O grupo genérico do caso de 6 estacas é apresentado na Figura 3.17



**Figura 3.16 – Configuração generalizada do grupo de 6 estacas.**

Depois de avaliadas as várias configurações e analisadas quais possuem comportamento mais próximo do grupo intacto, em termos de recalques, momentos, esforços de reação e fatores de segurança, e em termos de economia, é escolhido o caso com melhores características.

Em outra etapa de reforço, utilizando estacas com propriedades distintas, é escolhido um dos casos antes analisados e alteradas as suas propriedades, utilizando 50% dos valores da estaca intacta (comprimento, diâmetro e módulo de elasticidade) para avaliar também se a nova estaca atende sua funcionalidade com propriedades adversas.

### **ANÁLISE DE REFORÇO DE GRUPO DE ESTACAS**

É apresentada neste capítulo a análise do comportamento de reforço de grupos de estacas com algumas danificadas. Estes danos simulados por meio da variação de suas propriedades, tais como, o módulo de elasticidade ( $E_p$ ) e o comprimento ( $L$ ) da estaca.

Projetos de grupos de estacas com a filosofia em radier estaqueado têm contribuído no estudo do problema de grupos de estacas que apresentam estacas defeituosas. Utilizando estacas dispostas de forma adequada sob o bloco, objetiva-se a recuperação ou aproximação dos comportamentos de resposta atingidos pelo grupo, quando intacto, e atingir fatores de segurança com margens aceitáveis.

#### **4.1. FATORES DE INTERAÇÃO**

Os fatores de interação e a rigidez das estacas são determinados neste trabalho por meio do programa DEFPIG (Poulos, 1990), em que é especificado se há contato do bloco com o solo ou não, quantidade de estacas sob o bloco e a dimensão do bloco.

Para a escolha da metodologia 2, Randolph (1985), foi considerada inicialmente, uma carga  $P$  aplicada no centro do bloco e distribuída num elemento de 30 x 30 cm (representando um pilar que chega ao bloco). Adota-se a relação  $H/L = 2$  e 10, onde  $H$  é a espessura da camada e  $L$  é o comprimento da estaca. Assume-se aqui o bloco retangular rígido de 180 cm por 150 cm e espessura de 60 cm, formado por quatro estacas, Figura 4.1.

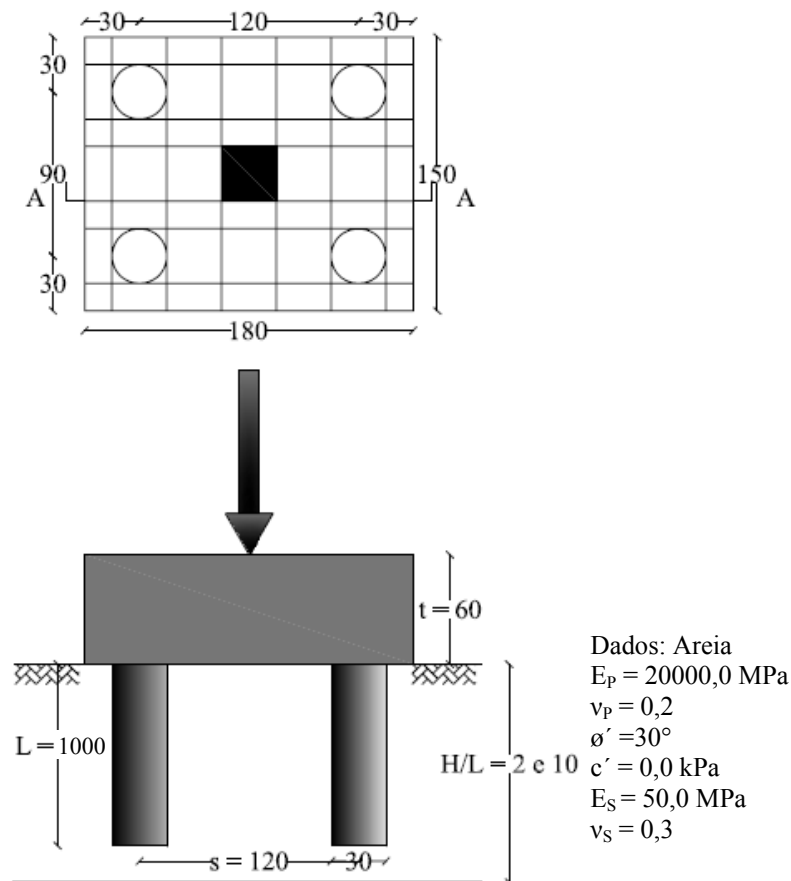


Figura 4.1 – Análise dos fatores de interação.

A Figura 4.2 apresenta a variação dos fatores de interação em relação à distância ao longo da placa para duas situações da relação  $H/L$ , igual a 2 e 10, para ambos os métodos de cálculo, Poulos (1988) e Randolph (1985).

Pode ser observado que quanto maior o espaçamento entre as estacas menor é a influência que existe entre elas, confirmando as formulações mostradas por Poulos & Davis (1980). É importante destacar a influência do espaçamento no comportamento e como os diferentes métodos de cálculo alteram o comportamento de resposta do grupo.

A “metodologia 1” (Poulos, 1988) apresentou diferentes comportamentos quando se variou a relação  $H/L$ , influência mais significativa de interação entre as estacas quando a relação  $H/L$  aumenta. Diferentemente, a “metodologia 2”, Randolph (1985), não foi influenciado com a variação desta relação.

Das duas metodologias apresentadas acima, a referente às expressões de Randolph não apresentou tal variação, por esta razão esta metodologia foi adotada para as análises desta pesquisa, por não incorporar mais uma variável nas análises paramétricas.

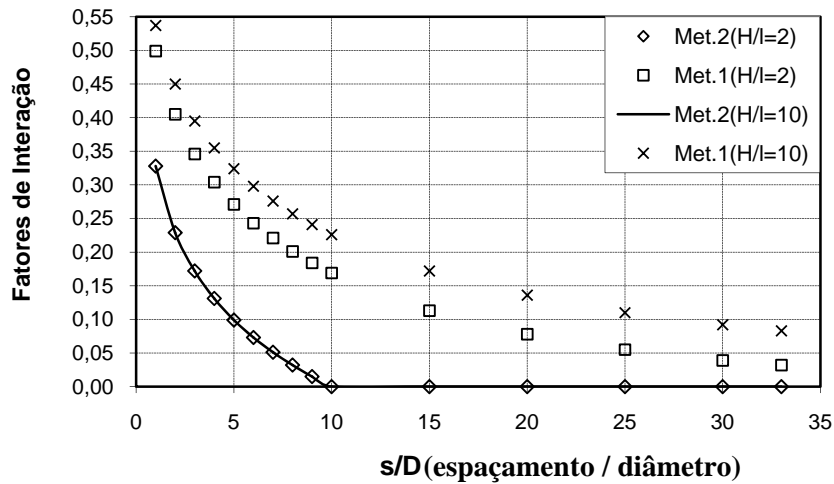


Figura 4.2 – Fatores de Interação.

Para avaliar a influência destes distintos fatores de interação no comportamento do conjunto os recalques, os momentos e os esforços de reação por estacas são mostrados a seguir. A Figura 4.3 apresenta os recalques normalizados ao longo do bloco, conforme Equação 3.15.

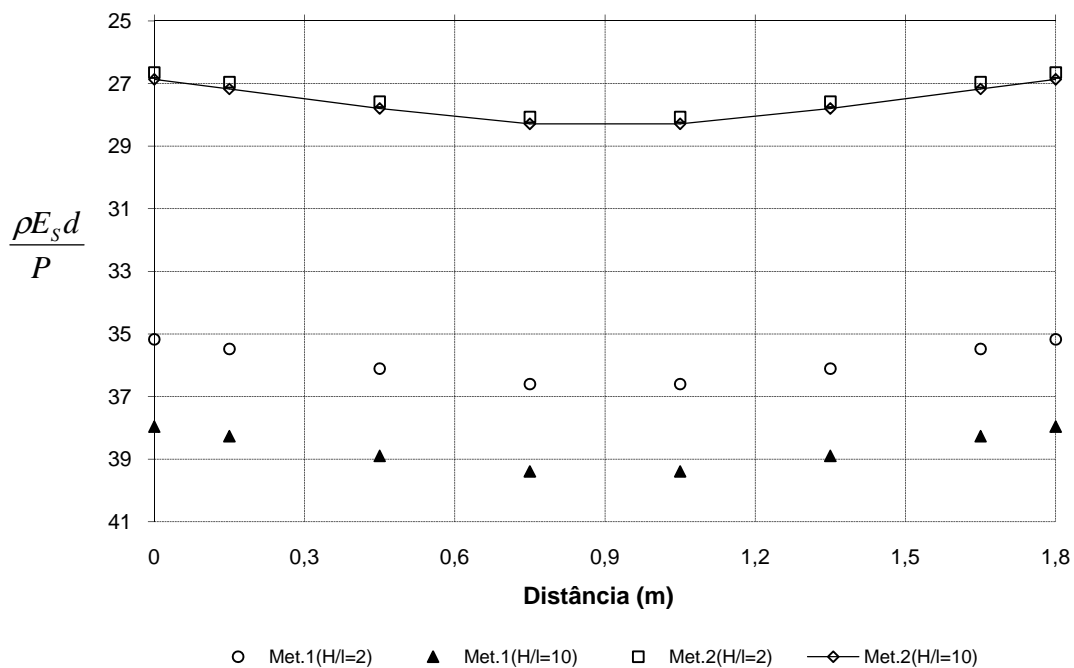
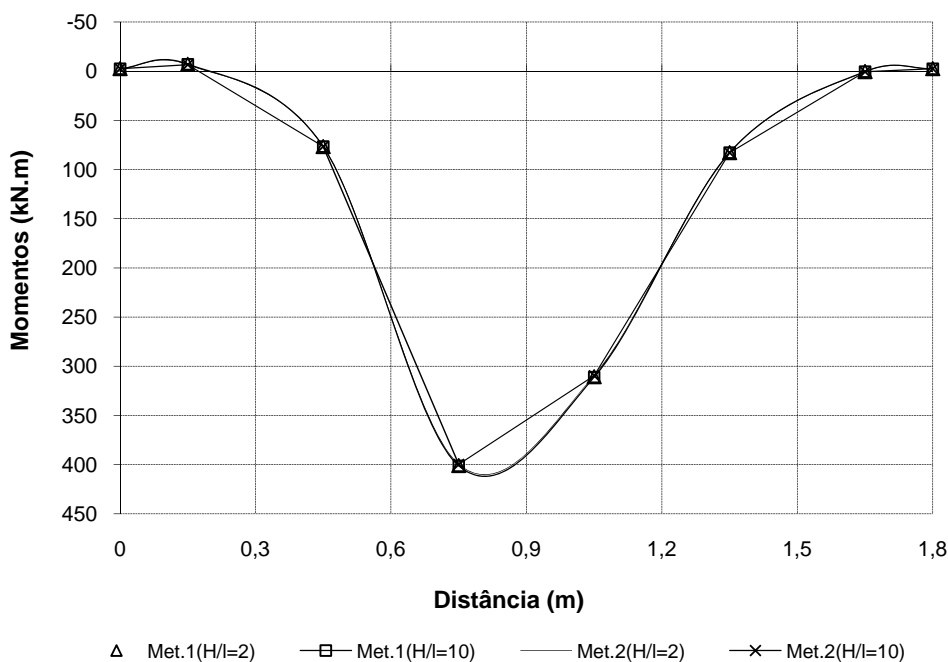


Figura 4.3 – Recalques Normalizados.

Como mostrado na Figura 4.3 os fatores de interação possuem influência direta no comportamento de resposta do grupo. A “Met.2” e a “Met.1” possuem diferenças na ordem de 30% (Metodologia 1 H/L = 2) a 40% (Metodologia 1 H/L = 10). Os recalques calculados baseados na “Met.1” possuem diferença de 9% em função da variação de H/L, todos em relação aos valores dos recalques da “Met.1”.

Em termos de momentos, a Figura 4.4, apresenta o comportamento do conjunto ao longo do centro da placa no corte A-A, para a rigidez das estacas de **K = 181488,2**.



**Figura 4.4 – Momentos ao longo da placa.**

A Figura 4.5 apresenta os esforços de reação ocorridos entre as estacas baseado nos dois métodos descritos, podendo ser observado a pouca variação em porcentagem entre os métodos. Podendo inferir que é pequena a influência destes distintos métodos quanto aos esforços de reação, mas ainda apresentou diferenças, o que poderia acarretar distorções nas análises seguintes.

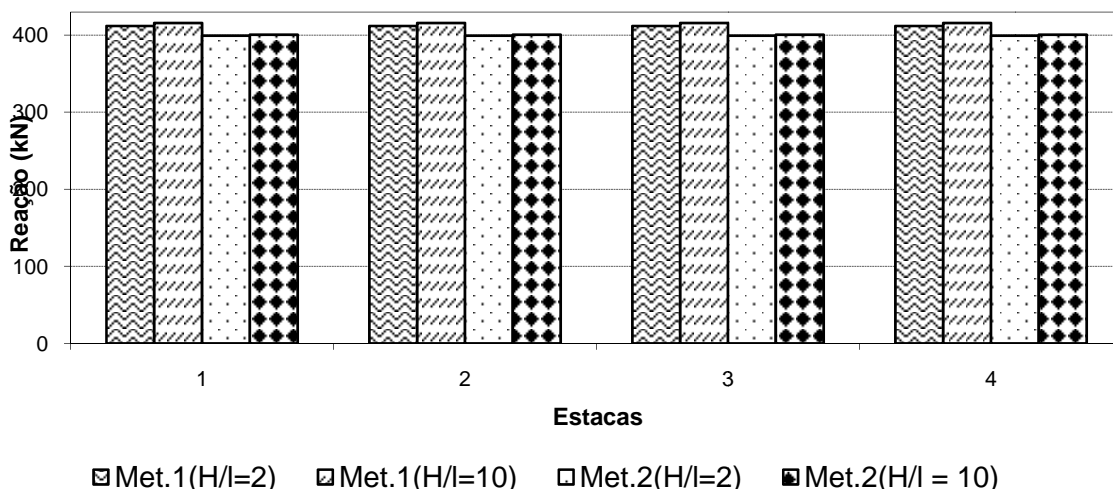


Figura 4.5 - Reação das Estacas.

Pode-se concluir, então, que os valores dos fatores de interação além de variar em função do espaçamento são também influenciados em função da relação H/L, mesmo que seja pequena esta influência, que também está relacionada com a hipótese de cálculo.

A influência destes fatores nos percentuais de redistribuição de carga entre as estacas e o bloco, Figura 4.6, é diferente para os distintos métodos de cálculo, em que na metodologia 2 estes estão muito próximos enquanto que a metodologia 1 há diferença para mudanças no comprimento relativo.

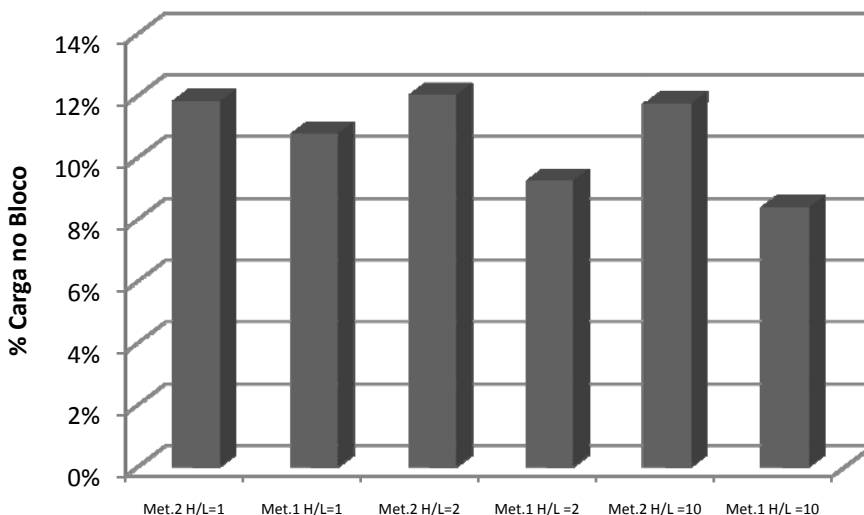


Figura 4.6 – Porcentagem de carregamento transferido ao bloco.

Logo, para avaliar o comportamento do grupo estaqueado com diferentes configurações foi adotada nesta pesquisa a “Metodologia 2”, ou seja, as expressões aproximadas de Randolph (1985), por não introduzir mais uma variável no problema, o fator de interação variando com outras incógnitas.

## 4.2. GRUPO DE 4 ESTACAS

Nos problemas estudados o carregamento pode ser definido por meio da intensidade  $\mathbf{P}$  de uma carga uniformemente distribuída no centro do bloco sobre um elemento de área de 30 por 30cm, de uma fundação quadrada de lado  $B$  igual a 150 cm apoiada sobre quatro estacas.

### 4.2.1. Grupo com Estacas Intactas e Danificadas

Com o objetivo de criar uma referência para a análise de reforço do grupo de radier estaqueado, primeiro considerou-se um bloco quadrado ( $B = 150$  cm,  $E_R = 20$  GPa,  $\nu_R = 0,2$ ) assente sobre uma camada de solo homogêneo ( $H = 20$  m,  $E_S = 50$  MPa,  $\nu_S = 0,3$ ). O bloco foi submetido a uma carga de  $q = 16,167$  MPa ( $P = 1,46$  MN) uniformemente distribuída numa área de 30 por 30 cm, com comprimento relativo da estaca  $H/L$  igual a dois, Figura 4.7.

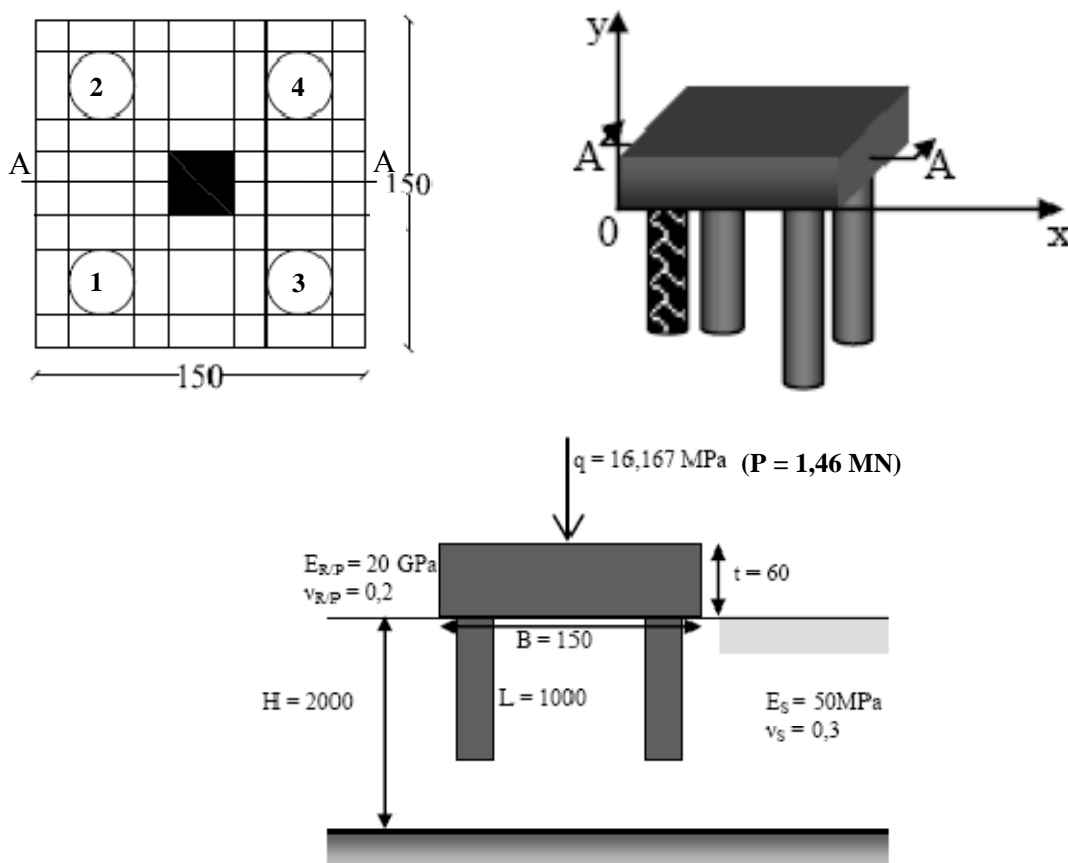


Figura 4.7 - Geometria do problema do grupo de quatro estacas.



Depois de verificado os comportamentos do grupo intacto são feitas as variações das propriedades da estaca 1, simulando o dano no conjunto, mantendo o mesmo nível de carga para o sistema.

As distribuições de recalque normalizados na seção A-A de cada nível de integridade de estaca foram expressas em termos do recalque normalizado ( $I_z$ ), apresentados na Figura 4.8.

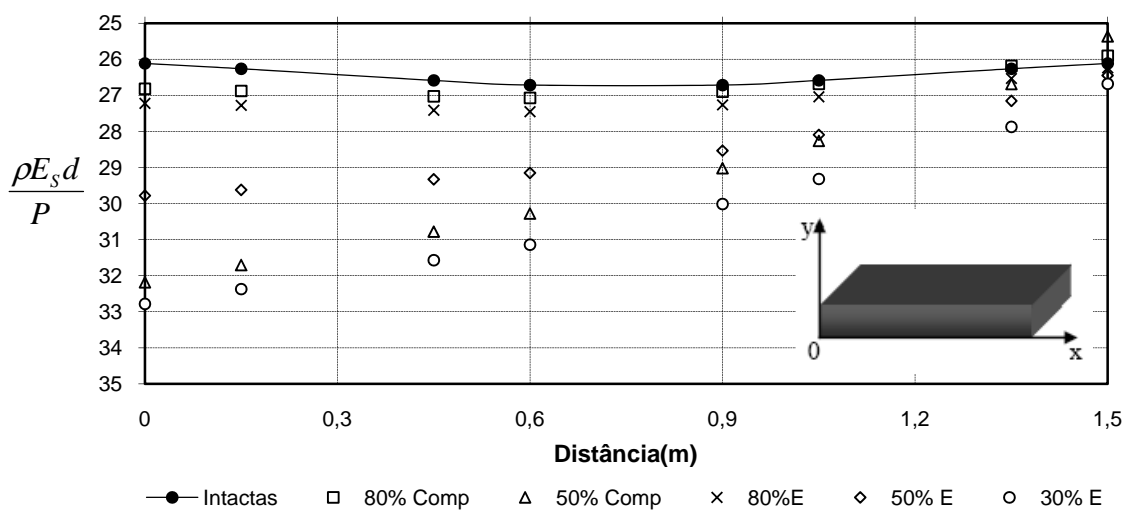


Figura 4.8 – Comportamento do Grupo após o dano.

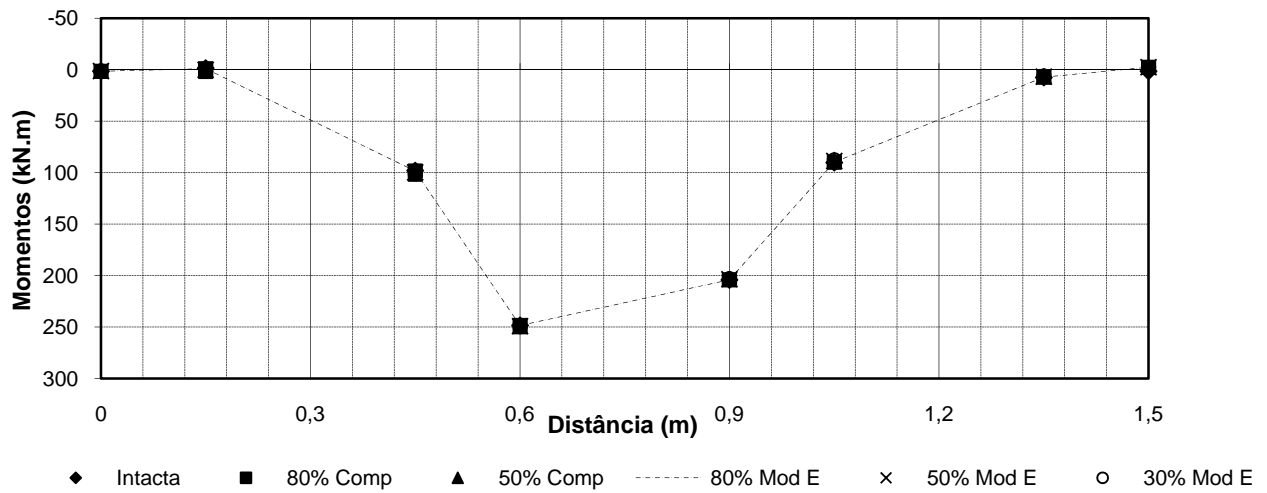
Para danos percentuais de 80%, a diferença entre danos no comprimento e módulo de elasticidade, em relação ao grupo intacto, é de 4%.

