

**MODELAGEM FÍSICA DE RADIERS ESTAQUEADOS COM E SEM ESTACAS  
DEFEITUOSAS ASSENTES EM AREIA**

**ARY FRANCK BAIA CORDEIRO**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ORIENTADOR: RENATO P. CUNHA, Ph.D.  
COORIENTADOR: MAURÍCIO M. SALES, D.Sc.**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

**MODELAGEM FÍSICA DE RADIERS ESTAQUEADOS COM  
E SEM ESTACAS DEFEITUOSAS ASSENTES EM AREIA**

**ARY FRANCK BAIA CORDEIRO**

**ORIENTADOR: RENATO PINTO DA CUNHA**  
**COORIENTADOR: MAURÍCIO MARTINES SALES**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.TD – 136/17**

**BRASÍLIA / DF: SETEMBRO DE 2017**

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

**MODELAGEM FÍSICA DE RADIERS ESTAQUEADOS COM E  
SEM ESTACAS DEFEITUOSAS ASSENTES EM AREIA**

**ARY FRANCK BAIA CORDEIRO**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

**APROVADA POR:**

---

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

---

**MAURÍCIO MARTINES SALES, D.Sc. (UFG)  
(COORIENTADOR)**

---

**ENNIO MARQUES PALMEIRA, Ph.D. (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**PAULO JOSÉ ROCHA DE ALBUQUERQUE, D.Sc. (UNICAMP)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

---

**OSVALDO DE FREITAS NETO, D.Sc. (UFRN)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 06 DE SETEMBRO DE 2017**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**CORDEIRO, ARY FRANCK BAIA**

Modelagem Física de Radiers Estaqueados com e sem Estacas Defeituosas Assentes em Areia (2017).

xxix, 188p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2017)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Modelagem Física

2. Estacas Defeituosas

3. Fundações Profundas

4. Prova de Carga

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

CORDEIRO, A.F.B. (2017). Modelagem Física de Radiers Estaqueados com e sem Estacas Defeituosas Assentes em Areia. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-136/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 188p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Ary Franck Baia Cordeiro

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Modelagem Física de Radiers Estaqueados com e sem Estacas Defeituosas Assentes em Areia.

GRAU / ANO: Doutor / 2017

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

---

Ary Franck Baia Cordeiro  
SQN 203, Bloco I, Apto. 601 – Asa Norte  
CEP: 70.833-090 – Brasília/DF - Brasil

## DEDICATÓRIA

“O bom lutador não desiste da batalha, mas ganha fôlego, cria ânimo e retorna pra guerra...então não desistiremos dos nossos sonhos por estarmos cansados... O senhor dá forças aos abatidos pra continuar lutando...No fim das contas, nossa vontade só está sendo colocada em cheque de novo... Lutar, lutar até que cordeiros virem leões...”

Artorius Augustus e os 12 cavaleiros da Távola Redonda

“O cientista não é o homem que fornece as verdadeiras respostas; é quem faz as verdadeiras perguntas.”

Claude Lévi-Strauss (1908-2009).

*Dedico este trabalho a Deus, a minha esposa Thania, por sempre me apoiar em todos os meus sonhos e loucuras, aos meus filhos, por me fazerem sonhar, aos meus pais, Aristeu e Helena e irmãos, Júnior e Patrícia.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e ao Santo Expedito por sempre me guiarem, principalmente nos momentos de escuridão.

Ao Professor Renato Cunha, meu eterno mestre e amigo, por ter me ensinado a prática da engenharia e a ser um resolvidor de problemas, e ainda, por ter acreditado na conclusão deste trabalho e me apoiado nos momentos difíceis.

Ao Professor Maurício Sales por ser este grande exemplo de profissional e pessoa, por ter me apoiado e orientado no desenvolvimento desta pesquisa, sempre com muita paciência.

Ao Professor Paulo Albuquerque pela acolhida e por ter disponibilizado seu tempo e atenção na etapa de instrumentação das estacas em Campinas-SP e por todas as considerações que contribuíram para o engrandecimento deste trabalho.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB pelos conhecimentos transmitidos e por serem grandes no que fazem.

Aos Laboratoristas que muito me ajudaram: Vanilson, Tiago, Ricardo, Xavier, Severino e ao Artur do Laboratório de Mecânica da UnB.

Ao Professor Alessandro Mandolini pela orientação e acolhida durante a etapa de doutorado *sandwich* na *Seconda Università di Napoli* e por me mostrar que podemos ir mais alto do que estamos. A todos que acolheram a mim e minha esposa em nossa estadia na Itália: Antonella, Bárbara, Nicola, Rafaelle, *la famiglia* Mancino, Lali, Enzo *i tutti gli altri*.

A Família Dinamiza por me ajudou a realizar um sonho, a todos que ainda estão conosco e os que passaram, pois me ensinaram muito. E em especial a Ana Carolina, pelo apoio no fechamento deste trabalho.

Aos meus grandes amigos que muito me ajudaram desde minha chegada a Brasília até hoje: Alexandre Gil, Fábio Nunes, Lorena, Marcos Aires, Marcus Vinícius, John Eloi e família.

A CAPES e CNPq pelo auxílio financeiro durante todo o curso de doutorado, inclusive durante a etapa de pesquisa na Itália.

A todas as pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para esta longa etapa da minha vida.

## RESUMO

O conceito de radier estaqueado vem sendo cada vez mais utilizado em fundações devido a ocorrência de prédios mais altos, que apresentam maiores cargas concentradas, mas também vem se tornando uma solução viável em pequenos empreendimentos. Desta forma, necessita-se de uma interação entre os elementos constituintes deste sistema para que se tenha um número ótimo de estacas sob o radier a fim de atender critérios de capacidade de carga e recalque admissível. Este aspecto é particularmente importante quando ocorrem defeitos (rupturas ou execução de estacas mais curtas que as projetadas) no sistema de fundação, que gera um fenômeno de distribuição de carga, mudança de fator de segurança e aumento de deslocabilidade imprevisível ao projetista. Um estudo aprofundado do assunto, em verdadeira grandeza, nem sempre é viável o que limita a avaliação destes sistemas sob condições de redução de escala em câmaras de calibração ou sob condições numéricas.

Para esta tese de doutorado foram utilizadas placas rígidas e tubos de alumínio para realizar 20 provas de carga em escala reduzida com tensões de 1g assentes em areia sob carregamento vertical, controlados por célula de carga, com o intuito de avaliar o comportamento qualitativo (e prever tendências) de radiers estaqueados com e sem a presença de estacas danificadas para radiers estaqueados de 04, 09 e 16 estacas em tanque de ensaio cilíndrico metálico. Os danos foram simulados pela variação do comprimento das estacas (50%L e 0%L). Para os radiers de 09 e 16 estacas os danos variaram nas posições de canto, borda e centro da placa. Para os radiers sobre 04 estacas, com 25% de estacas danificadas, na carga de serviço (50% da carga convencionada a um recalque de 10% do diâmetro da estaca) as fundações já estavam com FS de 1,5, enquanto que para os radiers sobre 09 (11% de dano) e 16 (6% de dano), os fatores de segurança atingiram 1,8 e 1,9, respectivamente. Observou-se também que, desde os níveis iniciais de carregamento, há uma pequena variação da rigidez do sistema, mesmo nos radiers de maior número de estacas, o que permite uma previsão qualitativa da nova situação pós defeito. E isso é claramente evidente a partir dos resultados que evidenciam a diminuição do fator de distribuição de carga (em um dado nível de recalque) com o aumento do número de estacas, embora estacas de diferentes comprimentos mostrem uma tendência similar na distribuição de carga. A tese contribui para o entendimento e a previsão qualitativa, adimensional, de sistemas de fundação radier estaqueado em condições distintas de defeito (posição, geometria do sistema, nível de deslocabilidade/carregamento), entendimento este que serve de base inicial a previsão do comportamento destas fundações quando

fisicamente afetadas – e de certa forma à tomada de decisões sobre a eventual necessidade de reforço do sistema de fundações.

**Palavras-chave:** Radier Estaqueado, Estaca Defeituosa, Modelagem Física 1g, Prova de Carga, Escala Reduzida, Areia.



## ABSTRACT

The concept of piled raft has been increasingly used in foundations due to the occurrence of taller buildings, which have higher concentrated loads, but has also become a economic solution in small building. In this way, an interaction between the constituent elements of this system is required in order to have an optimal number of piles under the raft in order to have a bearing capacity propered and admissible settlement. This is particularly important when defects occur (broken or execution of shorter piles than those designed) in the foundation system, occurs then a new behaviour of load spreads, change of safety factor and unplanned increase of displacement. An in-depth study of the subject in true scale is not always feasible which limits the evaluation of these systems small scale conditions in calibration chambers or under numerical conditions.

For this work, therefore, rigid plates and aluminum tubes were used to carry out 20 load tests on small scale with 1g tension on sandy soil under vertical loading, controlled by a load cell, in order to evaluate the qualitative behavior (and predict trends) of piled raft with and without the presence of damaged pile for groups of 04, 09 and 16 piles in a cylindrical metallic test tank. The damages were simulated by the variation of the length of the intacts piles (50% L and 0% L). For the groups of 09 and 16 piles the damages varied in the corner positions, edge and center of the plate. For groups of 4 piles, with 25% of piles damaged, in the service load, the group already had SF of 1.5, while for the groups of 09 (11% damage) and 16 (6% damage), safety factors reached 1.8 and 1.9, respectively. It was also observed that, from the initial levels of loading, there is a small variation of the stiffness of the system, even in the groups with more piles, which allows a qualitative prediction of the new situation of post-defect. And this is clearly evident from the results that show the decrease in the load distribution factor (at a given displacement level) with the increase in the number of piles, although piles of different lengths show a similar tendency in the load spreads. This thesis contributes to the understanding qualitative form, dimensionless prediction of piled raft systems foundation under different conditions of defect (defective pile position, system geometry, level of displacement / loading), an understanding that serves as the initial basis for predicting the behavior of these foundations systems when physically affected - and to a certain extent to making decisions about the possible improve of the system.

**Key words:** Piled Raft, Defective Pile, 1g Physical Modelling, Load Test, Small Scale, Sand.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. CONTEXTO GERAL .....	1
1.2. JUSTIFICATIVA .....	2
1.3. OBJETIVOS .....	3
1.3.1. Objetivo geral .....	3
1.3.2. Objetivos específicos .....	3
1.4. ESCOPO DA TESE .....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
2.1. FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS .....	6
2.1.1. Grupos de estacas .....	6
2.1.2. Radiers estaqueados .....	9
2.1.3. Fatores de interação .....	13
2.1.4. Fatores de distribuição de carga ( $\alpha_{PR}$ ) .....	17
2.2. MÉTODOS BASEADOS NA TEORIA DA ELASTICIDADE .....	18
2.2.1. Método de Poulos, Davis & Randolph (PDR) .....	18
2.2.2. Método de Randolph .....	20
2.2.3. Método de Sales (2000) .....	22
2.2.4. Novo Método PDR (Mandolini <i>et al.</i> , 2017) .....	23
2.3. PATOLOGIA DAS FUNDAÇÕES – ESTACAS DEFEITUOSAS .....	24
2.4. ENSAIOS DE DESEMPENHO EM ESTACAS DEFEITUOSAS .....	33
2.4.1. Ensaio de integridade de pequena deformação .....	34
2.4.2. Prova de carga estática (PCE) .....	36
2.5. MODELAGENS FÍSICAS DE FUNDAÇÕES .....	36
2.5.1. Ensaios em centrífuga .....	40
2.5.2. Ensaios em modelos 1g .....	42
2.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....	47
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	48
3.1. MODELAGEM DO SISTEMA DE FUNDAÇÃO .....	49
3.1.1. Equipamento geral .....	49
3.1.2. Sistema de reação .....	51
3.2. MODELAGEM DO SOLO .....	51
3.2.1. Caracterização do solo .....	51
3.2.2. Preparação do solo .....	53

3.3. EXECUÇÃO DO RADIER E DAS ESTACAS .....	56
3.3.1. Preparação das fundações.....	56
3.3.2. Sistema de aquisição de dados .....	60
3.3.3. Aferição do sistema de medição.....	61
3.4. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	63
3.4.1. Método de instalação.....	63
3.4.2. Configurações de ensaio e procedimentos executivos .....	64
3.5. PROGRAMA DE ENSAIOS E PROCEDIMENTOS EXECUTIVOS .....	66
3.5.1. Análise A1: Radier E Radier Estaqueado de 1 Estaca – Caso 9, Caso 10 e Caso 11 .....	70
3.5.2. Análise A2: Grupo de 4 Estacas – Caso 12 Ao Caso 18.....	71
3.5.3 análise A3: Grupo de 9 Estacas: do Caso 19 Ao Caso 33 .....	72
3.5.4 análise A4: Grupo de 16 Estacas: do Caso 34 ao Caso 48.....	73
3.6. PRINCIPAIS DIFICULDADES E AJUSTES NOS TESTES REALIZADOS.....	74
3.6.1. Preparação do solo .....	75
3.6.2. Instrumentação das estacas.....	76
3.6.3. Simulação dos danos .....	79
3.7. SÍNTESE DO CAPÍTULO .....	80
<b>4. RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>82</b>
4.1. INTRODUÇÃO .....	82
4.2. RESISTÊNCIA E SEGURANÇA .....	84
4.2.1. Introdução.....	84
4.2.2. Radiers.....	84
4.2.3. Radier de 4 estacas – Dano: Estaca Curta (50%L) e Ausente (0%L) .....	86
4.2.4. Radier de 9 estacas – Dano: Estaca Curta (50%L) e Ausente (0%L) .....	92
4.2.5. Radier de 16 estacas – Dano: Estaca Curta (50%L) e Ausente (0%L) .....	102
4.2.6. Síntese sobre a resistência e segurança .....	111
4.3. RIGIDEZ (K) E DESLOCAMENTO ( $\Delta$ ) .....	116
4.3.1. Introdução.....	116
4.3.2. Radier de 4 estacas – Dano: Estaca Curta (50%L) e Ausente (0%L) .....	116
4.3.3. Radier de 9 estacas – Dano: Estaca Curta (50%L) e Ausente (0%L) .....	121
4.3.4. Radier de 16 estacas – Dano: Estaca Curta (50%L) e Ausente (0%L) .....	133
4.3.5. Síntese sobre a rigidez e deslocamento .....	144
4.3.6. Considerações gerais .....	148
<b>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....</b>	<b>155</b>
5.1. INTRODUÇÃO .....	155

5.2. RESISTÊNCIA E SEGURANÇA .....	155
5.3. RIGIDEZ E DESLOCAMENTO .....	157
5.4. CONCLUSÕES .....	158
5.5. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	159
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>160</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>169</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Propriedades físicas da areia usada para o ensaio. ....	52
Tabela 3.2. Geometria e propriedades mecânicas da estaca íntegra. ....	56
Tabela 3.3. Placa utilizada para determinado tipo de estaca .....	59
Tabela 3.4. Ensaios e condições dos ensaios realizados .....	68
Tabela 3.5. - Características do radier estaqueado de 4 estacas .....	71
Tabela 3.6 - Características do Radier estaqueado de 9 estacas.....	73
Tabela 3.7 - Características do Radier estaqueado de 16 estacas.....	74
Tabela 4.1 – valores de carga referentes ao critério de recalque equivalente a 10%DE.....	86
Tabela 4.2. Valores de carga referentes ao critério de recalque máximo.....	89
Tabela 4.3. Valores de carga referentes ao critério de recalque equivalente a 10% do diâmetro da estaca, 9PEC .....	97
Tabela 4.4. Valores de carga referentes ao critério de recalque máximo, 9PEA. ....	97
Tabela 4.5. Valores de carga referentes ao critério de recalque máximo, 16PEC .....	106
Tabela 4.6. Valores de carga referentes ao critério de recalque máximo, 16PEA.....	106
Tabela 4.7. Efeito do tipo de dano sobre a carga aplicada e rigidez. ....	118
Tabela 4.8. Fator de redução de rigidez. ....	121
Tabela 4.9. Efeito do tipo de dano sobre a carga aplicada e rigidez para 9PEC.....	124
Tabela 4.10. Efeito do tipo de dano sobre a carga aplicada e rigidez para 9PEA.....	124
Tabela 4.11. Fator de redução de rigidez, EC. ....	132
Tabela 4.12. Fator de redução de rigidez, EA. ....	133

Tabela 4.13. Efeito do tipo de dano sobre a carga aplicada e rigidez (16PEC).....	135
Tabela 4.14. Efeito do tipo de dano sobre a carga aplicada e rigidez (16PEA).....	136
Tabela 4.15. Fator de redução de rigidez, 16PEC.....	143
Tabela 4.16. Fator de redução de rigidez, 16PEA.....	143
Tabela 4.17. Valores comparativos entre alguns trabalhos.....	148
Tabela b.1. Determinação das densidades.....	175

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Desacoplamento do efeito devido à lateral e à base da estaca: (a) camada de solo superior e inferior (b) deformações padrões separadas para a camada superior e inferior (Randolph & Wroth, 1978) .....	8
Figura 2.2 – Sistema de Fundação (Mandolini, 2003). .....	11
Figura 2.3 – Mecanismos de Interação em radiers estaqueados (modificado de Hain & Lee, 1978).....	14
Figura 2.4 – Distribuição de tensões no fuste e na base das estacas de um grupo (Poulos, 1980). .....	16
Figura 2.5 – Modelo trilinear Poulos & Davis (modificado - Poulos, 2001). .....	18
Figura 2.6 – Modelo para estimar o recalque de radier estaqueado contendo estacas totalmente mobilizadas (modificado – Poulos 1998). .....	20
Figura 2.7 – Exemplo de defeitos em estacas (modificado - Poulos, 1997). .....	25
Figura 2.8 – Efeito do nível de carga sobre a redução de rigidez devido a estacas defeituosas (Modificado Poulos, 1997). .....	26
Figura 2.9 - Porcentagem de carga no radier para o grupo com 3 estacas (Cordeiro, 2007). ..	27
Figura 2.10 - Características para os distintos casos do grupo reforçado (Cordeiro, 2007). ...	28
Figura 2.11 - Cargas geradas nas estacas para todos os casos reforçados (Cordeiro, 2007). ...	28
Figura 2.12 – Estacas utilizadas nos ensaios: a) esquema longitudinal das estacas defeituosas; b) zona defeituosa da estaca mobilizada após a realização da prova de carga no radier de 1 (uma) estaca, (Freitas Neto, 2013). .....	29
Figura 2.13 – Malhas de elementos finitos geradas nas análises numéricas; a) vista isoparamétrica da malha de elementos finitos; b) detalhe da malha de elementos finitos; c) vista isoparamétrica da malha de elementos finitos e detalhe do posicionamento do defeito na estaca (Freitas Neto, 2013). .....	29

Figura 2.14 - Distribuição de cargas entre o radier e as estacas no radier estaqueado, no sistema experimental (Freitas Neto, 2013).....	30
Figura 2.15 - Carga absorvida somente pelas estacas (Freitas Neto, 2013).....	31
Figura 2.16 – Esquema da prova de carga lateral (Alva, 2017). .....	32
Figura 2.17 – Resultado gráfico do carregamento horizontal obtido através da modelagem numérica, (Alva, 2017).....	32
Figura 2.18 – Montagem e detalhes dos sistemas PIT e PET no campo experimental Cunha et. al, (2012). .....	35
Figura 2.19 – Comparação entre os resultados dos equipamentos PET x PIT a uma profundidade de 10m com estaca com 50 cm de diâmetro no campo experimental da UnB.....	35
Figura 2.20 - Sequência de execução do modelo de teste (modificado - Reinhorn, 2008).....	39
Figura 2.21 – Fotos dos ensaios em centrífuga: a) centrífuga geotécnica utilizada para os ensaios; b) detalhe do modelo de radier de 4x4 estacas (Rincon, 2016).....	41
Figura 2.22 - Proporção da carga absorvida pela placa em um sistema radier estaqueado. Adaptado de Mandolini et al., (2013).....	43
Figura 2.23 – Exemplos de Experimentos 1g. (a) Lee (2008) e (b) Choi (2012). .....	45
Figura 2.24 - Comparativo entre as curvas carga-recalque do grupo com 4 estacas e o radier estaqueado com 4 estacas (Tavares, 2012).....	46
Figura 3.1 – Modelo esquemático do sistema de prova de carga em modelo reduzido, 1g.....	50
Figura 3.2 – Sistema de prova de carga em modelo reduzido, 1g.....	51
Figura 3.3 – Placa de Reação de aço com cantoneiras em perfil “L”. .....	51
Figura 3.4 – Distribuição do tamanho do grão da areia. ....	52
Figura 3.5 – Secagem da areia.....	53



Figura 3.6 – Procedimento executivo do solo para as fundações em escala reduzida: (a) Retirada do material na baia de estoque; (b) Controle através de uma balança analógica da quantidade de material por camada; (c) Lançamento da areia por camada e (d) Nivelamento da camada de areia. ....	54
Figura 3.7 – Roteiro adotado na compactação das três camadas constituintes do solo de sustentação: (a) compactação do quadrante 1; (b) compactação dos quadrantes 2, e do 4; (c) compactação do quadrante 3. ....	55
Figura 3.8 – Controle de densidade por camada. (a) Modelo esquemático. (b) Uso de cápsulas para a determinação da densidade natural por camada. ....	56
Figura 3.9 – Densidades encontradas para cada grupo de ensaio por camada. ....	56
Figura 3.10 – Estacas ensaiadas: (a) Material; (b) Estaca Íntegra com cola epóxi. ....	58
Figura 3.11 – Esquemático da Estaca Íntegra. ....	58
Figura 3.12 – Estacas do modelo EM2: (a) Estaca Curta (b) Estaca Ausente. ....	59
Figura 3.13 – Estaca Curta do modelo: EC. ....	59
Figura 3.14 – Placas utilizadas para os ensaios. ....	60
Figura 3.15 – Dimensões dos Radiers utilizados e a localização das estacas. Unidades em milímetro. ....	61
Figura 3.16 – Sistema de medição e carregamento. ....	62
Figura 3.17 – Ensaio de Calibração do sistema de leitura de carga. ....	62
Figura 3.18 – Calibração das leituras em função do número de carregamentos – 1º ciclo. ....	63
Figura 3.19 – Calibração das leituras em função do número de carregamentos – 2º ciclo. ....	63
Figura 3.20 – Calibração entre as leituras digitais e analógicas – 1º ciclo. ....	64
Figura 3.21 – Calibração entre as leituras digitais e analógicas – 2º ciclo. ....	64
Figura 3.22 – Método de instalação das estacas. ....	65

Figura 3.23 – Localização das estacas danificadas e instrumentadas. ....	65
Figura 3.24 – Procedimento esquemático para a realização dos ensaios. ....	66
Figura 3.25 – Localização das estacas danificadas e íntegras. ....	67
Figura 3.26 – Localização das estacas instrumentadas e danificadas. ....	68
Figura 3.27 – Análise A1: Placa e Radier de 1 estaca – Caso 9, Caso 10 e Caso 11. ....	71
Figura 3.28 – Análise A2: Grupo de 4 estacas: Caso 12, 14, 16 e Caso 18. ....	72
Figura 3.29 – Análise A3: Grupo de 9 estacas: Do Caso 19 ao Caso 33 – Posições E5, E6 e E9. ....	73
Figura 3.30 – Análise A4: Grupo de 16 estacas: Do Caso 34 ao Caso 48 – Posições E11, E12 e E16. ....	74
Figura 3.31 – Modelo esquemático do sistema de “chuva de areia” em modelo reduzido, 1g. ....	76
Figura 3.32 – Preparação do modelo do solo. EM1: Solo AP – Areia pluviada, com uso da técnica de “Chuva de Areia”. ....	76
Figura 3.33 – Preparação do modelo do solo: (a) Solo APV (EM2) – Areia pluviada e vibrada, com uso do vibrador tipo mangote; (b) controle da vibração pelo tempo com o uso de cronômetro. ....	77
Figura 3.34 – Estacas em modelo reduzido, 1g: (a) Estaca modelo 01-EM1 (b) Estaca modelo 02-EM2 com corte longitudinal tipo “meia-cana”. ....	78
Figura 3.35 – Estacas em modelo reduzido, 1g: (a) Estaca modelo 01-EM1. ....	78
Figura 3.36 – Instrumentação estaca modelo 02 - EM2. ....	79
Figura 3.37 – Prensa Uniaxial. ....	79
Figura 3.38 – Estacas do modelo EM1: (a) Estaca Íntegra (EIN1) (b) Estaca Curta (EC1 - 50% do comprimento da estaca íntegra) e (c) Estaca danificada (corte de 45° na metade do comprimento da estaca íntegra); (d) Ruptura Lenta (ERL); (e) Ruptura Rápida (ERR); (f) Solo mole (SM). ....	81

Figura 4.1 – Gráfico Esquemático com identificação das variáveis utilizadas.....	84
Figura 4.2 – Curva carga recalque para o radier isolado de 4, 9 e 16 estacas.....	85
Figura 4.3 – Comportamento carga versus recalque normalizados para o radier isolado de 4, 9 e 16 estacas.....	85
Figura 4.4 - Localização da estaca danificada.....	86
Figura 4.5 – Configurações analisadas para o ensaio de radier estaqueado com 4 estacas. ....	87
Figura 4.6 - Curva completa carga-recalque para o radier de 4 estacas com estaca curta e ausente.....	87
Figura 4.7 - Curva normalizada carga-recalque para o radier de 4 estacas com estaca intactas, curta e ausente. ....	88
Figura 4.8 - Detalhe da curva carga-recalque para o Radier de 4 estacas com estaca curta e ausente.....	89
Figura 4.9 – Fatores de Segurança nos níveis de carregamentos. ....	90
Figura 4.10 – Fator de distribuição de carga em função da profundidade. ....	91
Figura 4.11 - Posição do dano dentro do radier de 9 estacas. ....	92
Figura 4.12 – Seção transversal do grupo de 9 estacas. ....	92
Figura 4.13 - Curva carga-recalque para o radier de 9 estacas com estaca curta.....	93
Figura 4.14 - Curva Carga-Recalque para o Radier de 9 estacas com estaca ausente. ....	94
Figura 4.15 - Curva normalizada carga-recalque para o radier de 9 estacas com estaca curta.95	
Figura 4.16 - Curva normalizada carga-recalque para o radier de 9 estacas com estaca ausente. ....	95
Figura 4.17 - Detalhe da curva carga-recalque para o radier de 9 estacas com estaca curta....	96
Figura 4.18 - Detalhe da curva carga-recalque para o Radier de 9 estacas com estaca ausente. ....	96

Figura 4.19 – Perdas de carga em função das posições. ....	98
Figura 4.20 - Variação do Fator de Segurança em função da posição do dano, para estacas curtas e ausentes. ....	100
Figura 4.21 – Variação do Fator de Segurança em função da posição do dano, para estacas curtas e ausentes. ....	99
Figura 4.22 – Variação do $\alpha_{pr}$ com o recalque para o grupo de 9 estacas com a presença de uma estaca curta em posições distintas. ....	100
Figura 4.23 – Variação do $\alpha_{pr}$ com o recalque para o grupo de 9 estacas com a presença de uma estaca ausente em posições distintas. ....	101
Figura 4.24 – Caso de Radiers Estaqueado de 16 estacas. ....	102
Figura 4.25 - Curva carga-recalque para o radier de 16 estacas com 01 estaca curta. ....	103
Figura 4.26 - Curva carga-recalque para o radier de 16 estacas com estaca ausente. ....	103
Figura 4.27 - Curva normalizada carga-recalque para o radier de 16 estacas com estaca curta. ....	104
Figura 4.28 - Curva normalizada carga-recalque para o radier de 16 estacas com estaca ausente. ....	104
Figura 4.29 - Detalhe da curva carga-recalque para o Radier de 16 estacas com estaca curta. ....	105
Figura 4.30 - Detalhe da curva carga-recalque para o radier de 16 estacas com estaca ausente. ....	105
Figura 4.31 – Variação do Fator de Segurança em função do incremento de carga. ....	107
Figura 4.32 – Variação do Fator de Segurança em função do incremento de carga. ....	108
Figura 4.33 – Variação do $\alpha_{pr}$ com o recalque para o grupo de 16 estacas com a presença de uma estaca curta em posições distintas. ....	110

Figura 4.34 – Variação do $\alpha_{pr}$ com o recalque para o grupo de 16 estacas com a presença de uma estaca ausente em posições distintas. ....	110
Figura 4.35 – Curva carga-recalque para todos os radiers estaqueados estudados. ....	111
Figura 4.36 - Visão Geral do FS em função do incremento de carga para os casos com a presença de estacas curtas. ....	112
Figura 4.37 – Visão Geral do FS em função do incremento de carga para os casos com a presença de estacas ausentes. ....	113
Figura 4.38 – Visão Geral detalhada do FS em função do incremento de carga para os casos com a presença de estacas curtas.....	114
Figura 4.39 – Visão Geral do FS em função do incremento de carga para os casos com a presença de estacas ausentes. ....	115
Figura 4.40 - Curva carga-recalque do radier isolado.....	116
Figura 4.41 - Fator de redução de recalques. ....	117
Figura 4.42 - Efeito do tipo de dano sobre a carga aplicada e rigidez. ....	118
Figura 4.43 - Relação do percentual de incremento de recalque em função do tipo de dano. ....	119
Figura 4.44 - Recalque normalizado com fator de segurança global dos radiers estaqueados. ....	120
Figura 4.45 - Fator de Redução de Rigidez, $R_{ks}$ .....	121
Figura 4.46 - Curva carga-recalque do radier isolado, 9PEC.....	122
Figura 4.47 - Curva carga-recalque do radier isolado, 9PEA. ....	123
Figura 4.48 - Relação de redução de recalques, EC.....	123
Figura 4.49 - Efeito do tipo de dano e posição do dano em relação à rigidez do sistema.....	125
Figura 4.50 – Efeito do tipo de dano e posição do dano em relação à rigidez do sistema. ....	126
Figura 4.51 - Incremento de recalque em função da posição da estaca danificada.....	128