Para percentagens maiores de dano, maiores as disparidades entre os mesmos níveis percentuais, ou seja, distintos tipos de dano. Com referência aos recalques máximos os danos de módulo de elasticidade ou comprimento da ordem de 50% em relação a estaca intacta, a diferença de recalques entre os diferentes tipos de dano passa a ser de 11%.

Por meio do gráfico de recalques normalizados apresentados na Figura 4.8 observa-se que os danos provocados pela propriedade geométrica do material, estacas de menor comprimento, são mais decisivos e levam a recalques maiores que os danos causados pelo menor módulo de elasticidade desta estaca.

O comportamento do grupo em relação aos momentos, para ambos os tipos de dano, é

apresentado na Figura 4.9, que também apresenta comportamento similar para os vários níveis e tipos de danos analisados, quando se trata deste corte A-A.



**Figura 4.9 – Momentos na área central da placa.**

A Figura 4.10 apresenta os momentos principais máximos dos casos intacto e danificados em 3-D em toda a placa.

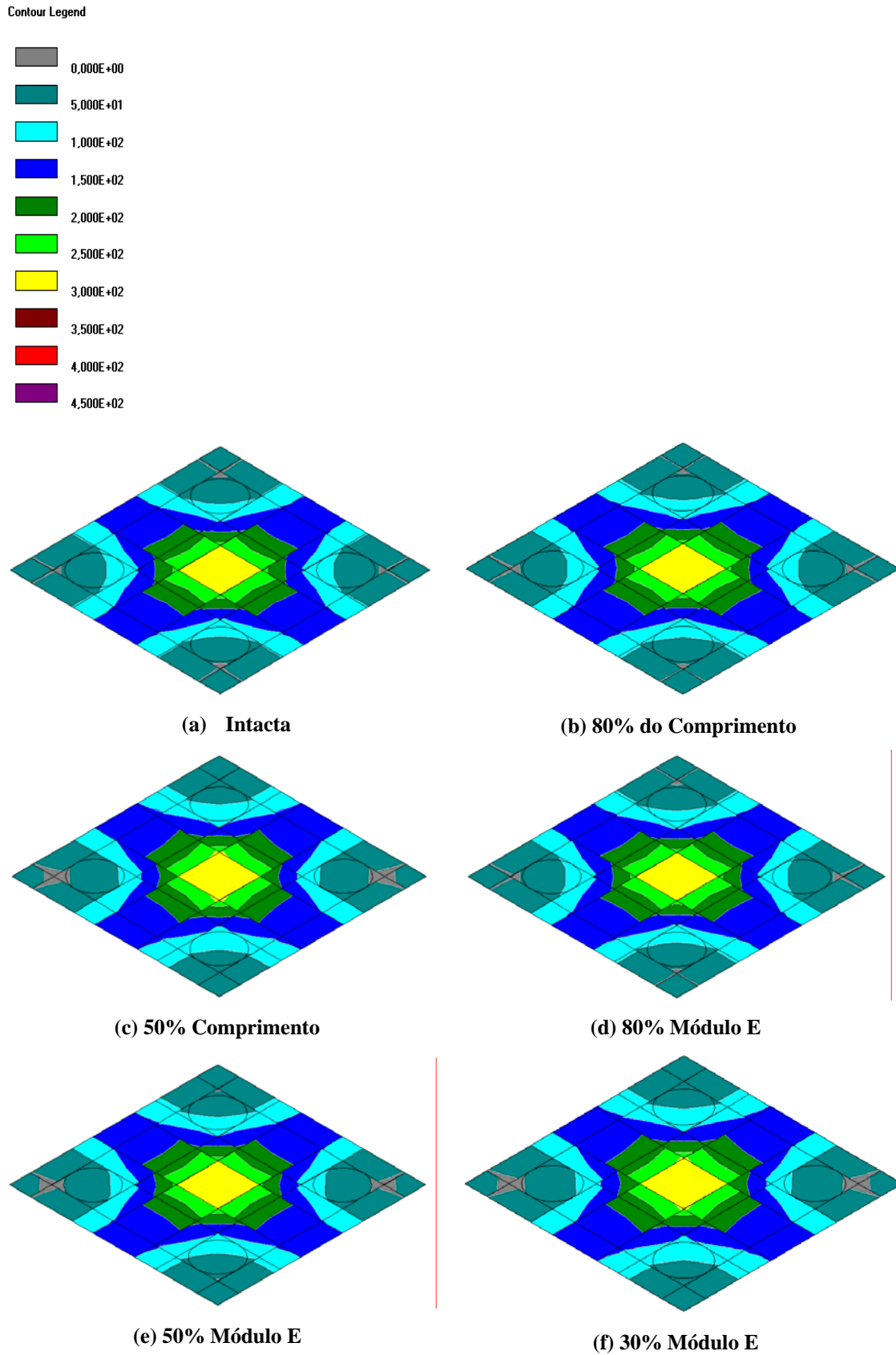


Figura 4.10 – Momentos principais máximo.

Os momentos encontrados nesta seção são similares para o comportamento do grupo intacto

para os vários níveis e tipo de dano, assim como os momentos máximos e mínimos.

As reações causadas por estas estacas em vários níveis de integridade da estaca número 1, para a mesma configuração analisada, Figura 4.11.

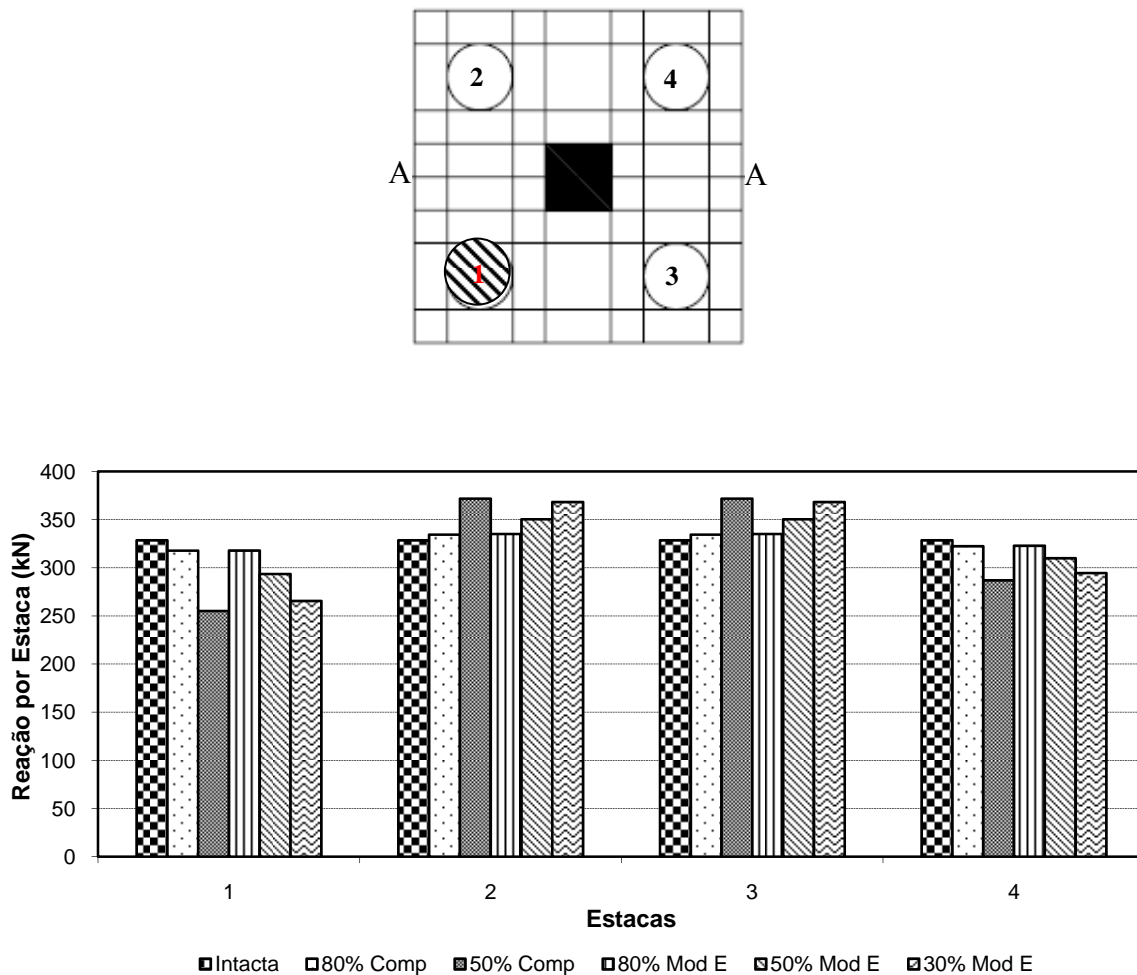


Figura 4.11 – Reação por estaca.

Trata-se de um bloco rígido em uma configuração, quando intacta, simétrica fazendo com que as estacas absorvam a mesma carga.

O objetivo desta análise é verificar quanto são solicitadas as estacas nas distintas situações de análise, ou seja, verificar o novo arranjo de carga das estacas após o aparecimento de um dano. As estacas de menor comprimento estão recebendo menores níveis de carregamento, quando comparadas com as estacas de menor módulo de elasticidade.

Os fatores de segurança (FS) para estacas de menor comprimento, apesar de menor

carregamento diminuem devido a abrupta queda de capacidade de carga. Os fatores de segurança são próximos de 1,0.

Para a variação de integridade a nível de módulo de elasticidade, os fatores de segurança tendem a se manter próximos, devido a pouca perda de capacidade de carga.

Devido à rigidez do bloco e simetria do conjunto, o aumento do dano causado na estaca 1, implicar num alívio da estaca 4, fazendo com que tenha maior FS para estaca 4, porém o FS do grupo tende a acompanhar a estaca 1. A Tabela 4.1 apresenta resumidamente os fatores de segurança de cada estaca e do grupo estaqueado. Para o caso “Danificada” é considerado a situação em que não há a estaca 1 (grupo com 3 estacas).

**Tabela 4.1 – Fatores de Segurança dos vários níveis de dano.**

Níveis de dano	Estaca 1	Estaca 2	Estaca 3	Estaca 4	Fator de Segurança do Grupo
<b>Intacto</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,0</b>
<b>80% Comp</b>	<b>1,28</b>	<b>1,98</b>	<b>1,98</b>	<b>2,08</b>	<b>1,83</b>
<b>80% Mod E</b>	<b>1,60</b>	<b>1,97</b>	<b>1,97</b>	<b>2,05</b>	<b>1,89</b>
<b>50% Comp</b>	<b>1,00</b>	<b>1,78</b>	<b>1,78</b>	<b>2,30</b>	<b>1,72</b>
<b>50% Mod E</b>	<b>1,73</b>	<b>1,89</b>	<b>1,89</b>	<b>2,13</b>	<b>1,89</b>
<b>30% Mod E</b>	<b>1,73</b>	<b>1,80</b>	<b>1,80</b>	<b>2,24</b>	<b>1,89</b>
<b>Danificada</b>	<b>-</b>	<b>1,22</b>	<b>1,22</b>	<b>4,93</b>	<b>1,55</b>

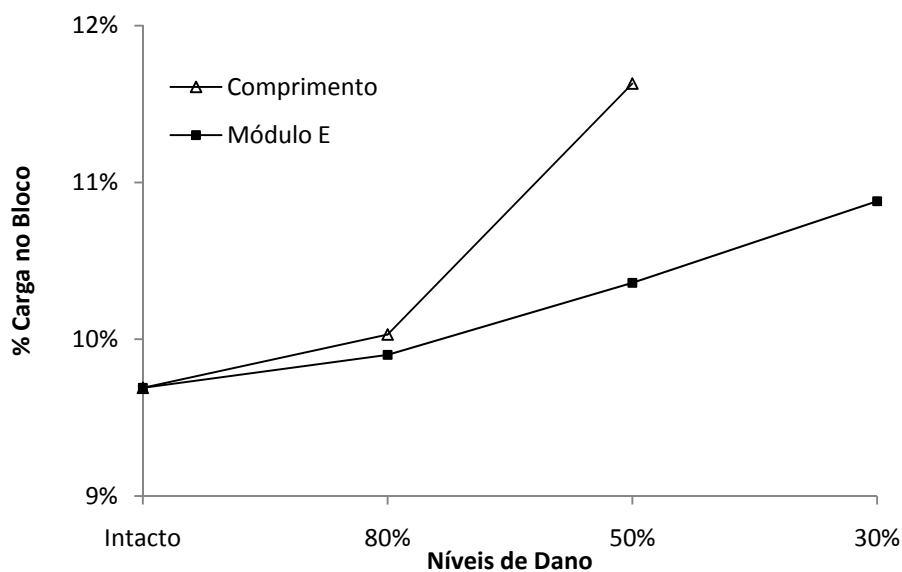
Para a mesma variação imposta por ambos os tipos de danos, a carga de reação para a estaca encurtada varia na ordem de 30% enquanto a enfraquecida 9%. A Tabela 4.2 mostra resumidamente a influência do dano no aumento dos recalques das estacas.

**Tabela 4.2 – Influência da variação do nível de dano.**

Tipo de Dano	Varição dos recalques em relação ao valor original (%)
<b>Encurtamento</b>	
100 a 80% do comprimento	1,38
100 a 50% do comprimento	29,0
<b>Enfraquecimento</b>	
100 a 80% do módulo de elasticidade	2,8
100 a 50% do módulo de elasticidade	14,6
100 a 30% do módulo de elasticidade	29,5

É importante enfatizar o método de cálculo de projeto utilizado, pois, se o método de cálculo for o adotado para blocos tradicionais, ou seja, em que somente as estacas suportam todo o carregamento e o bloco atua somente como elemento de transferência de carga para o solo, então as estacas estarão suportando todo o carregamento transferido a estas, e qualquer dano será potencialmente mais prejudicial ao sistema. Porém, quando a concepção de projeto é alterada, e quando for utilizada a metodologia de radier estaqueado, o bloco terá participação na distribuição desta carga, fazendo com que as estacas estejam trabalhando a um nível de carregamento menor que o esperado pela filosofia anterior, levando a um nível de prejuízo menor no sistema.

Com o aumento do dano causado em uma estaca, a participação do bloco torna-se cada vez maior, ou seja, parte deste carregamento além de transferido para as demais estacas é também transferido para a placa, Figura 4.12.



**Figura 4.12 - Porcentagem de carga no bloco.**

No processo tradicional os custos são mais elevados, apesar de haver maior segurança se comparado com a nova concepção. Porém, se focado apenas na metodologia tradicional o dano de uma das estacas colocaria em risco toda a estrutura. Faz-se então necessária a verificação da estrutura por meio da metodologia de radier estaqueado, onde todo o sistema está trabalhando em conjunto, com participação na distribuição da carga para os elementos horizontais e verticais, verificar realmente se a estrutura está em risco frente a determinado nível de dano.

Tem-se, então, como conclusão parcial deste item, que quanto a níveis de recalque, a estaca de menor comprimento leva a uma maior influência quando comparada à redução de qualidade do material (módulo de elasticidade). Em se tratando de nível de carregamento, nota-se que estacas de menor comprimento tendem a receber menores níveis de carregamento, por sua menor rigidez, tornando, assim, esta situação mais prejudicial do que a qualidade do material, atingindo valores próximos a ruptura. Vale enfatizar que esta conclusão se dá para esta configuração de problema, levando em conta, além das propriedades, a configuração do grupo estaqueado e as propriedades do solo em questão.

Para o grupo de estacas íntegras e para o grupo de estacas danificadas, não houve variações significativas de momentos fletores no centro bloco, podendo isto ser atribuído à simetria do grupo no caso de estacas íntegras. Ao grupo com estaca danificada, este fato pode ser atribuído ao aumento do recalque absoluto. Este aspecto foi comentado, embora em outro contexto distinto de reforço de blocos, por Mandolini *et al.*, 2005.

#### **4.2.2. Reforço com Adição de Estacas**

Depois de observado o comportamento do grupo de quatro estacas íntegras e analisado o comportamento do novo arranjo causado por dois tipos de dano em vários níveis, passa-se a um questionamento que muitos engenheiros fazem nesta etapa de uma obra: “Que tipo de reforço será necessário?”. A este soma-se a seguinte dúvida “e como será a distribuição de esforços e deslocamentos no bloco pós-reforço?”.

A primeira medida de muitos engenheiros é a de procurar uma solução de substituição da estaca danificada por outra localizada próxima a esta, e com as mesmas propriedades. Porém, esta hipótese não leva em consideração o nível de dano causado, até porque se desconhece o instrumento que possa quantificar este nível de dano, além da influência do bloco que será acrescido no sistema.

Nesta etapa serão avaliadas algumas simulações de reforço verificando quais destas possui melhor eficiência, levando em conta o comportamento do grupo, e verificando seu desempenho quanto a forças de reação de cada estaca, para determinar para as várias situações o nível do fator de segurança. São ainda avaliados os momentos ao longo do bloco e os

momentos máximos e mínimos, para determinação da necessidade de armação na deformada ao longo do comprimento do bloco, e também dos recalques máximos e mínimos.

São apresentados algumas alternativas de reforço com o objetivo de avaliar o melhor custo-benefício em função do desempenho de cada alternativa. Neste sentido, procurou-se alterar comprimento, diâmetro, módulo de elasticidade do novo elemento a ser adicionado, tendo como referência as estacas íntegras, além de sua melhor posição no grupo.

#### 4.2.2.1. Grupo Reforçado com Estacas contendo Propriedades Similares


O nível de dano a ser aqui utilizado é o caso mais crítico, ou seja, aquele em que estaca está completamente comprometida, tendo, então, que desconsiderá-la no projeto. Desta forma a estaca defeituosa é considerada (e simulada) como inexistente na análise numérica de reforço.

O nível de carregamento é o mesmo utilizado para o caso de estacas intactas, pois simula um defeito ocorrido durante a execução, mantendo as características de carregamento anteriores calculados.

Neste caso a estaca a ser incluída no grupo possui as mesmas propriedades geométricas e físicas que as estacas intactas. É importante lembrar que para esta inclusão se faz necessário o aumento do bloco, logo, este aumento tem influência direta com a capacidade de carga do elemento superficial, conseqüentemente no sistema.

A Figura 4.13 apresenta os casos que serão utilizados como opção de reforço.

Legenda:

 Estaca de Reforço

 Estaca Danificada



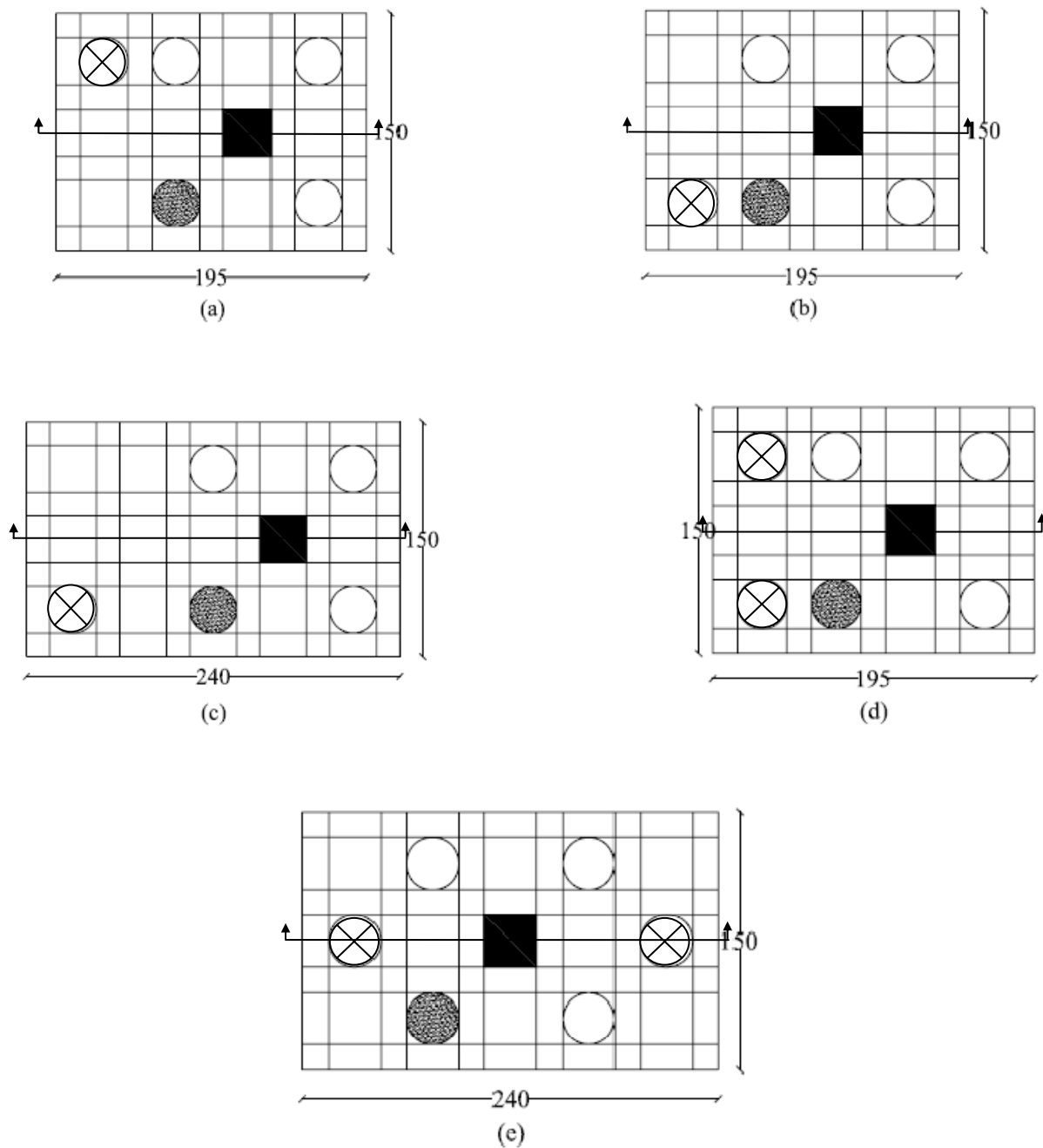


Figura 4.13 – Grupos Reforçados (a) Caso 1 (b) Caso 2 (c) Caso 3 (d) Caso 4 (e) Caso 5.

A Figura 4.14 apresenta os recalques dos grupos supracitados em relação ao grupo intacto em uma seção A-A, que passa ao centro do bloco. Os recalques do conjunto após o reforço, para todos os casos apresentam grande melhoria, quando comparado ao grupo danificado, em termos de controle de recalques.

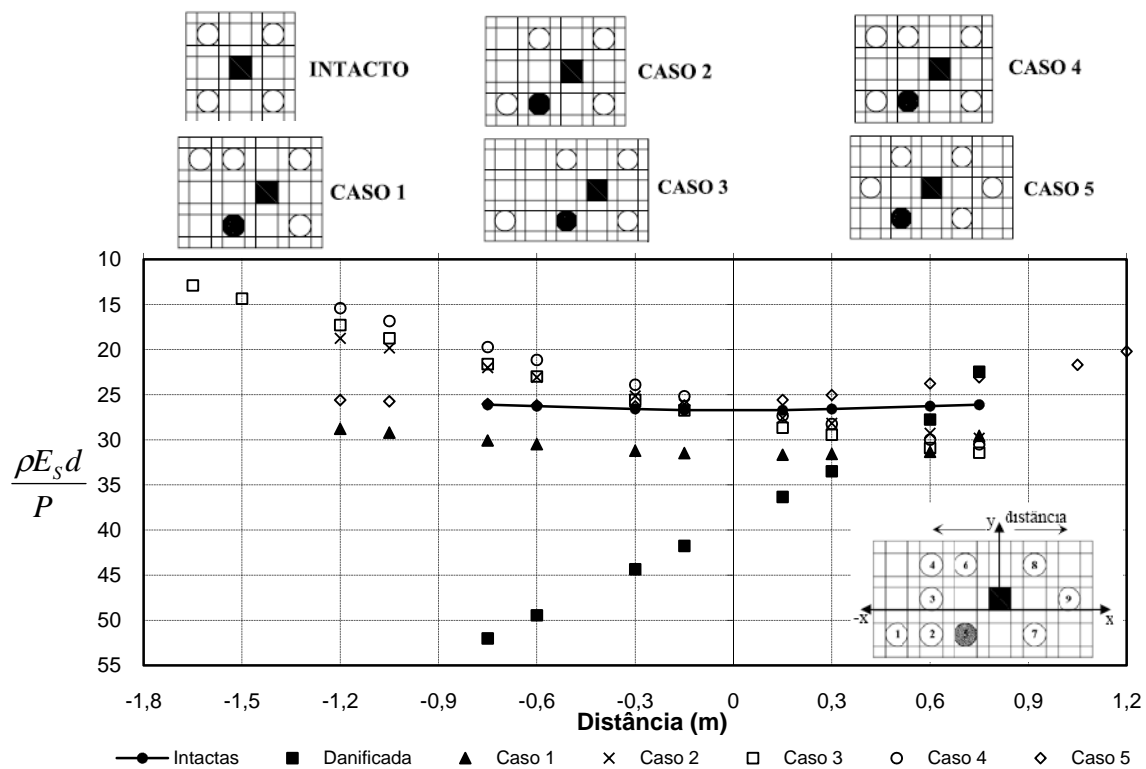


Figura 4.14 – Deformações ao longo da placa.

Para os casos que tiveram os mesmos aumentos de bloco (45 cm), Casos 1, 2 e 4, estes tiveram parte dos recalques diferenciais controlados pela posição da nova estaca. Tendo o Caso 1 maiores recalques absolutos, porém menores recalques diferenciais, apresentando um comportamento do sistema semelhante ao grupo intacto, o aumento no volume de concreto no bloco foi de  $0,405\text{m}^3$ , o que é considerado na análise final de reforço.

O acréscimo de uma estaca a mais de reforço (2 estacas de reforço), no Caso 4, além de elevar o custo desta solução tende a maiores recalques diferenciais, o que pode transferir danos à superestrutura.

Os casos 2 e 3 possuem características bastante comuns em relação aos seus comportamentos na curva, apesar do Caso 3 apresentar aumento de  $0,81\text{m}^3$  de concreto enquanto o Caso 2 aumento de  $0,405\text{m}^3$  somente no bloco sem contar com os  $0,71\text{m}^3$  a mais de concreto, para esta configuração que apresenta semelhante comportamento, ao outro caso possui os mesmos recalques diferenciais e absolutos. Porém no Caso 2 as estacas encontram-se a uma distância menor que três vezes o diâmetro da mesma ( $s < 3d$ ).

O Caso 4 apresenta volume de concreto, valores de  $0,81\text{m}^3$  para bloco e  $0,70\text{m}^3$  por estaca

adicional, chegando a um volume total de concreto de 1,51m<sup>3</sup>.

O Caso 5 apresentou resultados a níveis de recalques mais satisfatórios apresentando menores recalques diferenciais e absolutos, com um volume de concreto utilizado nesse caso é de 0,81m<sup>3</sup> de concreto mais 0,70m<sup>3</sup> por estaca utilizada.

Os momentos fletores que ocorrem em vários tipos de reforço são apresentados na Figura 4.15.

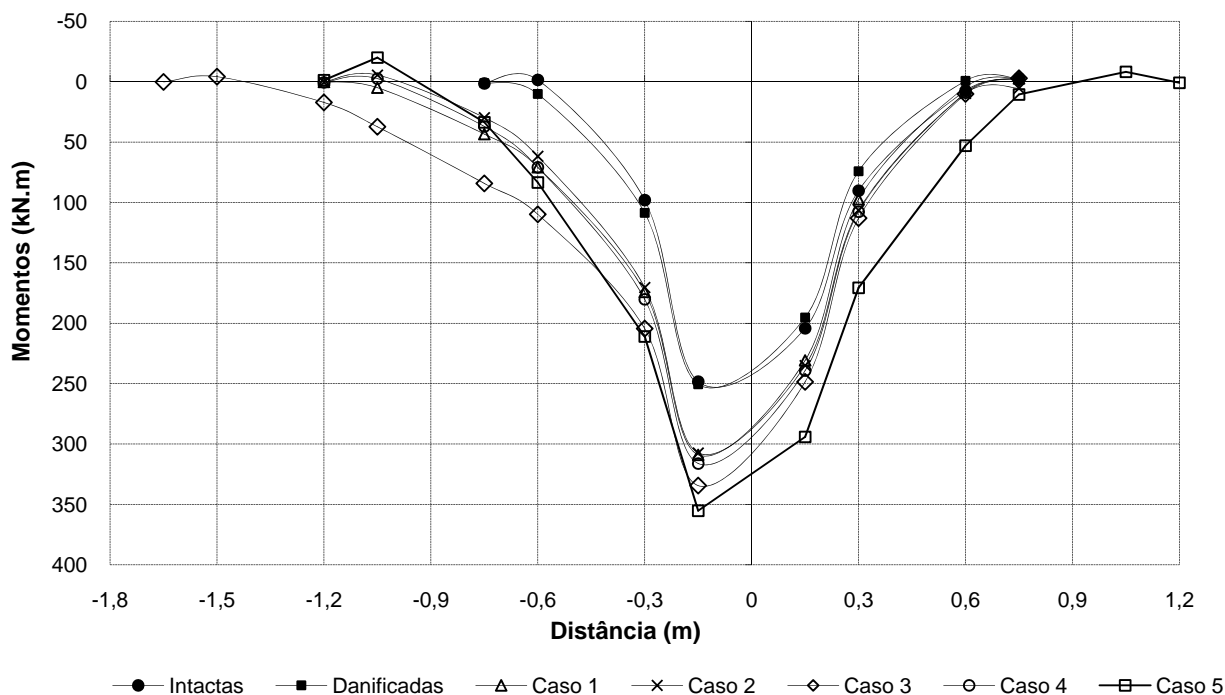


Figura 4.15 – Momentos em relação aos vários casos.

Todos os tipos de reforços tenderam a aumentar os momentos, o que ocorre em função do aumento da dimensão do bloco, e posicionamento de estacas mais distantes do ponto de carga. Estes momentos estarão diretamente ligados ao aumento de armadura de aço no bloco, e a um maior custo do mesmo. A média do aumento causado por estes reforços é de 27% em relação ao grupo de estacas intactas, que se tem aqui como referência.

A Figura 4.16 apresenta uma configuração genérica de todos os casos estudados e mostra a numeração destas estacas no grupo.

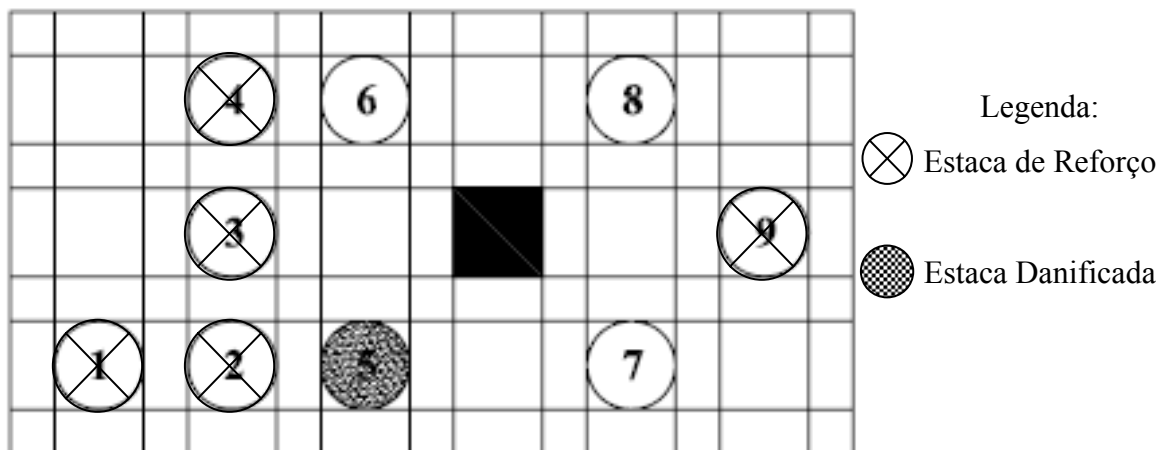


Figura 4.16 – Numeração das estacas para reação destas.

Para avaliar o limite de utilização das estacas para as novas configurações, os esforços de reação devem ser analisados e verificada a redistribuição das cargas, em termos de fator de segurança.

A Figura 4.17 apresenta os esforços de cada estaca dos grupos em várias configurações.

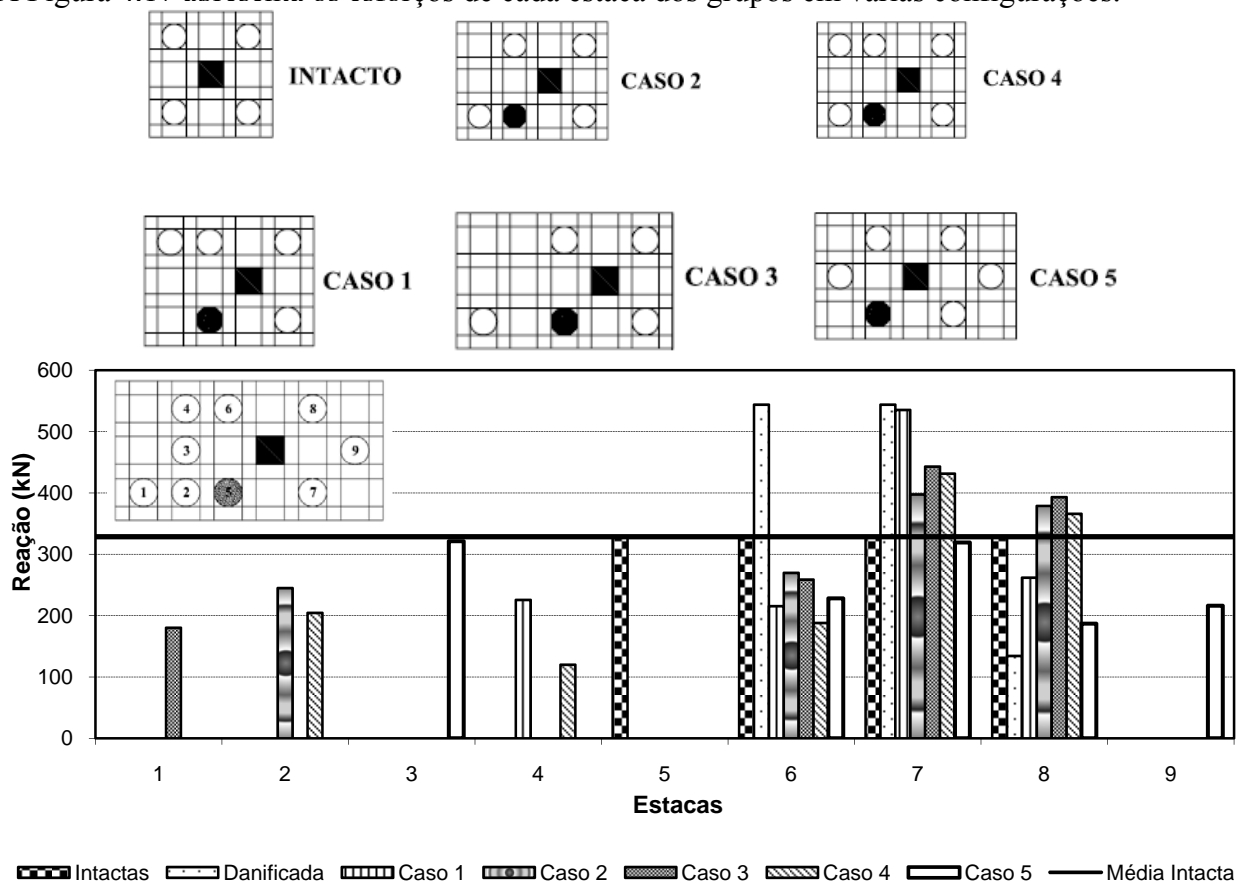


Figura 4.17 – Reação das novas configurações.

O grupo intacto é utilizado com fator de segurança de 2,0, tanto para as estacas quanto para todo o sistema, sendo utilizada a filosofia de projeto de radier estaqueado, quando há participação do bloco na capacidade de carga do conjunto. Então, as estacas intactas com 100% de carregamento de trabalho, significam que estas estão com a porcentagem de carga proporcional a configuração do problema, ou seja, parte do carregamento é suportado pelo bloco e o restante do carregamento é dividido igualmente entre as estacas.

Com o dano causado na estaca 1, parte da carga nele solicitada é transferida para o bloco que passa a ter uma maior participação e para as demais estacas (6 e 7), trabalhando próximo a ruptura, com FS igual a 1,20.

No Caso 1, quando incluída uma nova estaca próxima à intacta, é transferido o carregamento desta para a nova, ou seja, sendo então, transferência da estaca 6 para 4, fazendo com que o fator de segurança desta estaca (6) de 1,20 passe para 3,0. Porém mantendo o FS da estaca 7 igual tanto para o dano quanto para o reforço (Caso 1).

No Caso 2 a estaca incluída foi pouco carregada, ou seja, 75% do o carregamento da estaca intacta, tendo fator de segurança igual a 2,7, redistribuindo o carregamento para as estacas 7 e 8, com 21% e 15%, respectivamente, de carga a mais do que a prevista em projeto para estas estacas alcançando níveis de fator de segurança igual a 1,66 e 1,74.

O Caso 3 apresenta um carregamento de 55% para a estaca 1 (estaca de reforço) e FS de 3,0. Há uma tendência de redistribuição menos uniforme dos esforços em relação ao caso 2, tendo em vista um menor FS das estacas 7 e 8.

No Caso 4 uma distribuição de carga entre os elementos permite que estes estejam com alto FS, com exceção da estaca 7, que se encontra com FS de 1,5.

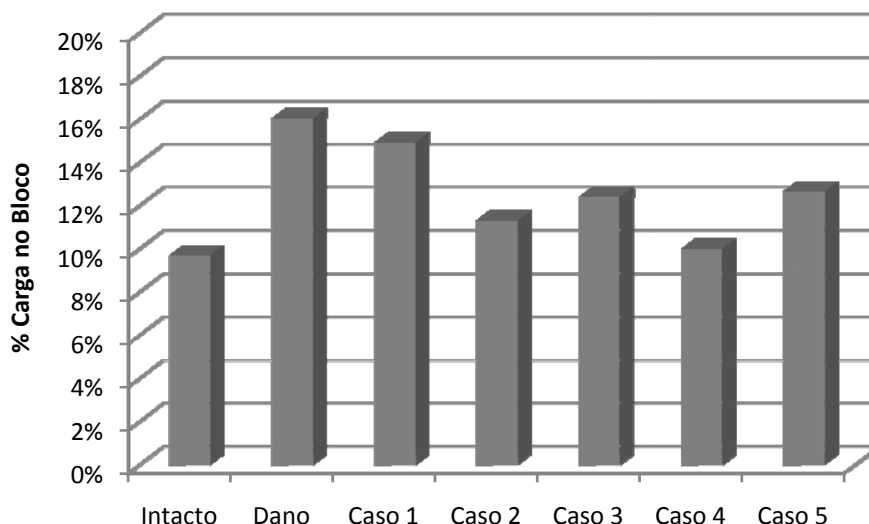
A Tabela 4.3 apresenta o Quadro Resumo dos resultados dos Fatores de Segurança obtidos para as várias alternativas de reforço para o grupo de quatro estacas.

Tabela 4.3 –Fator de Segurança para as alternativas de reforço.

Nº Estaca	Intacta	Danificada	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
1	-	-	-	-	3,67	-	-
2	-	-	-	2,7	-	3,3	-
3	-	-	-	-	-	-	2,1
4	-	-	2,9	-	-	5,5	-
5	2,0	-	-	-	-	-	-
6	2,0	1,2	3,0	2,5	2,6	3,5	2,9
7	2,0	1,2	1,2	1,66	1,5	1,5	2,1
8	2,0	5,0	2,5	1,74	1,68	1,80	3,5
9	-	-	-	-	-	-	3,1
FS Grupo	2,0	1,02	2,02	2,02	2,04	2,5	2,5

Para o Caso 5, é apresentada uma redistribuição de carga de forma que estas estejam com carregamento igual ou menor do que as estacas de projeto intactas. Devendo ser levado em consideração o volume de concreto utilizado, além do aumento do bloco a adição das duas estas.

Para as várias configurações apresentadas deve ser notada a maior ou menor participação do bloco no comportamento do conjunto. Tal fato vem complementar os dados de fator de segurança, pois pode ser percebida a importância do bloco, que mostra sua maior participação para um grupo danificado ou quando as estacas estão mais espaçadas entre si, Figura 4.18.



**Figura 4.18 – Porcentagem de carga aplicada no bloco.**

#### 4.2.2.2. Grupo Reforçado com Estacas contendo Propriedades Diferentes

Foram simuladas variações nas propriedades deste elemento de reforço para uma das configurações para alternativas otimizadas de projeto, sendo levados em consideração os comportamentos do conjunto e os fatores de segurança que atendem às condições de serviço.

São apresentadas as variações nas propriedades para o Caso 3, por se tratar de um caso comum na prática.

Três variações são mostradas a seguir: no comprimento, no diâmetro e no módulo de elasticidade do material da estaca utilizada como reforço. Todas estas variações são feitas para o nível de 50% da propriedade relativo à estaca íntegra.

O grupo de estacas intactas foi utilizado como referência juntamente com o comportamento do grupo reforçado “Padrão”, com as mesmas propriedades físicas e geométricas (Caso 3), para que se possam avaliar os recalques, momentos e esforços de reação das estacas.

A Figura 4.19 apresenta os recalques do grupo com as variações nas propriedades do reforço, na região central da placa.

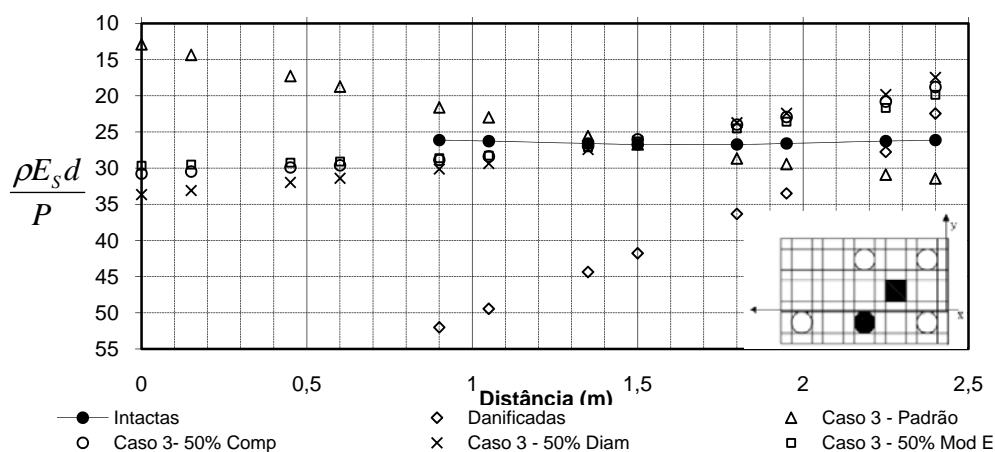


Figura 4.19 – Variações nas Propriedades de Reforço.

O “Caso 3 – 50% Mod E” dos métodos alternativos de reforço apresentado foi o que apresentou menores recalques diferenciais seguidos do “Caso 3 -50% Comp”. As três variações possuem comportamento similar, para os recalques diferenciais, se distinguindo do caso “Padrão” foi o lado intacto que sofreu maiores recalques.

Além disso, outro aspecto deve ser levado em consideração para avaliação de qual das alternativas conduz a um melhor controle de recalques diferenciais do sistema. Por isso, deve-se fazer uma avaliação econômica dos três casos alternativos e verificar o menos dispendioso. Para isso, será considerado também o volume de concreto a ser utilizado.

A Tabela 4.4 apresenta a quantidade estimada de volume de concreto de todo o sistema para cada tipo de reforço, não levando em consideração as armaduras de aço.

Tabela 4.4 – Volume de Concreto utilizado para o reforço (Caso 3).

Tipo de Reforço	Volume de Concreto Total (m <sup>3</sup> )
Padrão	0,71
50% Comprimento	0,35
50% Diâmetro	0,18
50% Módulo de Elasticidade	0,71

Levando em consideração somente o volume de concreto a alternativa de reforço com estacas de menor diâmetro que o atual, ou seja, com 50% do diâmetro da estaca íntegra, apresenta bom desempenho. Porém, em termos práticos dever ser levado em consideração a



exequibilidade do reforço, pois dependendo da situação da obra, deve ser dada preferência para uma uniformidade de diâmetro. Isto porque para uma possível alteração deste diâmetro também teria que ser levado em consideração o custo de mobilização de equipamento alternativo.

Quanto à redução do módulo de elasticidade na estaca de reforço, deve-se ter cuidado para mobilidade de equipamentos, pois, em se tratando de concreto produzido por concreteira, deve ser feito um levantamento de custo adicional.

Na Figura 4.20 é apresentado o comportamento do grupo levando em consideração os momentos causados pela adição do reforço, para que se possa avaliar o incremento de aço na estrutura.

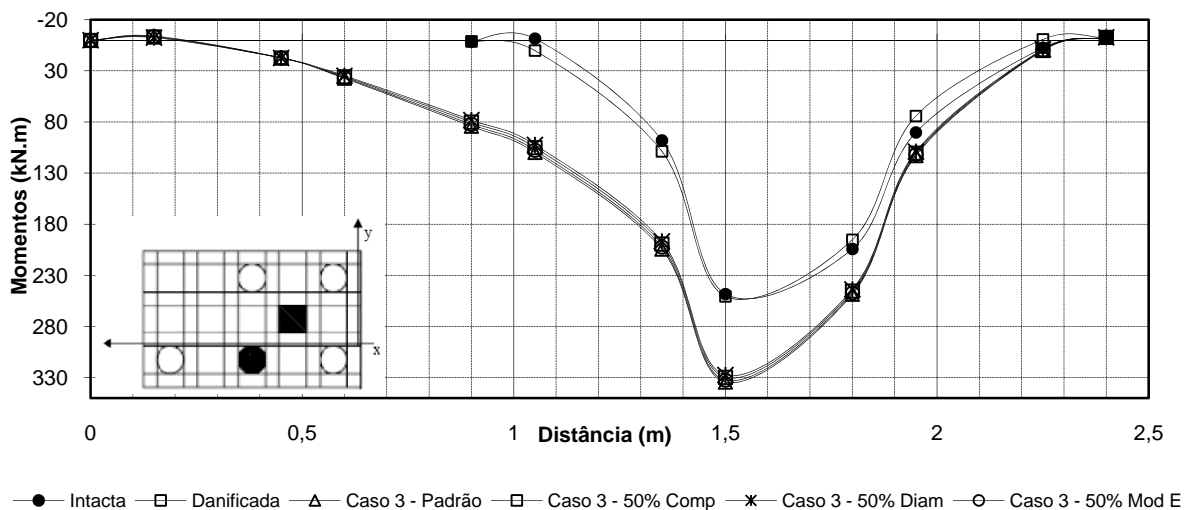


Figura 4.20 – Momentos por adição do Reforço.