Figura 4.52 – Incremento de recalque em função da posição da estaca danificada. ....	129
Figura 4.53 - Recalque normalizado com fator de segurança real dos radiers estaqueados, 9PEC. .....	131
Figura 4.54 – Recalque normalizado com fator de segurança real dos radiers estaqueados, 9PEA. ....	131
Figura 4.55 - Fator de Redução de Rigidez, Rks.....	132
Figura 4.56 - Curva carga-recalque do radier isolado, 16PEC.....	133
Figura 4.57 - Curva carga-recalque do radier isolado, 16PEA. ....	134
Figura 4.58 - Relação de redução de recalques, Sr. ....	135
Figura 4.59 - Efeito do tipo de dano e posição do dano em relação à rigidez do sistema.....	136
Figura 4.60 - Efeito do tipo de dano sobre o nível de recalque e rigidez. ....	137
Figura 4.61 - Incremento de recalque em função da posição da estaca danificada.....	139
Figura 4.62 - Incremento do recalque em função da posição do dano. ....	140
Figura 4.63 - Recalque normalizado com fator de segurança real dos radiers estaqueados, 16PEC.....	141
Figura 4.64 - Recalque normalizado com fator de segurança real dos radiers estaqueados, 16PEA. ....	142
Figura 4.65 - Fator de Redução de Rigidez, Rks.....	143
Figura 4.66 – Visão Geral da variação da rigidez em função do incremento de recalque para os casos com a presença de estacas curtas. ....	144
Figura 4.67 – Visão Geral da variação da rigidez em função do incremento de recalque para os casos de dano 0%L. ....	145
Figura 4.68 - Visão Geral da variação da rigidez em função do incremento de recalque para os casos com a presença de estacas curtas. ....	146

Figura 4.69 – Visão Geral da variação da rigidez em função do incremento de recalque para os casos de dano 0%L.....	147
Figura 4.70 – Gráfico de Desempenho de Capacidade de Carga versus Percentual de estacas danificadas.....	150
Figura 4.71 – Gráfico de Desempenho quanto aos Fatores de Segurança versus Percentual de estacas danificadas. ....	151
Figura 4.72 – Gráfico de Desempenho quanto ao Recalque versus número de estacas e do percentual de estacas danificadas. ....	151
Figura 4.73 – Recalque em função do Fator de Redução de Recalque.....	152
Figura 4.74 – Fator de Distribuição de carga em função da profundidade para todos os grupos estudados. ....	153
Figura 4.75 – Fator de Distribuição de carga em função da profundidade para todos os grupos estudados. ....	154
Figura A.1. Carga recebida nos strain gauge da estaca EM1 .....	171
Figura A.2. Carga recebida nos strain gauge da estaca EM2 (topo e base) .....	171
Figura A.3. Ensaio de calibração do sistema de leitura de carga .....	172
Figura A.4. Determinação do módulo de young da estaca.....	172
Figura B.1 – Ensaio de cisalhamento direto na areia .....	174
Figura B.2 – Regressão linear do ensaio de cisalhamento direto.....	174
Figura C.1 – Arquitetura da rotina simplificada VB.....	179
Figura C.2 – Desenho esquemático das estacas isoladas .....	182
Figura C.3 – Análise comparativa para as estacas isoladas. ....	182
Figura C.4 – Comportamento carga-recalque do grupo de 4 Estacas .....	183
Figura C.5 – Distribuição de carga entre as estacas do grupo de 4 estacas.....	184

Figura C.6 – Comportamento carga-recalque do grupo de 9 estacas.....	185
Figura C.7 – Distribuição de carga entre as estacas do grupo de 9 estacas.....	186
Figura C.8 - Comportamento carga-recalque do grupo de 16 estacas.....	187
Figura C.9 - Distribuição de carga entre as estacas do grupo de 16 estacas .....	187



## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$\sigma$	tensão;
$\bar{R}_G$	razão entre o recalque médio de uma fundação em radier estaqueado e o recalque de uma estaca, com <i>cap</i> , sob carga total atuante no grupo;
$L_p$	comprimento das estacas;
$\alpha_{PR}$	fator de interação entre o radier e o grupo de estacas;
$\alpha_{RP}$	fator de interação entre o grupo de estacas e o radier;
$\alpha_{kl}$	fator de interação entre as estacas do sistema de fundação;
$A_C$	área líquida de contato do radier com o solo;
$A_E$	área efetiva da estaca;
$A_E$	área externa da estaca;
$A_G$	área do grupo de estacas;
$A_R$	área ocupada pelo radier;
$B$	largura da placa (radier);
$C_C$	coeficiente de curvatura do solo;
$C_R$	compacidade relativa do solo;
$C_U$	coeficiente de uniformidade do solo;
$D_E$	diâmetro externo da estaca;
$D_I$	diâmetro interno da estaca
$D_P$	diâmetro da estaca;
$dr$	recalque médio do sistema radier estaqueado;
$d_{re}$	recalque do radier estaqueado, para cada dado carregamento;
$d_{ri}$	recalques do radier isolado;
$e$	índice de vazios no solo;
$EI_P$	rigidez estrutural da estaca;
$E_{PA/L}$	rigidez axial;
$e_{máx}$	índice de vazios máximo;
$e_{mín}$	índice de vazios mínimo;
$E_P$	módulo de elasticidade da estaca;
$E_p$	módulo de Young da estaca;
$FF$	fator de forma;
$F_m$	fator de mobilização da capacidade de carga última da fundação;

$G$	módulo cisalhante do solo;
$G_b$	módulo cisalhante do solo abaixo da ponta da estaca;
$G_l$	módulo cisalhante do solo na base da estaca;
$G_s$	densidade dos grãos;
$H/L$	profundidade relativa;
$I_p$	momento de inércia da estaca;
$K_{PG}$	rigidez do grupo de estacas;
$K_{PR}$	rigidez do radier estaqueado;
$K_R$	rigidez do radier isolado;
$N_p$	número de estacas no grupo;
$P_a$	carga total aplicada ao radier estaqueado que corresponde ao momento de completa mobilização de todo o grupo de estacas
$P_{av}$	carga média entre as camadas do solo;
$P_b$	carga transferida para a base da estaca;
$P_G$	carga total atuante no radier estaqueado;
$P_k, P_l$	cargas aplicadas no topo das estacas “k” e “l” respectivamente;
$P_p$	carga absorvida pelo grupo de estacas;
$P_{pu}$	carga última do grupo de estacas;
$P_r$	carga absorvida pelo radier;
$P_t$	carga total aplicada;
$Q$	resistência total da estaca;
$q_b$	resistência unitária mobilizada na base da estaca;
$Q_p$	cargas totais assumidas por todas as estacas;
$Q_{PG}$	Capacidade de carga do grupo de estacas;
$Q_{pile,i}$	Capacidade de carga da estaca isolada;
$Q_{PR}$	Capacidade de carga do radier estaqueado;
$Q_{pr}$	cargas totais assumidas pelo radier estaqueado para o mesmo nível de recalque;
$Q_R$	Capacidade de carga do radier (bloco);
$Q_r$	carga recebida pelo radier (sem estacas) para um mesmo nível de recalque;
$q_s$	resistência unitária mobilizada ao longo da superfície lateral;
$r_0$	raio no topo da estaca;
$R_A$	raio equivalente da estaca;
$r_b$	raio na base da estaca;
$R_C$	razão entre o recalque médio de uma estaca com <i>cap</i> e outra similar sem o <i>cap</i> ;

$R_G$	relação entre o recalque médio da fundação (radier estaqueado) e o recalque de uma estaca isolada, sem o bloco, sob carga total atuante no grupo;
$R_{ks}$	fator de redução de rigidez
$r_m$	raio máximo de influência de cada estaca individual;
$r_p$	raio da estaca;
$r_r$	raio equivalente do radier;
$s$	espaçamento entre as estacas;
$s/D$	razão entre o espaçamento das estacas e seu diâmetro;
$s_{ij}$	espaçamento eixo a eixo entre estacas;
$S_r$	relação de redução de recalques;
$w_b$	recalque na base;
$w_p$	recalque do grupo de estacas;
$w_r$	recalque do radier;
$w_s$	recalque lateral da estaca;
$\alpha_{kl}$	fatores de interação entre as estacas “k” e “l”;
$\beta$	proporção de carga atuante nas estacas;
$\gamma_d$	peso específico seco;
$\delta$	recalque do radier estaqueado;
$\delta_1$	recalque de uma estaca sem bloco sob carga unitária;
$\lambda$	esbeltez;
$\nu$	coeficiente de Poisson;
$\rho$	fator de heterogeneidade do solo;
$\rho_{dm\acute{a}x}$	densidade máxima seca do solo;
$\rho_1$	deslocamento sob carga unitária de uma estaca isolada idêntica às que formam o grupo;
$\tau_0$	tensão cisalhante na lateral da estaca;
$\nu_p$	coeficiente de Poisson da estaca;
$\nu_s$	coeficiente de Poisson do solo;
$\varphi'$	ângulo de atrito interno dos grãos;
$\eta$	eficiência de um grupo de estacas;

<i>cap</i>	radier ou bloco
%PC	Perda de Capacidade de carga
16P	Placa com 143mm de lado, para 16 estacas
1P	Placa com 95,25mm de lado, para 1 estaca
3D FENF	Ferramenta Numérica para Análise de Fundações
4P	Placa com 80mm de lado, para 4 estacas
9P	Placa com 105mm de lado, para 9 estacas
ABAQUS	Software para análise 3D de radiers estaqueados pelo método dos elementos finitos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DAMPA	<i>DAMaged Pile Analysis</i>
DAMPIG	<i>DAMaged Pile Groups</i>
DIANA	Programa de Elementos Finitos baseado no método dos deslocamentos. Desenvolvido pela <i>TNO Building and Construction Research Company</i>
EA	Estaca Ausente (0%L)
EC	Estaca Curta (50%L)
EIN	Estaca Íntegra
EM1	Estaca modelo 1, formada por um tubo de alumínio com instrumentação externa e encaixada na placa.
EM2	Estaca modelo 2, formada por um tubo de alumínio bipartido, com instrumentação externa, rosqueada na placa. Foram as estacas utilizadas nos ensaios
FS	Fator de Segurança
GARP	<i>Geotechnical Analysis of Raft with Piles</i>
LCPC-Cesar	Software baseado no método dos elementos finitos, desenvolvido pelo “ <i>Laboratoire central des ponts et chaussées</i> ”
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método de Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
PDR	Método de Poulos – Davis – Randolph, baseado na teoria da elasticidade
PET	<i>Pile Echo Test</i>
PIT	<i>Pile Integrity Test</i>
QC	Carga Convencionada (última)
QDANO	Carga na estaca danificada
QIN	Carga na estaca intacta
QLS	Carga Limite de Serviço (trabalho)
SG	<i>strain gauge</i>
SoFIA	<i>Soil-Foundation Interaction Analysis</i>
UnB	Universidade de Brasília
w <sub>c</sub>	Recalque referente ao deslocamento de 1,47mm (10%D <sub>E</sub> )
w <sub>LS</sub>	Recalque referente a carga limite de serviço

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONTEXTO GERAL

A utilização de modelos físicos para a representação ou interpretação simplificada da realidade vem sendo cada vez mais utilizada para entender o comportamento de grupos e radiers estaqueados. Normalmente este tipo de modelagem é utilizada para complementar os cálculos dos modelos matemáticos durante projetos de grande complexidade, assim, no modelo em escala, diversos fenômenos físicos podem ser estudados em escala reduzida ou aumentada.

Com o advento de construções mais altas foi necessário compreender melhor o uso de um sistema de fundação que compartilha a carga entre seus elementos (radier ou bloco, estacas e solo circundante) devido a um desempenho desigual em termos de qualidade ou performance do conjunto das estacas. Pois, o conceito considerado por alguns projetistas de grupo estaqueado com estes mesmos elementos, o bloco não é considerado para fins de capacidade de suporte, somente como elemento de transferência de carga para as estacas, situação rara na prática.

Devido ao desenvolvimento de ferramentas computacionais aliado ao número de edifícios mais altos e de maiores vãos livres o que resulta em cargas mais elevadas e concentradas, principalmente nas partes centrais dos edifícios, houve uma necessidade de estudos mais rigorosos de modo que as estacas fossem otimizadas no que se refere a sua localização e comprimento sob o radier dando maior economia ao empreendimento e com isso, este conceito, sendo aderido por mais projetistas e pesquisadores.

Para os casos em que o radier está sujeito a cargas não uniformes, o uso de estacas com diferentes comprimentos melhora o desempenho do sistema de fundação. As solicitações impostas nas estacas são distribuídas de tal forma que estas podem atuar próximo a sua carga última sem que a estabilidade e a segurança do sistema sejam comprometidas. Desta forma, tais solicitações utilizam o limite da capacidade de carga

destes elementos e quando estes não são executados conforme previsto em projeto faz-se necessário uma nova análise em busca da previsão deste novo comportamento.

Esta pesquisa visa comparar o comportamento de sistemas de fundação com as estacas íntegras e o sistema com uma estaca danificada, onde o defeito ocorre no início do carregamento do bloco (caso de estaca com problema pré-existente). A variação da eficiência do comportamento carga-recalque será avaliada em função da posição da estaca danificada com a utilização da modelagem física a fim de abordar variáveis qualitativas ou adimensionais não identificadas quando analisadas exclusivamente nos modelos matemáticos.

É desejável desenvolver um procedimento de análise geral de grupos que apresentem estacas defeituosas que sirva como um *benchmark* para as análises aproximadas ou numéricas futuras. Entretanto, antes destas análises serem aplicadas em problemas práticos, a acurácia destas previsões de comportamento necessita ser estabelecida, e isto pode ser alcançado realizando testes em estacas modelo em condições controladas.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

Ainda que os estudos na área de fundações venham evoluindo exponencialmente com o advento de métodos numéricos cada vez mais sofisticados, ainda há uma lacuna nas informações disponibilizadas na literatura quando se trata de patologias em radiers estaqueados. Atualmente, grupos de estacas convencionais ou de radiers estaqueados que apresentem danos durante a fase executiva, ou durante a operação, não possuem um plano de soluções, nem mesmo um plano para avaliar o nível do problema no sistema, muito menos ideia do comportamento pós-dano. A ausência destas informações, aliada à falta de estudos técnicos mais aprofundados, podem acarretar vários problemas para o empreendimento e para a sociedade como superestimar o dano e eventuais comportamentos pós-defeito (distribuição de cargas, deslocamentos etc), o que pode onerar o reforço ou subestimá-lo, sem dúvida levando a um eventual risco na segurança das pessoas.

Os resultados desta pesquisa poderão contribuir para o conhecimento do comportamento carga-recalque de radiers estaqueados com e sem estacas defeituosas e poderão ser de grande importância do ponto de vista de projetos no que diz respeito ao dimensionamento de fundações profundas (notar que uma fundação com defeito se comporta como um “radier estaqueado” com integração de cargas bloco-solo-estaca). Com tais resultados pretende-se aferir o modelo físico 1g com as demais pesquisas, envolvendo dano

de radiers estaqueados, de modo que tais resultados sirvam de diretrizes para investigadores e projetistas de fundação, o que se torna fundamental para a busca por projetos racionais e de soluções mais otimizadas.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

- Avaliar o comportamento de sistemas de fundação profunda (radier estaqueado) assentes em areia sob a influência da presença, desde o início do carregamento, de uma estaca danificada por meio de modelos em escala reduzida (1g).

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Nesta Tese de Doutorado, foi analisado o comportamento carga-recalque de radiers estaqueados íntegros e com a presença de estacas danificadas em distintas posições. Estas análises foram realizadas por meio de provas de carga estáticas em escala reduzida. Para atingir os objetivos gerais, os seguintes objetivos específicos foram alcançados:

- Avaliar a variação da capacidade de carga em relação a posição do dano apresentado;
- Avaliar a influência da posição do dano no Fator de Segurança geral do sistema;
- Avaliar o incremento de recalque em função do dano;
- Elaborar gráficos de tendências de comportamentos para anteprojeto ou validações numérico/analíticas futuras;
- Avaliar quando realizar uma intervenção na ocorrência de dano no sistema de fundação.

### **1.4. ESCOPO DA TESE**

Esta tese foi estruturada em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta o contexto geral e a importância sobre a evolução de estudos de radiers estaqueados, com e sem a presença de danos, além da aplicação de modelagem física nos estudos geotécnicos de fundações e eventuais necessidades de aprimoramento nesta área.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica onde são descritos os fundamentos teóricos dos métodos analíticos e experimentais sobre a metodologia de análises de grupos e radiers estaqueados com e sem estacas danificadas e sobre modelagens físicas. Além disso, são apresentadas as metodologias de previsão do comportamento carga recalque de pesquisas publicadas recentemente.

No Capítulo 3 são descritos os procedimentos metodológicos utilizados na preparação do solo, na instalação das estacas e seus respectivos carregamentos. Neste capítulo são apresentados em detalhes os resultados dos ensaios de caracterização do solo e das barras de alumínio, assim como a geometria dos modelos utilizados e os procedimentos dos ensaios. As principais dificuldades encontradas durante a fase experimental e um resumo de todos os ensaios realizados são destacados ao final do capítulo.

No Capítulo 4 são apresentados, analisados e discutidos os resultados globais em termos de comportamento da curva carga-recalque e, com isso, a variação da capacidade de carga do radier estaqueado, do incremento de recalques e dos fatores de segurança nas diversas situações estudadas. As rigidezes são também comparadas entre os casos estudados e com os valores de referência dos casos intactos, de forma adimensional.

As principais considerações e conclusões obtidas neste trabalho são apresentadas no Capítulo 5, incluindo também algumas sugestões para pesquisas futuras.



### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O uso de fundações em radier ou grandes grupos de blocos sobre estacas vem ganhando cada vez mais espaço, tanto devido ao aumento de edifícios mais altos em áreas de projeção menores, quanto em pequenos edifícios, pois a adição de estacas ao sistema de fundação contribui na melhora da capacidade de carga e no controle dos recalques. Porém, alguns episódios patológicos em obras civis têm sido reportados e se destacam principalmente pelo comportamento da obra como um todo, onde este pode vir a apresentar problemas estéticos, em casos menos problemáticos, e até problemas funcionais, que podem pôr em risco a vida humana, em casos extremos. Estes episódios decorrem desde a má caracterização do comportamento do solo, erros de projeto até de eventos após a conclusão da obra.

Dessa forma, extensivas pesquisas têm sido realizadas e publicadas nas últimas décadas com o objetivo de determinar modelos satisfatórios para a previsão do comportamento dessas estruturas e diferentes métodos de análises têm sido desenvolvidos visando auxiliar nesta previsão de comportamento.

Além das metodologias tradicionais, analíticas e numéricas, as análises em modelagem física em pequenas dimensões vêm sendo cada vez mais difundidas por apresentarem comportamentos em condições controladas a fim de se estudar isoladamente detalhes de difícil percepção em campo, porém, para estas simulações, são encontradas grandes dificuldades na escolha do material e das condições de contorno que possam representar de forma adequada nos experimentos, de modo a obter uma inequívoca previsão de comportamento, e a partir das quais se obtenham leis de escala aceitáveis (Giretti, 2009).

Neste capítulo são abordados alguns conceitos metodológicos de cálculo de capacidade de carga e previsão de recalques para grupos e radiers estaqueados convencionais, além de trabalhos que apresentaram estacas de diferentes comprimentos ou defeituosas, em escala reduzida (1g e centrífuga) e em verdadeira grandeza.

## 2.1. FUNDAÇÕES ESTAQUEADAS

O uso de estacas em conjunto com a fundação em radier, não somente como uma alternativa para o caso de não haver capacidade de suporte superficial suficiente, vem sendo cada vez mais utilizado devido ao aumento da carga dos prédios. Desta forma, quando o solo competente não estiver na superfície do terreno, a decisão de incluir estacas na fundação pode ser feita com base nos recalques excessivos de fundações em raders isolados. A abordagem tradicional tem sido usada para projetar as fundações unicamente para serem suportadas pelas estacas, ignorando qualquer contribuição do *cap* (ou radier ou bloco) da estaca na capacidade de carga da fundação.

### 2.1.1. GRUPOS DE ESTACAS

Segundo a NBR6122:2010 fundação profunda é o elemento estrutural de fundação que transmite a carga ao terreno ou pela base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou pela combinação das duas, devendo sua ponta ou base estar assente em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo 3,0m. A Eq. 2.1 descreve numericamente esse a resistência total da estaca sob o carregamento axial.

$$Q = \int_0^L \pi \cdot d \cdot q_s(z) \cdot dz + q_b \cdot \frac{\pi \cdot d_b^2}{4} \quad (2.1)$$

Onde:

$q_b$  = resistência unitária mobilizada na base da estaca;

$q_s$  = resistência unitária mobilizada ao longo da superfície lateral.

$d_b$  = diâmetro da base;

$d$  = diâmetro da estaca;

$L$  = comprimento da estaca;

$Q$  = resistência total da estaca.

A resposta de grupos de estacas verticalmente carregadas é similar aos carregamentos de estacas isoladas, no que tange a transferência de carga ao solo mais competente pela combinação de resistência lateral e de ponta das estacas. Quando as estacas estão com certo espaçamento entre si, em um grupo, a interação entre elas pode influenciar significativamente a sua resposta, e desta forma, o comportamento individual de cada estaca no grupo se diferencia do comportamento isolado. Este efeito de grupo é calculado por fórmulas de eficiência, para capacidade de carga, e taxas de recalque, para análise de deformação (Salgado, 2008).

Dentre os métodos gerais de análises de grupos estaqueados destacados na literatura podem ser citados os métodos de analíticos simplificados, os métodos numéricos simplificados e os métodos numéricos rigorosos (Katzenbach *et al.*, 1998; Reul & Randolph, 2002).

A capacidade de carga de um grupo de estacas é dada pela relação entre o somatório das capacidades de carga das estacas isoladas e um fator de eficiência conforme Eq. 2.2.

$$\eta = \frac{\text{capacidade de carga do grupo de estacas}}{\text{somatório da capacidade de carga das estacas individuais no grupo}} \quad (2.2)$$

Chan *et al.*, (1996) comentam que várias fórmulas empíricas propostas no passado relacionam a eficiência do grupo ( $\eta$ ) ao número e espaçamento de estacas, mas recomenda que uma aproximação mais racional na interpretação da capacidade de grupos estaqueados é considerar a capacidade tanto das estacas individuais e do grupo como um bloco, ou uma fileira de estacas, e determinar qual potencial de falha é mais crítico. Gerando assim, um fator de segurança mais adequado em relação ao modo mais crítico de falha.

Ensaio realizados em areia fofa por O'Neill (1983) apresentaram resultados indicando que a eficiência do grupo assume valores maiores quando a relação de espaçamento/diâmetro da estaca é 2, chegando à conclusão que uma maior eficiência está relacionada ao aumento no número de estacas. Segundo Cox *et al.*, (1984), o espaçamento entre as estacas é o fator que mais influencia o comportamento do grupo de estacas.

Para grupos de estacas, o método analítico simplificado desenvolvido por Randolph & Wroth (1978) apresentam soluções aproximadas fechadas para análises de estacas isoladas carregadas verticalmente, e que em seguida são extrapoladas para grupos de  $n$  estacas. Nesta abordagem, o solo foi dividido em uma camada superior e uma inferior, em que a base da camada superior corresponde ao nível da base da estaca. Os resultados mostraram que a deformação da camada superior foi devido à ação da carga ao longo da lateral da estaca, em que a deformação da camada inferior ocorreu devido à ação da ponta da estaca. Para a camada superior, a deformação do solo ao redor da lateral da estaca foi modelada como o cisalhamento de cilindros concêntricos (Cooke, 1974). Para a camada inferior, a base da estaca foi assumida agir como uma área rígida sobre a superfície da camada, e essa camada agiu como uma limitação sobre a deformação da camada superior.

Essa abordagem foi então estendida para as análises de grupos de estacas pelos mesmos autores (Randolph & Wroth, 1979) mediante incorporação de uma aproximação da interação entre as estacas carregadas. O fator de interação para a lateral e a base das estacas foi considerado separadamente. Para grupos rígidos de estacas, o fator de interação é calculado

usando uma expressão fechada aproximada, enquanto que, para grupos compressíveis, o fator de interação é obtido por um procedimento iterativo para estabilizar uma relação que expressa o deslocamento lateral deste o topo da estaca até o deslocamento da base da estaca. O deslocamento global para uma estaca com a presença de uma estaca adjacente carregada foi obtido pelo princípio da superposição. Essa abordagem foi limitada para as estacas de mesmo comprimento enterrado.

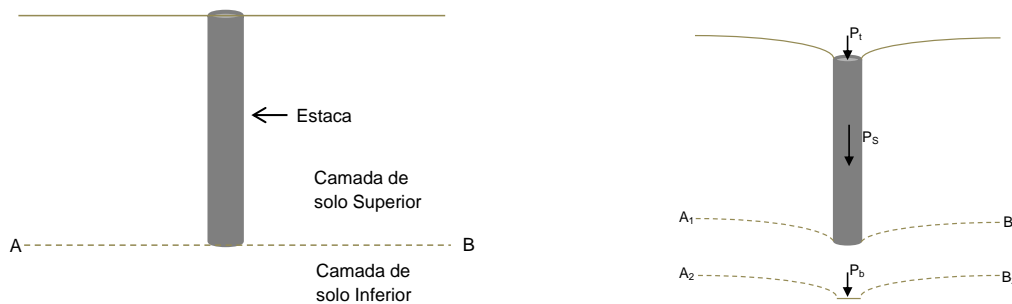


Figura 2.1 – Desacoplamento do efeito devido à lateral e à base da estaca: (a) camada de solo superior e inferior (b) deformações padrões separadas para a camada superior e inferior (Randolph & Wroth, 1978).

Para grupos de estacas a interação entre estacas vizinhas pode ser modelada pela superposição dos deslocamentos de cada estaca. As Eq. 2.3 e 2.4 calculam o recalque no nível da base da estaca (i) devido a um carregamento na própria estaca, enquanto o recalque devido ao carregamento da estaca vizinha (j), a um espaçamento  $s_{ij}$ , pode ser expresso por:

$$(w_b)_{ij} = \frac{2r_b}{\pi s_{ij}} (w_b)_j = \frac{(1 - \nu)}{2\pi G_b} \frac{(P_b)_j}{s_{ij}} \quad (2.3)$$

De maneira similar o recalque lateral da estaca é dado por:

$$(w_s)_{ij} = \ln(r_m/s_{ij}) \frac{(\tau_0 r_0)_j}{\rho G_l} \quad (2.4)$$

Em que:

$r_0$ : raio no topo da estaca;

$r_b$ : raio na base da estaca;

$r_m$ : raio máximo de influência de cada estaca individual;

$w_b$ : recalque na base;

$w_s$ : recalque lateral da estaca;

$s_{ij}$ : espaçamento eixo a eixo entre estacas;

$P_b$ : carga transferida para a base da estaca;  
 $G_b$ : módulo cisalhante do solo abaixo da ponta da estaca;  
 $\nu$ : coeficiente de Poisson;  
 $\tau_0$ : tensão cisalhante na lateral da estaca;  
 $G_t$ : módulo cisalhante do solo na base da estaca;  
 $\rho$ : fator de heterogeneidade do solo.

O caminho mais simples para proceder com uma solução é seguir um procedimento iterativo. Para uma solução assumindo estacas rígidas, onde  $w_s = w_b = w_t$ , valores para  $P_b$  e  $P_t$  são obtidos. As Eq. 2.5 e 2.6 permitem estimar novos valores de  $w_s$  e  $w_b$ .

$$w_t - w_b \cong P_{av} \frac{l}{\pi r_0^2 E_p} = \frac{l}{2\pi r_0^2 \lambda G} (P_t + P_b) \quad (2.5)$$

$$w_s \cong \frac{1}{4} (w_t + 3w_b) \quad (2.6)$$

Em que:

$P_{av}$ : carga média entre as camadas do solo;  
 $\lambda$ : coeficiente de rigidez estaca-solo;  
 $E_p$ : módulo de Young da estaca;  
 $G$ : módulo cisalhante do solo;  
 $P_t$ : carga total aplicada.

### 2.1.2. RADIERS ESTAQUEADOS

Segundo Janda *et al.*, (2009), o termo “radier estaqueado” é geralmente expresso como um sistema de fundação em que ambos os componentes estruturais (estacas e o radier) interagem entre si e com o solo circundante para suportar cargas verticais, horizontais e momentos provenientes da superestrutura.

As soluções elásticas geralmente fazem uso da solução analítica de Mindlin de carga pontual em um semiespaço. Poulos (2001) indica que as soluções elásticas geralmente superestimam a interação entre estacas e solos no grupo de estacas.

Uma série de métodos analíticos está disponível para avaliar o comportamento dos grupos de estacas e radiers estaqueados - Hain e Lee, 1978; Clancy e Randolph, 1993; Franke *et al.* 1994; Poulos, 1994a; Ta & Small, 1996; Van Impe & Lungu, 1996; Poulos *et al.* 1997;

E1-Mossallamy & Franke, 1997; Russo & Viggiani, 1998; Viggiani, 1998; Yamashita *et al.*, 1998; Katzenbach *et al.*, 1998; Prakoso & Kulhawy, 2001.