A Tabela 4.5 mostra a variação dos momentos com a inclusão do reforço em relação ao grupo intacto.

Tabela 4.5 – Porcentagem de Acréscimo de Momentos em relação ao Grupo Intacto.

Tipo de Reforço	% de Acréscimo de Momentos Máximos em relação ao Grupo Intacto
Padrão	29
50% Comprimento	31
50% Diâmetro	30
50% Módulo de elasticidade	31

Com o aumento do bloco e o afastamento da estaca de reforço fez com que houvesse aumento dos momentos com os blocos menos rígidos.

A Figura 4.21 mostra o grupo analisado com a numeração das estacas para verificação dos esforços de reação das estacas. A Figura 4.22 apresenta os esforços de reação do grupo em questão.

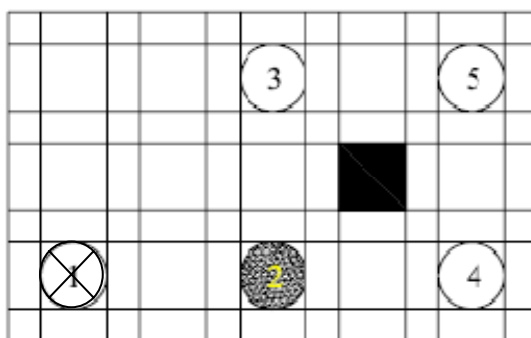


Figura 4.21 – Configuração das Redistribuições das Cargas devido ao Reforço.

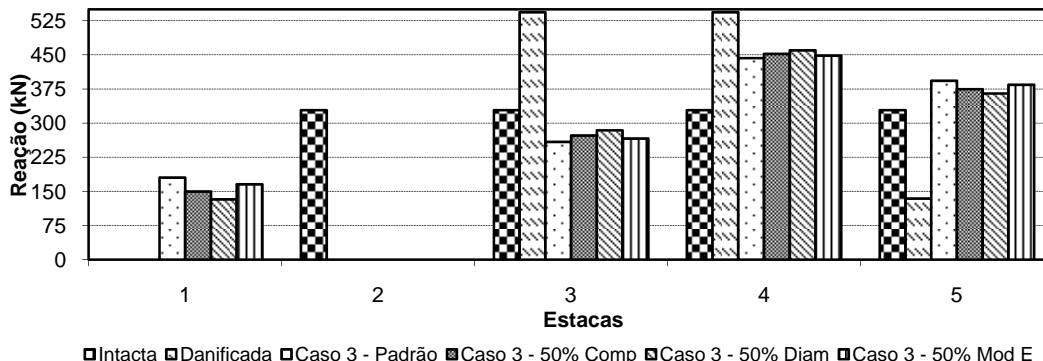


Figura 4.22 – Reação por estaca.

Para qualquer alteração nas propriedades deste tipo de reforço as reações das estacas são similares. Porém, a maior preocupação que se deve ter para o comportamento do conjunto após a redistribuição da carga é em saber se as estacas que são mais carregadas suportam este carregamento, pois há variações em sua capacidade de carga. Para as estacas intactas verificou-se o excesso de carregamento após a redistribuição, verificando também o fator de segurança.

A Tabela 4.6 apresenta a porcentagem de carga transferida a estaca de número 4, de acordo com as alternativas de soluções com a transferência no carregamento para as estacas 4 e 5, o fator de segurança tende diminuir, contudo, estão ainda dentro dos limites de fator de segurança, não mais os exigidos por norma.

**Tabela 4.6 – Porcentagem do Acréscimo de Carga na Estaca 4.**

<b>Tipo de Reforço</b>	<b>Acréscimo de Carga (%)</b>
Caso Padrão	35
Caso 50% Comprimento	37
Caso 50% Diâmetro	40
Caso 50% Módulo de elasticidade	36

Apesar do mesmo nível de esforço aplicado nas estacas de reforço o “Caso-50% Comp” possui o menor FS (1,70).

A Tabela 4.7 apresenta o Quadro Resumo dos Fatores de Segurança obtidos para as várias alternativas de reforço para o grupo de quatro estacas.

**Tabela 4.7 - Fatores de Segurança para Grupo Reforçado com propriedades distintas.**

<b>Nº Estaca</b>	<b>FS Estaca 1</b>	<b>FS Estaca 3</b>	<b>FS Estaca 4</b>	<b>FS Estaca 5</b>	<b>FS Grupo</b>
Intacta	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Padrão	3,67	2,55	1,49	1,68	2,04
50% Comp	1,70	2,42	1,46	1,76	1,77
50% Diam	3,11	2,33	1,47	1,8	1,88
50% Mod E	3,07	2,48	1,48	1,72	1,95
Danificada	-	1,2	1,2	5,0	1,02

Para qualquer tipo de reforço, as estacas 4 e 5 são as mais solicitadas, tendo, em geral FS em torno de 1,60. Mantendo o FS do grupo na ordem de 1,90, o que poderia ser aceitável em projeto.

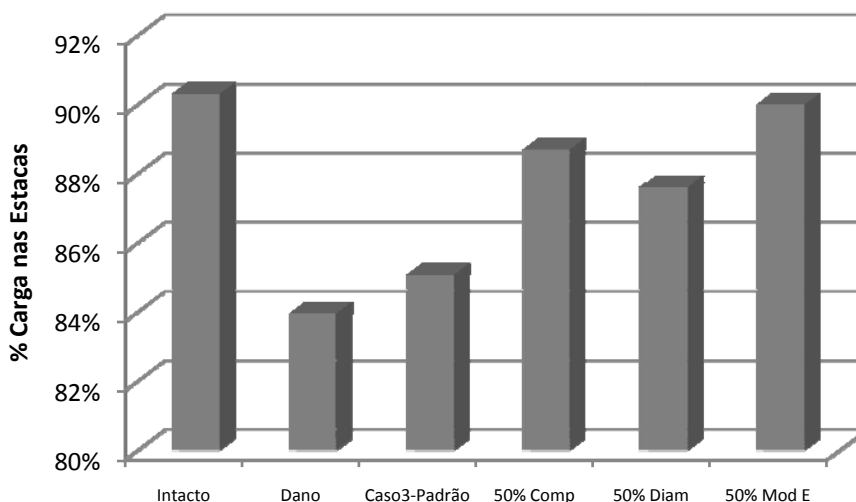
Os reforços não trabalham no limite de sua capacidade última, tendo FS maior que 3,0, com exceção do “Caso-50% Comp” que possui fator de 1,70.

Em termos de fator de segurança a situação que apresentou todas as estacas com FS ideal, ou seja, igual ou maior que 2,0, foi o Caso 5, em que foi considerado duas estacas de mesmas propriedades que as demais estacas, porém, também deve ser levado em consideração o volume de concreto utilizado para a execução deste reforço.

Para as demais alternativas de reforço com a adição de uma nova estaca houve redistribuição do carregamento entre as estacas e o bloco, fazendo com que uma das estacas (estaca 7) encontre-se abaixo do permitido por norma ( $< 2,0$ ).

Para caso escolhido para análise com propriedades distintas das originais, nenhuma das alternativas pode atender o quesito segurança, pois duas estacas deste grupo encontravam-se com fator de segurança menor que o permitido, além do fator de segurança das estacas, o fator do grupo também está comprometido.

A Figura 4.23 mostra a participação do bloco no auxílio da capacidade de carga.



**Figura 4.23 – Porcentagem de carga transferida para estacas.**

De maneira geral tem-se que para os reforços com propriedades similares, dentre as alternativas apresentadas, a inclusão de apenas 1 estaca não atende às especificações de fator

de segurança maior que dois para uma das estacas, mesmo que o fator de segurança global esteja atendido.

Logo, um grupo de 4 estacas com uma estaca danificada, a alternativa que apresentou melhor solução, levando em consideração o fator de segurança de cada estaca é o Caso 5, inclusão de 2 estacas no grupo, uma estaca em cada lado do bloco.

Para este grupo de 4 estacas, quando analisado o Caso 3, as variações das propriedades apresentam melhoras somente para a estaca 5, porém, não o suficiente para alcançar o limite de segurança para a estaca.

### **4.3. GRUPO DE 3 ESTACAS**

Do mesmo modo que foi utilizado para o grupo de 4 estacas, estudou-se o comportamento para um grupo rígido de 3 estacas, visto ser este também um caso freqüente na prática que também é um caso simétrico de grupo de estaca.

Assim como no caso anteriormente estudado, o nível de carregamento aplicado será a carga de trabalho de intensidade **P** uniformemente distribuída no centro do bloco sobre um elemento de área de 30 por 30cm de uma fundação quadrada de lado B igual a 150cm. A Figura 4.24 apresenta a análise em questão.

#### **4.3.1. Grupo com Estacas Intactas e Danificadas**

Considerou-se um bloco quadrado ( $B = 150\text{cm}$ ,  $t = 60\text{cm}$ ,  $E_R = 20\text{GPa}$ ,  $\nu_R = 0,2$  e  $L = 1000\text{cm}$ ) assente sobre uma camada de solo homogêneo ( $H = 2000\text{cm}$ ,  $E_S = 50\text{MPa}$ ,  $\nu_S = 0,3$ ), como mostra a Figura 4.24. O grupo foi submetido a uma pressão,  $q = 12,494\text{MPa}$ , uniformemente distribuída em um elemento de 30 cm por 30 cm, e este carregamento aplicado no centro de gravidade das três estacas. Foi analisado o valor de comprimento relativo da estaca  $H/L$  igual a 2,0. O fator de segurança global do grupo (estacas mais o bloco) é igual a dois.

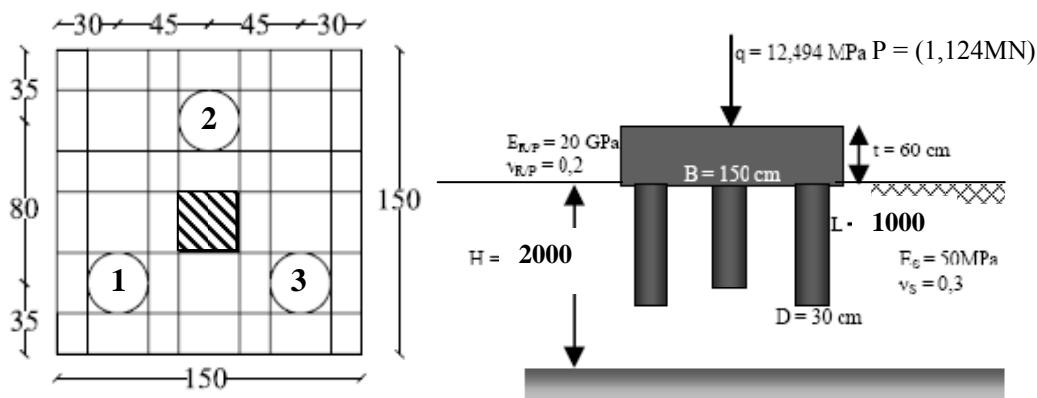


Figura 4.24 – Grupo 3 estacas Intactas.

Para os recalques ao longo da placa para o estaqueamento verificou-se inicialmente o comportamento em uma seção transversal no meio do bloco, e em seguida verificou-se o comportamento simulando o dano em uma estaca.

Os danos foram simulados na estaca 1, variando em estados percentuais de 80%, 50% e 30% da propriedade em relação a estaca intacta, em modos de propriedades físicas e geométricas.

Os recalques normalizados do grupo intacto e dos danos simulados são apresentados na Figura 4.25.

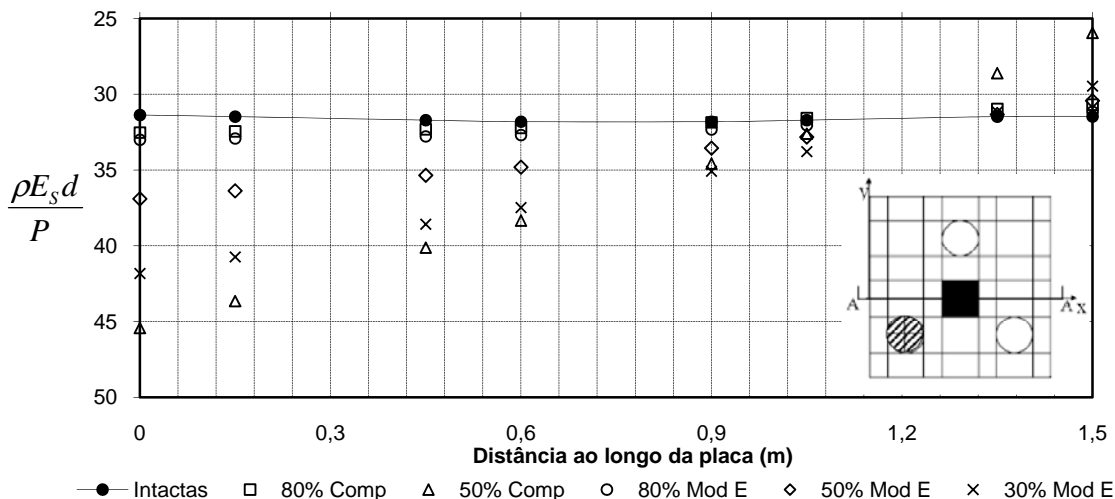
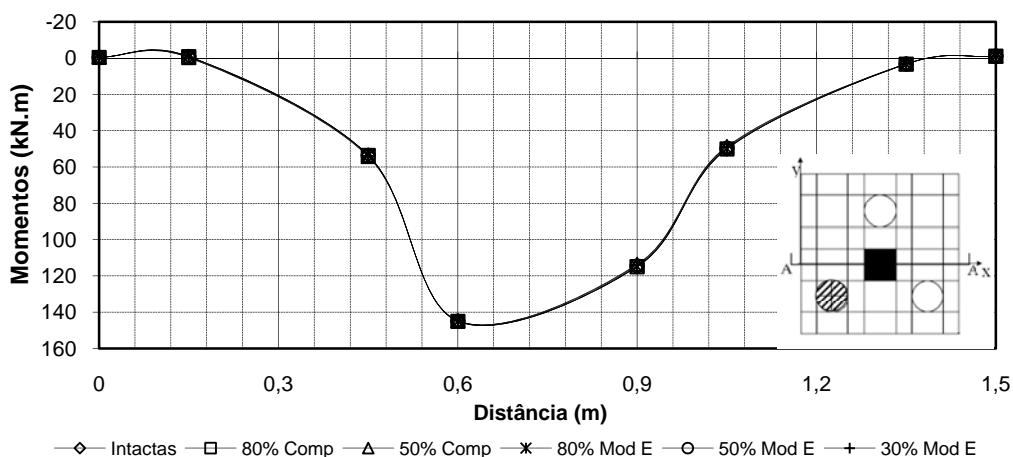


Figura 4.25 – Comportamento do Grupo após o dano.

Os recalques de 80% de dano, tanto para o comprimento quanto para a qualidade do material são apresentados próximos aos do grupo intacto (3%). A partir deste nível há disparidades maiores dos recalques.

Os danos provocados pela menor comprimento da estaca são mais significantes do que os causados pelo menor módulo elástico da estaca, considerando as mesmas variações percentuais.

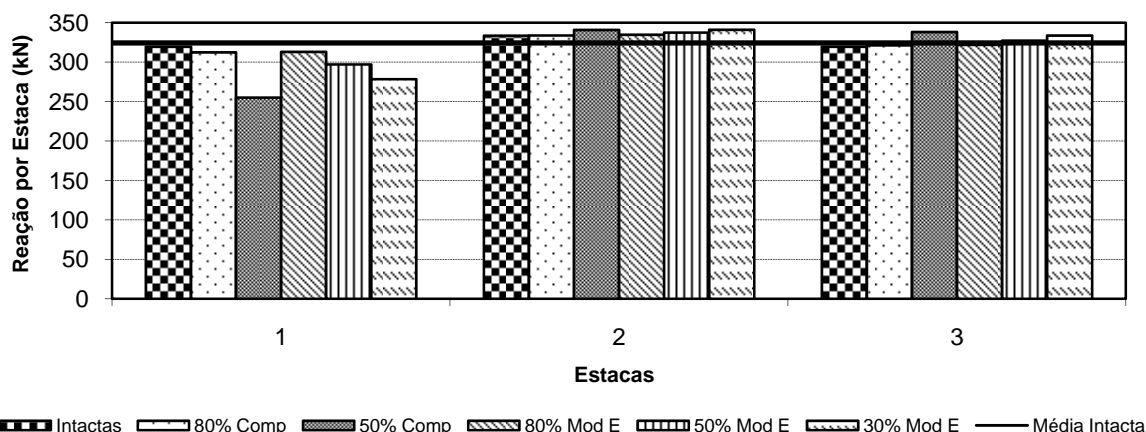
O comportamento do grupo em relação aos momentos fletores é apresentado na Figura 4.26.



**Figura 4.26 – Momentos na área central da placa.**

Os momentos encontrados são similares, não havendo acréscimo dos momentos do grupo danificado em relação ao intacto.

As reações causadas por estas estacas nas várias soluções são apresentadas na Figura 4.27.



**Figura 4.27 – Reação por Estaca.**

O grupo intacto simétrico apresenta esforços de reação com níveis de carregamentos

próximos entre as três estacas, visto que o carregamento situa-se no centro de massa deste grupo.

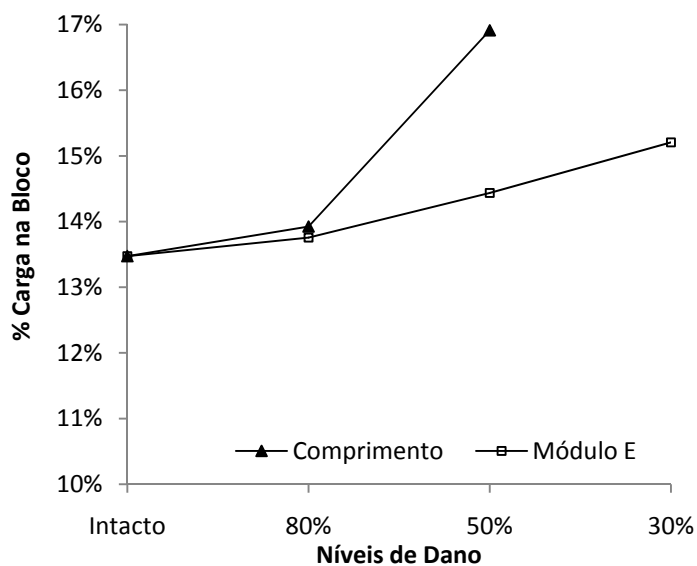
Com a estaca 1 apresentando danos, esta transfere para as outras duas estacas, estacas 2 e 3, para qualquer tipo ou nível de dano, são acrescidas de carga em valores bem próximos, contudo, a capacidade de carga destas estacas é variada, possuindo estacas no limite de ruptura.

A Tabela 4.8 apresenta os fatores de segurança após os danos causados na estaca 1.

**Tabela 4.8 - Os fatores de segurança do grupo danificado.**

Níveis de dano	Estaca 1	Estaca 2	Estaca 3	Fator de Segurança do Grupo
Intacto	2,07	1,98	2,06	2,00
80% Comp	1,30	1,98	2,06	1,75
80% Mod E	1,63	1,97	2,06	1,64
50% Comp	1,00	1,94	1,96	1,87
50% Mod E	1,71	1,97	2,02	1,87
30% Mod E	1,83	1,94	1,98	1,87
Danificada	-	1,68	1,64	1,41

A partir do aumento percentual de dano as estacas tendem a ser menos solicitadas e o bloco possuir maior participação na distribuição da carga, Figura 4.28.



**Figura 4.28 – Percentagem de carga absorvida pelo bloco.**



Para o caso de dano de 30% do comprimento da estaca original, não se pôde fazer sua verificação, pois não se conseguiu o equilíbrio do sistema, FS menor que 2,0.

A influência do comprimento no dano, ou seja, que o dano provocado pelo menor comprimento das estacas resulta em estados mais críticos do sistema que o respectivo dano provocado pelo enfraquecimento da estaca. Além disso, para o grupo de estacas íntegras e para o grupo de estacas danificadas, não houve variações significativas no momento, podendo isto ser atribuído à simetria do grupo íntegro, levando em conta o corte na seção A-A.

#### **4.3.2. Reforço com Adição de Estacas**

Nesta etapa é interessante destacar que tipos de reforço apresentam o melhor comportamento. Primeiramente são analisados os reforços de estacas que apresentam propriedades iguais às estacas intactas e, em seguida são feitas alterações na estaca de reforço.

Para os reforços são utilizados para os maiores níveis de dano em que não é considerada a estaca no cálculo de capacidade de carga.

Procurou-se alterar o comprimento, o diâmetro, o módulo de elasticidade da nova estaca a ser adicionada que possui 50% da estacas íntegra em uma configuração pré-determinada.

##### **4.3.2.1. Grupo Reforçado com Propriedades Similares**

A Figura 4.29 apresenta as configurações utilizadas como alternativas de reforço para um grupo rígido de três (3) estacas.

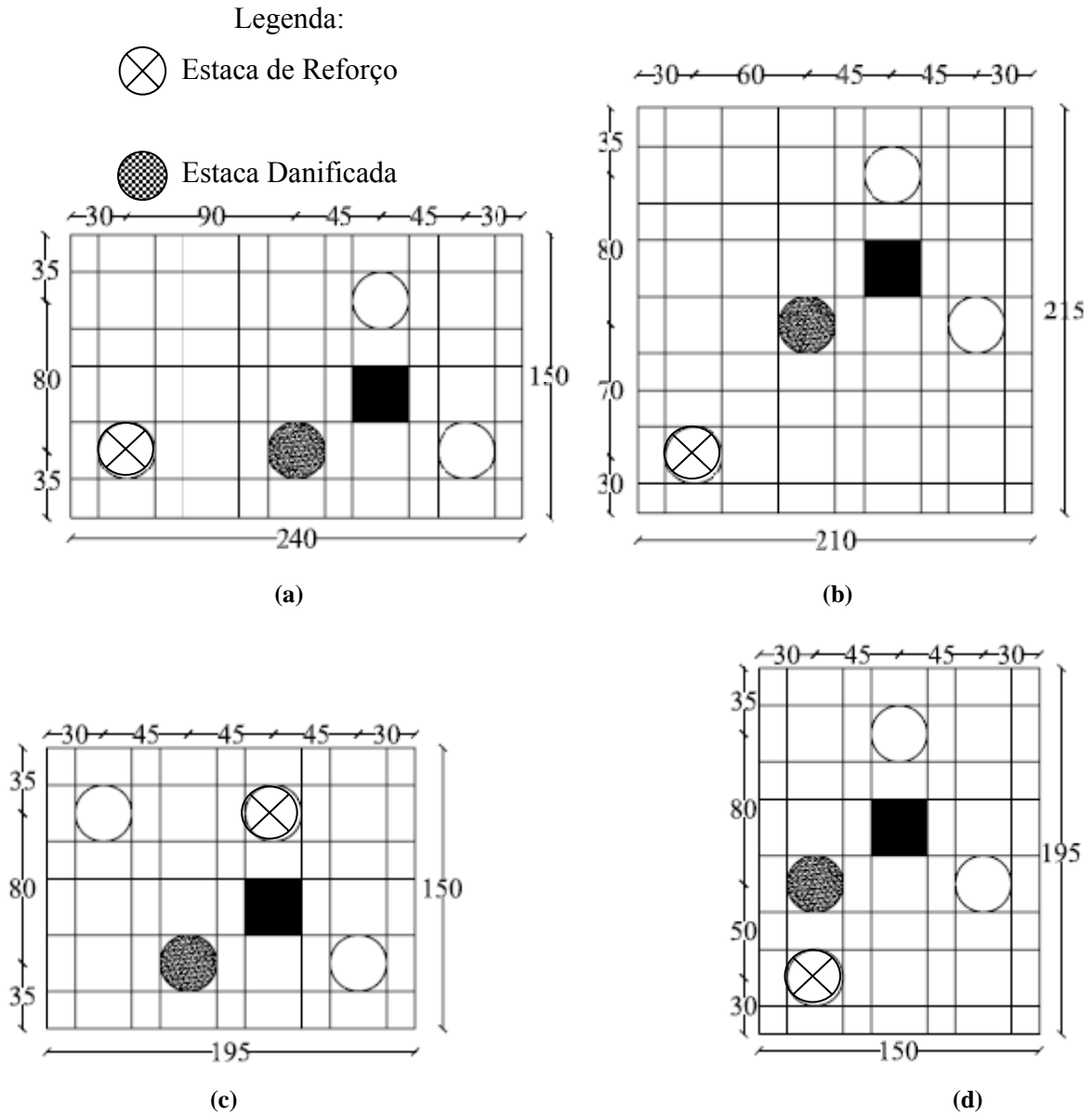


Figura 4.29 – Grupos Reforçados (a) Caso 1 (b) Caso 2 (c) Caso 3 (d) Caso 4.

A Figura 4.29 apresenta o resultado dos recalques normalizados do grupo quando reforçados.

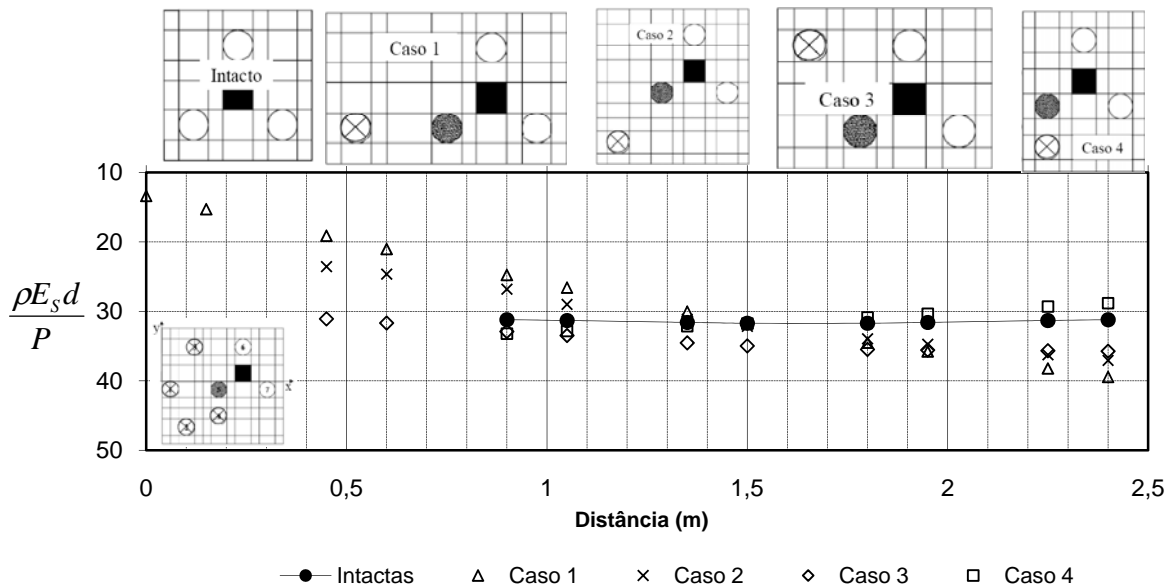


Figura 4.30 – Deformações ao longo da placa em relação ao Grupo Intacto.

Para os casos em que a estaca de reforço encontra-se a uma distância de 3 d (Caso 1, Caso 2 e Caso 3), que apresentam volumes de concreto de 2,16m<sup>3</sup>, 2,76m<sup>3</sup> e 1,76m<sup>3</sup>, respectivamente. O Caso 3, de menor volume de concreto, possui dentre os outros casos, os menores recalques diferenciais. O que não ocorre entre os Casos 1 e 2, em que o Caso 1 possui menor volume de concreto, e possui maiores recalques diferenciais.

Para os casos que possuem mesmo volume de concreto (Caso 3 e 4), em que o Caso 4 possui estaca de reforço está menor que 3d da estaca danificada, está apresentada menores recalque absolutos

Os resultados do Caso 1 pode ser relacionado a distancia do elemento de reforço em relação a carga aplicada, observando que na redistribuição dos esforços para este caso as estacas 3 e 4, são as mais carregadas.

O Caso 3 é um típico caso pouco utilizado na prática (raro), porém, contrário às expectativas foi o caso que apresentou o melhor comportamento para o grupo danificado, junto com o Caso 4. Isto porque após o reforço levou a menores recalques diferenciais, além do menor consumo de concreto em relação às outras alternativas.

Os momentos que relacionam os vários tipos de reforço são apresentados na Figura 4.31.

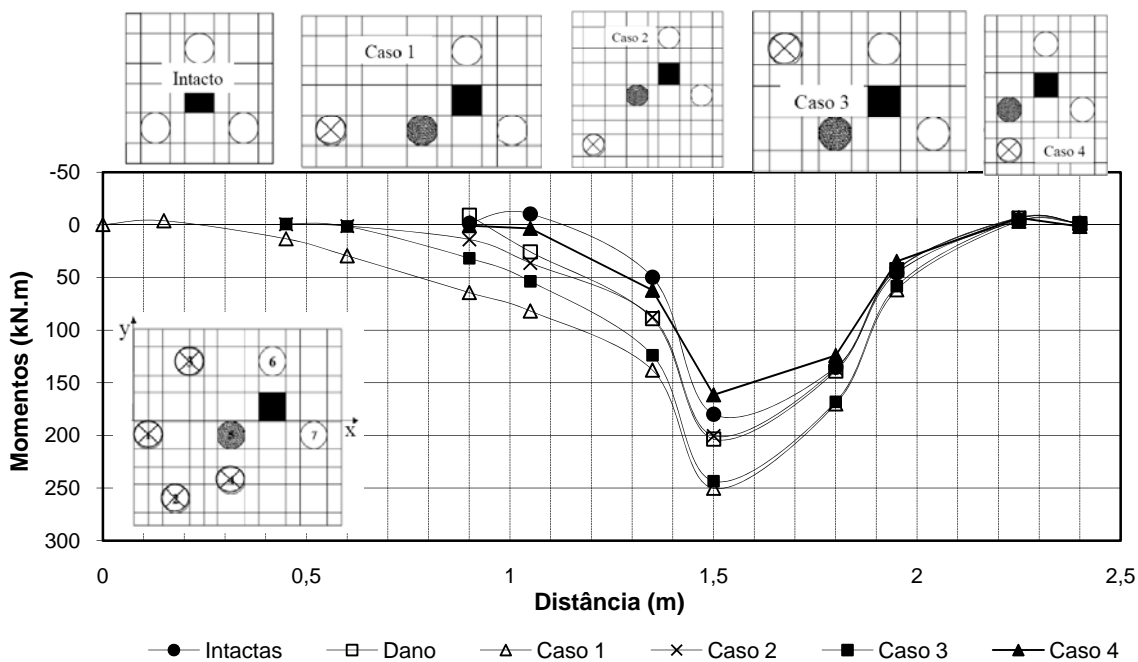


Figura 4.31 – Momentos em relação aos vários casos.

Dentre os resultados, os reforços dos Casos 1 e 3 tendem a aumentar os momentos, e estes momentos estarão diretamente ligados ao aumento de armadura de aço no bloco.

Para os casos 2 e 4 tiveram momentos fletores menores do que do grupo danificado. A Figura 4.32 apresenta a configuração genérica de todos os casos proposta para efeito de comparação entre os casos estudados, para avaliar o FS da estaca e do sistema pela metodologia de radier estaqueado.

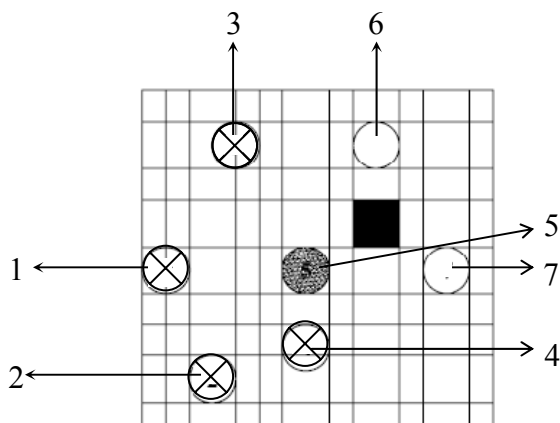


Figura 4.32 – Numeração das estacas para reação destas.

O carregamento de cada estaca em várias configurações é mostrado, Figura 4.33.

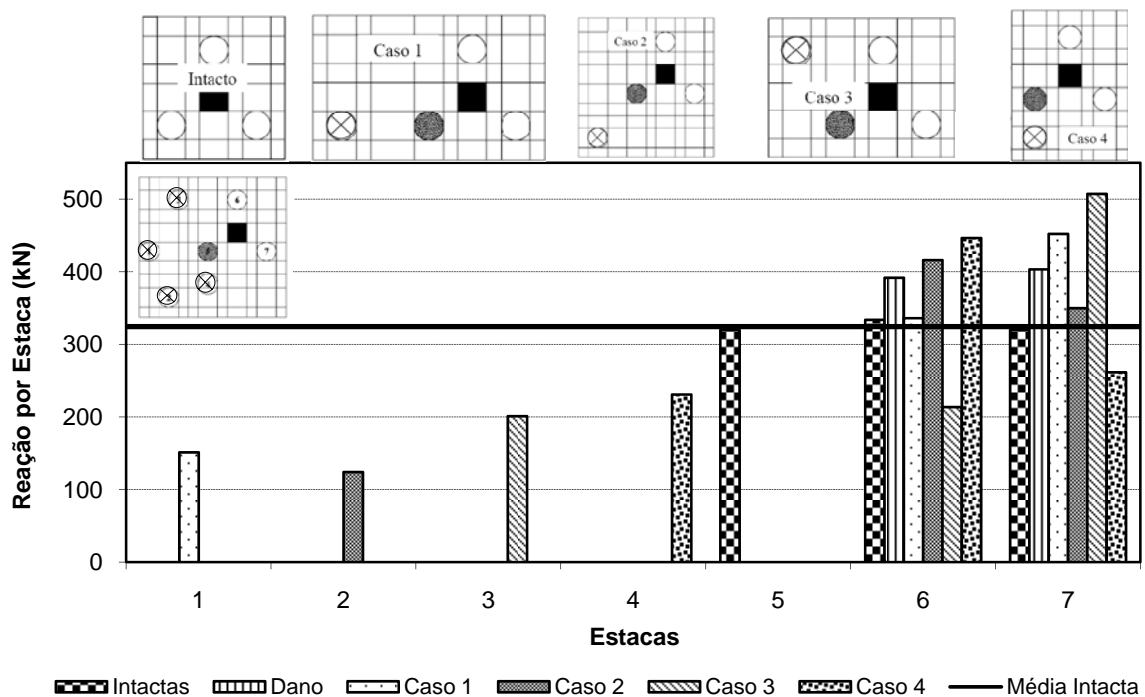


Figura 4.33 – Reação das novas configurações.

Com o grupo intacto ( $FS = 2,0$ ), a participação do bloco é na ordem de 12% e o restante é distribuído entre as estacas. Com a estaca danificada o bloco possui maior participação, conseguindo manter o fator de segurança global de 1,41, tornando as estacas 6 e 7 com fator de 1,6, aproximadamente.

O Caso 1, com a inclusão de reforço a estaca 7 foi a mais solicitada, atingindo valores de fator de segurança de 1,50, e reforço foi pouco solicitado, fator de 4,0.

Os Caso 3 e 4 a inclusão de elementos de reforço, fez com que o carregamento fosse distribuído, e a estaca 7 sofra grandes solicitações fazendo com que estes fatores de segurança atinjam valores menor que os valores de grupo danificado, porém o grupo atingiu fatores de segurança de projeto, igual a 2,0.

A mudança na configuração do grupo faz com que haja redistribuição de carga, não apenas entre as estacas, como também entre o bloco e as estacas, como mostra a Figura 4.34.

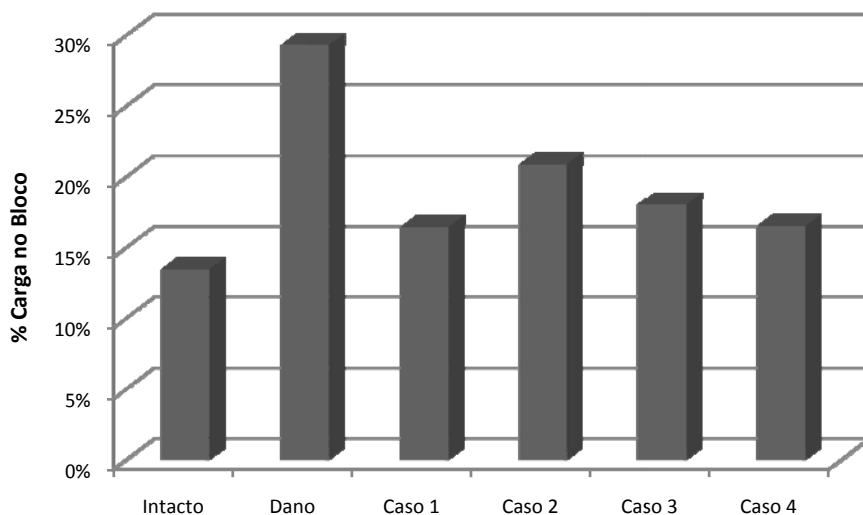


Figura 4.34 – Porcentagem de carga transferida ao bloco.

Os fatores de segurança são apresentados a seguir na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Fator de Segurança de grupo reforçado com propriedades semelhantes.

Nº Estaca	FS Intacta	FS Danificada	FS Caso 1	FS Caso 2	FS Caso 3	FS Caso 4
1	-	-	4,38	-	-	-
2	-	-	-	5,33	-	-
3	-	-	-	-	3,3	-
4	-	-	-	-	-	2,86
5	2,06	-	-	-	-	-
6	1,98	1,67	1,97	1,59	3,09	1,48
7	2,06	1,64	1,46	1,89	1,30	2,53
FS Grupo	2,00	1,41	2,06	2,10	2,03	2,03

4.3.2.2. Grupo Reforçado com Estacas contendo Propriedades Distintas

Adotou-se como padrão o Caso 1. A Figura 4.35 apresenta os recalques normalizados no centro do bloco.

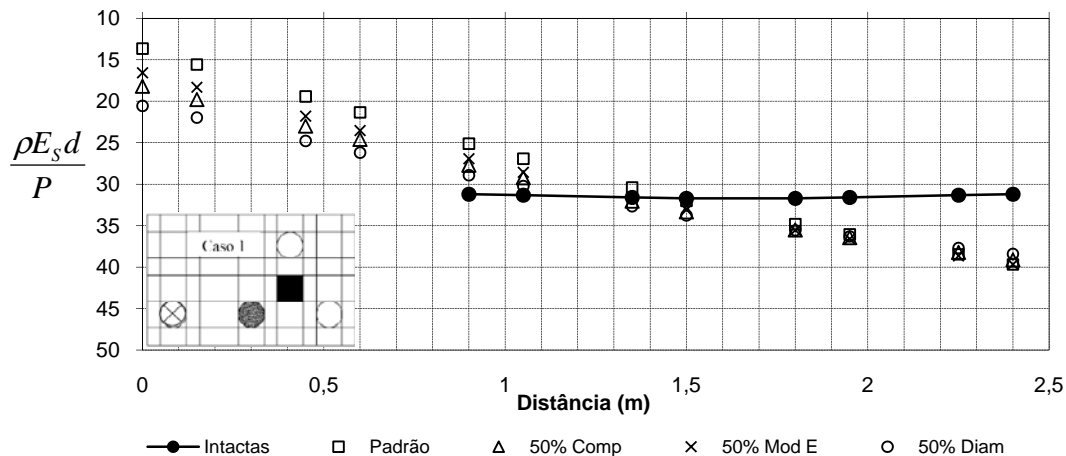


Figura 4.35 – Comportamento em relação aos Recalques Normalizados.

Os recalques apresentados mostram pequenas variações quando alterado as propriedades.

A pouca variação dos recalques, ocorridos devido a alteração das propriedades, também foi observado na variação dos momentos ao longo da placa. A Figura 4.36 apresenta os recalques para o caso típico “50% do Comp”.

Os momentos são apresentados na Figura 4.36.

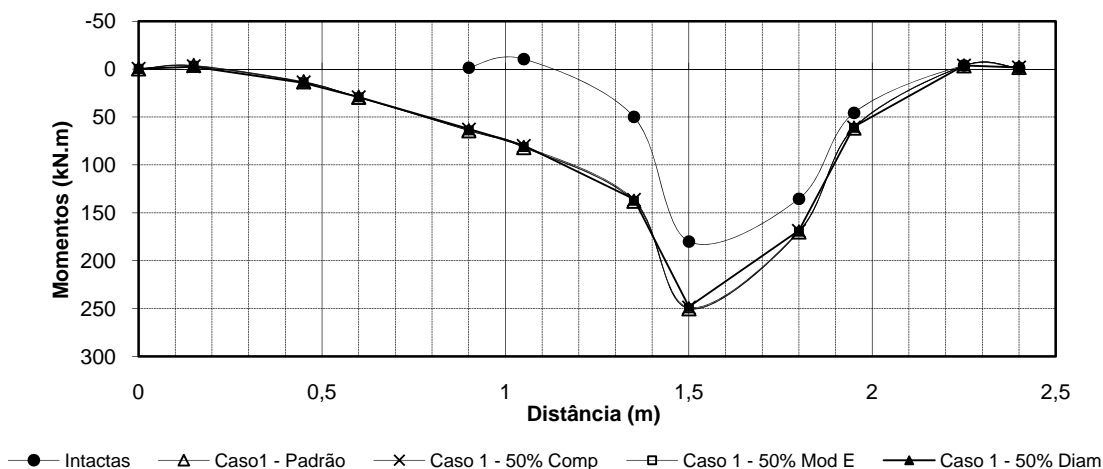


Figura 4.36 – Momentos ao longo da placa.

Os esforços de reação por estaca são apresentados na Figura 4.37, que dita qual das estacas está mais carregada, onde pode ser percebido que a estaca 4, independente da alternativa de propriedade, se comprimento, módulo de elasticidade ou diâmetro, é a mais carregada, FS em torno de 1,5 para a estaca e o grupo com FS igual a 1,7 aproximadamente.

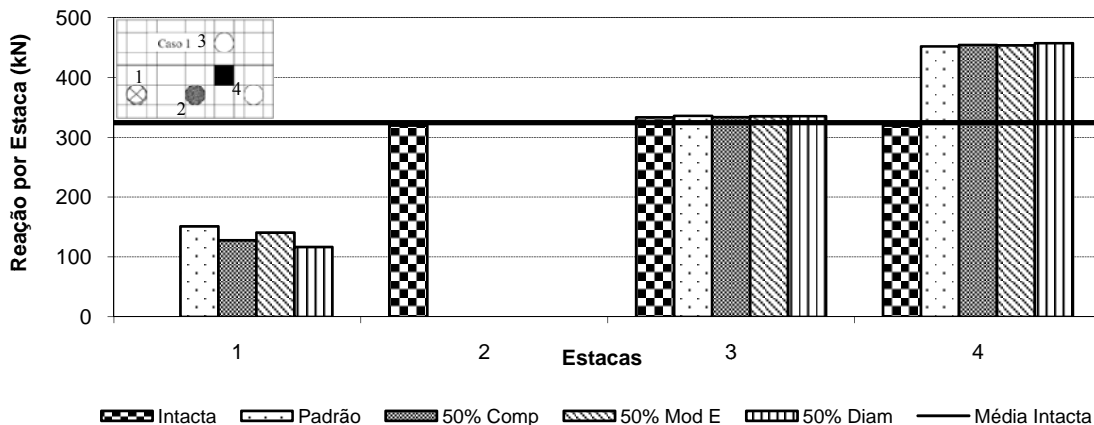


Figura 4.37 – Reações por estaca.

A porcentagem de carga absorvida pelo bloco, Figura 4.38.

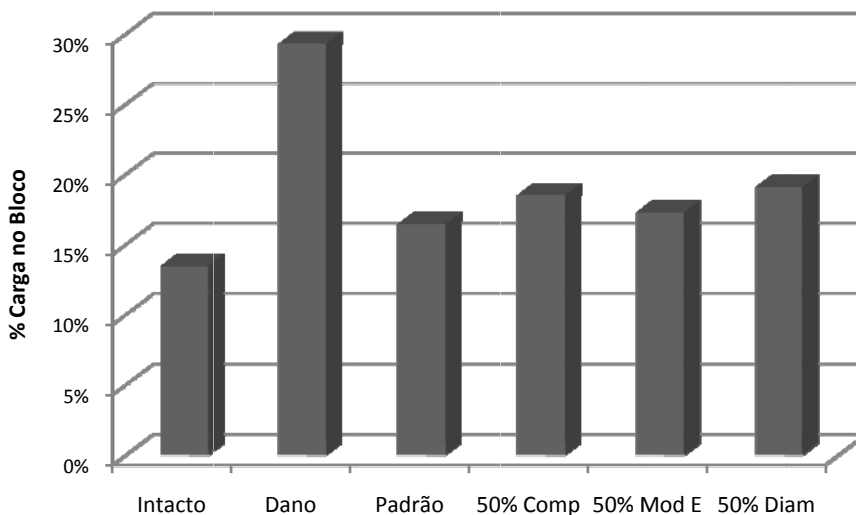


Figura 4.38 – Porcentagem de carga transferida ao bloco.



**Tabela 4.10 – Fator de Segurança de grupo reforçado com propriedades distintas.**

Níveis de dano	Estaca 1	Estaca 2	Estaca 3	Estaca 4	Fator de Segurança do Grupo
Intacto		2,06	1,98	2,07	2,06
Padrão	4,38	-	1,97	1,46	2,06
Danificada			1,67	1,64	1,41
50% Comp	1,99	-	1,98	1,46	1,70
50% Mod E	3,62	-	1,97	1,46	1,70
50% Diam	3,54	-	1,97	1,45	1,84

No grupo de 3 estacas, os reforços apresentaram fator de segurança maior que dois, porém, quando analisado o fator de segurança de cada estaca, as estacas originais apresentaram queda desta segurança, mesmo que o reforço se apresente com grande folga quanto à segurança.

Alternativas de reforço com as propriedades iguais às estacas originais apresentaram bons resultados em se tratando de recalques.

Alterando as propriedades de um dos casos, o Caso 1 teve-se comportamentos similares, e com um aumento dos recalques diferenciais. Não havendo melhora dos fatores de segurança das estacas e dos grupos com a variação das propriedades do novo elemento.

#### 4.4. GRUPO DE 6 ESTACAS

O objetivo nesta etapa é a verificação do comportamento de um grupo maior de estacas, onde se supõe que a influência do dano de uma das estacas a princípio não teria tanta influência para o restante do grupo. É intuitivo que isto também depende também em que estaca está localizada este dano. Trata-se, porém agora de um bloco flexível sobre 6 estacas com algumas peculiaridades.

Assim como nos casos estudados anteriormente o nível de carregamento se dá pela carga de trabalho de intensidade  $P$ , uniformemente distribuída no centro do bloco sobre um elemento de área de 50 por 50cm. O bloco possui comprimento  $B$  igual a 380cm e largura  $l$  igual a 230cm, como pode ser observado na Figura 4.38.