Segundo Mandolini (2007), um projeto “ideal” de fundação deve satisfazer as verificações de Estado Limite Último, com coeficiente global e/ou parcial de segurança, e ao estado limite de serviço sob diversas solicitações.

Se um radier estaqueado é sujeito a uma carga estrutural vertical total  $Q_{PR}$ , de acordo com sua rigidez, o radier distribui sua carga para solo por meio das pressões de contato, com uma força resultante  $Q_R$ , bem como para as  $n$  estacas de um grupo estaqueado, com uma força resultante  $Q_{PG}$ . A Eq. 2.7 apresenta a formulação para a capacidade de carga do radier estaqueado sob carregamento vertical.

$$Q_{PR} = Q_R + Q_{PG} = Q_R + \sum_{i=1}^n Q_{pile,i} \quad (2.7)$$

Em que:

$Q_{PR}$ : Capacidade de carga do radier estaqueado;

$Q_R$ : Capacidade de carga do radier (bloco);

$Q_{PG}$ : Capacidade de carga do grupo de estacas;

$Q_{pile,i}$ : Capacidade de carga da estaca isolada;

$n$ : número de estacas.

Definidos os esforços das estacas do grupo estaqueado e da carga total recebida pelo radier estaqueado, pode-se então introduzir o coeficiente  $\alpha_{PR}$  definido através da Eq. 2.8.

$$\alpha_{PR} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{pile,i}}{Q_{PR}} \quad (2.8)$$

Este coeficiente descreve a distribuição de carga entre as estacas e o radier, Fig. 2.2. Somente a placa atuando no sistema, fundação superficial, representa um coeficiente igual a zero ( $\alpha_{PR} = 0$ ). Para um grupo de estacas em que o radier não mantém contato com o solo, o coeficiente  $\alpha_{PR}$  é igual a um ( $\alpha_{PR} = 1$ ). Os coeficientes de distribuição das fundações em radier estaqueado apresentam valores entre zero e um ( $0 < \alpha_{PR} < 1$ ), ou seja, toda fundação estaqueada age como um radier estaqueado, exceto naqueles casos em que não há contato entre o radier e o solo, por exemplo, estruturas *offshore*.

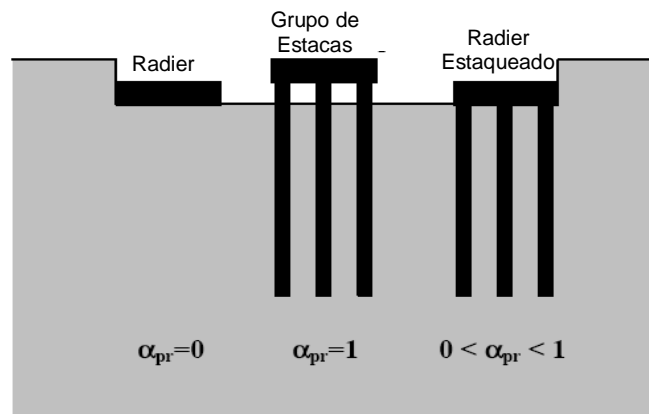


Figura 2.2 – Sistema de Fundação (Mandolini, 2003).

Diferentes métodos de análises em radier estaqueado têm sido desenvolvidos e podem ser classificados nas seguintes categorias: métodos empíricos, analíticos e numéricos.

Em projetos de rádier, o solo pode ser tratado ou como uma série de molas individuais – conhecido como modelo de Winkler (1867) ou como um contínuo. O modelo de Winkler assume que a pressão em qualquer ponto da superfície do solo está relacionada ao módulo de reação do solo (ou rigidez da mola de Winkler) e a deflexão do solo. A rigidez da mola depende do recalque característico do solo e da geometria da fundação. Esse modelo pode ser facilmente calculado por equações matemáticas e pode produzir resultados razoavelmente acurados. Entretanto, negligencia a interação entre cada mola individual, e o solo de apoio, portanto, não é modelado como um contínuo. Uma abordagem alternativa que trata o solo de apoio como um contínuo elástico pode melhor representar o comportamento do solo nesta situação. O parâmetro do solo usado nesta abordagem depende do estado de tensões de campo e tem que ser cuidadosamente avaliado (Hain & Lee, 1974).

Vários outros pesquisadores têm desenvolvido diversos métodos de análises, incluindo o método de camada finita de Small e Zhang (2002), e Chow e Small (2005), e o método de Clancy e Randolph (1993) que combina o método de elementos finitos para radier e soluções analíticas para as estacas. Existe também a abordagem de Kityodom e Matsumoto (2003) que calculam as interações usando as equações de Midlin (com uma técnica de média para o solo em camadas) e consideram ambos os carregamentos verticais e horizontais. Além destas técnicas, existem outras mais.

Randolph (1983) apresentou um método para calcular a interação entre uma estaca isolada e um radier circular. Uma flexibilidade no método da matriz foi então usada para calcular a rigidez global visando à fundação de radier estaqueado combinando a rigidez individual unitária para um sistema radier-estaca.

Sob a concepção de fundações em radier estaqueado, Poulos (1994) desenvolveu o programa GARP (*Geotechnical Analysis of Raft with Piles*) que empregou um método de diferenças finitas para o radier com a consideração do efeito de interação entre as estacas e o radier. Alguns subsídios quanto aos ajustes das curvas foram realizados para as estacas chegarem as suas capacidades últimas e à capacidade de ruptura local para o radier.

Sales (2000) realizou algumas alterações no *GARP 6.0*. O autor considerou a variação da rigidez das estacas após sua completa mobilização e o comportamento não linear da estaca, por meio do uso de dois fatores de ajuste de curva.

Russo (1998) apresentou um método similar onde as estacas e o solo foram modelados pela interação de molas lineares e não lineares. O deslocamento do solo foi calculado usando equações de Boussinesq, produzindo assim soluções de forma fechada. O comportamento não linear das estacas foi modelado assumindo uma curva hiperbólica carga-recalque para uma estaca isolada. Esse método é limitado para carregamentos puramente verticais entre o radier, as estacas e o solo.

Chow (2007) apresentou alguns métodos de vários autores e expôs as seguintes conclusões:

- Um modelo elástico contínuo é preferível para um modelo de mola de Winkler em que a modelagem do solo como suporte para a fundação prevê uma aceitável representação para o comportamento físico do solo;
- Exceto para os métodos de elementos finitos e de camadas finitas, as análises para fundações em solo não homogêneo têm sido realizadas ou pela média do módulo do solo, assumindo o módulo incrementar linearmente com a profundidade (Solo de Gibson), ou com algum incremento com a profundidade;
- Entre os métodos “rigorosos”, o método de elementos de contorno é mais prático para as análises de grandes grupos de estacas, pois se calculam maior facilidade os fatores de interação para o solo de expressões analíticas;
- As soluções de Mindlin têm sido incorporadas em diferentes tipos de abordagens para a determinação do deslocamento do solo e dos fatores de interação;
- Para a maioria dos métodos, as análises não lineares foram realizadas por um procedimento iterativo, de forma tal que as forças atuantes sobre a interface estaca-solo foram limitadas para um valor estimado, e as forças que excedam ao valor limite foram então redistribuídas;



- Os métodos de elementos finitos e de camadas finitas podem ser usados para as análises de fundações enterradas em solos não homogêneos sem a necessidade de aproximações;
- Para grupos de estacas e fundações em radier estaqueado sujeitos a ambos os carregamentos axial e lateral, as respostas axiais e laterais para as fundações são frequentemente assumidas serem não acopladas.

Sousa (2014) implementou no programa de elementos finitos 3D FENF – Ferramenta Numérica para Análise de Fundações, a não linearidade do sistema e um modelo hiperbólico para a modelagem do solo.

Carvalho (2015) desenvolveu um programa híbrido, *Soil-Foundation Interaction Analysis*, SoFIA, que buscou simplificar a análise sem perder a qualidade dos resultados comparados com programas em MEF puros, onde, a autora analisa o radier em elementos finitos de placas de Kirchhoff e o meio solo/estaca através da superposição das interações de seus elementos.

### 2.1.3. FATORES DE INTERAÇÃO

Segundo Poulos (1998) 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 em decorrência da proximidade de outra estaca que devido a continuidade parcial do solo, arrasta à estaca vizinha, quando ambos estão submetidos à mesma carga.

A análise de interação entre duas estacas pode ser representada pela Eq. 2.9:

$$\alpha_{kl} = \frac{\text{recalque adicional na estaca k devido à carga unitária aplicada na estaca l}}{\text{recalque da estaca k sob carga unitária}} \quad (2.9)$$

A análise de um radier estaqueado requer a consideração de quatro interações desenvolvidas entre os elementos da fundação mista. A Fig. 2.3 mostra cada uma dessas interações.

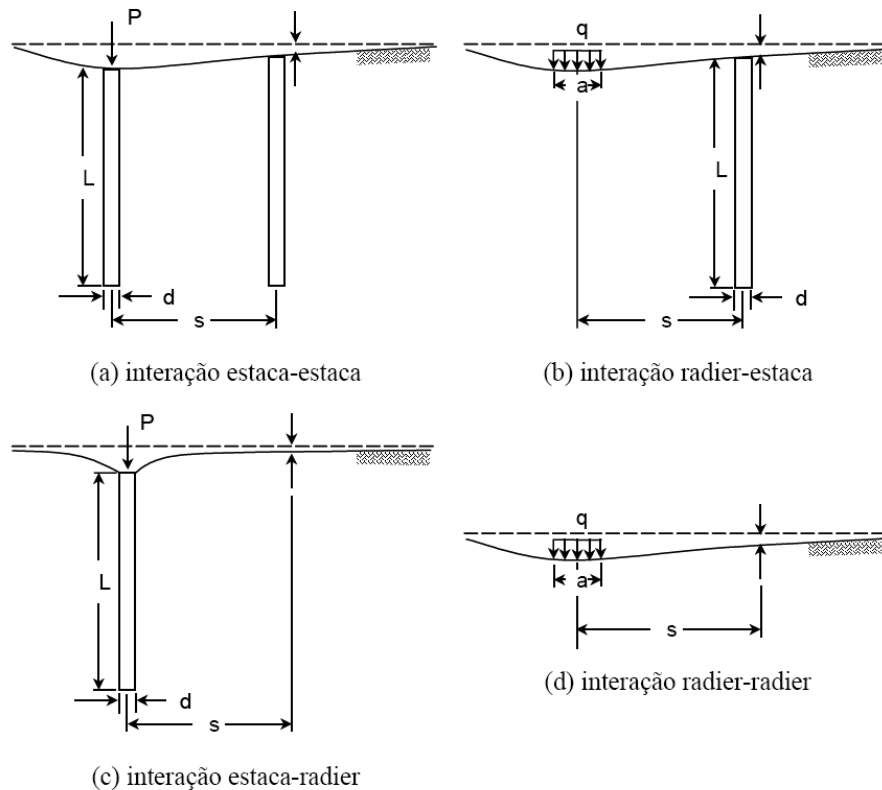


Figura 2.3 – Mecanismos de Interação em radiers estaqueados (modificado de Hain & Lee, 1978).

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;
- 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 mais utilizadas no Brasil, o assunto é relevante.

Em geral há duas maneiras de se proceder: a primeira 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, com, 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 de recalque e de transferência de carga que ocorrem em grupos estaqueados e se avaliou a influência do comprimento relativo da estaca no recalque dos radiers estaqueados e destacou o comprimento além do qual não houve mais diminuição no recalque como comprimento crítico. Além disso destacou também que 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 e que para um grupo de estacas com bloco de coroamento rígido é possível que forças de tração se desenvolvam na parte superior das estacas externas.

Poulos (1980) considerando o grupo constituído por N estacas idênticas, como apresentado na Fig. 2.4, sugeriu que o deslocamento de uma estaca k do grupo está relacionada com a carga aplicada e a interação entre as estacas, conforme apresentado na Eq. 2.10, admitindo-se o comportamento tensão-deformação do solo e do material da estaca descrito pela teoria da elasticidade linear.

$$\rho_k = \rho_l \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^N P_l \alpha_{kl} + \rho_l P_k \quad (2.10)$$

Em que:

$\rho_l$  = 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 Eq. 2.10.

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.

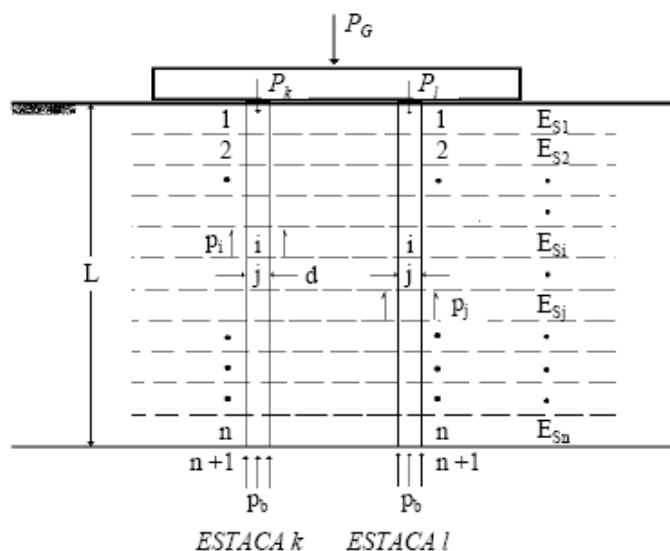


Figura 2.4 – Distribuição de tensões no fuste e na base das estacas de um grupo (Poulos, 1980).

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 e as análises rigorosas são apontadas para fundações de radier estaqueado.

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).

Akinmusuru (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 a soma dos seus elementos estruturais;
- Devido à interação, momentos são induzidos nas estacas, e há um aumento de atrito lateral ao longo do fuste de cada uma destas. O efeito disto tem sido definido em termos de fator de interação  $\alpha$ . A percentagem da capacidade de carga que se transfere para o

bloco causado pela interação não é significativa. As mudanças em ambas as capacidades, da estaca e bloco são influenciados pelo comprimento da estaca e o tamanho do bloco.

Souza (2010) analisou a influência dos fatores de interação no comportamento carga recalque dos grupos com o uso de dois programas consagrados (GARP e DIANA). Já Curado (2015) estudou algumas metodologias existentes para a determinação dos fatores de interações, neste sentido, comparou os métodos analíticos com as soluções numéricas de casos já conhecidos da literatura e concluiu que o posicionamento e o número de estacas no grupo influência no comportamento do conjunto.

#### 2.1.4. FATORES DE DISTRIBUIÇÃO DE CARGA ( $\alpha_{pr}$ )

Embora o desempenho de um radier estaqueado seja baseado na redução de recalque do sistema de fundação, a economia do projeto advém do número de estacas utilizadas. Isto é decidido pelo projetista a partir da distribuição de carga entre o radier e as estacas. Para se determinar a distribuição de carga e o número de estacas, avalia-se a capacidade de carga individual dos elementos e a redução de recalque do conjunto para se avaliar o comportamento inicial de referência, com a referida distribuição de carga. A distribuição de carga entre os dois elementos de suporte (estaca e radier) do radier estaqueado é influenciado pelos parâmetros da estaca e do radier incluindo o recalque do radier estaqueado que tem grande influência na distribuição de carga.

Nos estágios iniciais de carregamento, o recalque global do radier estaqueado é pequeno, então a maior porção da carga aplicada é absorvida pelas estacas. Com o incremento das cargas o recalque aumenta e a parcela de carga do radier também é incrementada. Para os maiores valores de recalque (isto é, recalques devido à deformação plástica do solo), a porcentagem absorvida de carga pelas estacas permanece quase constante. Este aspecto do radier estaqueado é melhor analisado em termos de fator de distribuição de carga,  $\alpha_{pr}$ . O coeficiente  $\alpha_{pr}$  é definido como a relação entre a quantidade de carga (resistência lateral + resistência de base de todas as estacas) absorvidas pelas estacas em um certo recalque ( $Q_p$ ) para a carga total recebida pelo radier estaqueado a uma mesmo nível de recalque ( $Q_{pr}$ ), conforme Eq. 2.11.

$$\alpha_{pr} = Q_p / Q_{pr} \quad (2.11)$$

Em que:  $Q_p = Q_{pr} - Q_r$  e  $Q_r$  = carga absorvida pelo radier a um mesmo nível de recalque.

Deve-se referir que o valor de  $\alpha_{pr} = 0$  para uma radier e  $\alpha_{pr} = 1$  para um grupo de estacas. Para o radier estaqueado o  $\alpha_{pr}$  pode corresponder a qualquer valor entre zero e um,  $0 < \alpha_{pr} < 1$ . O que depende da densidade relativa da camada de solo, do comprimento das estacas, do diâmetro das estacas, da espessura do radier, do recalque do radier, etc. (Balakumar, 2008).

## 2.2. MÉTODOS BASEADOS NA TEORIA DA ELASTICIDADE

### 2.2.1. MÉTODO DE POULOS, DAVIS & RANDOLPH (PDR)

Baseado na teoria da elasticidade o Método de Poulos – Davis – Randolph que é uma combinação dos métodos de Poulos (1980) e Randolph (1994) pode-se avaliar o comportamento da curva carga-recalque de um radier estaqueado.

Poulos & Davis (1980) apresentaram um método para estimativa do comportamento carga-recalque de um radier sob carregamento axial, este método se aplica a situações onde o conjunto de estacas seria totalmente mobilizado. O modelo inicialmente proposto por Poulos & Davis foi reformulado por Poulos (1989) conforme apresentado na Fig. 2.5.

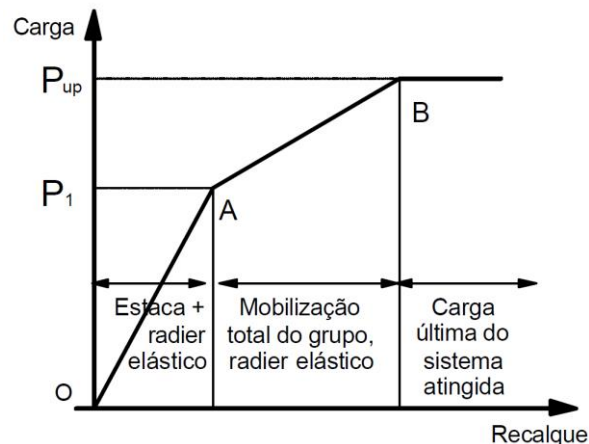


Figura 2.5 – Modelo trilinear Poulos & Davis (modificado - Poulos, 2001).

Randolph (1994) propôs estimar a rigidez do radier estaqueado pela expressão:

$$K_{PR} = \frac{K_{PG} + (1 - 2\alpha_{RP})K_R}{1 - \alpha_{RP}^2(K_R/K_{PG})} \quad (2.12)$$

Em que:

$K_{PR}$  : rigidez do radier estaqueado;

$K_{PG}$  : rigidez do grupo de estacas;

$K_R$  : rigidez do radier isolado;

$\alpha_{RP}$  : fator de interação radier – estaca.

Sales (2000) e Bezerra (2003) apresentaram as seguintes considerações acerca do método trilinear de Poulos & Davis (1980):

- No trecho AO, ainda não há total mobilização das estacas, o recalque é então estimado pelas Eq. 2.13 e 2.14 apresentadas a seguir:

$$\delta = R_G P_G \delta_1 \quad (2.13)$$

$$R_G = R_C \bar{R}_G \quad (2.14)$$

Em que:

$\delta$  = recalque do radier estaqueado;

$\delta_1$  = recalque de uma estaca sem bloco sob carga unitária;

$P_G$  = carga total atuante no radier estaqueado;

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

$R_C$  = razão entre o recalque médio de uma estaca com *cap* e outra similar sem o *cap*;

$\bar{R}_G$  = razão entre o recalque médio de uma fundação em radier estaqueado e o recalque de uma estaca, com *cap*, sob carga total atuante no grupo.

- No trecho AB, após total mobilização de todas as estacas, assumiu-se que toda a carga excedente ao valor “ $P_A$ ” seria absorvida pelo radier (ou *cap*), e, portanto, mesmo passaria a comandar todo o comportamento da fundação;
- O trecho BC corresponderia a ruptura completa do sistema de fundação.

Na reformulação Poulos (1998) considera que o trecho “AO” as estacas não suportam sozinhas as cargas, mas que parte desta carga seria transferida ao solo pelo radier. Denominando “ $K_{pr}$ ” a rigidez do radier estaqueado e “ $K_r$ ” a rigidez do radier isolado, o modelo foi alterado de acordo com a Fig. 2.6 a seguir:

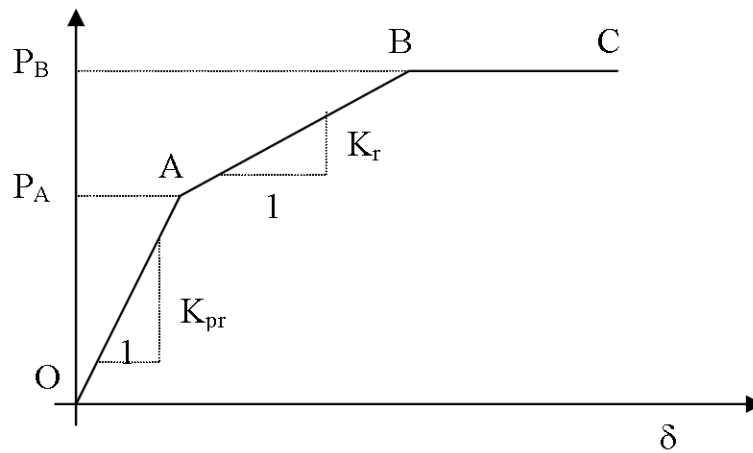


Figura 2.6 – Modelo para estimar o recalque de radier estacaado contendo estacas totalmente mobilizadas (modificado – Poulos 1998).

### 2.2.2. MÉTODO DE RANDOLPH

Randolph (1983) propôs um método aproximado para as análises de fundações em radier estacaado. Nas análises foram introduzidos dois parâmetros de interação e relacionados ao recalque do grupo de estacas e do radier conforme apresentado na Eq. 2.15.

$$\begin{bmatrix} 1/K_p & \alpha_{pr}/K_r \\ \alpha_{rp}/K_p & 1/K_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_p \\ P_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_p \\ w_r \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Em que:

- $w_p$  : recalque do grupo de estacas;
- $w_r$  : recalque do radier;
- $P_p$  : Carga absorvida pelo grupo de estacas;
- $P_r$  : Carga absorvida pelo radier;
- $k_p$  : Rigidez do grupo de estacas;
- $k_r$  : Rigidez do radier;
- $\alpha_{rp}$  : Fator de Interação entre o grupo de estacas e o radier;
- $\alpha_{pr}$  : Fator de Interação entre o radier e o grupo de estacas;

Pelo teorema da reciprocidade, o fator de interação entre o radier e o grupo de estacas é apresentado na Eq. 2.16.

$$\alpha_{pr} = \alpha_{rp} \frac{k_r}{k_p} \quad (2.16)$$



Pela condição de compatibilidade imposta ( $w_p = w_r$ ) e a introdução de uma melhor hipótese pela teoria da reciprocidade ( $\alpha_{pr}/K_{pr} = \alpha_{rp}/K_p$ ), pode-se obter uma expressão para se determinar a distribuição de carga e a rigidez do radier estaqueado dadas pelas Eq. 2.17 e 2.18:

$$\frac{P_t}{P_r + P_p} = \frac{k_r(1 - \alpha_{rp})}{k_p + k_r(1 - 2\alpha_{rp})} \quad (2.17)$$

$$k_{pr} = \frac{(P_p + P_r)}{W_{pr}} = \frac{k_p + k_r(1 - 2\alpha_{rp})}{1 - (k_r/k_p)\alpha_{rp}^2} \quad (2.18)$$

Randolph (1983) sugeriu que " $\alpha_{rp}$ " poderia ser aproximado pela Eq. 2.19.

$$\alpha_{rp} = 1 - \frac{\ln(r_r/r_p)}{\ln(r_m/r_p)} \quad (2.19)$$

Em que:

- $r_r$  : raio equivalente do radier;
- $r_p$  : raio da estaca;
- $r_m$  : raio máximo de influência de cada estaca individual;

Randolph comparou esse resultado com os resultados obtidos por Poulos & Davis (1980) e verificou boa concordância entre os resultados. Clancy e Randolph (1992) e Clancy (1993) encontraram que o valor de  $\alpha_{pr}$  se aproximou de 0,8 a partir do incremento de estacas. Clancy & Randolph (1993) introduziram um parâmetro conhecido como o aspecto de coeficiente (R), que é expresso como  $\sqrt{ns}/L_p$  onde,  $n$  é o número de estacas no grupo,  $s$  é o espaçamento entre as estacas e  $L_p$  é o comprimento das estacas. Este parâmetro é usado para compreender o comportamento do grupo de estacas. Foi relatado que para um aspecto de coeficiente maior que 4, o comportamento do grupo de estacas (padrão de recalque do grupo) foi similar ao de uma fundação em radier. Entretanto, uma abordagem de radier equivalente é a escolha ideal para a análise. Para valores de R menor que 2, foi recomendado adotar a abordagem de *pier* equivalente, pelo menos para estimar o recalque médio do grupo de estacas.

### 2.2.3. MÉTODO DE SALES (2000)

Sales (2000) propôs um método mais eficiente de previsão do comportamento de radier estaqueado em que considerava a capacidade de carga totalmente mobilizada, em sistemas de sapatas estaqueadas. A interação entre o radier e as estacas ainda permanece influenciada no comportamento do sistema após a carga de mobilização total do grupo de estacas, e consequentemente, os recalques sofridos nesta fase são maiores do que aqueles previstos pelo Método de Poulos.

Assim, antes da total mobilização da carga última do grupo de estacas, que ocorre quando a carga aplicada no sistema é igual à carga que provoca a total mobilização do grupo de estacas. O recalque do radier estaqueado pode ser calculado pela Eq. 2.20:

$$\delta = \frac{P_t}{K_{pr}} \text{ para } P \leq P_a \quad (2.20)$$

Onde os fatores são apresentados nas Eq. 2.21 a 2.22:

$$P_a = \frac{P_{pu}}{\beta} \quad (2.21)$$

$$\beta = \text{parcela de carga absorvida pelo grupo de estacas;} \quad (2.22)$$

$$\beta = 1 - \frac{(1 - \alpha_{rp})k_r}{k_{pg} + (1 - \alpha_{rp}) \cdot k_r} \quad (2.23)$$

Após a carga P ultrapassar o valor de  $P_a$ , o recalque será dado pela Eq. 2.24:

$$\delta = RG \cdot \frac{P_t - F_m \cdot P_{pu}}{k_r} \quad (2.24)$$

$$RG = \frac{k_r}{(1 - \beta) \cdot k_{pr}} \quad (2.25)$$

Em que:

$\delta$ : recalque do radier estaqueado;

$\alpha_{rp}$ : fator de interação entre o grupo de estacas e o radier;

$\beta$ : proporção de carga atuante nas estacas;

$P_a$ : carga total aplicada ao radier estaqueado que corresponde ao momento de completa mobilização de todo o grupo de estacas

$P_t$ : carga total aplicada;

$P_{pu}$ : carga última do grupo de estacas;

$K_{pr}$ : rigidez do radier estaqueado;

$K_r$ : rigidez do radier;

$K_{GP}$ : rigidez do grupo de estacas;

$R_G$ : fator de modificação do recalque da sapata/radier;

$F_m$ : fator de mobilização da capacidade de carga última da fundação (Burland, 1995).

Burland (1995) sugere que o fator  $F_m$  deve ser obtido por retroanálise de prova de cargas em escala no local da fundação.

Ao final o autor concluiu que ao considerar estacas na sua capacidade de carga totalmente mobilizada, em sistemas de sapatas estaqueadas, os resultados foram mais coerentes e próximos aos dados experimentais analisados.

#### 2.2.4. NOVO MÉTODO PDR (Mandolini *et al.*, 2017)

Mandolini, *et al.* (2017) propuseram um novo método simplificado baseado no método original PDR (Poulos, 1980) para estimar a curva carga-recalque de um radier estaqueado bem como a distribuição de carga entre as estacas e o radier sob carregamento centrado vertical. O método, apesar da sua simplicidade, é capaz de explicar a não linearidade no comportamento do solo, sendo este último responsável pela variação progressiva da distribuição de carga com o aumento da carga aplicada.

O método emprega curvas arbitrárias não-lineares de compensação de carga tanto para grupo de estacas quanto para os radies, assumindo assim a seguinte forma de matriz, conforme Eq. 2.26.

$$\begin{bmatrix} 1/K_p & \alpha_{pr}/K_{r,0} \\ \alpha_{rp}/K_{p,0} & 1/K_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dQ_p \\ dQ_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dw_p \\ dw_r \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Em que  $K_p$  e  $K_r$  são as rigidezes tangentes do grupo de estacas e do radier (com  $K_{p,0}$  e  $K_{r,0}$  seus valores iniciais).

O ajustamento das atuais rigidezes do radier e do grupo de estacas através das funções selecionadas para descrever a evolução da rigidez com o carregamento, se corretamente obtidas, geraram novos valores de rigidez obtidos através das Eq. 2.27 e 2.28.

$$K_{p,i} = K_{p,0} \left( 1 - \frac{Q_{p,i}}{Q_{p,u}} \right)^{np} \quad (2.27)$$

$$K_{r,i} = K_{r,0} \left(1 - \frac{Q_{r,i}}{Q_{r,u}}\right)^{nr} \quad (2.28)$$

Em que:  $Q_{p,u}$  e  $Q_{r,u}$  são as cargas últimas,  $n_p$  e  $n_r$  são números positivos reais que ajustam a forma das curvas. Com  $n_p[n_r] = 1$ , o que corresponde a um comportamento não-elástico das estacas [radier] até a ruptura.

Os passos acima são repetidos por um número de incrementos de cargas igual a  $Q_{pr,u}/Q_{pr}$ .