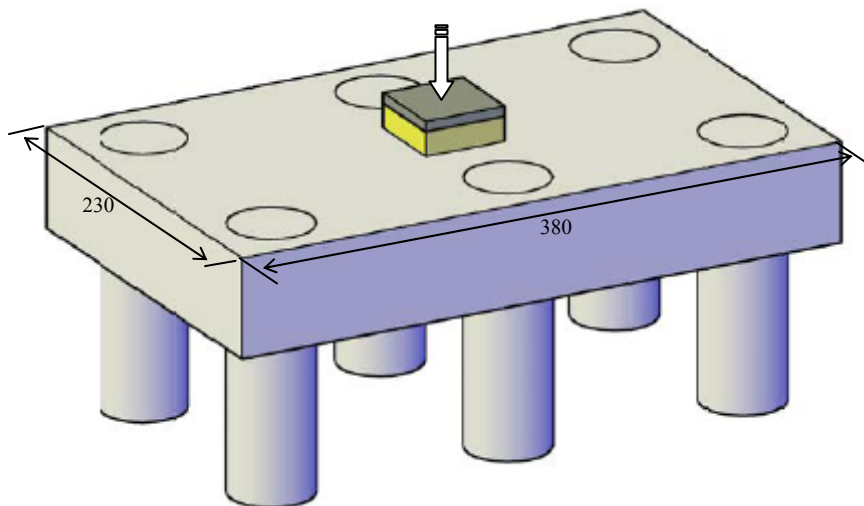


Figura 4.39 – Parâmetros que definem a geometria do problema (Grupo 6 estacas).

#### 4.4.1. Grupo com Estacas Intactas e Danificadas

O estudo das estacas intactas é novamente usado como referência para as demais análises. Considerou-se um bloco retangular (de espessura  $t = 60$  cm, módulo de elasticidade  $E_R = 20$  GPa,  $\nu_R = 0,2$ ) assente sobre uma camada de solo homogêneo ( $H = 20$  m,  $E_S = 50$  MPa,  $\nu_S = 0,3$ ) como mostra a Figura 4.37. O bloco foi submetido a uma carga uniformemente distribuída  $q = 18,448$  MPa ( $P = 4,612$  MN). Utilizou-se também a situação da relação  $H/L$  igual a dois, como mostra a Figura 4.40.

O nível de carregamento utilizado foi baseado no nível de carga de trabalho do sistema, onde o fator de segurança global utilizado foi de dois, para metodologia de cálculo de radier estaqueado.

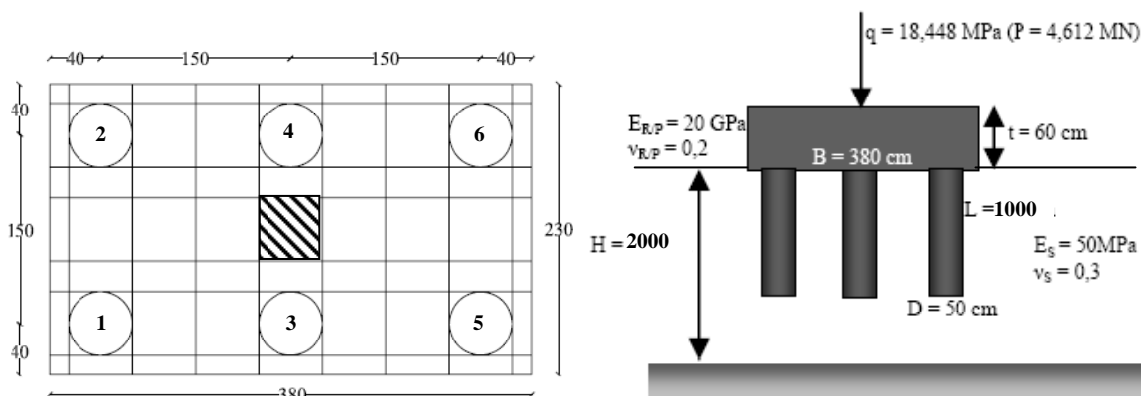


Figura 4.40 – Grupo 6 estacas Intactas.

Verificou-se inicialmente o comportamento em uma seção transversal do bloco, no meio deste, Figura 4.41.

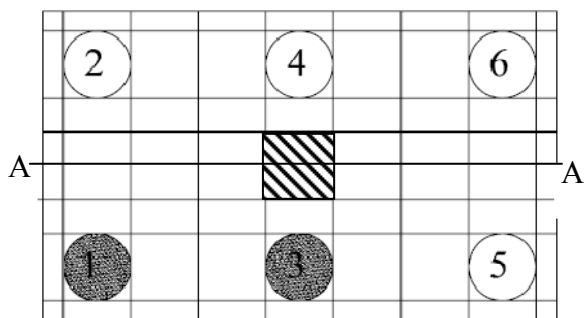


Figura 4.41 – Corte Seção Transversal estudada.

Em seguida, o dano será imposto pela variação do comprimento da estaca e pela variação do módulo de elasticidade das estacas indicadas, 1 e 3. Para avaliar a relação dano-localização da estaca, também foram variados em estados de 80, 50, 30% da estaca íntegra, causados em duas estacas distintas, e de cada vez.

A Figura 4.42 mostra os recalques normalizados do grupo intacto após dano na estaca 1.

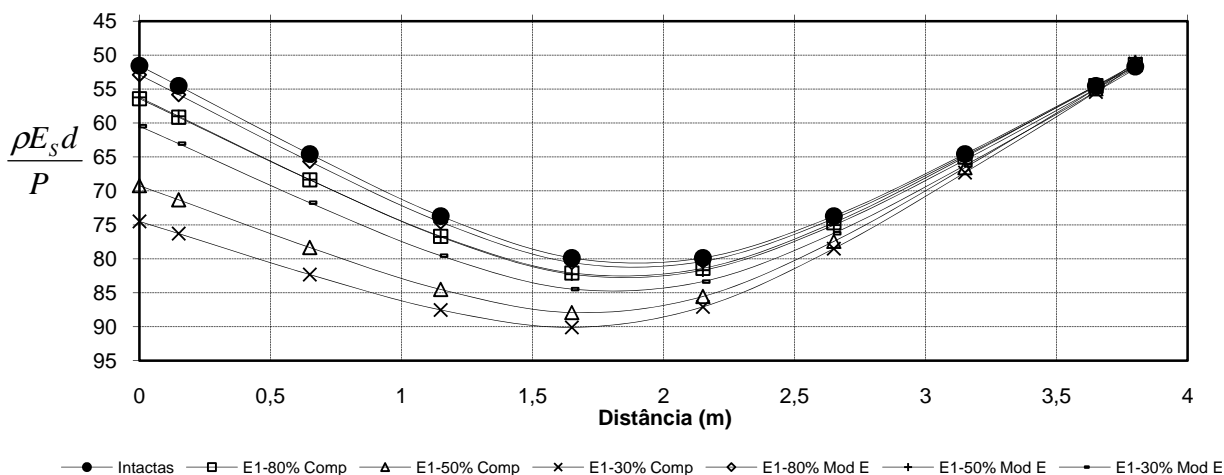
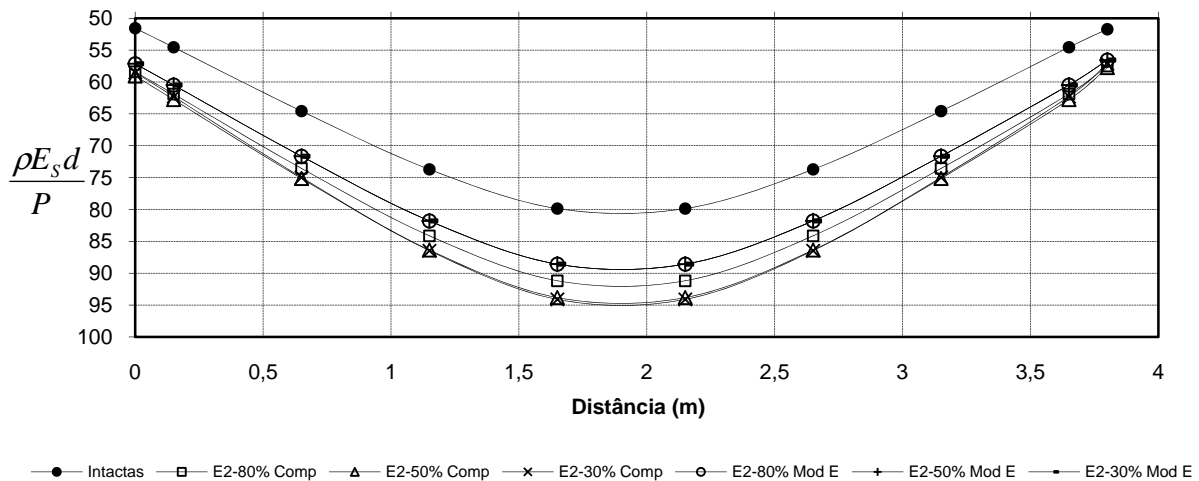


Figura 4.42 – Comportamento do Grupo após o dano na estaca 1.

O fator mais influente para o sistema é o dano provocado pelo menor comprimento da estaca, pois para os mesmos níveis percentuais são apresentados maiores recalques.

Assim quanto maior o nível percentual de dano, tanto para menores comprimentos, quanto para menores módulos, maior é a disparidade de resultados entre os dois tipos de danos.

A Figura 4.43 apresenta resultados dos recalques normalizados na seção A-A, em diferentes níveis de dano na estaca 3.

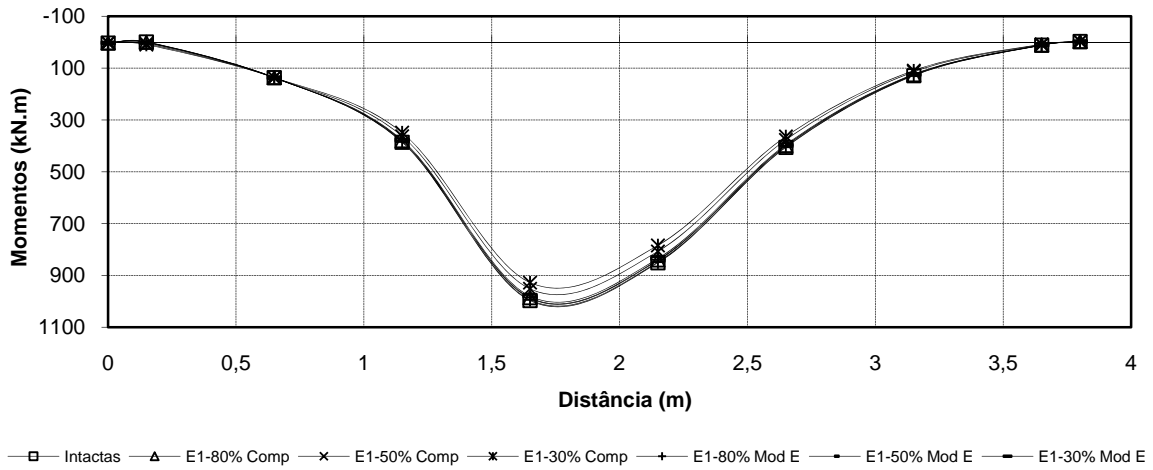


**Figura 4.43 - Comportamento do Grupo após o dano na estaca três.**

Neste caso a variação no nível do módulo de elasticidade possui menor influência no comportamento do grupo quando comparado com os outros níveis de dano, sendo que estes levam a recalques médios na ordem de 11% maiores que os recalques máximos do grupo intacto. Para os recalques causados pelo menor comprimento das estacas os valores crescem de 16%, 23%, 24%, para os níveis de 80%, 50% e 30%, respectivamente.

Para o dano de 80% do comprimento na estaca 3, que o resultado de detrimento do sistema foi mais significativo do que o equivalente na estaca 1. Isto devido à flexibilidade do bloco, já que, se fosse rígido o efeito seria o contrário.

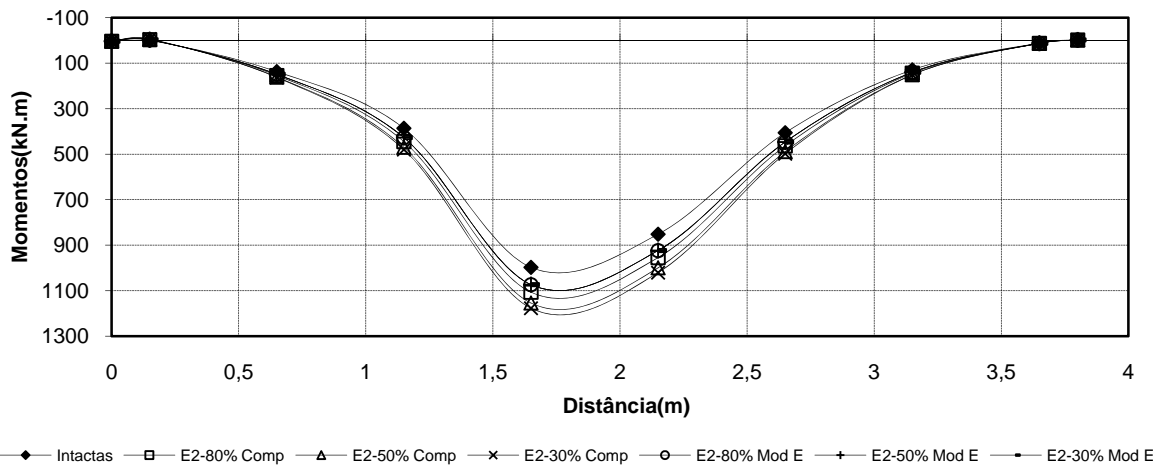
Os momentos do grupo quando a estaca 1 encontra-se danificada são apresentados na Figura 4.44.



**Figura 4.44 – Momentos devido ao dano da estaca 1.**

Na Figura 4.43 os esforços obtidos não sofrem grandes variações ao longo deste trecho quando comparados com o grupo de estacas intactas. O dano na região central do bloco, em adição ao carregamento ocorrido nesta área, faz com que esta seja a área que sofre a maior influência deste trecho. Há a redução nos momentos obtidos com os incrementos dos recalques absolutos causados na estaca um.

Para o dano causado na estaca 3 a Figura 4.45, apresenta os momentos ao logo da seção.



**Figura 4.45 – Momentos devido ao dano na Estaca 3.**

Na situação em que a estaca danificada é a estaca central (número 3), a Figura 4.45, os momentos aumentam de acordo com seu dano, ao contrário do que acontece na estaca do canto.

A Figura 4.46 apresenta os esforços de reação de cada estaca, para avaliar qual a mais prejudicada pelo dano na estaca um.

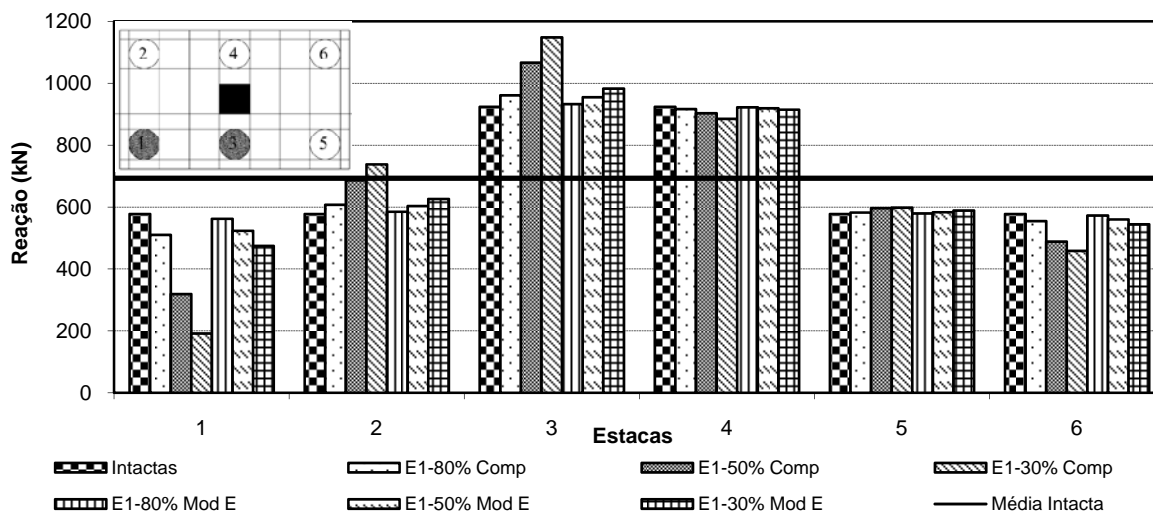


Figura 4.46 – Comportamento de Reação com dano na estaca 1.

Pode ser observado na Figura 4.45 que com o dano na estaca 1 há uma tendência de sobrecarga sobre as estacas 3 e 4, mesmo que em pequenas porcentagens, fazendo com que o fator de segurança seja de 1,50, e as demais continuando com 2,50. Conforme Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Fatores de Segurança para o grupo danificado na estaca 1.

Níveis de dano	Estaca 1 (Dano)	Estaca 2	Estaca 3	Estaca 4	Estaca 5	Estaca 6	Fator de Segurança do Grupo
Intacto	2,50	2,50	1,57	1,57	2,50	2,50	2,00
80% Comp	1,00	2,39	1,51	1,58	2,49	2,61	1,80
80% Mod E	1,14	2,48	1,55	1,57	2,50	2,53	1,82
50% Comp	1,00	2,11	1,36	1,61	2,43	2,97	1,75
50% Mod E	1,22	2,40	1,52	1,58	2,49	2,59	1,82
30% Comp	1,00	1,96	1,26	1,64	2,42	3,16	1,73
30% Mod E	1,35	2,32	1,48	1,58	2,46	2,67	1,82
Danificada	-	1,78	1,16	1,64	2,37	3,47	1,69

Para o dano na estaca 1, a porcentagem de carga transmitida para o bloco é apresentada a seguir.

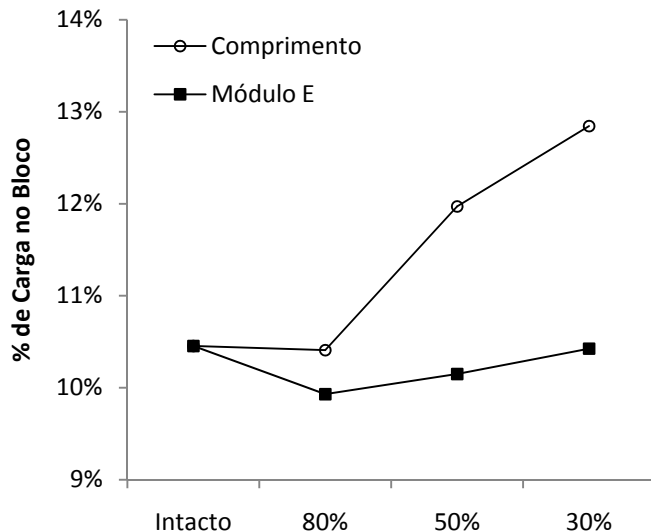


Figura 4.47 – Carregamento do bloco com estaca 1 danificada.

Para danos relacionados com o comprimento da estaca tem-se maior participação do bloco.

Apresenta-se a seguir, Figura 4.48, o comportamento do grupo para o caso que a estaca 3 está danificada.

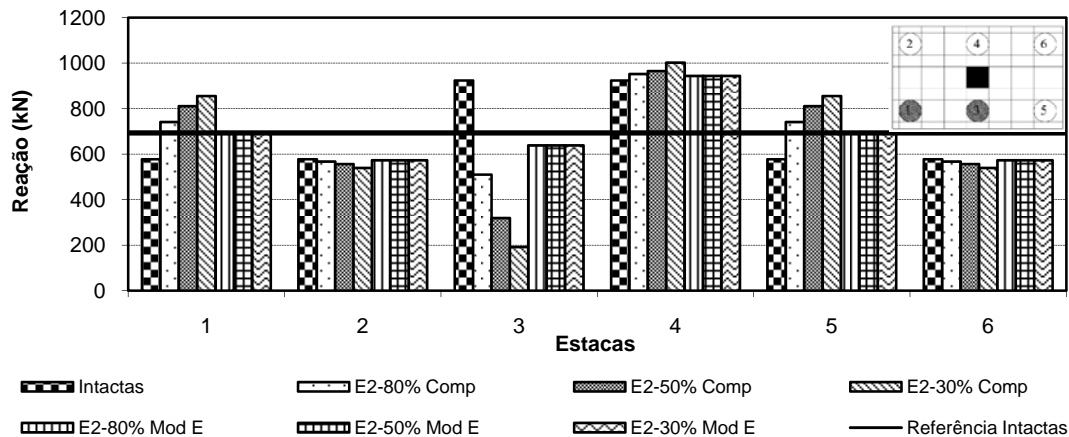


Figura 4.48 - Comportamento de reação com dano na estaca 3.

Com o dano provocado na estaca 3 há uma melhor distribuição das cargas resultantes, sem uma sobrecarga excessiva das demais. Neste caso a carga é mais acentuada entre as estacas 1, 4 e 5, nos casos de danos relacionados ao comprimento.

Tabela 4.12 – Fatores de Segurança para o grupo intacto e dano na estaca 3.

Níveis de dano	Estaca 1	Estaca 2	Estaca 3 (Dano)	Estaca 4	Estaca 5	Estaca 6	Fator de Segurança do Grupo
Intacto	2,50	2,50	1,57	1,57	2,50	2,50	2,00
80% Comp	1,96	2,55	<b>1,00</b>	1,52	1,96	2,55	1,80
80% Mod E	2,10	2,53	<b>1,00</b>	1,54	2,10	2,53	1,82
50% Comp	1,78	2,60	<b>1,00</b>	1,50	1,78	2,60	1,75
50% Mod E	2,10	2,53	<b>1,00</b>	1,54	2,10	2,53	1,82
30% Comp	1,69	2,69	<b>1,00</b>	1,45	1,69	2,69	1,73
30% Mod E	2,10	2,53	<b>1,00</b>	1,54	2,10	2,53	1,82
Danificada	1,57	2,68	-	1,39	1,57	2,68	1,69

A Figura 4.48 mostra que para um grupo flexível estaqueado com uma estaca central danificada possui menores efeitos em termos de carga e fatores de segurança quando comparadas com uma estaca de canto com os mesmos níveis de dano. Isso pode ser atribuído ao posicionamento desta entre as demais, tendo maior interação e da flexibilidade do bloco.

A Figura 4.48 também apresenta como nos outros casos que o menor comprimento da estaca possui maior influência para o comportamento do sistema no caso de dano, quando comparado com o comportamento das estacas menos rígidas (menor módulo de elasticidade).

A estaca com menor comprimento, no primeiro caso, leva a maior influência para as estacas 3 e 4, enquanto que para o caso 2 (dano na estaca 3) observa-se um comportamento mais bem distribuído de cargas. Devido o Caso 1, se trata de um dano no canto do grupo, leva a deformações que são basicamente de recalques diferenciais. Para o Caso 2, os recalques diferenciais são mantidos, porém os absolutos tendem a aumentar de acordo com o nível do dano, principalmente quando este dano é o relacionado ao menor comportamento da estaca.

A Figura 4.49 apresenta a porcentagem de carga que é transmitida para o bloco em função do nível de dano causado nas estacas.



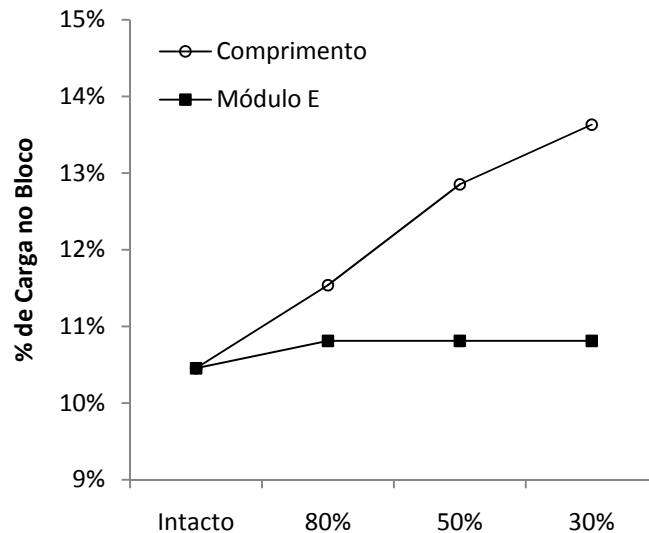


Figura 4.49 – Porcentagem de carga devido ao dano da estaca 3.

Pode ser observado que com o aumento do dano causado na estacas aumenta a participação do bloco na redistribuição dos esforços entre estes e as estacas.

#### 4.4.2. Reforço com Adição de Estacas

Foi verificado para o grupo de 6 estacas o reforço que induz a um melhor comportamento, em relação aos recalques e momentos do sistema.

Foram feitas algumas alternativas para a solução de reforço do grupo de 6 estacas. Foram apresentadas alternativas de soluções com a introdução de estacas com as mesmas propriedades das estacas intactas.

Na etapa seguinte fez-se uma comparação na variação das propriedades desta estaca introduzida como reforço, levando em consideração também outros fatores, como o volume de concreto utilizado para as alternativas estudadas. Também foram feitas alterações no comprimento, diâmetro e módulo de elasticidade da nova estaca, sempre referenciando com o comportamento das estacas íntegras.

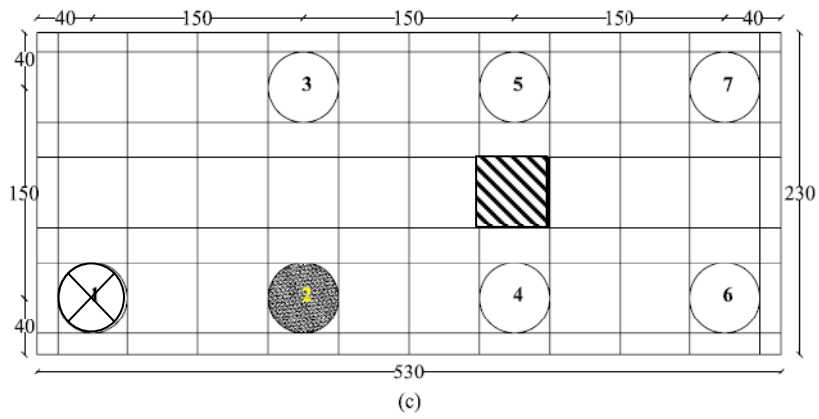
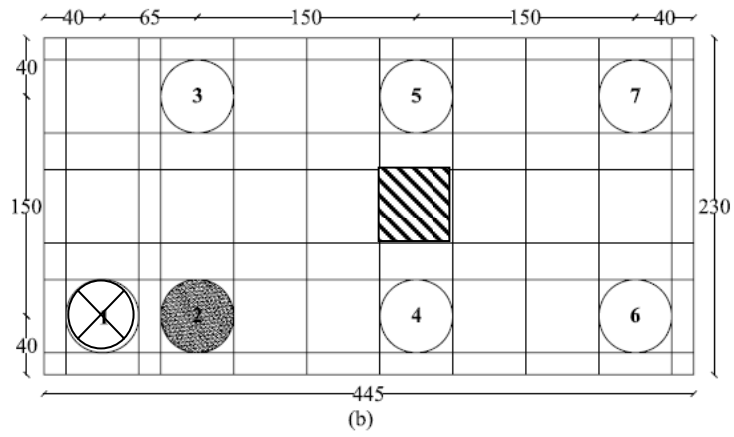
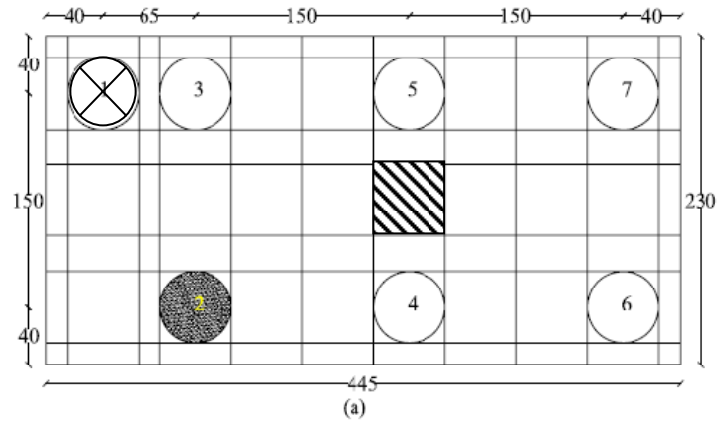
#### 4.4.2.1. Grupo Reforçado com Propriedades Similares

O nível de dano a ser utilizado é o caso mais crítico, ou seja, quando a estaca danificada é desconsiderada na de capacidade de carga.

O nível de carregamento é o mesmo utilizado para o caso de estacas intactas, pois simula um defeito ocorrido durante a execução, mantendo as demais características adotadas.

Neste caso a estaca a ser incluída no grupo possui as mesmas propriedades que as estacas intactas, respeitando um espaçamento mínimo de 3 vezes o diâmetro da estaca íntegra. É importante lembrar que para esta inclusão se faz necessário o aumento o bloco, logo, este aumento tem influencia direta com a capacidade de carga do sistema.

A Figura 4.50 apresenta os casos que serão utilizados como opção de reforço.



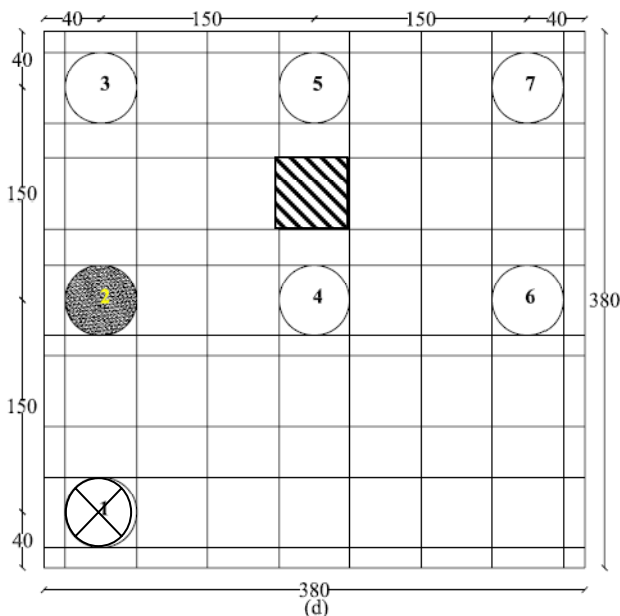


Figura 4.50 – Grupos Reforçados (a) Caso 1 (b) Caso 2 (c) Caso 3 (d) Caso 4.

As figuras a seguir apresentam o comportamento do grupo quando reforçado com estacas com as mesmas propriedades das estacas íntegras. A Figura 4.51 apresenta os recalques normalizados para todos os quatro casos citados.

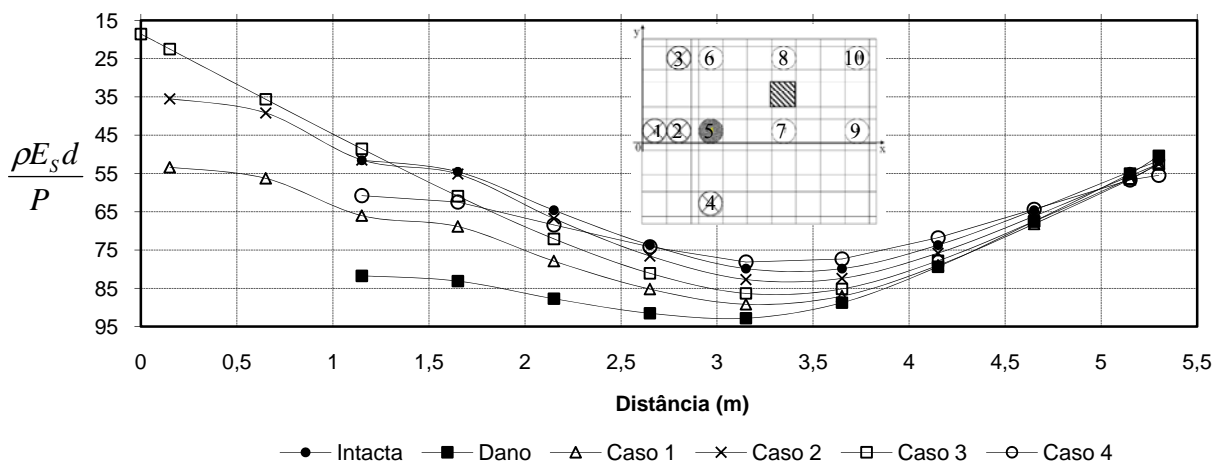


Figura 4.51 – Deformações ao longo da placa em Relação aos Reforços utilizados.

Os recalques mais próximos ao do grupo intacto é o Caso 4, pois, ainda que possua recalques absolutos maiores, este apresenta recalques diferenciais próximos aos do grupo intacto.

O Caso 3 é um dos procedimentos usualmente mais adotados como soluções para este tipo de problema, porém, diferente do que era esperado, este caso apresentou os maiores recalques

diferenciais. Este fato pode ser atribuído ao grande espaçamento existente entre o local do carregamento e o reforço, formando assim esta área propícia para grandes flechas.

Outro fato que merece destaque é o comportamento do Caso 1, por ser uma alternativa que pouco atrai os projetistas. Entretanto, esta alternativa de reforço apresentou um comportamento, quanto a recalque, muito próximo do grupo intacto.

Os momentos que relacionam os vários tipos de reforço são apresentados na Figura 4.52.

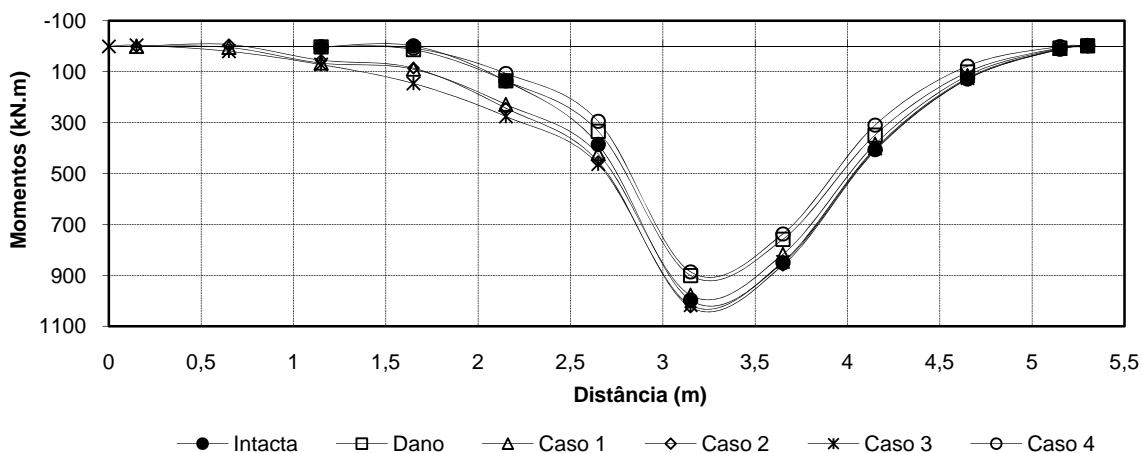


Figura 4.52 – Momentos em relação aos vários casos.

Todos os reforços tendem a aumentar os momentos no centro da placa. Dentre estes comportamentos, os Casos 1 e 2 apresentaram maiores momentos, enquanto os Casos 3 e 4 os menores.

Este comportamento por estar relacionado com a localização das estacas e com a forma do bloco, pois para o Caso 3 e 4, o bloco se apresenta mais simétrico e menos flexível do que para os Casos 1 e 2.

A Figura 4.53 apresenta uma configuração generalizada e a comparação entre os casos estudados a respeito dos esforços de reação.

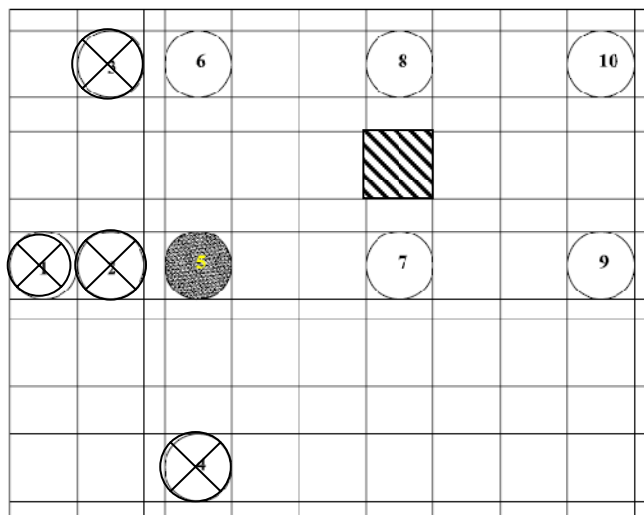


Figura 4.53 – Numeração das estacas para reação do grupo generalizado.

A Figura 4.54 apresenta o comportamento do grupo em várias configurações, mostrando assim o desempenho das estacas.

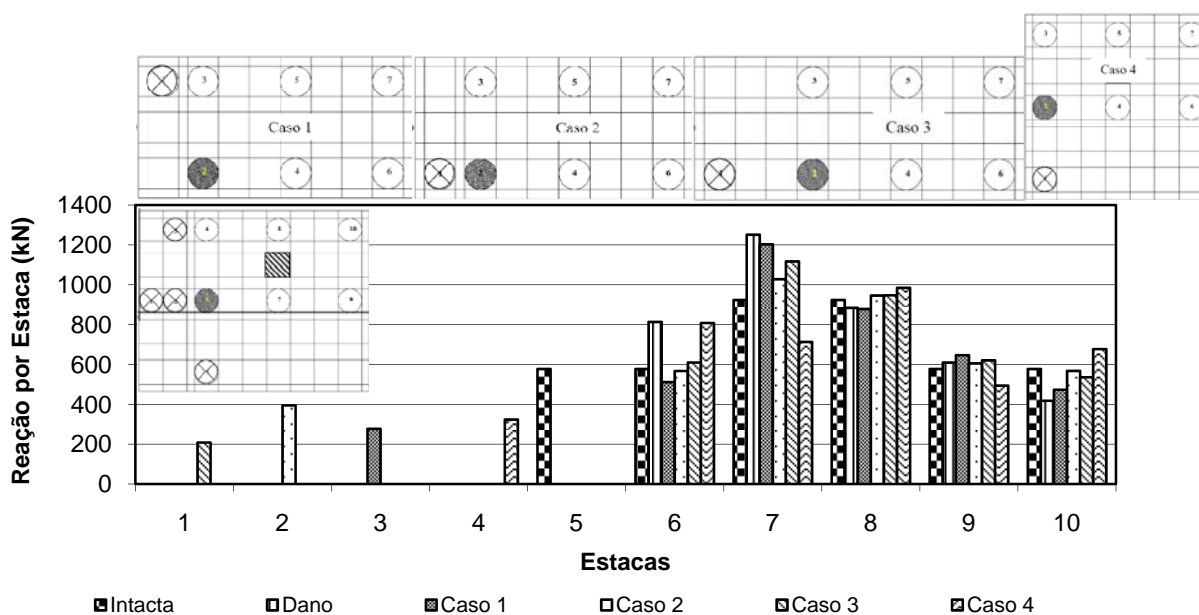


Figura 4.54 – Reação das novas configurações.

No Caso 1, as estacas mais solicitadas são as estacas 7 e 8, por se localizarem no contorno da estaca danificada e próxima ao carregamento num bloco mais flexível com FS igual a 1,21 e 1,65, respectivamente. Os esforços transferidos para estas estacas se aproximam aos esforços recebidos quando o grupo se encontra danificado, ou seja, próximo do limite último das estacas em questão. O mesmo vale para o Caso 2.

Os Casos 3 e 4 foram os que apresentaram melhor distribuição de carga, bem próximos ao

comportamento do grupo intacto, tendo ainda o Caso 3, a estaca 7 com FS igual 1,29.

Os Fatores de segurança de cada estaca mais o bloco são apresentados a seguir, Tabela 4.13.

**Tabela 4.13 – Quadro Resumo Fator de Segurança para diferentes grupos.**

<b>Nº Estaca</b>	<b>Intacta</b>	<b>Danificada</b>	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>	<b>Caso 4</b>
1	-	-	-	-	<b>6,97</b>	-
2	-	-	-	<b>3,67</b>	-	-
3	-	-	<b>5,23</b>	-	-	-
4	-	-	-	-	-	<b>4,48</b>
5	<b>2,5</b>	-	-	-	-	-
6	<b>2,5</b>	<b>1,78</b>	<b>2,84</b>	<b>2,55</b>	<b>2,38</b>	<b>1,79</b>
7	<b>1,57</b>	<b>1,16</b>	<b>1,21</b>	<b>1,41</b>	<b>1,29</b>	<b>2,03</b>
8	<b>1,57</b>	<b>1,64</b>	<b>1,65</b>	<b>1,53</b>	<b>1,53</b>	<b>1,47</b>
9	<b>2,5</b>	<b>2,38</b>	<b>2,24</b>	<b>2,40</b>	<b>2,33</b>	<b>2,94</b>
10	<b>2,5</b>	<b>3,47</b>	<b>3,07</b>	<b>2,55</b>	<b>2,71</b>	<b>2,14</b>
Fator de Segurança do Grupo	<b>2,00</b>	<b>1,69</b>	<b>2,00</b>	<b>2,00</b>	<b>2,02</b>	<b>2,03</b>

Independente do tipo de reforço, os esforços solicitantes nestas estacas são baixos e as mesmas ainda não estão totalmente mobilizadas, possuindo altos fatores de segurança.

A porcentagem de carga transferida para o bloco se mantém próximos de 10% a 14%, do carregamento absorvido por estes elementos de fundação superficial, como apresentado na Figura 4.55.

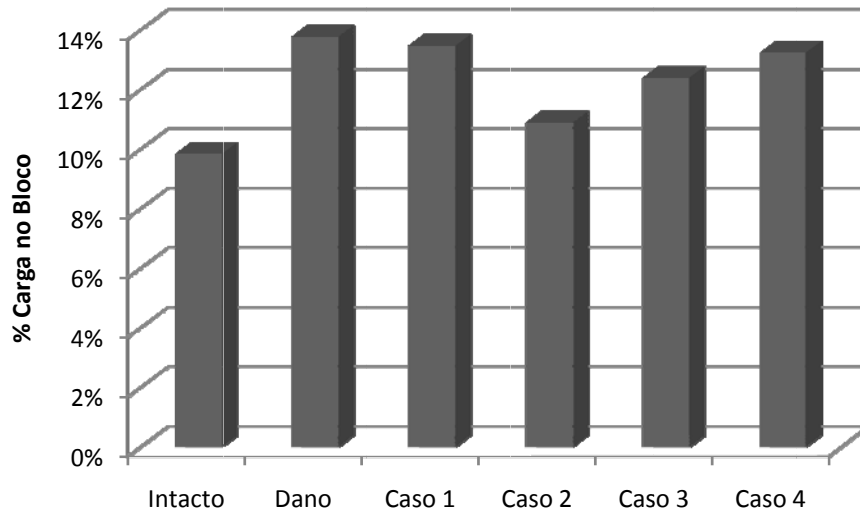


Figura 4.55 – Porcentagem de carga transferida para o bloco.

4.4.2.2. Grupo Reforçado com Estacas contendo Propriedades Distintas

Foram avaliadas alternativas de soluções para o Caso 3, procurando soluções mais econômicas que apresentam um comportamento mais eficiente para o sistema.

Os recalques normalizados são apresentados para as várias alterações no reforço, Figura 4.56.

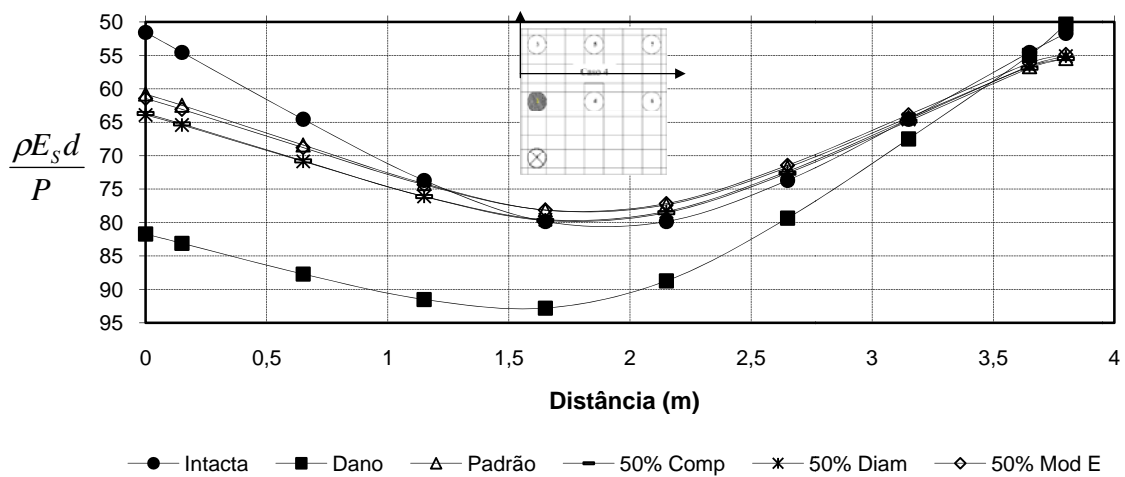
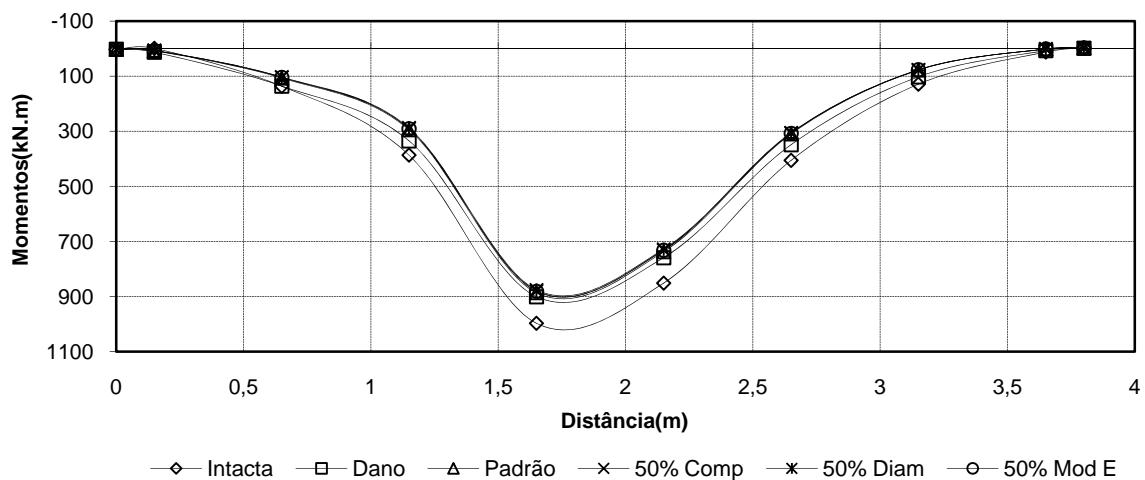


Figura 4.56 – Variações nas Propriedades de Reforço em Relação ao Grupo Intacto.



Pode ser notada a pequena variação do comportamento nas várias alterações das propriedades da estaca de reforço. Um melhor comportamento para o reforço de estaca “Padrão”, e observa-se ainda um similar comportamento para os casos de comprimento e de diâmetro, que tiveram valores entre si não superiores a 5% de diferença.

Estas análises foram feitas a partir da consideração dos recalques observados ao longo do trecho. Na Figura 4.57 são apresentados os momentos comportamento do grupo levando em consideração a adição dos reforços.



**Figura 4.57 – Momentos por adição do Reforço.**

De acordo com o corte nesta seção A-A, os momentos calculados apresentaram comportamentos similares aos do grupo intacto e menores de 5 a 10% de diferença entre estes momentos.

A Figura 4.58 mostra a numeração das estacas, do grupo escolhido para verificação dos esforços de reação das estacas, apresentadas na Figura 4.59.