Os autores comparam com modelos mais rigorosos como o Método das Diferenças Finitas e com o Método de Elementos Finitos e com os resultados de ensaios em centrífugas, além do método PDR original.

### 2.3. PATOLOGIA DAS FUNDAÇÕES – ESTACAS DEFEITUOSAS

O projeto de fundações profundas sob prédios ou pontes quase sempre assumem que a maioria das estacas, senão todas, apresentam mesmas características (comprimento, diâmetro e rigidez) e são construídas sem nenhuma imperfeição (defeito) estrutural ou geotécnico.

Para estruturas apoiadas sobre solo de baixa capacidade de suporte ou alta deformabilidade, e para elevados níveis de carga, estacas de concreto são extensivamente utilizadas. É uma experiência comum encontrar defeitos nestas estacas. Engenheiros de fundação por todo o mundo estão se deparando com muitas estacas danificadas e, em alguns destes casos, a razão de tal dano poderia ser identificada (Cunha *et al.*, 2010).

Broms (1995) já apresentava vários fatores que contribuía para o dano em estacas cravadas, tais como altura de queda de martelo excessivo, excentricidade, energia de cravação, além dos matacões.

Thorburn & Thorburn (1997) encontraram que dentre as principais causas de danos em estacas escavadas podem-se destacar os problemas de impregnação do solo no concreto, o que pode vir a apresentar problema de descontinuidade e estrangulamento da seção transversal. Além disso, acrescentaram que tais problemas podem apresentar um efeito nocivo, principalmente quando a estaca é submetida a momento fletor.

Poulos (1997) dividiu os defeitos em duas categorias principais: defeitos estruturais e defeitos geotécnicos, como apresentado na Fig. 2.7. Defeitos estruturais geralmente são relatados durante a construção e resultam em tamanho, resistência e/ou rigidez das estacas menor do que a assumida em projeto. Defeitos geotécnicos surgem a partir de uma má avaliação

das condições de campo durante o projeto, ou por problemas relacionados à construção, tais como construção sobre um solo mole, por exemplo.

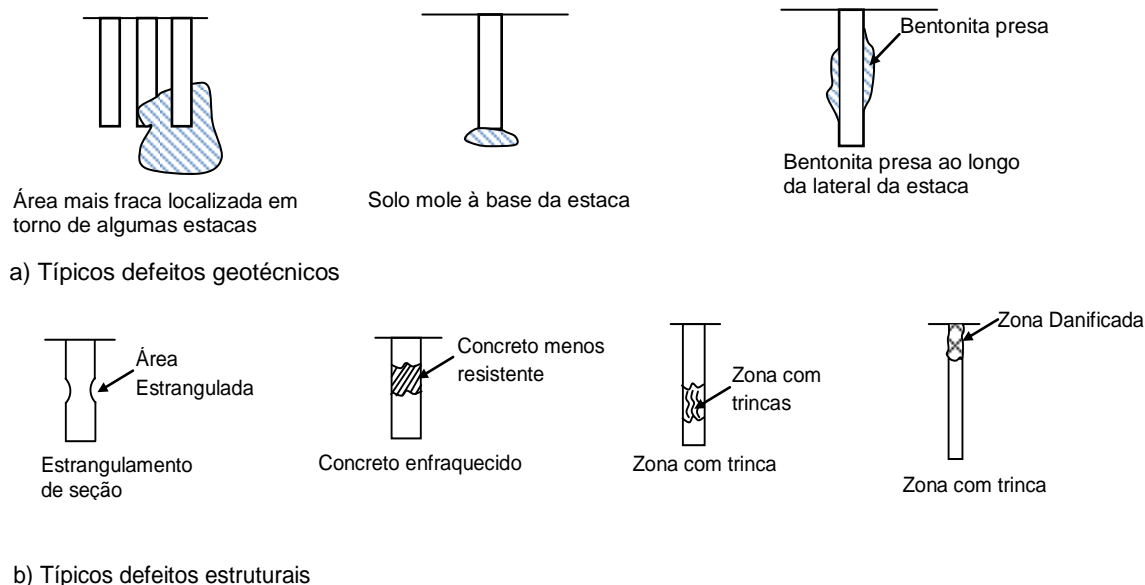


Figura 2.7 – Exemplo de defeitos em estacas (modificado - Poulos, 1997).

Além destes pode-se incluir os defeitos referentes a influência humana, pois na prática desde a etapa de caracterização do local até a etapa de elaboração de projeto e execução da obra, os agentes envolvidos são distintos, na maioria dos casos, e no caso das investigações iniciais pode-se tratar de um operador sem os conhecimentos técnicos suficientes. Desta forma torna-se muito difícil em todas as etapas de realização da fundação o total controle de todas as informações necessárias para a boa execução da obra (Milititsky *et al.*, 2005).

Por meio de estudos sobre a probabilidade de ruína de uma fundação atrelada à relevância dos resultados obtidos em provas de carga, e por meio de um processo estatístico pode-se antever a insuficiência do projeto inicialmente executado evitando-se possíveis danos e atribuindo segurança ao empreendimento (Cunha *et al.*, 2015).

Em muitos casos, os grupos das estacas podem apresentar diferentes comprimentos e podem conter defeitos decorrentes das técnicas de construções imperfeitas, ou uma análise global das investigações de campo que não avaliou corretamente algum parâmetro. Alterações no projeto arquitetônico resultam em acréscimo de carga e, conseqüentemente, o desempenho do sistema de fundação pode ser suficientemente desfavorável, o que, de alguma forma, uma ação corretiva pode ser necessária (Poulos, 2008).

Uma análise teórica não-linear de estacas defeituosas via um método de elemento de contorno simplificado foi desenvolvida por Poulos (1997). A análise foi implementada pelo programa DAMPA (*DAMAGED Pile Analysis*) e DAMPIG (*DAMAGED Pile Groups*). Além

disso, embora introduzindo um fator de redução de rigidez  $R_{ks}$  (relação de rigidez da estaca danificada e a rigidez da estaca íntegra), ele realizou um estudo paramétrico sobre o comportamento das estacas e do grupo de estacas contendo danos estruturais e geotécnicos.

Para estacas isoladas, a presença de defeitos conduz à redução da rigidez no topo da estaca, e a possibilidade de redução da capacidade de carga (Xu, 2000). Se o dano ocorre devido a um defeito estrutural, haverá um brusco incremento de recalque. Com defeito geotécnico, a aparente perda de capacidade de carga é caracterizada por um incremento mais gradual em recalque com um incremento de carga, conforme apresentado na Fig.2.8, (Poulos, 1997).

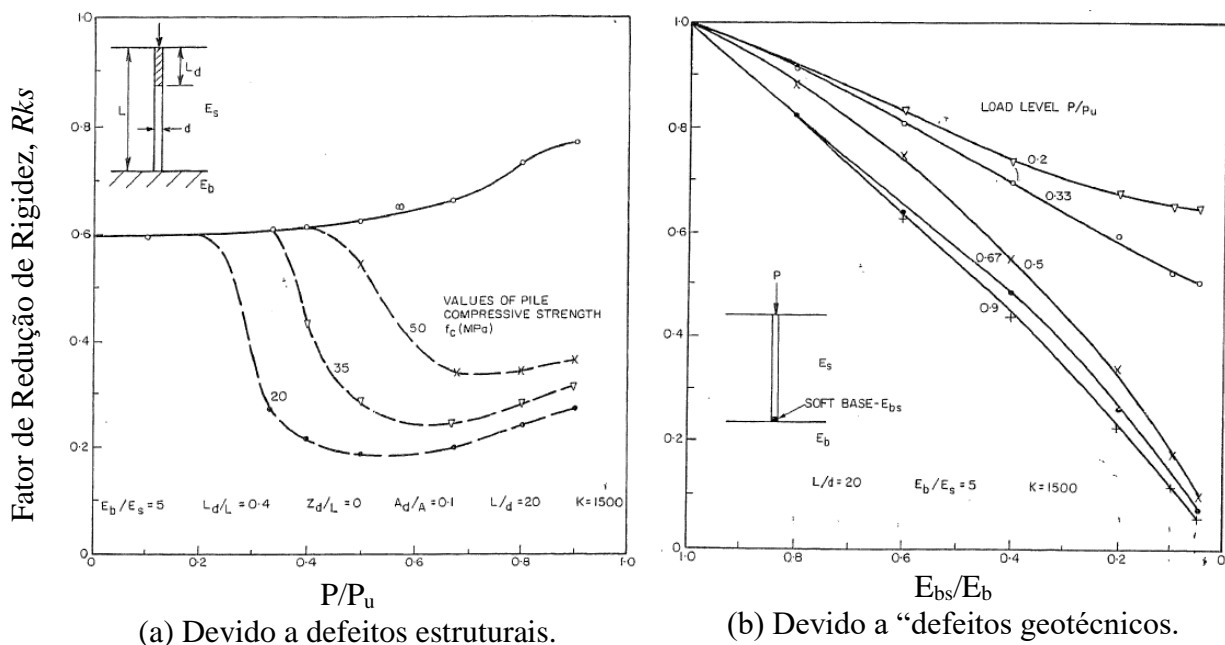


Figura 2.8 – Efeito do nível de carga sobre a redução de rigidez devido a estacas defeituosas (Modificado Poulos, 1997).

Cordeiro (2007) realizou análises numéricas com o programa GARP em radiers de 3, 4 e 6 estacas considerando os parâmetros originais dos elementos e em seguida foram analisados estes grupos por meio de simulação de dano com a variação dos módulos de elasticidade em 30%, 50% e 80% menor do que o considerado para a estaca íntegra e com variação do comprimento das estacas originais. Onde se concluiu que a variação do comprimento das estacas exerce mais influência sobre o fator de segurança do que a variação do módulo de elasticidade, conforme Fig. 2.9.

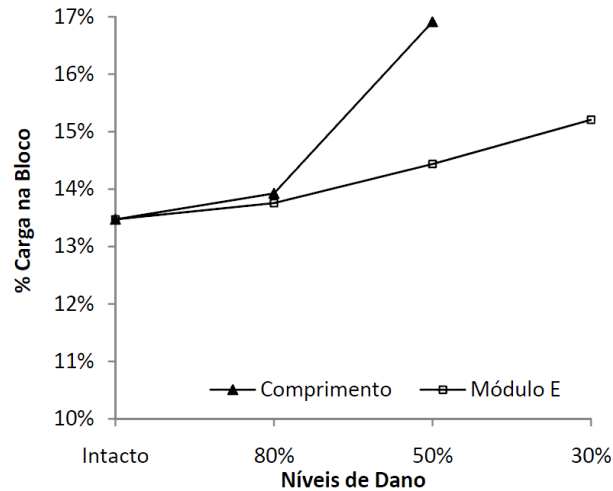


Figura 2.9 - Porcentagem de carga no radier para o grupo com 3 estacas (Cordeiro, 2007).

O autor também concluiu que quando o grupo apresenta uma estaca danificada pode causar alívio de tensões em algumas estacas no grupo, o que resulta em acréscimo no fator de segurança de uma estaca específica, porém, neste mesmo contexto, ocorre situações em que o dano em uma determinada estaca sobrecarrega outra, reduzindo assim o fator de segurança desta estaca isolada e por consequência o fator de segurança do grupo. Além disso, a depender do nível do dano e da posição da estaca defeituosa, o fator de segurança de cada estaca pode aumentar ou diminuir, em função da redistribuição de cargas sobre essas estacas após a manifestação do defeito.

Cordeiro (2007), Cunha *et al.* (2007), Cordeiro *et al.* (2009), Cunha & Cordeiro (2009) e Cunha *et al.* (2010) apresentaram resultados de análises numéricas dos referidos radiers estaqueados com estacas defeituosas com alternativas de reforço do mesmo. Os autores consideraram o reforço no radier via adição de estacas com comprimento, diâmetro e rigidez, semelhantes ou não, às apresentadas pelas estacas intactas.

A Fig. 2.10 apresenta uma visão geral de quatro casos de reforços para um grupo de 6 estacas, isto é, casos de 1 a 4, respectivamente relacionados às estacas de reforço R1 a R4. A distância equivalente da estaca danificada e a seção transversal AA. Os resultados são apresentados em relação a esta seção particular do radier.

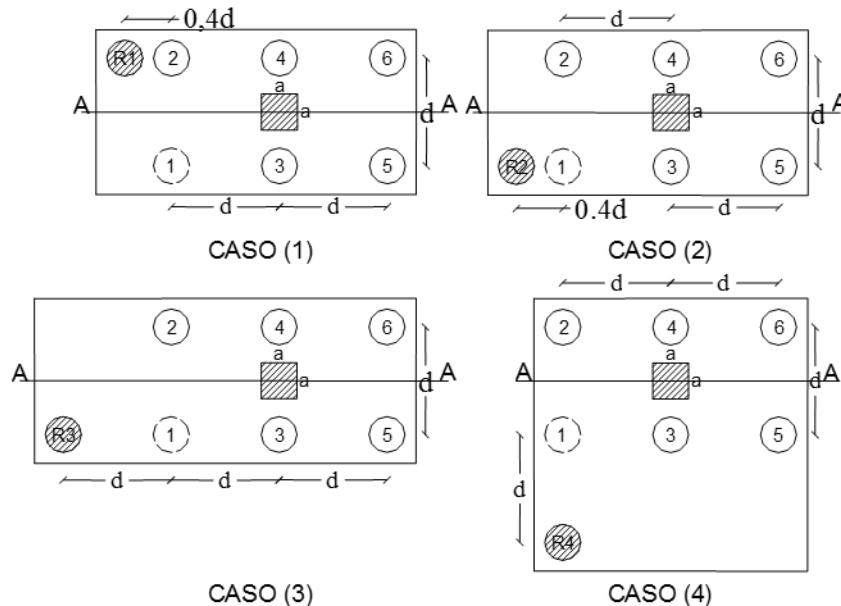


Figura 2.10 - Características para os distintos casos do grupo reforçado (Cordeiro, 2007).

A Fig. 2.11 apresenta a reação calculada com o programa GARP7 para todos os casos considerados. O Fator de Segurança (FS) global é considerado a condição alargada do radier mais a contribuição da estaca de reforço, em cada caso específico em questão.

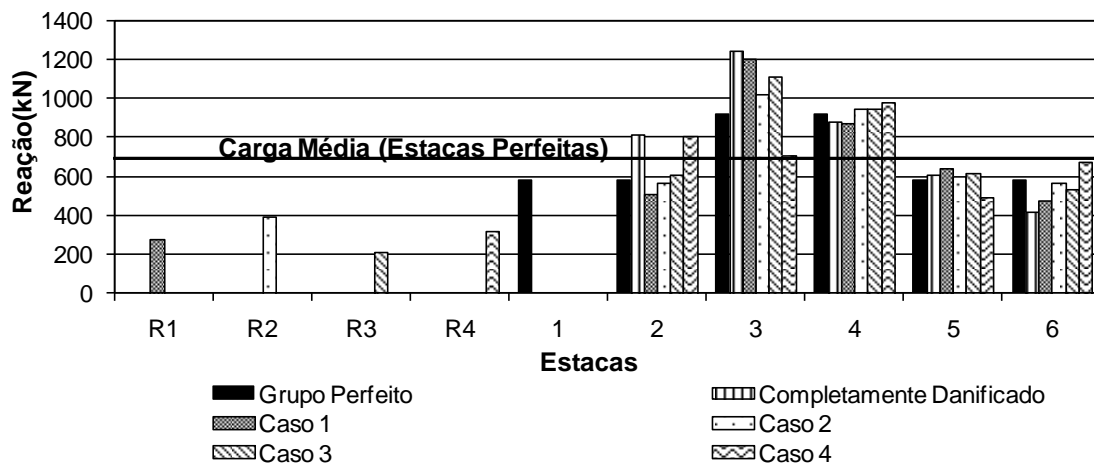


Figura 2.11 - Cargas geradas nas estacas para todos os casos reforçados (Cordeiro, 2007).

Freitas Neto (2013) avaliou, com testes em verdadeira grandeza, o comportamento de radiers estaqueados sujeitos à presença de estacas defeituosas carregados verticalmente, a Fig. 2.12a apresenta o esquema longitudinal da estaca defeituosa (E9) com a instrumentação já inserida em momento anterior à sua concretagem em campo e o detalhe da estaca após a realização da prova de carga, Fig. 2.12b.



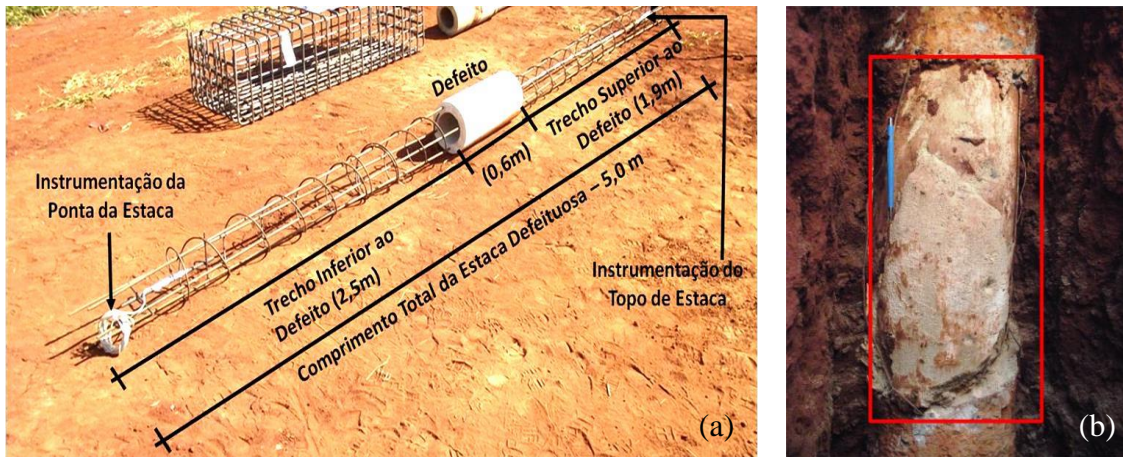


Figura 2.12 – Estacas utilizadas nos ensaios: a) esquema longitudinal das estacas defeituosas; b) zona defeituosa da estaca mobilizada após a realização da prova de carga no radier de 1 (uma) estaca, (Freitas Neto, 2013).

Para analisar o comportamento dos radiers com a presença de estacas defeituosas, o autor realizou ensaios de campo em verdadeira grandeza e análises numéricas para a previsão do comportamento dos radiers ensaiados. As análises numéricas foram realizadas com a ferramenta LCPC-CESAR (versão 4.0), que é baseada no método dos elementos finitos. A Fig. 2.13 apresenta as malhas de elementos finitos geradas nas análises numéricas para o radier assente sobre uma estaca.

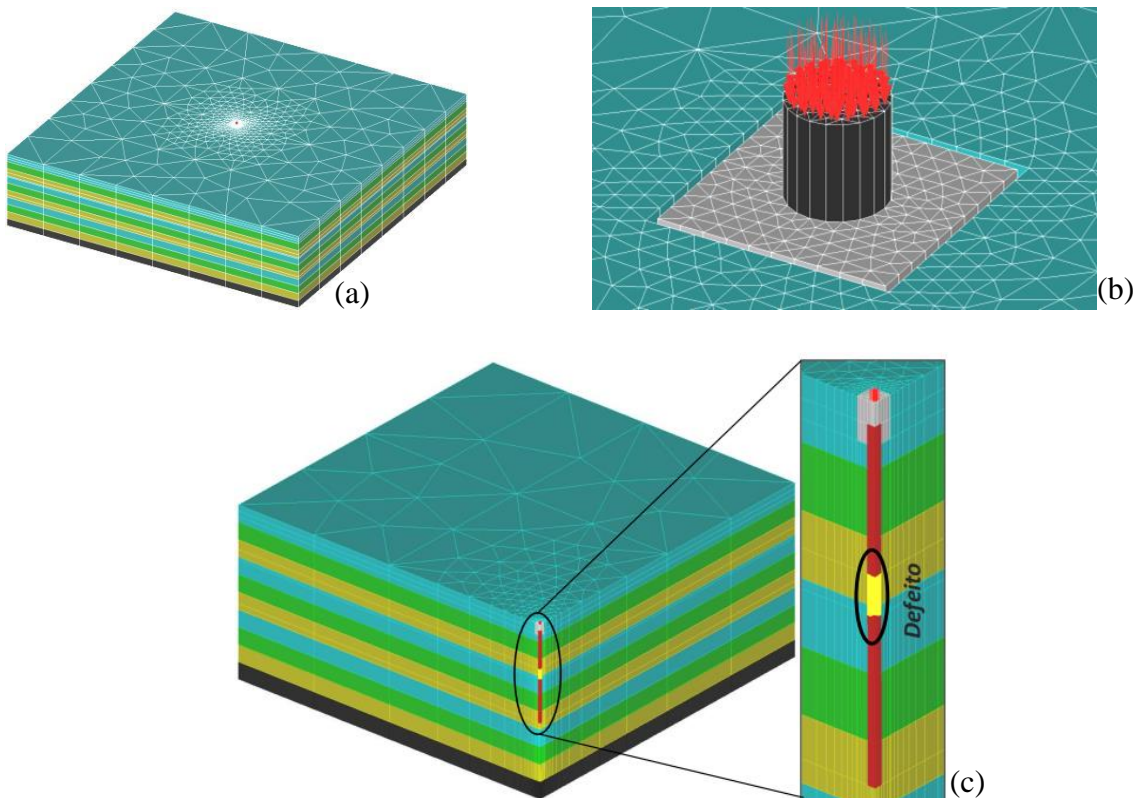


Figura 2.13 – Malhas de elementos finitos geradas nas análises numéricas; a) vista isoparamétrica da malha de elementos finitos; b) detalhe da malha de elementos finitos; c) vista

isoparamétrica da malha de elementos finitos e detalhe do posicionamento do defeito na estaca (Freitas Neto, 2013).

O autor conclui que a previsão do comportamento dos radiers executados em campo com a ferramenta numérica LCPC-Cesar foi satisfatória, e destacou também o comportamento de alívio das cargas sobre as estacas íntegras e maior participação do radier do sistema após o dano e confirmou o que foi apresentado por Cordeiro (2007), quanto ao fator de segurança.

Cunha *et al.* (2016), baseado nos dois trabalhos supracitados (Cordeiro, 2007 e Freitas Neto, 2013), avaliaram o comportamento numérico e em escala real de um sistema de fundação profunda assentado sobre quatro estacas escavadas em solo tropical, sendo uma sujeita a um defeito estrutural, e concluíram que após o defeito o sistema continua a absorver carga e ter capacidade portante, inclusive a estaca defeituosa, mas deixa de ser funcional na carga de trabalho por um deslocamento distorcional excessivo do radier. A Fig. 2.14 indica o momento de ruptura geotécnica (convencional) do sistema defeituoso, e o momento aproximado em que se observou a “quebra” estrutural da estaca.

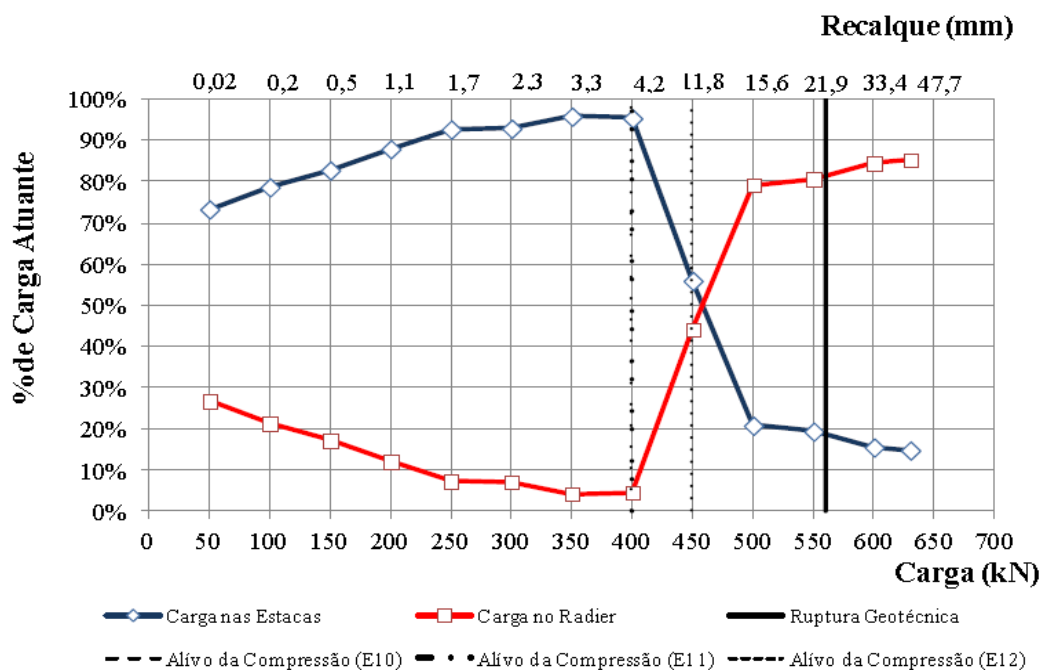


Figura 2.14 - Distribuição de cargas entre o radier e as estacas no radier estaqueado, no sistema experimental (Freitas Neto, 2013).

A Fig. 2.15 apresenta a carga atuante por estaca (dentro da % total que é absorvido somente por estas) ao longo de todo este processo em que são igualmente indicados os momentos de ruptura geotécnica e estrutural.

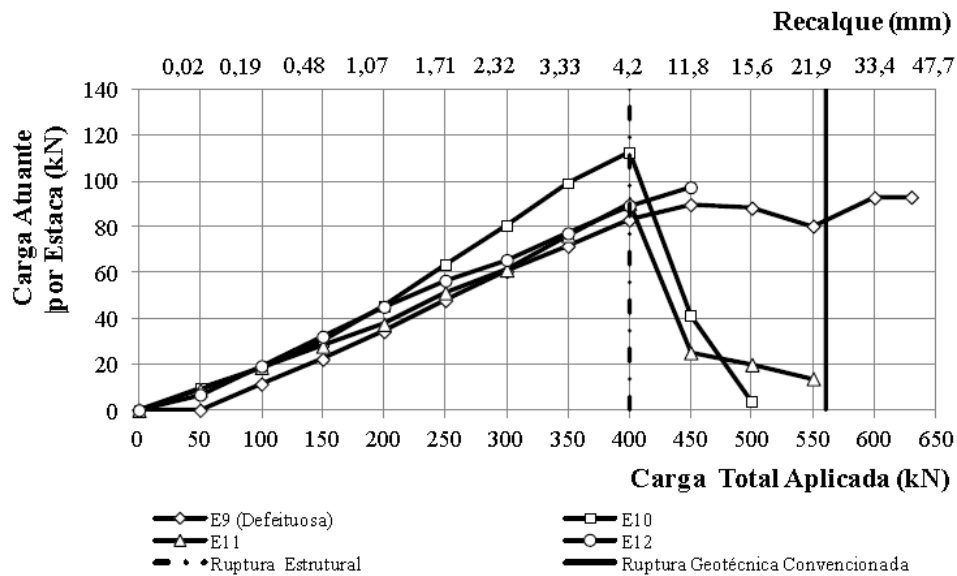


Figura 2.15 - Carga absorvida somente pelas estacas (Freitas Neto, 2013).

Albuquerque *et al.* (2017), analisaram numericamente, pelo método de elementos finitos, o impacto de estacas defeituosas instaladas em sistemas de radiers estaqueados de 3, 4, 5 e 6 estacas quanto a capacidade de carga e deslocamento destes conjuntos. As análises mostraram que desde os primeiros incrementos de carga a área defeituosa absorve carregamento e que esta continua a absorver carga mesmo após a ruptura estrutural. Além disso, os autores também concluíram que a existência de uma estaca defeituosa em radiers estaqueados pode representar um problema para o comportamento de longo prazo do sistema, embora possa eventualmente não entrar em colapso, mas sim sofrer um aumento no nível de deslocamento e/ou inclinação.

Alva (2017) analisou o comportamento de radiers estaqueados com e sem estacas defeituosas carregadas lateralmente, Fig. 2.16. Os ensaios foram realizados com estacas escavadas em verdadeira grandeza e foram realizadas simulações numéricas usando o método dos elementos finitos através do *software* ABAQUS versão 14.4.

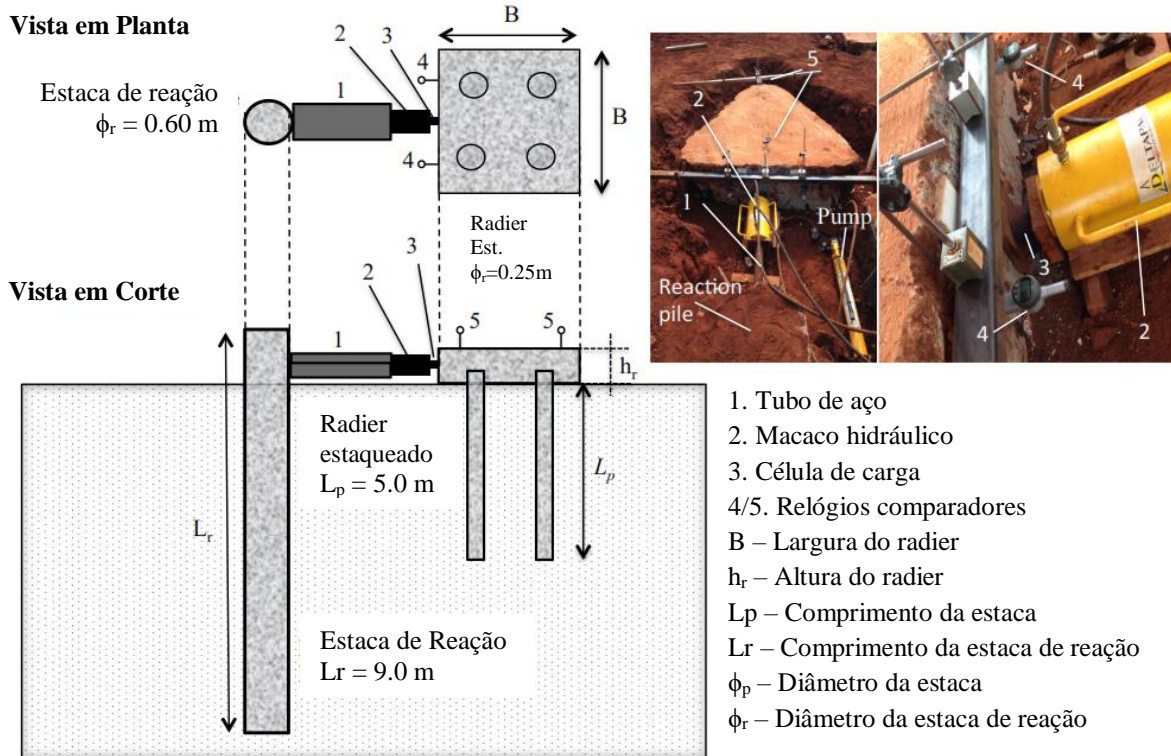


Figura 2.16 – Esquema da prova de carga lateral (Alva, 2017).

A Fig. 2.17 apresenta os comportamentos obtidos através da simulação numérica realizadas no *software* ABAQUS, para o radier com uma estaca defeituosa.

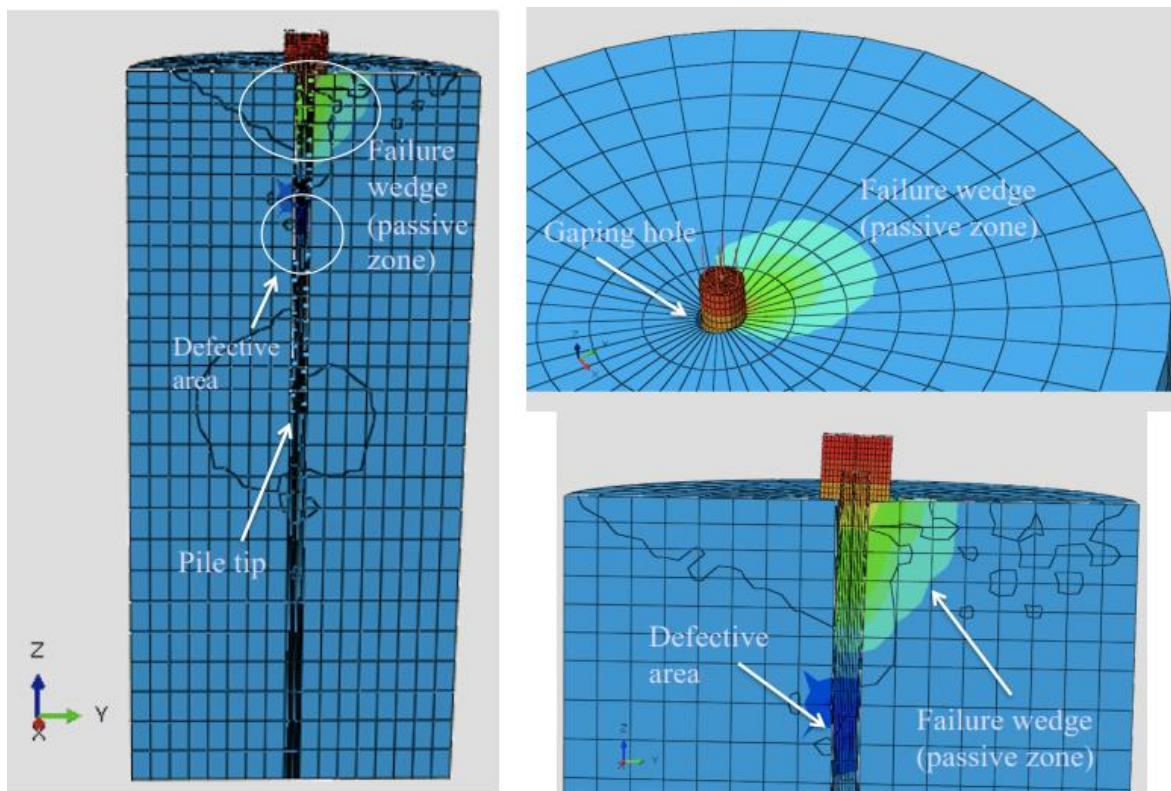


Figura 2.17 – Resultado gráfico do carregamento horizontal obtido através da modelagem numérica, (Alva, 2017).

O autor conclui que as simulações numéricas foram coerentes com os resultados experimentais obtidos através dos ensaios em verdadeira grandeza. Os ensaios e simulações mostraram que sob a carga de trabalho, os sistemas de fundação apresentam deflexão e rotação no grupo induzindo a momentos adicionais nas estacas, o que não acontece nos sistemas com somente estacas intactas.

#### 2.4. ENSAIOS DE DESEMPENHO EM ESTACAS DEFEITUOSAS

Os problemas em fundações não cessam com uma boa caracterização do subsolo ou na escolha do tipo solução a ser adotada, mas é na fase de execução que muitos problemas ocorrem e daí a necessidade de realização de ensaios de acompanhamento e controle dos materiais, processos, verificação de integridade e desempenho das fundações prontas (Milititsky *et al.*, 2005).

Existem alguns procedimentos técnicos disponíveis para a verificação da integridade e a capacidade estrutural de fundações profundas, cujo uso minimiza dúvidas sobre as condições obtidas no processo construtivo, que vão desde as escavações mais simples e perfuração exploratória até aos mais sofisticados métodos, destacando-se (Velloso & Lopes, 2010; Freitas Neto, 2013):

- Método sísmico: uma pequena fonte de vibração é introduzida num furo e a captação dessa vibração é feita por um sensor colocado em um furo aberto ao lado (caso *cross-hole*) ou no mesmo furo em nível diferente (caso *down-hole*);
- Método radioativo: uma fonte de radiação é introduzida num furo e a contagem de isótopos é feita em um furo vizinho (tipo *cross-hole*);
- Método de excitação do topo: um vibrador é preso ao topo da estaca e um acelerômetro (com integrador no tempo) permite verificar a velocidade do topo, que indicará a integridade da estaca;
- Método de impacto ou dinâmico: um golpe é aplicado no topo do elemento de fundação e a interpretação é feita com base na propagação da onda de tensão. De acordo com a intensidade do impacto, as deformações são de maior ou menor magnitude, e podem ser subdivididas em:
  - De grande deformação (*high strain method*);
  - De pequena deformação (*low strain method*);

Dentre todos supracitados, os ensaios mais sofisticados e mais aplicados atualmente são os ensaios de pequena e de alta deformação, que serão mais bem detalhados a seguir.

### 2.4.1. ENSAIO DE INTEGRIDADE DE PEQUENA DEFORMAÇÃO

#### *Método Sônico*

De acordo com a ASTM (2007), existem dois métodos para a realização dos ensaios sônicos em campo:

- O “*Pulse Echo Method* (PEM)”: A movimentação no topo da estaca é medida como uma função de tempo. O registro do domínio do tempo é então avaliado para a integridade da estaca;
- O “*Transient Response Method* (TRM)”: A movimentação no topo da estaca e a força (medida com um martelo instrumentado) é medida como uma função de tempo. Os dados são avaliados usualmente no domínio de frequência.

O método sônico é usado para avaliar as condições de integridade das estacas de fundação, isto é, se sua densidade homogênea, variações na seção transversal e comprimento, e demais termos quanto a qualidade do elemento de fundação. Quanto maior a variação das características em relação aos dados padrões daquela estaca, maior a possibilidade de estimativa da magnitude e localização do “possível dano”. Estes ensaios são realizados normalmente alguns dias após a execução das estacas, onde é requerida uma preparação mínima no topo da estaca (ASTM, 2007).

Um martelo cai sobre o topo da estaca e produz uma onda que pode ser detectado por um acelerômetro fixado na superfície no topo da estaca. Quando a estaca é atingida, o acelerômetro acusa a onda que se propagou até a base da estaca (ou a uma descontinuidade) a então reflete de volta. Descontinuidades e alterações na seção transversal na estaca produzem reflexões, que alteram a forma do sinal. O sinal então pode ser interpretado de acordo com a forma da onda. Maiores defeitos, juntos com uma indicação da profundidade que este possa ocorrer, podem ser usualmente detectados. Cunha (2008) usou um grande banco de dados de testes de integridade em Brasília, que foram estatisticamente interpretados baseados nestes formatos de curvas, para refinar o controle de qualidade e garantir o sistema de classificação (QCA) para estacas escavadas em solos tropicais.

Cunha *et al.* (2012) comparam os dois sistemas que avaliam qualitativamente a integridade de uma estaca e de modo prático e demonstraram alguns pontos chave sobre a interpretação desses resultados. Os autores concluíram que os dois sistemas apresentam boa relação entre os resultados e a forma de interpretação, são eles: P.I.T. (*Pile Integrity Test*) e o P.E.T (*Pile Echo Test*), a Fig.2.18 apresenta estes dois equipamentos em detalhes.



Figura 2.18 – Montagem e detalhes dos sistemas PIT e PET no campo experimental Cunha *et al.*, (2012).

Ambos os equipamentos apresentam o mesmo princípio de ensaio que consiste na aplicação de golpes de martelo no topo da estaca, que geram ondas de tensão que se propagam ao longo do fuste até a sua ponta, voltando ao topo desta por reflexão.

A partir do conhecimento da velocidade de propagação da onda e do tempo de retorno, com o uso de acelerômetros, é possível identificar problemas de descontinuidade ou integridade na estaca. Este ensaio não oferece como resposta exatamente qual é o problema, apenas mostra se existe alguma anomalia na estaca assim como o local e qual é a gravidade da mesma.

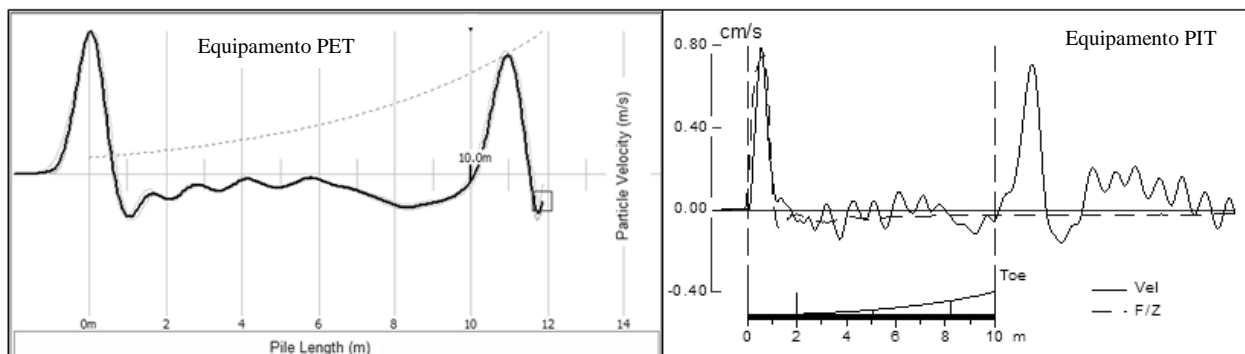


Figura 2.19 – Comparação entre os resultados dos equipamentos PET x PIT a uma profundidade de 10m com estaca com 50 cm de diâmetro no campo experimental da UnB.

Os resultados da comparação de ambos os sistemas em uma estaca escavada de 10 m de comprimento neste terreno são mostrados na Figura 2.1. Esta figura mostra a velocidade da partícula medida na cabeça da estaca interpretada pelo método de eco de pulso, conforme comentado anteriormente.

#### **2.4.2. PROVA DE CARGA ESTÁTICA (PCE)**

A norma brasileira de Projeto e Execução de Fundações, ABNT NBR 6122:2010 descreve no item 9.2.2.1 a obrigatoriedade de execução de prova de carga estática em obras que tiverem um número de estacas superior a 100 unidades. Segundo a NBR 6122:2010, faz-se necessário a execução de um número de provas de carga igual a no mínimo 1% da quantidade total de estacas, arredondando-se sempre para mais.

A prova de carga estática é usada para avaliar o desempenho em estágio preliminar ou em últimos estágios de trabalho, ou a *posteriori* para verificação dos dados utilizados no projeto, onde se busca, principalmente, analisar a capacidade de carga do elemento de fundação.

Na prática, métodos teóricos, semi-empíricos e empíricos são aplicados para obter a carga de ruptura, porém, pode-se afirmar que, para a maioria dos pesquisadores, o modo mais confiável para prever a capacidade de carga é através da análise do comportamento da curva carga-recalque, obtida a partir de uma prova de carga (Melo & Albuquerque, 2015).

O ensaio de carga é aplicado por um macaco, hidráulico ou elétrico, contra um sistema de reação, composto por estacas e viga metálica. Os detalhes podem ser obtidos pela NBR-12131/2006 – Prova de Carga Estática – Metodologia de Ensaio. Na análise de estacas defeituosas, a prova de carga estática tem oferecido o desempenho por meio da instrumentação com o uso de *strain gauges* nas estacas e modelos para avaliar o comportamento carga-recalque das estacas que contenham algum dano (Rao, 1996).

Décourt (2008) analisou de forma crítica como as provas de carga são rotineiramente realizadas e interpretadas. Apresentou alguns métodos para melhor analisar tanto as provas de cargas convencionais quanto as instrumentadas e propõe que sejam calculados os limites superiores e inferiores das parcelas de carga que são suportadas pela ponta e por atrito lateral da estaca. Assim, com uma interpretação mais elaborada dos resultados obtidos nas provas de carga, pode-se ter mais informações do comportamento das estacas do que se obtêm atualmente.

#### **2.5. MODELAGENS FÍSICAS DE FUNDAÇÕES**

O principal objetivo da modelagem física é a obtenção de um projeto mais otimizado, com menor custo efetivo, mais seguro e que pode servir como referência para calibração de modelos matemáticos. Estes modelos podem permitir a compreensão do mecanismo de comportamento da interação estrutura-solo, além de mecanismos secundários que na prática, são de difícil percepção. Além de produzir uma boa relação de custo-benefício, e ainda, projetos



adequados e seguros, que poderiam evitar futuras patologias (Springman, 2007; Springman *et al.*, 2014).

Estes modelos derivam de idealizações de protótipos reais que procuram entender o comportamento do “sistema” em resposta a suas perturbações. Estes modelos podem ser representados por meio de modelos físicos, modelos analíticos ou análises numéricas.

Um modelo físico tende a reproduzir artificialmente o comportamento mecânico de um solo quando este atende os principais parâmetros envolvidos no protótipo e os ensaios de laboratório fornecem um meio eficaz para o entendimento de análises e de previsão de comportamento de estruturas reais. A compreensão deste comportamento em situações reais melhora quando as simplificações dos modelos são realizadas corretamente e as análises são aferidas.

Na preparação do modelo e na representação do seu desempenho para o protótipo, uma série de requisitos básicos deve ser satisfeitos, para garantir a completa similaridade física entre o protótipo e o modelo, como, por exemplo, as leis de similitude.

A Lei de Similitude provê um método para calcular conjuntos de parâmetros adimensionais a partir das variáveis dimensionais dadas, mesmo se a forma da equação do sistema ou processo físico é ainda desconhecida.

Encontrar parâmetros adimensionais em um problema pode simplificá-lo e até mesmo resolvê-lo. Por outro lado, muitas vezes, é aconselhável omitir alguns detalhes para focar as principais condições que afetam o comportamento, pois geralmente um modelo é representado apenas por uma parte de um todo, o que resulta em vários modelos para representar um único problema.

Em laboratório, quando não se trata de um estudo para um caso específico, é difícil a escolha do tipo de solo a ser empregado. As areias permitem a execução de ensaios mais rápidos, porém geralmente apresentam ângulos de atrito maiores para baixos valores de tensões confinantes e são mais sujeitas ao efeito escala, devido à dimensão dos grãos. Outro problema para as areias densas é a dilatância a baixos níveis de tensão. Desta forma, seriam necessários recipientes maiores com a aplicação de pressões superficiais (ou vácuo) para reduzir os problemas apresentados. Já para argilas, se os fatores destacados para areias não são tão preocupantes, a dificuldade maior é a forma de preparação da amostra e instalação das fundações, que consomem um grande tempo de espera para a dissipação da poro-pressão (as vezes mais de 50 dias) para a realização de um único ensaio.

Uma atenção especial deve ser dada ao estado de tensão inicial em que a areia pode ser alocada no cilindro de calibração de ensaio com o uso da técnica de “chuva de areia” para obter

a condição de  $K_0$  e se obter densidade com certa repetibilidade, o que leva a uma similaridade (Hettler, 2010). Este autor concluiu que testes em modelo 1g são boas ferramentas para investigação de mecanismos de fratura e para determinação de deformações. A influência do nível de pressão sobre as deformações pode ser descrita por um fator de correção baseado na teoria da semelhança.

A avaliação do comportamento de fundações, seja em modelos em laboratório ou em ensaios de campo, é considerada de fundamental importância para uma melhor compreensão da resposta carga-recalque e distribuição dos esforços entre os elementos, e, além disso, geralmente apresentam um caráter qualitativo o que fornece subsídios para modelos e teorias que tentam explicar o comportamento destes elementos.

Os modelos físicos podem ser classificados tendo em vista a natureza das grandezas envolvidas e são apresentados a seguir:

- Modelos absolutos ou de Similitude Completa: simulação plena de todas as grandezas intervenientes no fenômeno analisado;
- Modelos Relativos ou de Similitude Restrita: simulação apenas das grandezas mais relevantes ao fenômeno analisado. Apresentam as seguintes subclasses:
  - mesmo material do protótipo e em condições similares (modelos de similitude imperfeita);
  - mesmo material do protótipo e em diferentes estados iniciais;
  - material equivalente ao usado no protótipo;
  - simulação do campo gravitacional;
- Modelos Distorcidos: simulação obtida por intermédio da adoção de diferentes escalas para grandezas de mesma base dimensional;
- Modelos Analógicos: simulação obtida mediante a correlação entre fenômenos qualitativamente distintos, mas regidos por equações de mesma estrutura formal.

Devido às restrições práticas impostas aos modelos absolutos, a simulação física adota comumente modelos relativos que, embora não reproduzam integralmente as condições do protótipo, fornecem previsões perfeitamente válidas para fins de engenharia. Neste caso, o importante é identificar as grandezas que mais influenciam na previsão a ser feita e que intervêm no fenômeno físico. A rigor, porém, as soluções obtidas têm caráter qualitativo e estão inseridas em determinados limites de validade, condicionadas à adequada interpretação das variáveis mais relevantes ao problema analisado.

O sucesso de estudo de um modelo se caracteriza por um planejamento cuidadoso das diversas etapas do processo de execução do modelo. Um estudo experimental de uma estrutura de engenharia é em si um pequeno projeto de engenharia, e como em qualquer projeto de engenharia, precisa de uma sequência lógica e criteriosa de eventos, conforme a Fig. 2.20 (Harris & Sabnis, 1999).

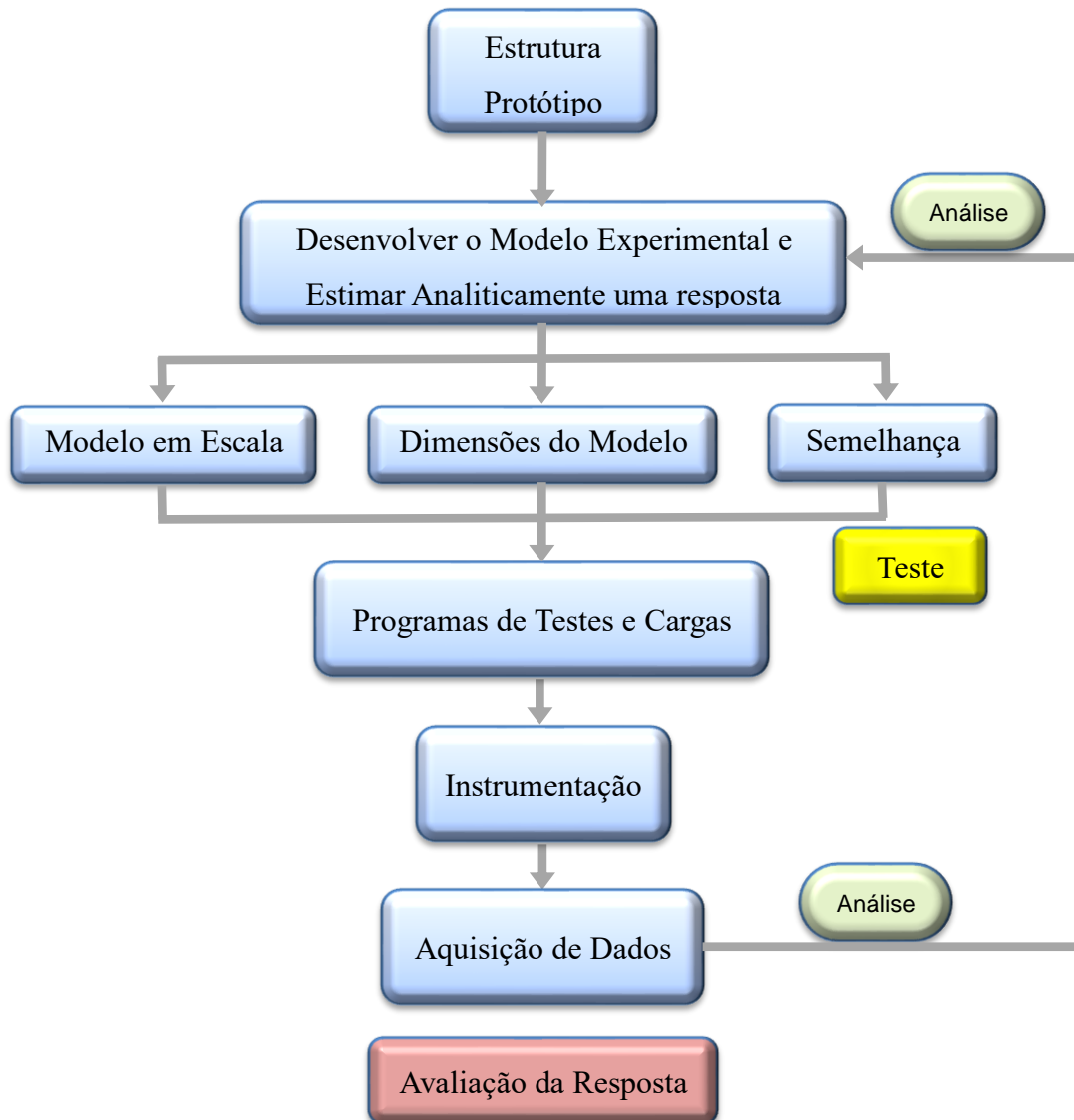


Figura 2.20 - Sequência de execução do modelo de teste (modificado - Reinhorn, 2008).

Para a simulação dos modelos absolutos algumas pesquisas vêm sendo desenvolvidas de modo a considerar as principais grandezas que influenciam no comportamento dos modelos.

Soares (2011) analisou o comportamento de grupos e radiers em verdadeira grandeza, com estacas *Hollow Auger* instrumentadas em solo arenoso. O autor concluiu que a capacidade de carga, assim como a taxa de recalque do grupo é maior quando comparada as estacas isoladas.

Garcia (2015) analisou o comportamento de quatro radiers estaqueados instrumentados, em verdadeira grandeza, comparando os resultados experimentais com os obtidos por meio de análise numérica com o *software* LCPC-Cesar e destacou a influência do contato do bloco na parcela de participação de ponta das estacas. Neste estudo os estudos experimentais não evidenciaram participação significativa por resistência de ponta, em média 3,8%, no caso dos radiers analisados numericamente com e sem contato, essa participação foi de 10,2% e 9,6%, respectivamente.

### **2.5.1. ENSAIOS EM CENTRÍFUGA**

Horikoshi (1995) e Horikoshi & Randolph (1996) apresentaram os resultados dos testes em centrífuga em modelos de radiers circulares flexíveis em grupo pequenos de estacas centradas e fundações estaqueadas em verdadeira grandeza em argilas. Eles destacaram que mesmo um pequeno grupo de estacas pode reduzir significativamente o recalque diferencial de um radier, apesar do nível de carga relativamente baixo transferido para o grupo de estacas. Provas de carga conduzidas sobre estacas isoladas e grupo de estacas individuais que apresentam pequeno bloco de coroamento em contato com o solo pode incrementar significativamente a capacidade de carga da estaca, devido à transferência de carga para o solo pelo bloco.

Conte *et al.*, (2003) estenderam a pesquisa experimental de Horikoshi (1995) e Horikoshi & Randolph (1996) e realizaram testes em centrífugas em grupos rígidos quadrados de estacas e radiers estaqueados em argila. Eles destacaram que a contribuição da capacidade da estaca para a capacidade global do radier estaqueado diminui quando o radier é projetado para grupo de estacas e que as estacas redutoras de recalque abaixo do radier podem ser solicitadas próxima a sua capacidade máxima de suporte sem comprometer a estabilidade da fundação.

Fioravante & Jamiolkowski (2005) realizaram testes de centrífugas em modelos de radiers estaqueados circulares rígidos em argilas pré-adensadas e destacaram que a distribuição de carga em um grupo estaqueado sob um radier rígido, em uma faixa de carga de trabalho, não é uniforme, e é consistente com a previsão para uma análise elástico-linear. Eles também observaram que o mecanismo de transferência de carga em um grupo com estacas redutoras de recalque é diferente daquele observado para uma estaca isolada e a diferença pode ser principalmente atribuída ao efeito da carga que é transferida para o radier, para o solo e para o confinamento adicional entre as estacas vizinhas.

Fioravante (2010) destacou o efeito da interação radier-estaca-solo sob o efeito de carregamento axial de fundações em radier estaqueado em areia simulando via método de elementos finitos utilizando um modelo constitutivo de endurecimento elasto-plástico.

Também foram realizados ensaios em centrífuga para analisar o comportamento de estacas escavadas em areias sob carregamento vertical em diversos níveis de aceleração, além dos efeitos da interação radier-solo-estaca sob este tipo de carregamento (Giretti, 2009).

Fioravante & Giretti (2010) realizaram uma série de ensaios para avaliar o mecanismo de transferência de carga no Sistema de radier estaqueado e explorar a influência de uma camada de solo granular inserido entre o radier e o topo das estacas sob o comportamento da curva carga-recalque, onde resultado dos modelos físicos destacaram algumas diferenças importantes no comportamento carga-recalque do radier estaqueado com e sem contato do radier, devido às diferentes condições de restrição na interface radier-solo.

Nishimoto et al. (2010) também apresentaram uma série de ensaios em centrífuga sob carregamento axial onde foram medidas as reações das estacas e do radier e a capacidade de carga do sistema foi analisada.

Rincon (2016) avaliou o comportamento de sistemas de radier estaqueado em escala reduzida assentes em argilas moles submetidos a processos de adensamento em centrífuga geotécnica, conforme apresentado na Fig. 2.21.

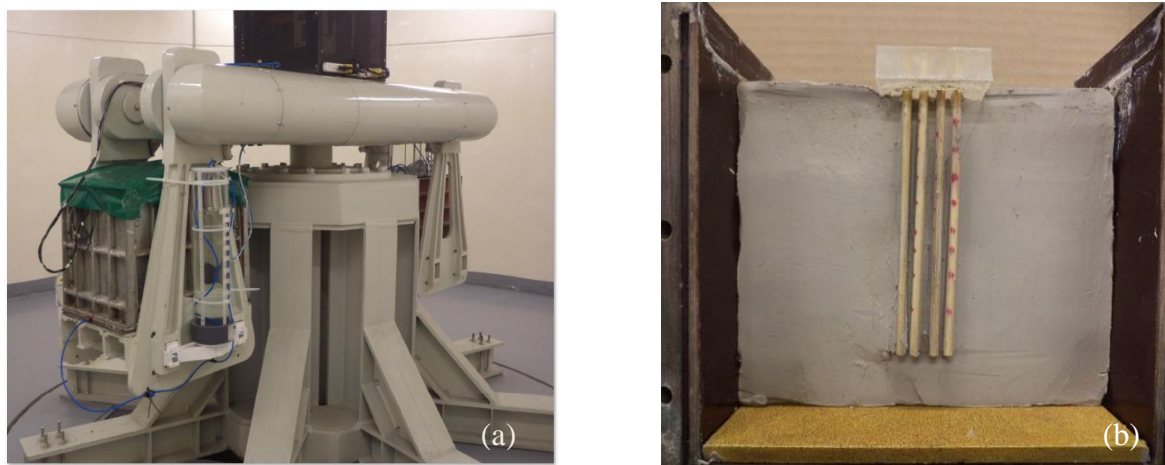


Figura 2.21 – Fotos dos ensaios em centrífuga: a) centrífuga geotécnica utilizada para os ensaios; b) detalhe do modelo de radier de 4x4 estacas (Rincon, 2016).

Os parâmetros que foram considerados variáveis para avaliar sua influência na resposta de radier estaqueado em argilas foram: o espaçamento das estacas; a quantidade de estacas e; a distribuição geométrica no sistema. Para discutir a influência da geometria na capacidade de carga do sistema, o autor utilizou parâmetros como o recalque médio do sistema radier

estaqueado ( $dr$ ), o Fator de Forma do sistema (FF), a relação de redução de recalques ( $Sr$ ) e o fator de distribuição de carga ( $\alpha pr$ ).