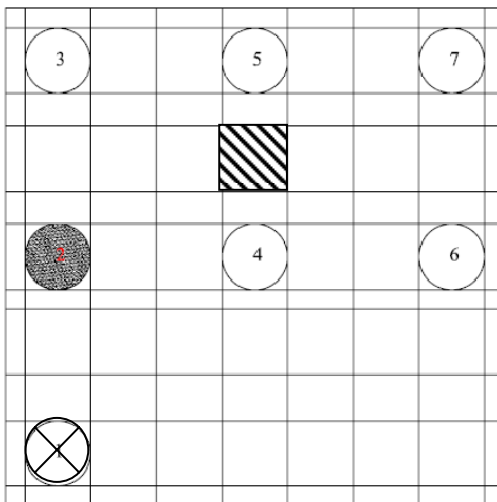


Figure 4.58 – Configuração das redistribuições das cargas devido ao reforço.

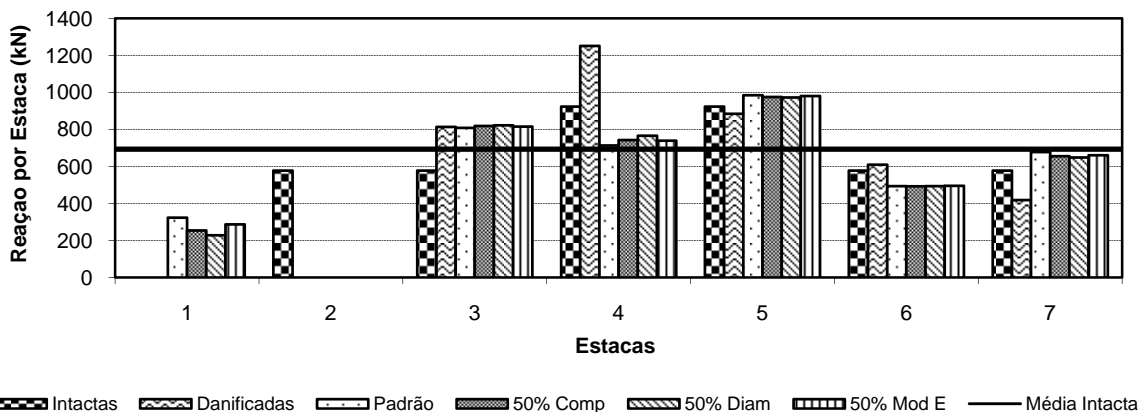


Figura 4.59 – Reação por estaca no grupo reforçado com propriedades distintas – G6.

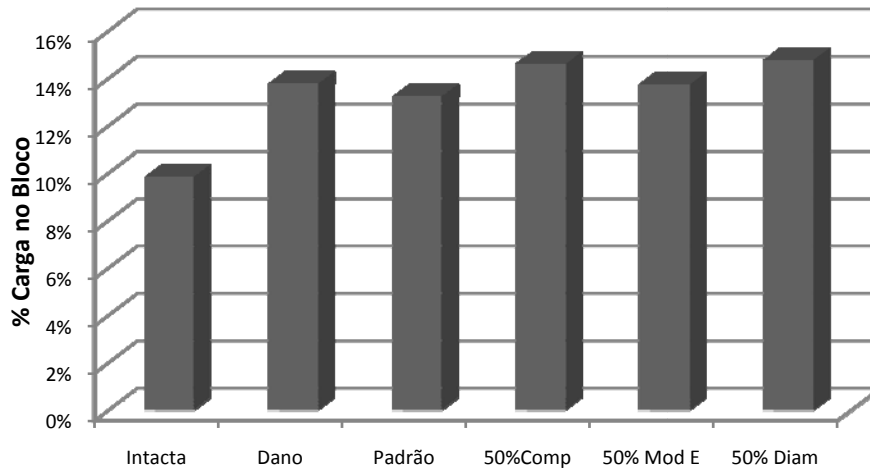
A Figura 4.59 mostra que qualquer alteração para este tipo de reforço, leva a um comportamento similar das estacas. A maior preocupação que se deve ter para o comportamento do conjunto após a redistribuição da carga é em saber se as estacas que serão mais carregadas irão suportar a sobrecarga. Porém, as estacas mesmo com redução de sua capacidade de carga, se mantiveram dentro dos limites aceitáveis, como mostra a Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Fator de Segurança com propriedades distintas.

Níveis de dano	Intacto	Padrão	50%Comp	50%Mod E	50%Diam	Danificada
Estaca 1		4,47	1,26	2,22	2,10	-
Estaca 2	2,50	-	-	-	-	-
Estaca 3	2,50	1,79	1,77	1,78	1,76	1,78
Estaca 4	1,57	2,03	1,95	1,96	1,89	1,16
Estaca 5	1,57	1,47	1,49	1,48	1,49	1,64
Estaca 6	2,50	2,94	2,95	2,93	2,94	2,38
Estaca 7	2,50	2,14	2,21	2,19	2,24	3,47
Fator de Segurança do Grupo	2,0	2,03	1,79	1,86	1,82	1,69

Esta conclusão só poderá ser realmente considerada se a metodologia de cálculo utilizado para o grupo for a correspondente ao de um grupo estaqueado, onde se pode prever a reação que irá para cada uma das estacas, pois, como mostra a Figura 4.59, a estaca 5 é a estaca mais carregada junto com a estaca 4.

Levando em consideração os recalques absolutos e diferenciais, os momentos, tanto os ocorridos na seção A-A, quanto os máximos, e finalmente os níveis de carga para cada uma das estacas, conclui-se que, para efeito de reforço nesta condição hipotética apresentada, a situação de maior adequação econômica seria com a utilização de uma estaca de reforço a uma distância de  $3d$  (150cm) da estaca danificada, com comprimento 50% menor que o utilizado para as estacas padrões, podendo ser utilizado somente como elementos redutores de recalque, pois não apresenta fator de segurança aceitável. A Figura 4.60 apresenta a transferência dos carregamentos para o bloco.



**Figura 4.60 – Porcentagem de carga transferida no bloco – G6.**

Quanto a conclusões podem ser feitas as seguintes colocações:

- O dano causado na estacas central é mais danoso do que um dano causado na estaca do canto;
- A redistribuição dos carregamentos entre as estacas e o bloco, também tem influência da localização do dano, podendo ser menor a participação do bloco com a presença de um dano;
- Mesmo em projetos de grupos de estacas tradicionais deve ser analisada a distribuição de carga entre as estacas para verificar se o nível de carregamento para cada estaca é o mesmo previsto no projeto preliminar, pois, pode haver estacas mais carregadas do que as demais, mesmo num grupo intacto.
- No grupo de 6 estacas com o dano na estaca do canto, o caso 1, apresenta melhor comportamento de recalque, por ter maior proximidade com o do grupo intacto. Para efeito dos fatores de segurança globais foram atendidos, para os fatores de cada estaca melhorou em relação ao danificado. Para todos os tipos de reforço, a inclusão de uma nova estaca fez com que uma das estacas esteja com menor fator de segurança.

### CONCLUSÕES

#### 5.1. OBSERVAÇÕES GERAIS

Neste trabalho pode ser observado que o reforço de grupos de fundações profundas pela introdução de estacas adicionais é analisado em conjunto com outras duas configurações distintas, uma quando se encontram estacas com dano e outra para a inclusão de um novo membro. Não deve ser considerado que se trata de uma mesma situação, e que basta incluir novos elementos sem prévio estudo, pois, isso poderá acarretar numa situação problemática, visto que, havendo redistribuição de carga entre o bloco e as estacas o comportamento torna-se complexo e de difícil determinação através de cálculo expedito.

A importância do trabalho é ressaltar a importância da posição e da rigidez das estacas no comportamento do grupo de estacas. Os casos analisados foram de blocos estaqueados com defeito detectado antes da execução da obra. Neste sentido o nível de dano deverá ser avaliado corretamente, uma vez que com uma menor rigidez, na maioria dos casos, não necessitaria de estacas adicionais para reforço.

Cada grupo de estacas com estacas adicionais deveria ser focado como uma nova fundação e outras análises deveriam ser pedidas. Deveriam ser procuradas a melhor posição e rigidez ótima. Em alguns casos, usando uma menor rigidez nas estacas adicionais podem resultar em um reforço mais barato e também alcançando comportamento geotécnico mais favorável.

Nos grupos analisados a inclusão de uma estaca com diferentes propriedades seria mais bem utilizada como elemento redutor de recalque diferencial, visto que devido ao seu bom desempenho geotécnico, entretanto, apresentou fatores de segurança menores que os permitidos por norma.

Dentre outras conclusões pode-se destacar:

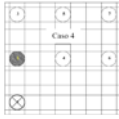
- Um dano referente ao menor comprimento da estaca é mais significativo do que uma menor rigidez desta estaca nas mesmas proporções;
- Utilizando a metodologia de cálculo de radier estaqueado, há uma maior participação do bloco quando suas estacas forem menos solicitadas;
- Apenas a inclusão de estacas adicionais não significa garantia de segurança para as mesmas estacas, pois, o grupo pode apresentar fatores de segurança superiores a dois (2,0), e estacas com valores de segurança menores que o de projeto (2,0);
- As variações das propriedades da estaca de reforço tendem a melhorar o comportamento do grupo em termos de recalque, contudo, podem apresentar fator de segurança da estacas,  $FS_{ESTACA}$ , menor que dois (2,0) para algumas das estacas do grupo;
- Podem ser obtidas variações nos fatores de segurança de cada estaca de um grupo, apenas com a mudança da estaca de reforço sob o bloco.

## 5.2. OBSERVAÇÕES ESPECÍFICAS

- Torna-se viável a aplicabilidade de *softwares* na escolha de melhores reforços num grupo estaqueado. Análises convencionais e manuais não permitem uma escolha refinada.
- O método simplificado apresentado pode ajudar o projetista, pelo menos na fase preliminar de projeto, a conferir a validade de um grupo estaqueado e investigar tanto as exigências de serviço como também o estado último de limite da fundação;

- Os fatores de interação são calculados em função da relação do espaçamento com o diâmetro da estaca. Outras variáveis também influenciam nestes valores, tais como a altura relativa das estacas (H/L) e a hipótese de cálculo utilizada, Randolph (1985);
- É muito interessante a utilização da metodologia de “radier estaqueado” para análises de blocos de estacas com algumas estacas defeituosas, tendo em vista que esta mudança de concepção de projeto pode ser considerada como mais uma alternativa para “reforço” do grupo;
- O programa GARP se mostrou satisfatório nas análises por simular as diferentes configurações e com elementos distintos num mesmo grupo, simulando grupos danificados e grupos reforçados;
- Pôde ser comprovada nestas análises que para pequenos danos no módulo de elasticidade, ou comprimento, nem sempre será necessário a inclusão de uma nova estaca;
- Diversas posições para inclusão devem ser testadas, podendo existir uma configuração ótima, diferente das utilizadas no dia-a-dia. A inclusão de estacas com propriedades distantes das originais pode ser mais vantajosa em desempenho e custo para alguns casos específicos de controle de recalque;
- A dimensão do novo bloco após a inclusão de novas estacas pode ajudar no desempenho da fundação, devendo ser considerado em projeto sua participação, metodologia de radier estaqueado.

### 5.3. CONCLUSÕES

- Para um Grupo de 4 Estacas:
  - ✓ Caso 5: Dentre os casos apresentados para o grupo de 4 estacas a adição de 2(duas) estacas idênticas ao lado do grupo original, foi o caso que atendeu as condições de segurança individual (em cada estaca) e global;
  - ✓ Caso 3: Para um dos casos estudados em que foram variadas algumas propriedades, o caso 3 com estacas 50% de seu módulo de elasticidade e do comprimento apresentou bom controle dos recalques diferenciais, porém, não atendendo aos fatores de segurança;
- Para um Grupo de 3 Estacas:
  - ✓ Caso 4: Para o grupo de 3(três) estacas a alternativa que melhor foi apresentada, em termos de fatores de segurança, foi a estaca com as mesmas propriedades das estacas originais próxima ao dano;
  - ✓ Caso 1: Dentre as alterações das propriedades na estaca de reforço, qualquer das alterações propostas o comportamento do grupo foi próximo, entre estes, sendo, então, possível adotar estas opções quando se referir a controle de recalques, pois, neste caso também os fatores de segurança apresentados são menores que os permitidos;
- Para um Grupo de 6 Estacas:
  - ✓ Caso 4: A localização de estaca que apresentou melhor aproveitamento, foi a adição de 1(uma) estaca “Abaixo” (  ) do bloco original;
  - ✓ Caso 4: Para as alterações nas propriedades dos reforços, neste caso analisado, quando alterado em 50% o módulo de elasticidade e o diâmetro da estaca de reforço, foram obtidos recalques mais próximos aos do grupo intacto, porém, para este caso também foram obtidos fatores de segurança abaixo do permitido por norma, tanto para algumas estacas quanto para o grupo.



## 5.4. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise para carregamentos horizontais;
- Expandir o trabalho para grandes grupos de estacas;
- Buscar casos na literatura para comparação com propostas de otimização;
- Acoplar rotinas de otimização para melhorar a escolha da posição das estacas;
- Estudos mais aprofundados de campo para fatores de interação;
- Análise de grupos estaqueados em modelos reduzidos.

Diagnosticado o problema, soluções devem ser elaboradas para procurar resolvê-lo ou minimizá-lo. Porém, devido à complexidade do problema, muitos profissionais procuram resolvê-lo sem o conhecimento necessário do comportamento das partes que formam o sistema. Pois, somente com a mudança de concepção de projeto já se poderiam solucionar alguns problemas (quando este fosse somente de redistribuição de carga). Podendo também fazer com que as estacas sejam apresentadas como elementos redutores de recalque, em vez de considerar que toda a capacidade do sistema seja absorvida pelas estacas e ,com isso, todo o grupo participe do comportamento deste conjunto.

Finalmente encerra-se o trabalho, de modelagem numérica, com a citação abaixo:

“O propósito destes modelos não é dar uma imagem de espelho da realidade ao não incluir todos seus elementos nos tamanhos e proporções exatos, mas sim ser bastante acurado para separar e o fazer disponível para investigações intensivas dos elementos que são decisivos. Um modelo é, e deve ser, não realístico, no senso em que a palavra mais comumente é usada. De certo modo e, num senso paradoxo, deve ser um bom modelo que prevê a chave para o entendimento da realidade” (Baran *apud* Mandolini, 2007).

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

---

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

Aoki, N. & Cintra, J. C. (1996). Influência da variabilidade do maciço de solos no comprimento de estacas. 3º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, v. I – São Paulo. Novembro, ABEF/ABMS-SP.

Bacelar, C.J.R. (2003). Análises de Recalque em Radiers Estaqueados. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 193p.

Baran, P.A., Sweezy, P.M. (1968). *Monopoly Capital: an essay on the American economic and social order.*

Burland, J.B. , Broms, B.B. & De Mello, V.F.B. (1977). Behaviour of foundations and structures. *Proc. 9<sup>th</sup> ICSMFE, Tokyo*, 2 : 495-546.

Butterfield, R. & Banerjee, P.K. (1971). The problem of pile group - pile cap interaction. *Geotechnique*, 21(2) : 135-142.

Chow, Y.K. & TEH, C.I. (1991). Pile-cap pile-group interaction in nonhomogeneous soil. *Journal of Geot. Eng. Div., ASCE*, 117(11) : 1655-1668.

Cunha, R. P. ; Bezerra, J e ; Zhang, H H . Influência da rigidez relativa estaca/solo (Kps) em grupo de estacas convencionais e tipo radier estaqueado carregados vertical ou horizontalmente. In: XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - Cobramseg, 2006, Curitiba, 2006. v. 2. p. 793-798.

Cunha, R.P., Small, J.C. & Poulos, H.G. (2000). Parametric analysis of a piled raft case history in Uppsala, Sweden. *SEFE-IV – Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia*, São Paulo, vol. 2, p. 380-390.

El-Mossalamy, Y. & Franke, E. (1997). Piled rafts - numerical modelling to simulate the behaviour of piled raft foundations. The authors, Darmstadt, Germany. 182p.

El-Mossallamy, Y., Schmidt, H., Gündling, E. & Löschner, J. (2003). Piled raft foundation of a railway bridge in tertiary clay. *Deep Foundation on Bored and Auger Piles*, Rotterdam, 387-393p.

El-Mossallmy, Y., Lutz, B. & Richer, Th. (2006). Innovative Application of Piled Raft Foundation to Optimize the Design of High-Rise Buildings and Bridge Foundation. 10<sup>th</sup> International Conference on Piling and Deep Foundations, Amsterdam, 269-278p.

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

Golombek, S. (2000). Reforço de Fundações. III SEFE, São Paulo, 4p.

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

Horikoshi, K. & Randolph, M.F. (1996). Centrifuge modelling of piled raft foundations on clay. *Geotechnique*, 46(4) : 741-752.

Horikoshi, K. & Randolph, M.F. (1997). Optimum design of piled rafts foundations. Proc. of the 14<sup>th</sup> Inter. Conference on Soil Mechanics and Foundation Eng. Hamburg. p. 1073-1076.

Iwamoto, R. K. (2000). Alguns aspectos dos efeitos da interação solo – estrutura em edifícios de múltiplos andares com fundação profunda. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 140p.

Katzenbach, R., Arslan, U., Gutwald, J. (1994). A numerical study on pile foundation of the 300m high Commerzbank tower in Frankfurt Main. **Numerical Methods in Geotechnical Engineering**, Balkema, Rotterdam, p.271-277.

Katzenbach, R., Arslan U., Gutwald J., Holzhauser J. & Quick H. (1997). Soil-structure interaction of the 300 m high Commerzbank tower in Frankfurt am Main. Measurements and numerical studies. Proc. XIV ICSMFE, vol. 2, p.1081-1084

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

Katzenbach, R., Bachmann, G., Gutberlet C. & Ramm, H. (2006). Present Developments in the Design of Deep Foundations. 10<sup>th</sup> International Conference on Piling and Deep Foundations, Amsterdam, 32-43p.

Kim, K. N., Lee, S., Kim, K., Chung, C., Kim, M. M., Lim H. S. (2001) Optimal pile arrangement for minimizing differential settlements in piled raft foundations. *Computers and Geotechnics*, v. 28, 235-253p.

Knigmüller, O. & Kirsh, F. (2004). A Quality and safety issue for cast-in-place: 25 years of experience with low-strain integrity testing in Germany – from scientific peculiarity to day-to-day practice, Proc. Current Practices and future trends in deep foundations, ASCE, Geotechnical Special Publication, Reston, Virginia: Ed. DiMaggio and Hussein, n.125, pp. 202-221.

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

\_\_\_\_\_. NBR6122 (1996). Projeto e Execução de Fundações, ABNT, São Paulo.

\_\_\_\_\_. NBR6118 (2003). Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento.

Manodilini, A. (2003). Design of Piled Raft foundation: Practice and Development. In: 4th International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, 2003, Ghent. 4th International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, 2003. v. 1. p. 59-80.

Mandolini, A., G., Russo & Viggiani, C. (2005). Pile foundations: Experimental investigations, analysis and design. XVI ICSMGE, Osaka 2005, 37p.

Mandolini, A. (2007). Pile Foundations from Research to Practice. Workshop de Fundações Profundas: Da Pesquisa à Prática.

Mota, R. & Fialho, R.L. (2000). Avaliação da Integridade de Estacas de Betão pelo Método de Diagrafia Sónica entre furos. VII Cong. Nac. de Get. Portugal, 593-600p.

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

Poulos, H.G. (1968). Analysis of the settlement of pile groups. *Geotechnique*, 18(4) : 449-471.

Poulos, H. G. (1979). Settlement of single piles in nonhomogeneous soil. **J. Geot. Eng. Div.**, ASCE, v. 105, n.5, 627-641.

Poulos, H.G. (1988). “Modified Calculation of Pile Group Settlement Interaction”. *Jnl. Geot. Eng.*, ASCE Vol. 114, No.6, pp. 697-706.

Poulos, H.G. (1994a). An approximate numerical analysis of pile-raft interaction. *Int. Journal for Num. & Anal. Meth. in Geomechanics*, 18 : 73-92.

Poulos, H.G. (1994b). Alternative design strategies for piled raft foundations. 3rd Int. Conf. Deep Foundations, Singapore, p. 239-244.

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

Poulos, H.G. (1998). The pile-enhanced raft - an economical foundation system. Keynote Lecture. *Anais do XI COBRAMSEG*, Brasilia, novembro, 1998.

Poulos, H.G. (1990). DEFPIG. Users’ Guide. Centre Geotechnical Researches. Univ. of Sydney. Australia.

Poulos, H.G. (1999a). Common procedures for foundations settlement analysis – are they adequate? Proc. 8<sup>th</sup> Australia-New zeeland Conf. on Geomechanics, Hobart, Australia, 1: p3-25.

Poulos, H.G. (1999b). Pile Defects – Influence on Foundation Performace. 4<sup>th</sup> International Conference on Deep Foundation Practice incorporating Piletalk, Singapore, 57-69p.

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

Poulos, H.G. (2002). Simplified Design Procedure for Piled Raft Foundations, In: 6th Intern. Symp. on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development, 2002, Seoul. Chung-Ang University Art Center, 2002. v. 2. p.441-458.

Poulos, H.G. (2006). Economic Foundation Design for Tall Buildings. 10<sup>th</sup> International Conference on Piling and Deep Foundations, Amsterdam, 200-209p.

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

Poulos, H.G. & Small, J.C. (1998). GARP. User's Manual. Centre for Geotechnical Researches. Univ. of Sydney. Australia.

Quick, H., Keiper, K. & Meissner, S. (2005). Complex Foundation design in inhomogeneous ground conditions for a high-rise building in Frankfurt, Germany. 16th ICSMGE, Tokyo, 1547-1550p.

Randolph, M.F. (1983). Design of Piled Raft Foundations. Cambridge University, Eng. Depart. Research Report, Soils TR143.

Randolph, M.F. (1985). Ch.4 of "Piling Engineering". By W.G.K. Fleming et al., New York: Surrey University/Halsted Press.

Randolph, M.F. (1994). Design methods for pile groups and piled rafts. Proc. 13<sup>th</sup> ICSMFE, New Delhi, 1 : 61-82.

Randolph, M.F. & Clancy, P. (1994). Design and Performance of a Piled Raft Foundation. Research Report G1088. Dep. of Civil Eng. Univ. of Western Australia.

Randolph, M.F. & Wroth, C.P. (1979). An analysis of the vertical deformation of pile groups. Geotechnique, 29(4) : 423-439.

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

Sales, M.M. & Costa, W.L. (2000). Dois Casos Históricos de Reforço de Fundações. III SEFE, São Paulo, 10p.

Sales M.M., Cunha R.P., Carvalho J.C. de & Silva C.M. (2002). Previsões de Comportamento de um radier estaqueado no Distrito Federal. XVI COBRAMSEG, São Paulo, 8p.

Sales, M. M.; Cunha, R. P.; Farias, M. M. (2000). Método alternativo para a simulação numérica do comportamento de estacas totalmente mobilizadas em fundações mistas. **INFOGEO**, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná.

Sommer, H.; Wittmann, P.; Ripper, P. (1985). Piled raft foundation of a tall building in Frankfurt clay. **ICSMFE**, v. 11, n. 4, 2253-2257. STEINBRENNER, W. (1934) Tafeln zur Setzungberechnung. **Die Strasse**, v. 1, n. 221.

Stephan, G.A. & Saxena, D.S. (2003). Case history of a designed, installed, load and integrity tested ACIP piles project. Deep Foundation on Bored and Auger Piles, Rotterdam, 339-345p.

Tan, Y.C., Chow, C.M. & Gues, S.S. (2004). Piled raft with short piles for low-rise building on very soft clay. Proceedings 15th SEAGC, Bangkok, Thailand, 171-176p.

Tan, Y.C., Chow, C.M. & Gue, S.S. (2005). Piled raft with different pile length for medium-rise buildings on very soft clay. 16th ICSMGE, Tokyo, 2045-2048p.

Yamashita, K.; Tomono, M.; Kakurai, M. (1987). A method for estimating immediate settlement of piles and pile groups. **Soils and Foundations**, v. 27, n. 1, 61-76.