Verificou-se que, quando o Fator de Forma (FF) se incrementa, o que normalmente corresponde a um maior número de estacas e espaçamento, a relação de redução de recalques ( $Sr$ ) é maior, porém a porcentagem em que as estacas reduzem os recalques decresce devido ao fato de existir um número ótimo de estacas acima da qual a inclusão de novas estacas não influencia significativamente os recalques.

Em seu estudo o autor também concluiu que, grupos de estacas com maior espaçamento controlam melhor os recalques, no entanto, os recalques são maiores quando o solo é submetido a um processo de dissipação das poropressões, se comparado com recalques medidos em condições de poropressão constante (ou somente afetados pelo carregamento).

### **2.5.2. ENSAIOS EM MODELOS 1G**

Há dificuldades e limitações associadas a ensaios em pequena escala em laboratório e sua extrapolação para fundações reais, principalmente pelo pequeno nível de tensão imposto (gravidade natural 1g), dimensões da amostra e similitude. Tais limitações, contudo, não invalidam estes trabalhos que podem ser considerados qualitativamente representativos do comportamento de elementos de fundações e, portanto, passíveis de serem usados para comprovar a aplicabilidade de estudos teóricos.

Ensaio em laboratório em radiers sem estacas, grupos de estacas (sem contato do bloco com o solo) e radiers estaqueados (com contato do bloco-solo) em areia seca mostrou que a capacidade de carga das estacas excedeu a soma da capacidade de carga das estacas e do bloco, devido ao incremento na capacidade de carga causado pela interação estaca-radier (pressão de contato do radier sobre o solo) (Akinmusuru, 1980; Balakumar, 2008).

Bauer *et al.* (2014) confirmaram este incremento de capacidade de carga lateral devido ao movimento do solo em teste 1g em laboratório.

Cooke (1986) apresentou uma extensiva série de ensaios e confirmaram este incremento de capacidade de carga lateral devido ao movimento do solo em teste 1g em laboratório, escala reduzida em radiers, grupos de estacas e radiers estaqueados de vários tamanhos em solos argilosos. Cooke estabeleceu que pouca vantagem seria obtida ao se projetar radiers estaqueados com espaçamento inferior a  $4d$  e também indicou que o comportamento do bloco ocorreu mesmo em um espaçamento muito maior (isto é,  $6d$  a  $8d$ ) do que o tradicionalmente era aceito para o projeto de radier estaqueado. Assim, menos estacas também poderiam produzir

uma considerável redução de recalque. O mesmo ressaltou a importância do comprimento das estacas no comportamento do radier estaqueado e observou que as estacas poderiam ser mais longas em relação ao tamanho do radier. Ele também observou que em caso de radiers rígidos, a distribuição da carga entre as estacas do radiers estaqueado depende do número de estacas e dos seus espaçamentos. Para espaçamentos mais comuns, as estacas externas podem receber pelo menos duas vezes a carga recebida pelas estacas do interior.

Lee & Chung (2005) realizaram ensaios em modelo reduzido em grupos de estacas com estacas flutuantes em areia densa e analisaram a influência do bloco sobre o comportamento do grupo de estacas carregadas verticalmente. A partir dos resultados, verificou-se que o efeito do bloco em contato com o solo subjacente resultou em um incremento no atrito lateral, principalmente após a carga da estaca ter sido atingida, com influência sobre o espaçamento da estaca. Eles também observaram que uma carga muito menor foi recebida pela placa no sistema radier estaqueado, pelo menos na fase inicial do carregamento.

Mandolini *et al.* (2013) apresentaram um gráfico (Fig. 2.22) em que foi estabelecido a variação da carga assumida pelo radier em um sistema radier estaqueado em função do Fator de Forma.

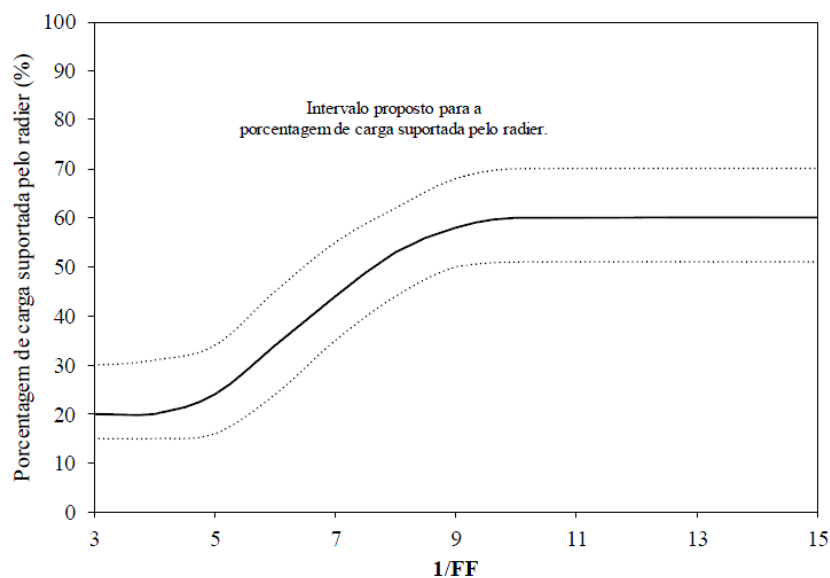


Figura 2.22 - Proporção da carga absorvida pela placa em um sistema radier estaqueado. Adaptado de Mandolini *et al.*, (2013).

O Fator de Forma (FF) estabelece que o comportamento de sistemas radier estaqueado encontra-se influenciado pelo comportamento relativo do grupo de estacas e do radier, como exposto na Eq. 2.29.

$$FF = \frac{A_G/A_R}{s/d} \quad (2.29)$$

Em que:

$A_G$ : área do grupo de estacas, definida por Sanctis *et al.* (2002), Eq. 2.30.

$$A_G = [(\sqrt{N_p} - 1)s]^2 \quad (2.30)$$

$A_R$ : área ocupada pelo radier;  $s$ : espaçamento;  $d$ : diâmetro das estacas e;  $N_p$ : número de estacas no grupo.

Bajad & Sahu (2008) através de testes em modelos 1g estudaram o efeito do comprimento e do número de estacas numa fundação em radier estaqueado, para estas análises os autores lançaram mão dos conceitos de relação de redução de recalques, que visa um projeto ideal de radier estaqueado, em que os recalques são reduzidos e não eliminados, de forma que o projetista de posse destas informações consiga ter uma ótima relação entre os elementos do sistema de fundação. O comportamento do fator de redução de recalque é quantificado pelo fator de redução de recalque que é descrito pela Eq. 2.31.

$$S_r = \frac{d_{ri} - d_{re}}{d_{ri}} \quad (2.31)$$

Em que:

$d_{ri}$ : recalques do radier isolado;

$d_{re}$ : recalque do radier estaqueado, para cada dado carregamento.

Em seus estudos os autores observaram que quanto maior a relação entre o comprimento das estacas e o diâmetro do bloco equivalente maior é a taxa de redução de recalques e também maior é a relação de distribuição de carga experimentada entre os elementos da fundação (radier + estacas).

Os autores também relacionaram o aumento no número de estacas dentro do sistema de fundação com o aumento de  $S_r$  e  $\alpha_{pr}$ , porém a influência do número de estacas nestes fatores deixa de ser significativa a partir de um determinado número de estacas.

Segundo Balakumar (2008) o fator de distribuição de carga ( $\alpha_{pr}$ ) é definido pela relação entre a quantidade de carga distribuída a todas as estacas a dado recalque do radier estaqueado ( $Q_p$ ) e a carga total aplicada sobre o radier estaqueado a um mesmo nível de recalque ( $Q_{pr}$ ), conforme Eq.2.32.



$$\alpha_{pr} = \frac{Q_p}{P_{pr}} \quad (2.32)$$

Em que:

$Q_p$ : cargas totais assumidas por todas as estacas;

$Q_{pr}$ : cargas totais assumidas pelo radier estaqueado para o mesmo nível de recalque;

$Q_r$ : carga recebida pelo radier (sem estacas) para um mesmo nível de recalque;

$$Q_p = Q_{pr} - Q_r. \quad (2.33)$$

Lee (2008) e Choi (2012) estudaram fundações formadas por estacas isoladas e grupos estaqueados em areia, em que estas fundações foram carregadas lateral e vertical, destacando como vantagem a possibilidade de melhor controle e repetibilidade das propriedades do solo e das condições de carregamento durante os ensaios em escala reduzida 1g. Lee ainda conclui que os dados obtidos nestes testes são compatíveis com ensaios de estacas realizados em modelos reduzidos e em escala real reportados na literatura, Fig.2.23.

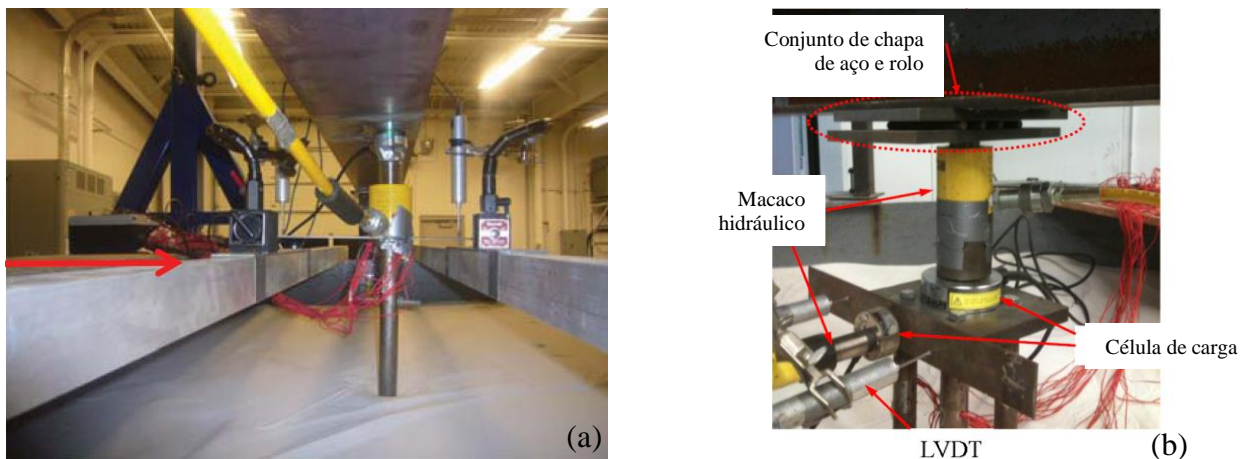


Figura 2.23 – Exemplos de Experimentos 1g. (a) Lee (2008) e (b) Choi (2012).

Os estudos de modelos em escala reduzida facilitam o controle das variáveis encontradas na prática e estudam sua influência no comportamento do radier estaqueado. Embora os resultados deste estudo não possam ser comparados diretamente com o comportamento da escala real, eles são muito úteis para fornecer um entendimento sobre o padrão de comportamento, como um guia para o desempenho de obras similares em escala de verdadeira grandeza quando examinado em conjunto com as soluções teóricas desenvolvidas.

Neste estudo, a concentração foi nos parâmetros adimensionais, tais como, a taxa de redução de recalque, a taxa de redução de rigidez, os fatores de segurança e as taxas de carga e recalques, uma vez que o comportamento do radier estaqueado é influenciado pelo recalque. Embora os testes em escala real sejam ideais, eles são demorados e apresentam alto custo. Além disso, as condições de contorno para os ensaios podem não ser tão claras quanto as que

podem ser criadas em laboratório. Isso pode levar à complexidade nas análises dos dados observados. Também estudos em verdadeira grandeza são limitados quanto a estudo paramétrico mas representam as condições reais.

Os modelos paramétricos podem simular um radier muito flexível e podem ser mais econômicos do que os ensaios em verdadeira grandeza. Porém, podem sofrer limitações quanto a influência das condições de contorno e apresentam algumas limitações quanto as leis de similitude no que se refere ao tamanho dos grãos, por exemplo. Mas este efeito tem sido estudado por muitos e comprovados ser insignificante se a relação da largura da fundação ou comprimento com o  $D_{50}$  for inferior a 30.

Tavares (2012) avaliou, em modelo reduzido 1g, o comportamento de um sistema de fundação em radier estaqueado com estacas íntegras assentes em areia sob carregamentos verticais.

O autor comparou os resultados experimentais com alguns métodos de previsão de capacidade de carga, além de ter apresentado os fatores de eficiência ( $\eta$ ), taxa de recalque ( $R_s$ ) e os fatores de redução dos grupos. Este ganho de eficiência é percebido quando se compara o comportamento carga-recalque destas fundações, conforme demonstrado na Fig. 2.24.

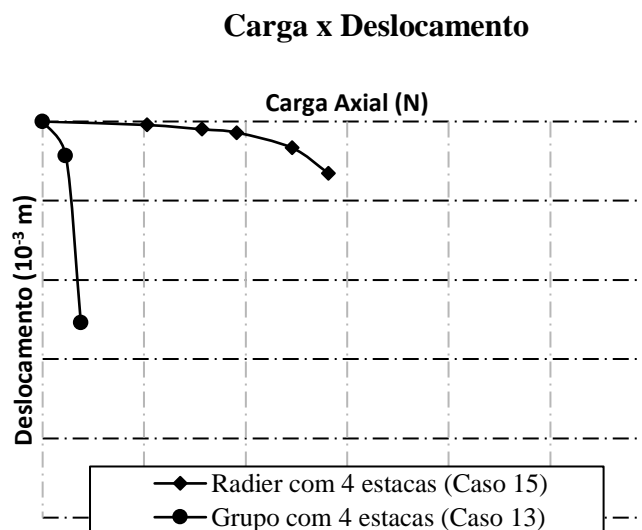


Figura 2.24 - Comparativo entre as curvas carga-recalque do grupo com 4 estacas e o radier estaqueado com 4 estacas (Tavares, 2012).

## 2.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO

A revisão bibliográfica sobre fundações estaqueadas se apresentam principalmente em algumas linhas de pesquisas, tais como: estudos em modelos de laboratório, estudos de protótipos e métodos numéricos de fundações estaqueadas.

Verificou-se que tanto os estudos de modelos em laboratório quanto em modelos 1g e em centrífuga visavam validar modelos analíticos desenvolvidos para a interação solo-estrutura. Testes em modelos 1g são limitados e concentrados em radier estaqueado em argila sobreadensada. Embora seja conhecido no meio técnico que os ensaios em centrífuga proporcionam mais informações que os ensaios em 1g, estas ainda se apresentam como uma boa alternativa quando comparados com os ensaios de campo em verdadeira grandeza, principalmente pelos custos empregados.

Diversos pesquisadores, tanto nos modelos experimentais de campo quanto de laboratório, vêm apresentando bons resultados em seus modelos com a inserção de estacas de diferentes comprimentos, onde o conceito de elementos redutores de recalque vêm sendo bem aplicado. Em trabalhos mais recentemente foram estudados o comportamento do sistema de fundação estaqueado com a presença de estacas danificadas, todos os modelos de análises buscam entender melhor a configuração deste “novo” sistema. Em paralelo a isso, algumas técnicas para a detecção do tipo de dano e de seu nível de gravidade vêm sendo aprimoradas.

As provas de carga estáticas, sendo instrumentadas ou não, descrevem as características de resistência e deslocamento de um sistema de fundação e a sua correta análise oferece um melhor entendimento na capacidade de carga deste sistema. Na ausência de ruptura física, a previsão de capacidade de carga pode ser realizada por métodos de extrapolação e, por critérios de ruptura convencional.

Dos trabalhos relacionados a patologia de fundações em radier estaqueado apresentados nesta pesquisa pode-se observar que os autores consideram o dano, independente da fase de obra, como um novo sistema e com isso, se observa a tendência de migração de carga para as demais estacas, fazendo com que os fatores de segurança variassem para cada estaca, dependendo do número e da configuração do grupo. Além disso, observou-se também que independentemente do tipo de dano, haverá deslocamentos rotacionais que estarão diretamente ligados aos níveis de dano.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos que possam simular o comportamento de grupos e radiers estaqueados com a presença de estacas danificadas ainda são limitados. Tais estudos poderiam melhorar a compreensão deste comportamento de interação entre os elementos a partir de sua nova configuração. Entretanto, realizar estes ensaios de provas de carga em grupos e radiers estaqueados em verdadeira grandeza apresenta um custo elevado e ainda não se pode garantir todas as condições de contorno. A modelagem física em escala reduzida destes ensaios possibilita uma boa alternativa aos ensaios de campo em verdadeira grandeza por apresentarem um bom custo-benefício, além de permitirem analisar diversas configurações, ou seja, múltiplos ensaios, e obter o controle de algumas propriedades do solo e das condições de carregamento, desde que seja considerado o efeito escala.

Manter a consistência no campo de tensões do modelo físico é certamente um dos fatores chave para uma modelagem acurada. A modelagem física 1g é baseada no princípio da semelhança em que um protótipo é observado e as principais características do fenômeno são tomadas como referência para a representação no modelo, com a utilização de modelos geométricos e fator de escala (Fioravante, 2002).

Na série de testes realizados nesta pesquisa a variação do comprimento de uma estaca simulou o dano e sua posição foi alterada (canto, borda e centro do grupo) para avaliar seu novo comportamento em relação ao grupo intacto. A geometria dos blocos foi alterada de acordo com o número de estacas utilizadas, 04, 09 e 16 estacas.

Os ensaios foram realizados para avaliar o comportamento de distribuição de carga do radier estaqueado e aferir a influência dos vários parâmetros relacionados às estacas, radier e solo, e como um elemento “danificado” pode influenciar no comportamento do conjunto.

Neste capítulo são descritos os detalhes da preparação das estacas, dos blocos, dos carregamentos e dos procedimentos de ensaio. Estes ensaios foram realizados em areia de granulometria fina a média, sujeitos a carga estática vertical controlada, em um tanque cilíndrico.

Em todos os ensaios foi utilizada uma escala geométrica de modelo de 1/30 baseado nas dimensões das fundações do trabalho de Freitas Neto (2013) como protótipo. Deve-se notar que os modelos selecionados para o presente trabalho não se destinavam a simular o comportamento de um protótipo real de fundação específico em um local específico. O modelo físico apresentado nesta pesquisa tem como principal objetivo a obtenção de valores qualitativos do comportamento das fundações apresentadas, de modo a contribuir para a compreensão do comportamento de tais fundações nas condições pré-estabelecidas.

Desta maneira, o programa experimental da pesquisa foi dividido em três etapas: (a) construção do sistema de prova de carga em modelo reduzido com nível de tensão de 1g; (b) realização de ensaio de laboratório; e (c) realização dos ensaios de prova de carga.

### **3.1. MODELAGEM DO SISTEMA DE FUNDAÇÃO**

#### **3.1.1. EQUIPAMENTO GERAL**

O sistema de ensaio desenvolvido neste estudo consiste numa placa metálica para reação, um cilindro hidráulico para aplicação de carga e um tanque cilíndrico metálico de paredes rígidas com 1150 mm de diâmetro interno e 600 mm de altura para armazenamento do solo. A visão esquemática da montagem experimental é apresentada em maiores detalhes na Fig. 3.1.

Em que:

- 1- Tanque metálico com paredes rígidas para o armazenamento do solo;
- 2- Barras de aço com roscas para ajuste de altura do sistema de reação;
- 3- Placa de reação com cinco pontos para fixação do extensor metálico de aplicação de carga;
- 4- Extensor para auxílio do cilindro de aplicação de carga. Utilizam-se dois, o menor com 15 cm para aplicação de carga no grupo (placa sem contato com o solo) e o maior de 30 cm para aplicação de carga nos radiers (placas em contato com o solo). A Fig. 3.2 apresenta o sistema de fundação.

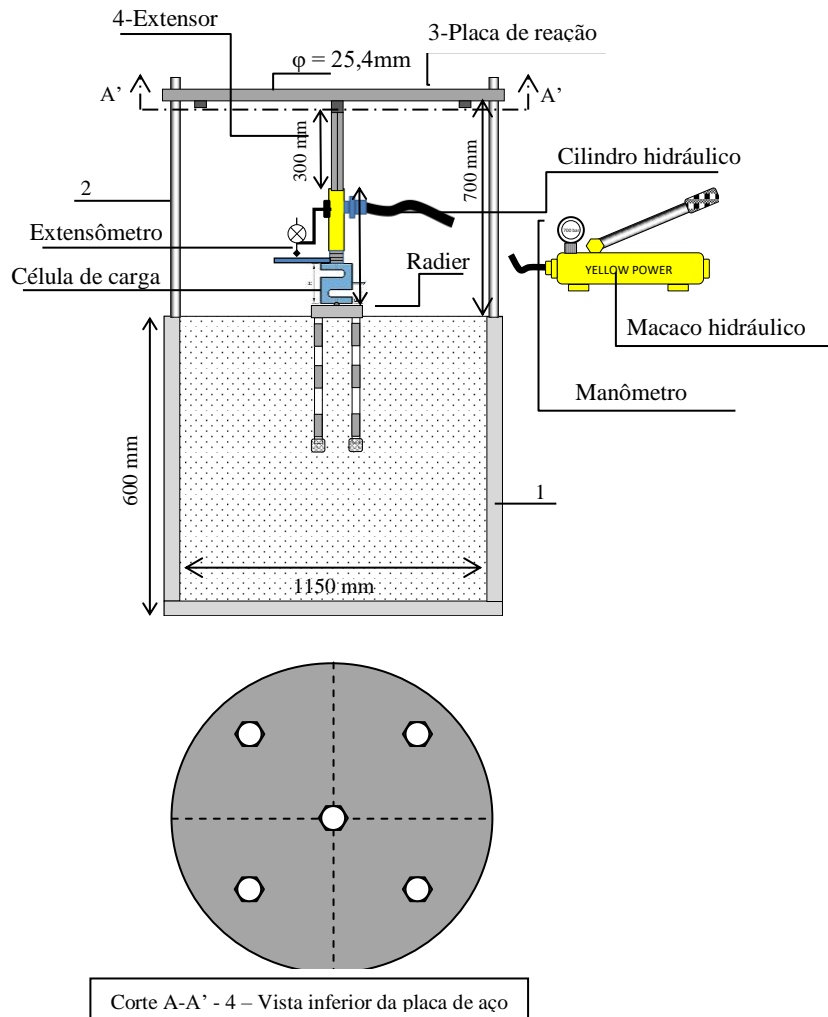


Figura 3.1 – Modelo esquemático do sistema de prova de carga em modelo reduzido, 1g.



Figura 3.2 – Sistema de prova de carga em modelo reduzido, 1g.

### 3.1.2. SISTEMA DE REAÇÃO

O sistema de reação desenvolvido para a realização dos ensaios em escala 1g possui capacidade de carga de 200 kN. Este sistema é composto por cinco barras de aço de 700 mm de comprimento que servem de sustento da placa de aço. Estas barras possuem roscas na extremidade superior que facilita ajustar a posição da placa de reação a uma altura requerida. Sob a placa de aço foram fixadas por meio de solda elétrica, cinco porcas que servem de pontos de fixação de barras extensoras, quatro diametralmente equidistantes e uma no centro da placa. Além disso, os pontos de fixação das barras extensoras de aplicação de carga possibilitaram espaçamentos que minimizam os efeitos dos grupos vizinhos. A placa de aço possui 25,4 mm de espessura e diâmetro de 1200 mm e sobre a placa foram soldadas perpendicularmente duas cantoneiras em perfil “L” de modo a aumentar a rigidez do sistema de reação, Fig. 3.3.



Figura 3.3 – Placa de Reação de aço com cantoneiras em perfil “L”.

## 3.2. MODELAGEM DO SOLO

### 3.2.1. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Para esta pesquisa foi utilizado um material arenoso, areia de rio, por permitir a execução de ensaios mais rápidos do que as argilas, por exemplo.

Uma série de ensaios de laboratório foi realizada para se obter as propriedades deste material e estes foram relacionados com o modelo das fundações utilizadas. A relação entre o diâmetro da estaca com o diâmetro médio do grão da partícula de areia é  $D_{ESTACA}/D_{50} = 67$  o que faz com que seja suficiente para minimizar o efeito escala do tamanho do grão sobre o comportamento da interface estaca-solo (Garnier e Konig, 1998; Foray *et al.*, 1998; Fioravante, 2002; Garnier, 2002). A curva granulométrica está apresentada na Fig. 3.4, conforme classificação ABNT NBR 6502/95.

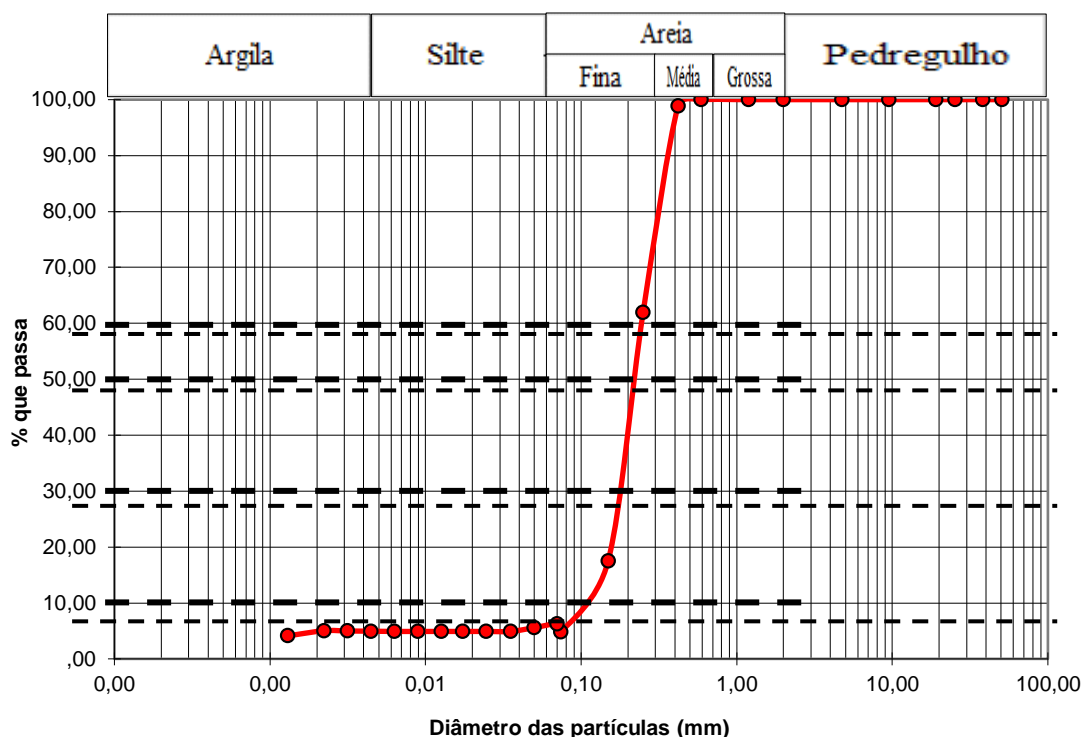


Figura 3.4 – Distribuição do tamanho do grão da areia.

Foi realizado ensaio de granulometria por peneiramento e o material foi caracterizado quanto ao seu tamanho. Pela curva do ensaio pode-se determinar o coeficiente de curvatura ( $C_C = 1,08$ ) e uniformidade ( $C_U = D_{60}/D_{10}$ ) e confirmar que se trata de um material uniforme de granulometria de média a fina com  $D_{50} = 0,22$ . Outros parâmetros que foram calculados são apresentados na Tab. 3.1.

Tabela 3.1– Propriedades Físicas da areia usada para o ensaio.

Propriedade	Símbolos	Valores
Densidade máxima seca	$\rho_{dmáx}$	17,0 kN/m <sup>3</sup>
Índice de Vazios máximo	$e_{máx}$	0,75
Índice de Vazios	$e$	0,64
Índice de Vazios mínimo	$e_{mín}$	0,45
Compacidade Relativa	$CR$	0,373
Coefficiente de uniformidade	$C_U$	2,08
Coefficiente de Curvatura	$CC$	1,08
Peso específico seco	$\gamma_d$	16,3 kN/m <sup>3</sup>
Densidade dos Grãos	$G_s$	2,67
Ângulo de atrito interno	$\varphi'$	32°



Para a caracterização do solo estudado foram realizados os seguintes ensaios:

- Normas NBR 6502/95 – Solos e Rochas;
- NBR 6457/2016 – Amostra de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização;
- NBR7181/2016 – Solos – Análise Granulométrica; e
- NBR 6508/2016 – Grãos de Solo que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da Massa Específica.

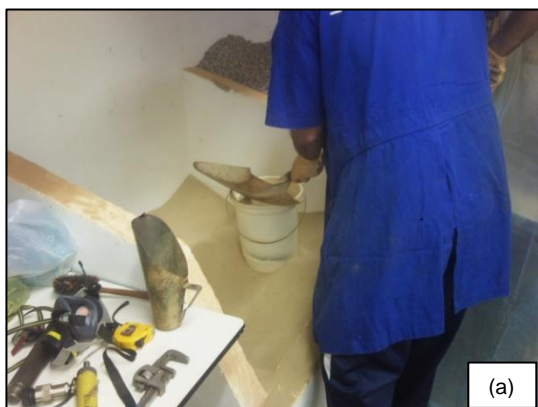
### 3.2.2. PREPARAÇÃO DO SOLO

A areia utilizada nos experimentos foi primeiramente aquecida com lâmpadas incandescentes até que estivesse completamente seca, conforme Fig. 3.5.



Figura 3.5 – Secagem da areia.

Para a preparação do solo, foi realizado o lançamento por meio de baldes a uma altura de 50 cm, em média. Para a primeira camada de lançamento, a mais inferior, foram adicionados 165 kg de areia resultando em uma espessura final de 10 cm, às camadas seguintes possuíam cada uma 20 cm de altura com massa de 250 kg, conforme Fig. 3.6.



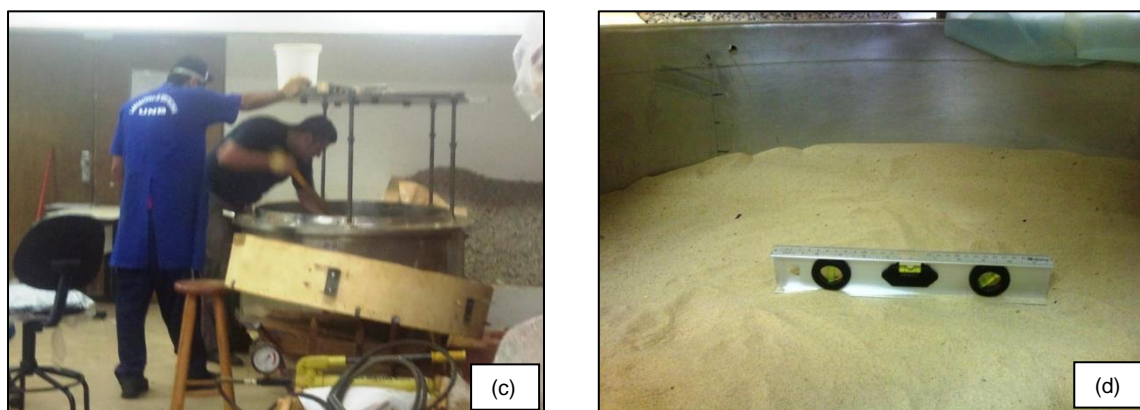


Figura 3.6 – Procedimento executivo do solo para as fundações em escala reduzida: (a) Retirada do material na baia de estoque; (b) Controle através de uma balança analógica da quantidade de material por camada; (c) Lançamento da areia por camada e (d) Nivelamento da camada de areia.

Para o processo de compactação foi utilizada uma placa de aço de massa de 40 kg e 60 cm de diâmetro sob três níveis de tensão: 10 kPa, 20 kPa e 30 kPa em quatro pontos distintos do tanque de ensaio, conforme Fig. 3.7.

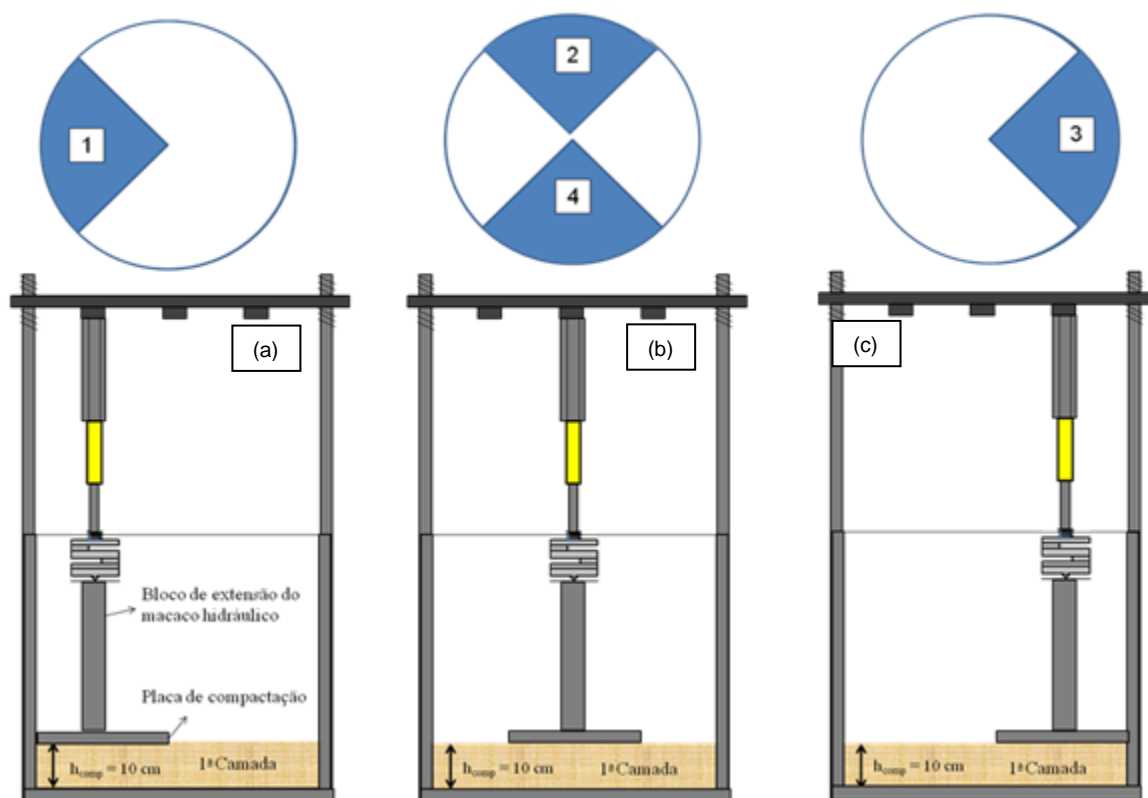


Figura 3.7 – Roteiro adotado na compactação das três camadas constituintes do solo de sustentação: (a) compactação do quadrante 1; (b) compactação dos quadrantes 2, e do 4; (c) compactação do quadrante 3.

As densidades foram controladas por meio de cápsulas inseridas durante o processo de preparação de cada camada, conforme esquematizado na Fig. 3.8 e foram sacadas ao final dos

ensaios. A Fig. 3.9 apresenta um gráfico com as densidades médias obtidas após os ensaios por camada, onde nota-se uma densidade relativa média de 75,8% com desvio padrão médio de 2,8%, antes da realização dos ensaios, para as duas (02) camadas superiores, as quais possuem 20 cm de altura cada, e densidade média de 96,8% com desvio padrão médio de 1,2% para a camada mais inferior, que possui 10 cm de altura.

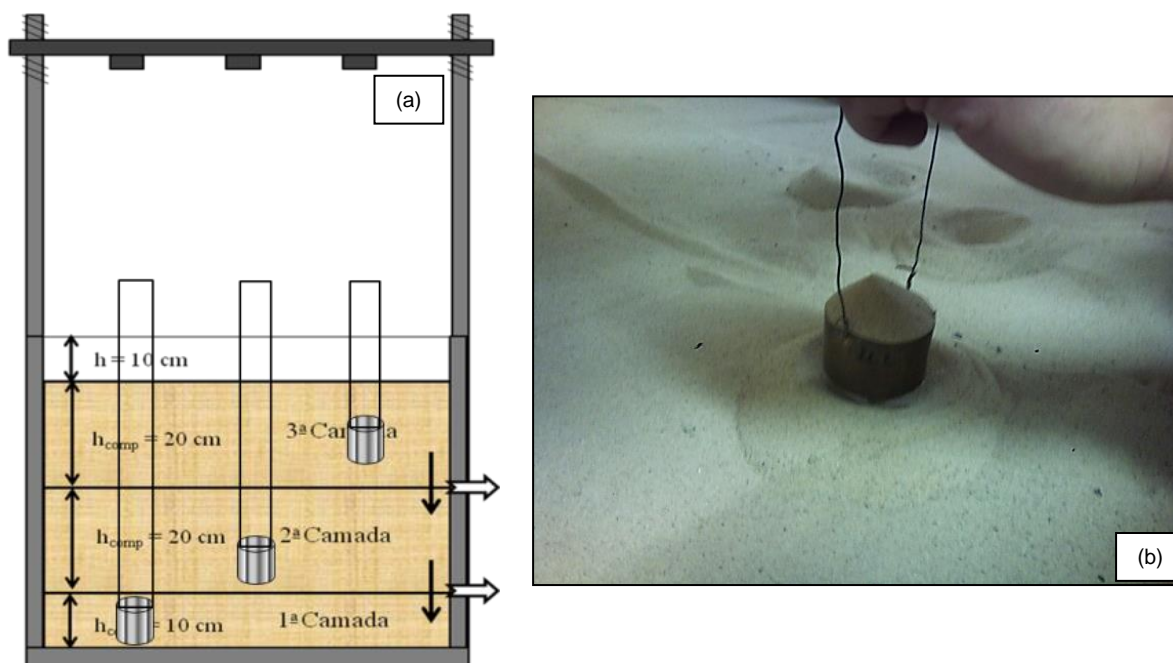


Figura 3.8 – Controle de densidade por camada. (a) Modelo esquemático. (b) Uso de cápsulas para a determinação da densidade natural por camada.

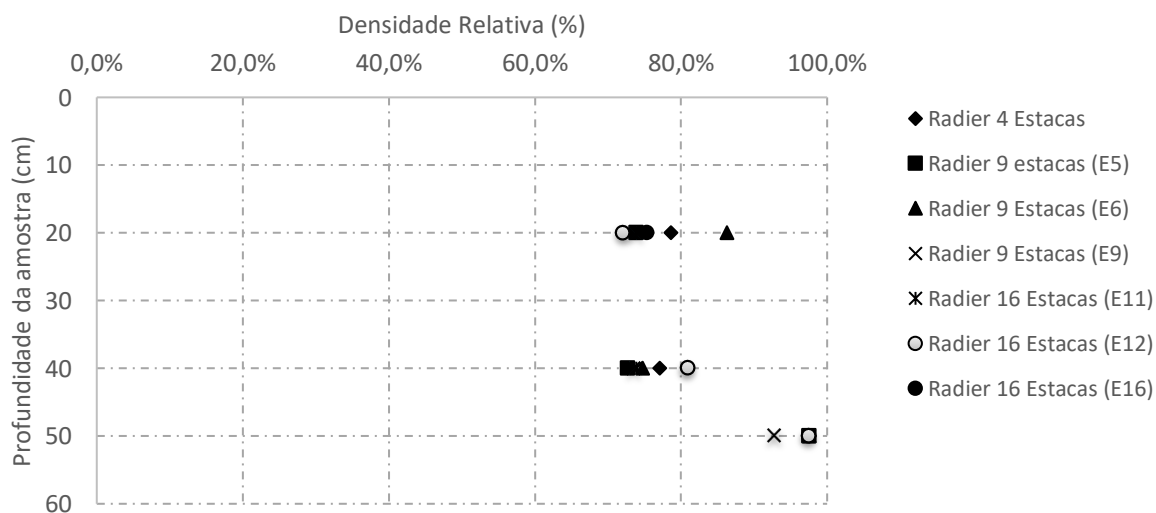


Figura 3.9 – Densidades encontradas para cada grupo de ensaio por camada.

### 3.3. EXECUÇÃO DO RADIER E DAS ESTACAS

#### 3.3.1. PREPARAÇÃO DAS FUNDAÇÕES

Para as estacas ensaiadas foram utilizados tubos de alumínio com aproximadamente  $L = 215\text{mm}$  de comprimento, diâmetro interno de  $D_{\text{INT}} = 9,24\text{mm}$ , diâmetro externo com  $D_{\text{EXT}} = 14,71\text{mm}$  e diâmetro da base  $D_{\text{BASE}} = 16,0\text{ mm}$  (tampa). A Tab. 3.2 apresenta sumariamente os parâmetros físicos e geométricos das estacas íntegras.

Tabela 3.2 - Geometria e propriedades mecânicas da estaca íntegra.

Propriedades do Modelo	Símbolo	Estaca Íntegra
Comprimento Est. Íntegra	$L_I$	$21,5 \times 10^{-2}\text{ cm}$
Diâmetro Externo	$D_E$	$1,471 \times 10^{-2}\text{ m}$
Diâmetro Interno	$D_I$	$0,924 \times 10^{-2}\text{ m}$
Área Efetiva	$A_E$	$1,03 \times 10^{-4}\text{ m}^2$
Relação do diâmetro da estaca com o diâmetro efetivo do grão	$D_P/D_{50}$	67
Módulo Elasticidade	$E_P$ (MN/m <sup>2</sup> )	$6,43 \times 10^4\text{ MPa}$
Momento de Inércia	$I_P$	$3,88 \times 10^5\text{ m}^4$
Rigidez Estrutural	$EI_P$	$2,49 \times 10^3\text{ kNm}^2$
Rigidez Axial	$E_P A/L$	$3079,6\text{ MN/m}$
Raio Equivalente	$R_A = A_P/\pi d^2/4$	0,61
Área Externa da Estaca	$A_E$	$1,70 \times 10^{-4}\text{ m}^2$
Relação do $L_{\text{ÍNTGRA}}/D_E$ (Esbeltez)	$\lambda$	14,6
Profundidade Relativa	$H/L$	2,1

Para que as estacas fossem fixadas às placas foram fabricadas roscas nas extremidades, no topo, para esse fim, e na base para bloquear a passagem de material para o interior da estaca durante a cravação. As estacas foram envolvidas de cola epóxi Araldite®, e em seguida foram mergulhadas na mesma areia utilizada nos ensaios para aumentar o atrito entre a estaca e solo, conforme Fig. 3.10.

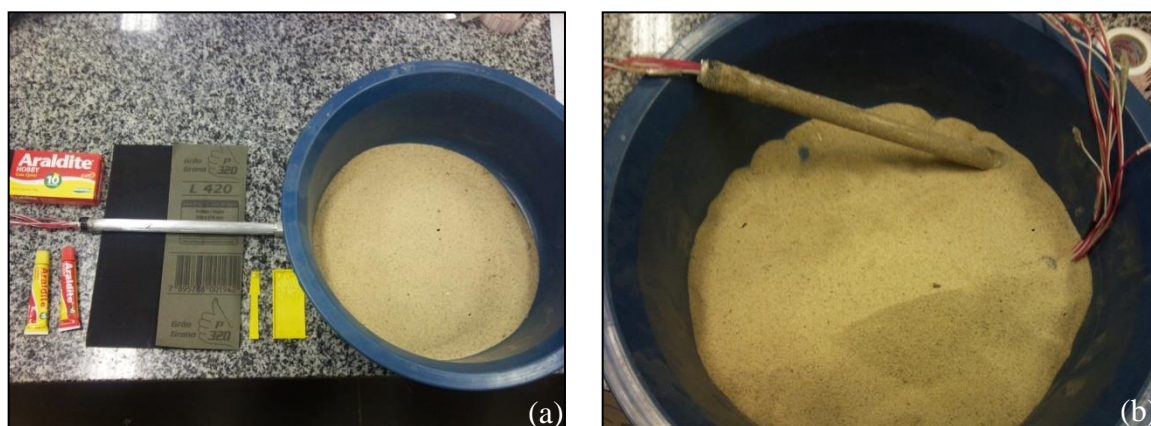


Figura 3.10 – Estacas ensaiadas: (a) Material; (b) Estaca Íntegra com cola epóxi.

A Fig. 3.11 apresenta o modelo da estaca íntegra ensaiada, antes do revestimento de areia.

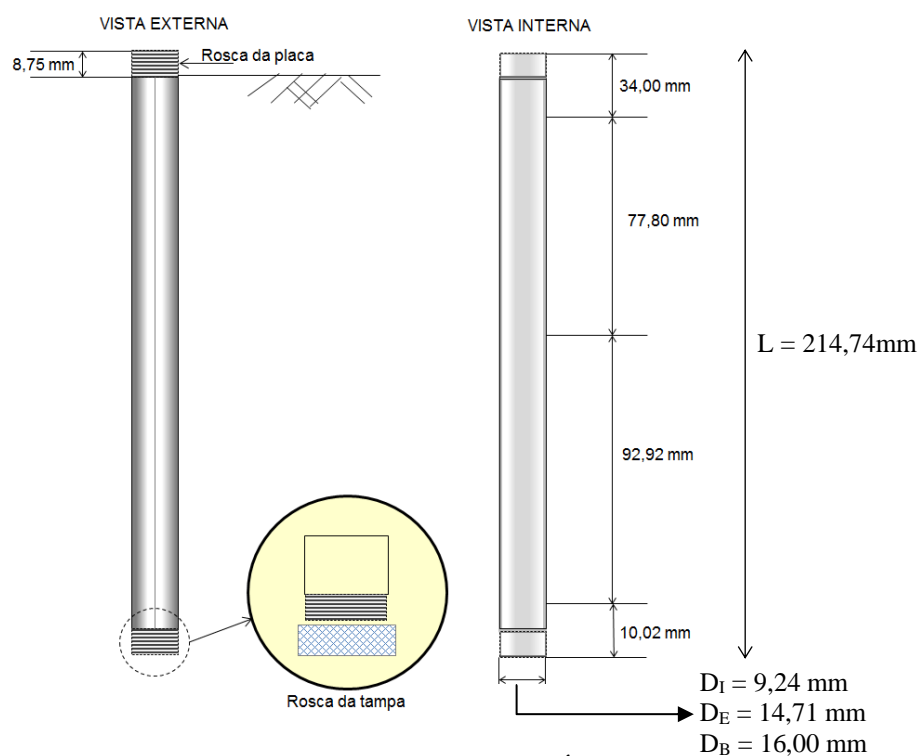


Figura 3.11 – Esquemático da Estaca Íntegra.

Para avaliação dos comportamentos são analisados três tipos de situações, com estaca íntegra que possui 100% do seu comprimento (EI), com estaca curta, que possui 50% do comprimento da estaca íntegra (EC), Fig. 3.12a. Para o caso extremo foi considerada a ausência de estaca, ou seja, 0% do comprimento da estaca íntegra (EA), Fig. 3.12b. A Fig. 3.13 apresenta em detalhes as dimensões da estaca curta (EC).

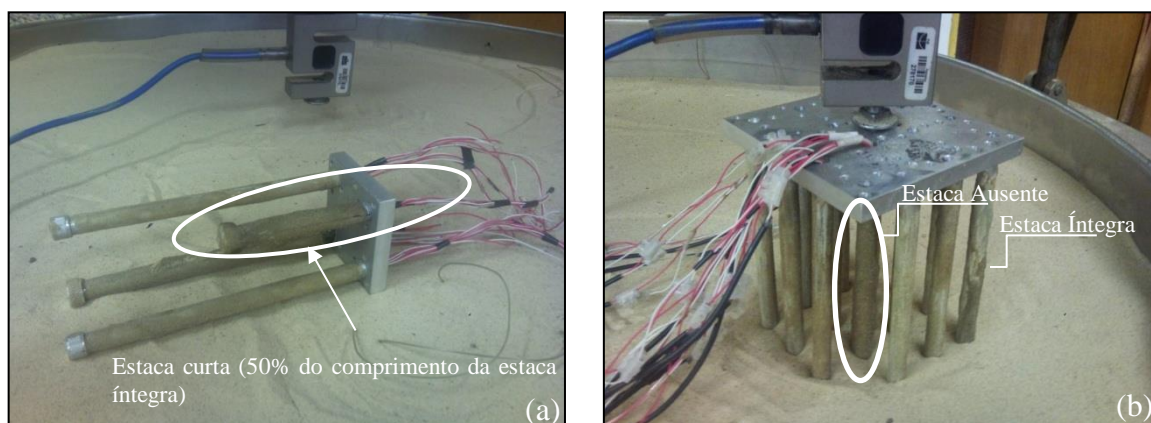


Figura 3.12 – Estacas do modelo EM<sub>2</sub>: (a) Estaca Curta (b) Estaca Ausente.

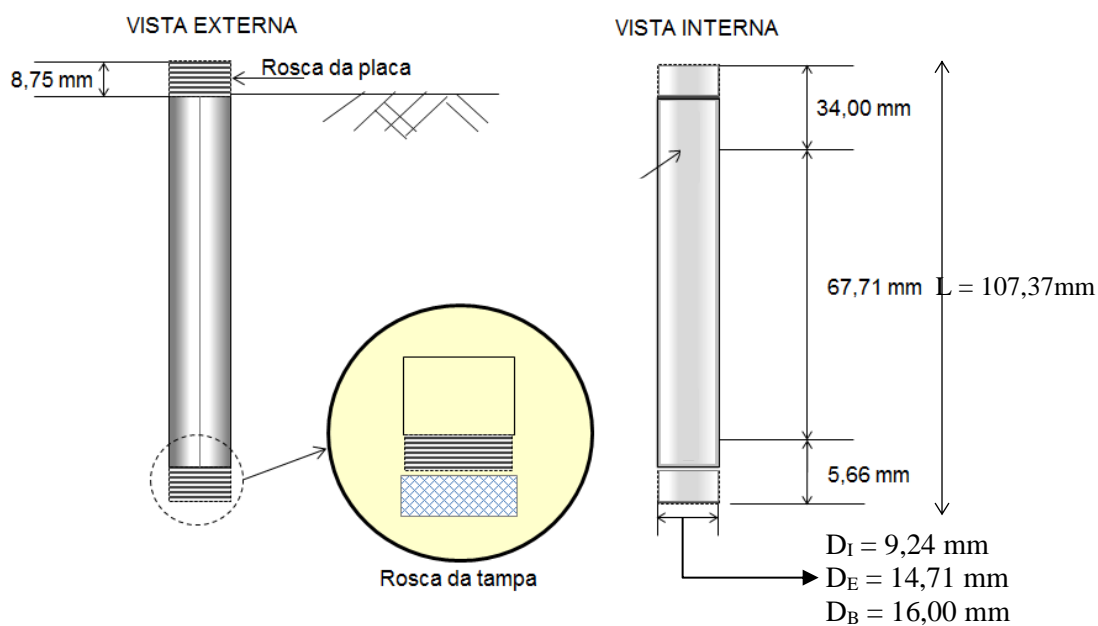


Figura 3.13 – Estaca Curta do modelo: EC.

As placas utilizadas para a simulação do radier são maciças de alumínio conforme apresentado na Fig. 3.14. Para o caso de uma estaca foi utilizada uma placa quadrada com largura de 95,25 mm e altura de 20 mm, para os grupos de 4, 9 e 16 estacas as placas, também quadradas e as larguras descritas na Tab. 3.3, apresentam espessura de 12,7 mm.

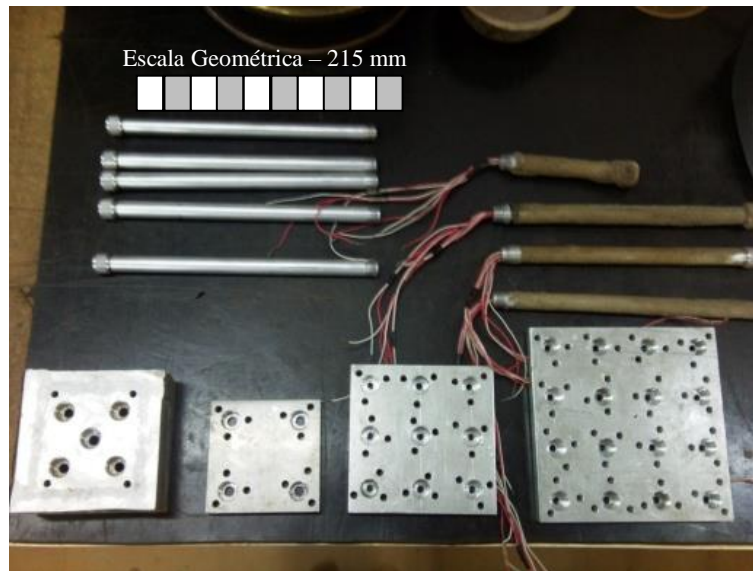


Figura 3.14 – Placas utilizadas para os ensaios.

O módulo de rigidez do radier foi calculado pelo coeficiente de rigidez radier-solo,  $K_{rs}$  (Brown, 1975) que é definido a seguir. Nele se determinou o valor da rigidez igual a 9.186, classificando, assim, o radier como rígido.

$$K_{rs} = \frac{E_r}{E_s} \quad (3.1)$$

Em que:

$E_r$  = módulo de elasticidade do radier;

$E_s$  = módulo de elasticidade do solo.

A Tab. 3.3 apresenta as dimensões, base, largura e espessura, respectivamente, das placas utilizadas nos experimentos, com as medidas em milímetro.

Tabela 3.3 - Placa utilizada para determinado tipo de estaca.

Placa	Dimensões (mm)
Placa de 1 Estaca	95,25 x 95,25 x 20
Placa de 4 Estacas	80 x 80 x 12,7
Placa de 9 Estacas	105 x 105 x 12,7
Placa de 16 Estacas	143 x 143 x 12,7

A Fig. 3.15 apresenta em detalhes cada placa ensaiada com as suas respectivas dimensões.

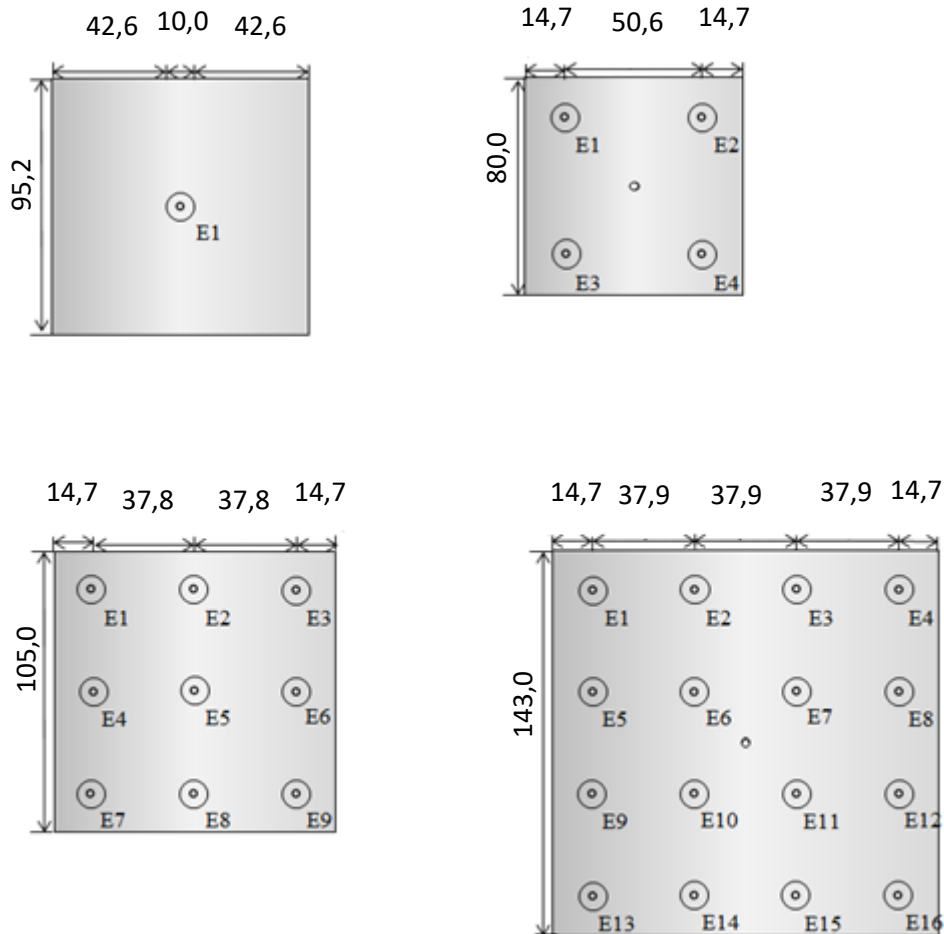


Figura 3.15 – Dimensões dos Radiers utilizados e a localização das estacas. Unidades em milímetro.

### 3.3.2. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para a leitura dos deslocamentos verticais foram utilizados deflectômetros da marca Mitutoyo com 0,2 mm de graduação com capacidade de deslocamento de 50 mm. O sistema de carregamento é composto por um cilindro hidráulico de simples ação com três polegadas de cursor, cinco (05) toneladas de capacidade, do modelo RCY 53, por uma bomba manual de velocidade única, com pressão máxima de trabalho de 70 MPa (700 bar), do modelo PY 39, um indicador digital IK-14 com 10.000 divisões e duas células de carga, uma célula de carga do modelo KS para 20.000N, e outra para calibração, do modelo MS-50 de 500N. Todos os equipamentos do sistema são apresentados na Fig. 3.16.



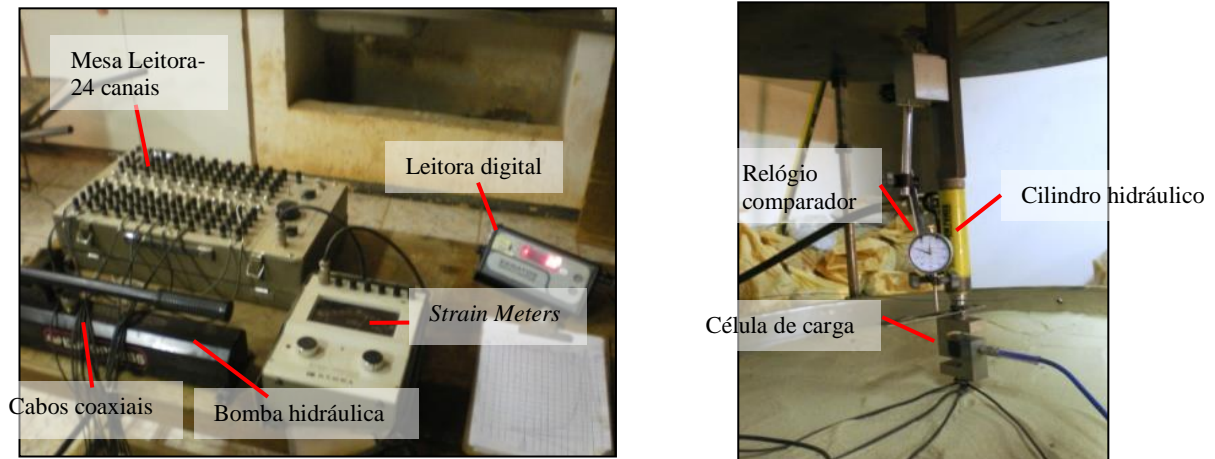


Figura 3.16 – Sistema de medição e carregamento.

### 3.3.3. AFERIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Primeiramente buscou-se aferir o sistema de aplicação de carga com o sistema de leitura e avaliar se o conjunto fornece respostas compatíveis com o esperado além de avaliar as principais influências nos procedimentos de ensaio.

Em seguida foi utilizado o próprio sistema de reação do tanque rígido com a célula de carga e com o anel dinamométrico (Fig. 3.17) para avaliar a relação de medição entre os equipamentos.



Figura 3.17 – Ensaio de Calibração do sistema de leitura de carga.

As Figs. 3.18 e 3.19 apresentam as medidas de carga em relação ao número de incrementos de carregamentos que foram em torno de 15,0N, estes testes foram realizados duas vezes. No primeiro ciclo de carregamento pode-se notar um pico no carregamento associado à própria acomodação do sistema de reação, mas foi corrigido para os demais ensaios, como comprovado no 2º ciclo, onde foram mantidas as mesmas condições.

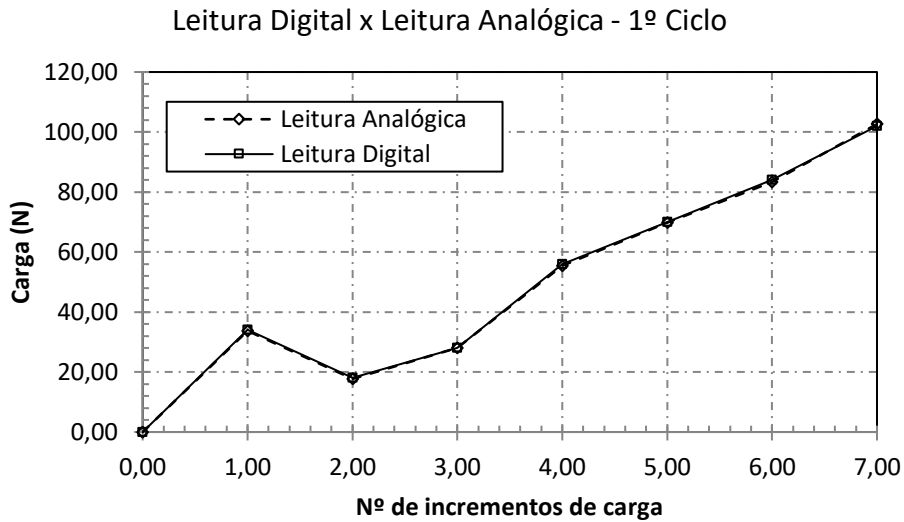


Figura 3.18 – Calibração das leituras em função do número de carregamentos – 1º ciclo.

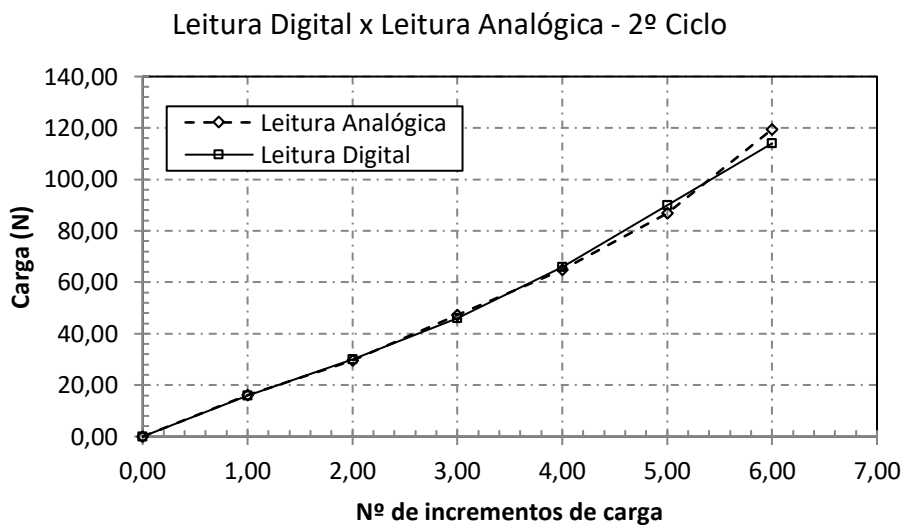


Figura 3.19 – Calibração das leituras em função do número de carregamentos – 2º ciclo.

As Figs. 3.20 e 3.21 apresentam a relação entre os dois medidores de força, analógico e digital. A célula de carga “S” já apresentava seu respectivo certificado de calibração, porém, a comparação entre os medidores visou comprovar a aferição entre os medidores. Com as calibrações efetuou-se uma regressão linear, cujo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) resultante médio foi de 0,9981, considerado satisfatório.

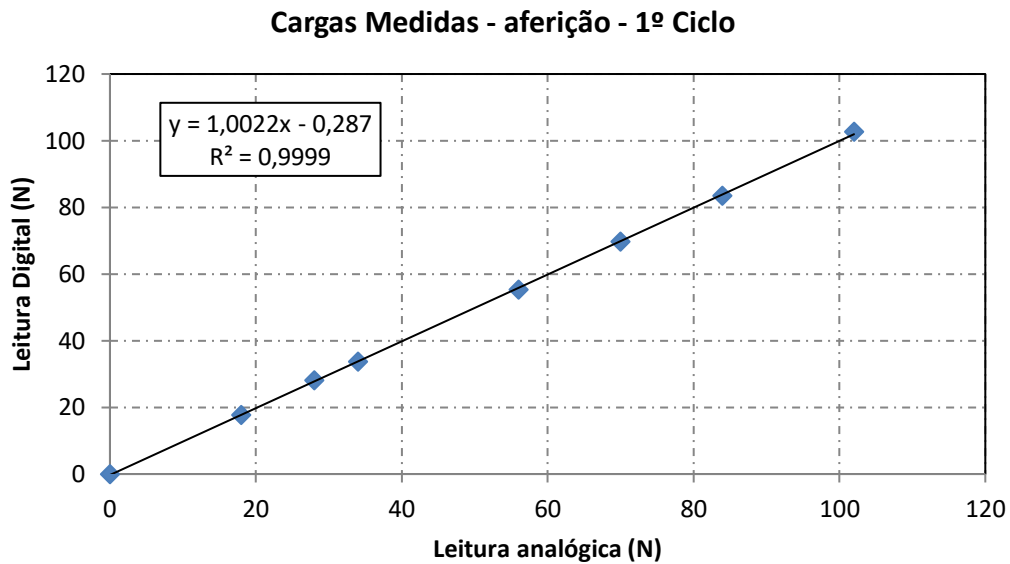


Figura 3.20 – Calibração entre as leituras digitais e analógicas – 1º ciclo.

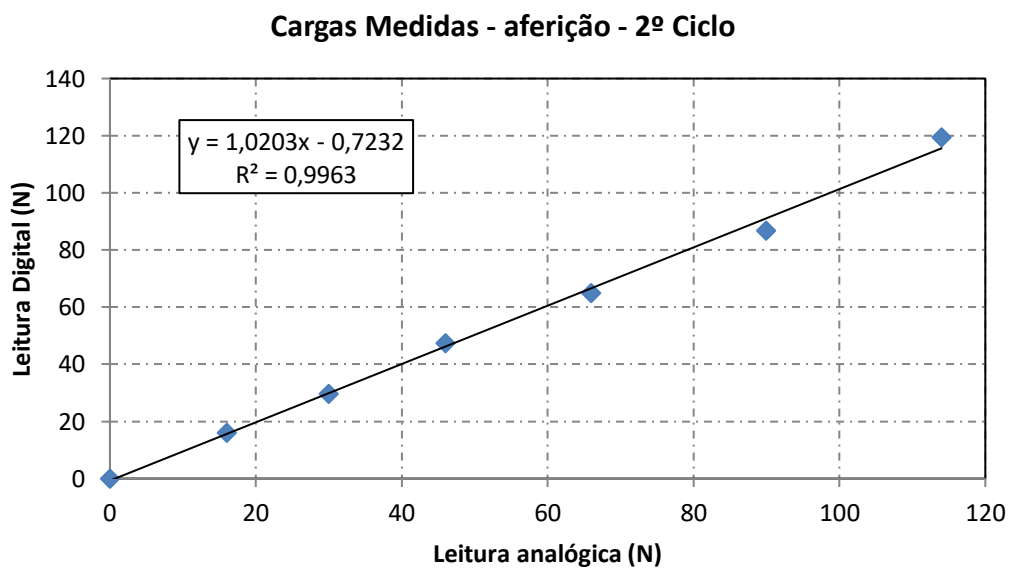


Figura 3.21 – Calibração entre as leituras digitais e analógicas – 2º ciclo.

### 3.4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.4.1. MÉTODO DE INSTALAÇÃO

As fundações estaqueadas foram prensadas e niveladas com o auxílio de um cilíndrico hidráulico de carregamento, ao final do lançamento e compactação da terceira camada de areia. A Fig. 3.22 apresenta o método de instalação das estacas em modelo reduzido.

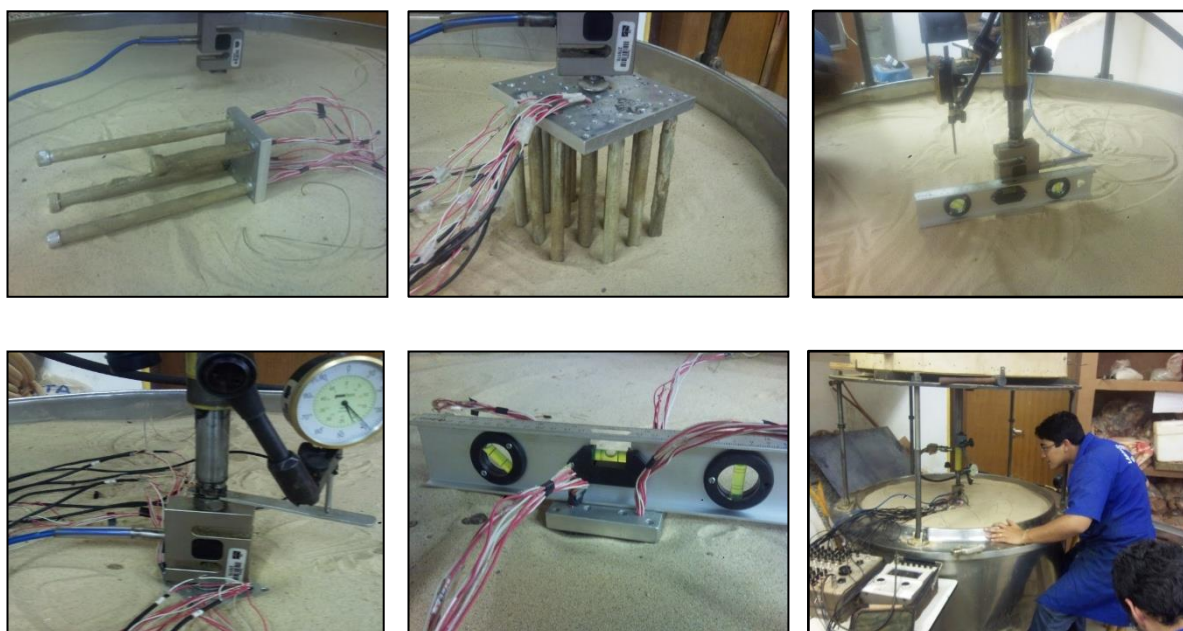


Figura 3.22 – Método de instalação das estacas.

### 3.4.2. CONFIGURAÇÕES DE ENSAIO E PROCEDIMENTOS EXECUTIVOS

Todas as fundações foram carregadas verticalmente nos seus eixos, e para melhor referenciar cada caso analisado foi utilizada uma nomenclatura que primeiramente será exemplificada a seguir.

Para um radier estaqueado de 16 estacas, por exemplo, que apresenta uma placa com 143 mm de lado (16P) e apresenta 16 posições de estacas, onde as estacas E1, E4, E13 e E16 representam a posição de canto. As estacas E2, E3, E5, E8, E9, E12, E14 e E15 a posição de borda e as estacas E6, E7, E10 e E11 as posições de centro. Para o exemplo mostrado, utilizou-se a estaca de número 11 (E11), que se apresenta na posição central do grupo, com um comprimento 50% menor que a estaca íntegra (50%L), denominada de estaca curta (EC), conforme Fig. 3.23.

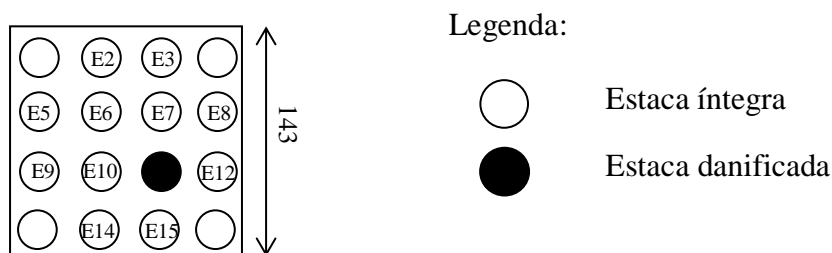
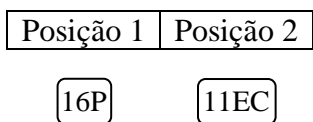


Figura 3.23 – Localização das estacas danificadas e instrumentadas.

Desta forma a nomenclatura pode ser generalizada para os demais grupos de 4 e 9 estacas, conforme apresentado a seguir.



- **Posição 1:** indica o tamanho da fundação superficial em função do número de estacas, onde: “P (placa)” indica que está em contato com o solo”, p.ex.: 16P – placa de 143mm de lado em contato com o solo;
- **Posição 2:** indica a posição da estaca danificada e qual o tipo de dano. O dano pode ser classificado em:
  - EC: Estaca curta (50% do comprimento da estaca);
  - EA: Estaca ausente (0% do comprimento da estaca);

Para a realização dos ensaios foi utilizado uma câmara de calibração cilíndrica que foi dividida em 4 quadrantes, conforme esquematizado na Fig. 3.24. Os ensaios foram realizados seguindo uma sequência de execução de tal forma que cada ciclo tenha sido executado nas mesmas condições de solo.

Para esta pesquisa foram realizados ensaios para radier estaqueado de quatro (04), nove (09) e dezesseis (16) estacas. Para os danos foram simulados dois tipos, Estaca Curta (EC), com 50% do comprimento da estaca íntegra e Estaca Ausente (EA), 0% do comprimento da estaca íntegra. Os casos de 9 e 16 estacas os danos foram simulados em três (03) posições distintas, canto, borda e centro.

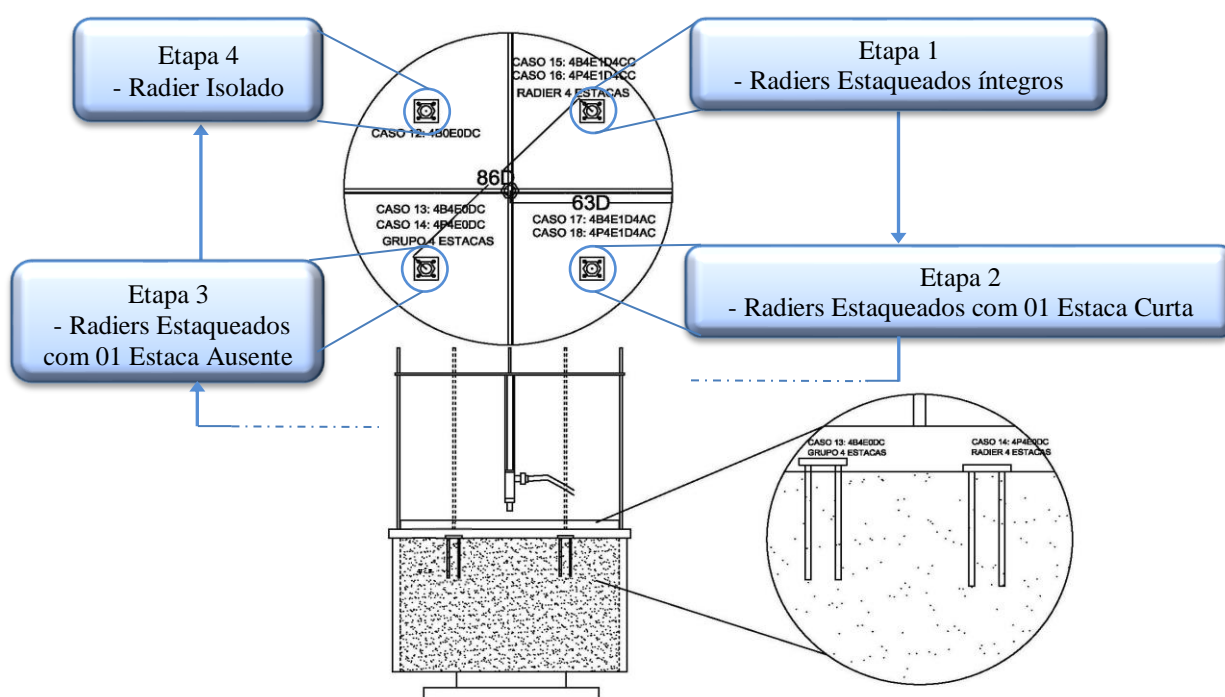


Figura 3.24 – Procedimento esquemático para a realização dos ensaios.

### 3.5. PROGRAMA DE ENSAIOS E PROCEDIMENTOS EXECUTIVOS

Os radiers estaqueados de quatro (04), nove (09) e dezesseis (16) estacas foram ensaiados com a variação do comprimento de uma (01) estaca, em 50%L, denominada de estaca curta (EC) e 0%L, com a ausência de uma estaca (EA). Para o caso de nove (09) e dezesseis (16) estacas estes danos foram avaliados em três (03) posições distintas na placa: canto, borda e centro. Com incrementos de carga em torno de 10N com estabilização deste carregamento devido a sensibilidade do sistema de aquisição dos dados até que fosse observado elevado incremento de recalque para qualquer incremento de carga.

A percentagem de carga que o radier distribui diretamente ao solo depende da razão entre espaçamento e diâmetro (s/d) das estacas, e da razão de área (Ag/A). Onde “Ag” é a área de projeção do grupo de estacas e “A” a área total do radier.

Para que o radier seja capaz de transmitir parte da carga diretamente ao solo, Mandolini (2007) sugere que as estacas tenham espaçamentos maiores que o usual no caso de  $Ag/A \approx 1$  (uniformemente distribuídas), ou que se concentrem em uma pequena área do bloco ( $Ag/A < 1$ ). Cooke (1986) apresentou como espaçamento crítico  $S_{crit}/D = 3$ , onde valores de  $S/D > 3$  há uma maior participação da placa e para valores menores as estacas se comportam como um conjunto. Para esta pesquisa por questões de geometria do sistema de reação e para minimizar a influência das condições de contorno foi utilizado o seguinte intervalo de razão de área e relação de espaçamento:

- $0,40 \leq (Ag/A) \leq 0,68$ ;
- $2,6 \leq S/D \leq 3,4$ .

Os espaçamentos entre as estacas nos grupos ensaiados são apresentados a seguir:

- Os casos de 4 estacas, o espaçamento médio é de  $S=3,4D$  e  $Ag/A = 0,40$ ;
- Os casos de 9 estacas, o espaçamento médio é de  $S=2,6D$  e  $Ag/A = 0,68$ ;
- Os casos de 16 estacas, o espaçamento médio é de  $S= 2,6D$  e  $Ag/A = 0,63$ .

Na Fig. 3.25 é apresentada a localização da estaca com dano e as estacas íntegras.

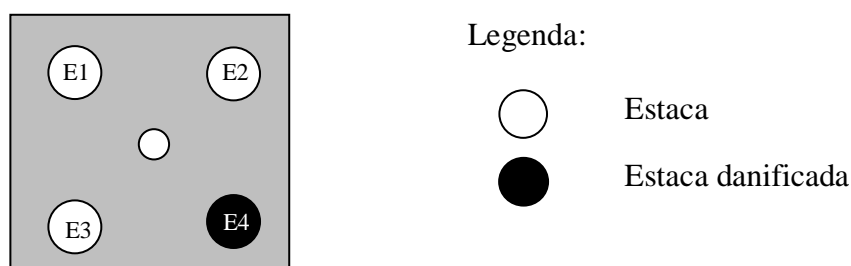


Figura 3.25 – Localização das estacas danificadas e íntegras.

A Fig. 3.26 apresenta as configurações dos ensaios com a localização das estacas íntegras e danificadas para todos os casos analisados. A numeração dos casos apresentados seguiu uma ordem predefinida e já apresentada em outro trabalho (Tavares, 2012) e por isso não foi alterada para esta pesquisa que irá focar somente nos casos supracitados, radiers estaqueados de 4, 9 e 16 estacas com e sem estacas danificadas. Os grupos de blocos estaqueados de 4, 9 e 16 estacas íntegros, sem contato com o solo, são apresentadas no apêndice para um estudo complementar comparativos com uma ferramenta numérica simplificada, este estudo também será detalhado no apêndice.

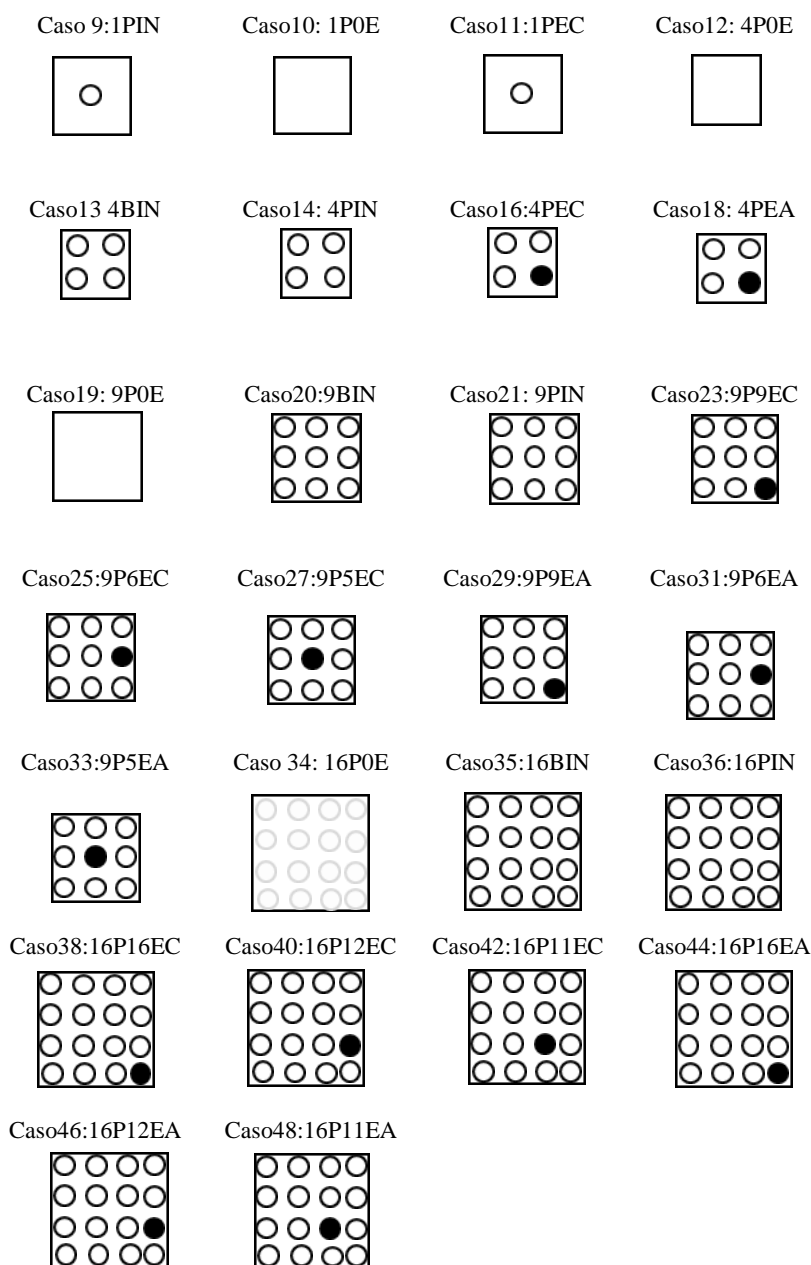


Figura 3.26 – Localização das estacas instrumentadas e danificadas.

O Grupo de Pesquisa em Fundações, Ensaios de Campo e Estrutura de Contensões da Universidade de Brasília vêm desenvolvendo pesquisas na área de grupos estaqueados e em conjunto com outro pesquisador (Tavares, 2012) foram realizados um total de 48 ensaios em dois tipos de modelos de estaca, sendo 8 ensaios de um primeiro modelo de estacas, caso 1 a caso 8, e 40 casos para o segundo modelo. Dentre estes, 16 casos são referentes aos casos dos grupos estaqueados em que o bloco não está em contato com o solo e 24 casos são referentes as placas e radiers estaqueados, estes últimos, serão analisados e discutidos neste trabalho, assim, para este trabalho serão apresentados e analisados 26 casos, 4 ensaios de grupos estaqueados sem contato com o solo, 4 ensaios de placas, 4 ensaios de radiers estaqueados íntegros e 15 ensaios de radiers estaqueados com a presença de dano. A Tab.3.4 apresenta a descrição de cada caso que será analisado neste trabalho.

Tabela 3.4 – Ensaios e condições dos ensaios realizados.

Nomenclatura de Ensaio		Descrição
Caso 9:	1PIN	Placa de 1 estaca (1P-95,2 <sup>2</sup> mm), com uma estaca sem dano (IN);
Caso 10:	1P0E	Placa de 1 estaca (1P-95,2 <sup>2</sup> mm), sem estaca (0E);
Caso 11:	1P1EC	Placa de 1 estaca (1P-95,2 <sup>2</sup> mm), com uma estaca curta (1EC);
Caso 12:	4P0E	Placa de 4 estacas (4P-80 <sup>2</sup> mm), sem estacas (0E);
Caso 13:	4BIN	Placa sem contato com o solo de 4 estacas (4B-80 <sup>2</sup> mm) com 4 estacas sem dano (IN);
Caso 14:	4PIN	Placa em contato com o solo de 4 estacas (4P-80 <sup>2</sup> mm) com 4 estacas sem dano (IN);
Caso 16:	4PEC	Placa de 4 estacas (4P-80 <sup>2</sup> mm) com 4 estacas com uma estaca curta (1EC);
Caso 18:	4P0E	Placa de 4 estacas (4P-80 <sup>2</sup> mm) com 4 estacas com uma estaca ausente (1EA);
Caso 19:	9P0E	Placa de 9 estacas (9P-105 <sup>2</sup> mm), sem estacas (0E);
Caso 20:	9BIN	Placa de 9 estacas sem contato com o solo (9B-105 <sup>2</sup> mm), com 9 estacas sem dano (IN);
Caso 21:	9PIN	Placa de 9 estacas (9P-105 <sup>2</sup> mm), com 9 estacas sem dano (IN);
Caso 23:	9P9EC	Placa de 9 estacas (9P-105 <sup>2</sup> mm) com 9 estacas, com uma estaca curta na posição 9, canto (9EC);
Caso 25:	9P6EC	Placa de 9 estacas (9P-105 <sup>2</sup> mm) com 9 estacas, com uma estaca curta na posição 6, borda (6EC);
Caso 27:	9P5EC	Placa de 9 estacas (9P-105 <sup>2</sup> mm), com 9 estacas, com uma estaca curta na posição 5, centro (5EC);
Caso 29:	9P9EA	Placa de 9 estacas (9P-105 <sup>2</sup> mm) com 9 estacas, com uma estaca ausente na posição 9, canto (9EA);
Caso 31:	9P6EA	Placa de 9 estacas (9P-105 <sup>2</sup> mm) com 9 estacas, com uma estaca ausente na posição 6, borda (6EA);
Caso 33:	9P5EA	Placa de 9 estacas (9P-105 <sup>2</sup> mm) com 9 estacas, com uma estaca ausente na posição 5, centro (5EA);



Nomenclatura de Ensaio		Descrição
Caso 34:	16P0E	Placa de 16 estacas (16P-143 <sup>2</sup> mm) sem estacas (0E);
Caso 35:	16BIN	Placa de 16 estacas sem contato com o solo (16B-143 <sup>2</sup> mm) com 16 estacas (16E);
Caso 36:	16PIN	Placa de 16 estacas (16P-143 <sup>2</sup> mm) com 16 estacas (16E);
Caso 38:	16P16EC	Placa de 16 estacas (16P-143 <sup>2</sup> mm) com 16 estacas, com uma estaca curta na posição 16, canto (16EC);
Caso 40:	16P12EC	Placa de 16 estacas (16P-143 <sup>2</sup> mm) com 16 estacas, com uma estaca curta na posição 12, borda (12EC);
Caso 42:	16P11EC	Placa de 16 estacas (16P-143 <sup>2</sup> mm) com 16 estacas, com uma estaca curta na posição 11, centro (11EC);
Caso 44:	16P16EA	Placa de 16 estacas (16P-143 <sup>2</sup> mm) com 16 estacas, com uma estaca ausente na posição 16, canto (16EA);
Caso 46:	16P12EA	Placa de 16 estacas (16P-143 <sup>2</sup> mm) com 16 estacas, com uma estaca ausente na posição 12, borda (12EA);
Caso 48:	16P11EA	Placa de 16 estacas (16P-143 <sup>2</sup> mm) com 16 estacas, com uma estaca ausente na posição 11, centro (11EA);

Para a preparação do solo dos primeiros modelos eram necessárias 9 horas para sua execução e mais uma hora para o ajuste do sistema de reação e o ensaio propriamente dito. Após isso, ainda se despendia mais 2 a 4 horas para retirar todo o solo do cilindro de ensaio, retirar a placa de reação e recolocar a caixa de areia para lançamento do solo para o próximo ensaio. Para este modelo eram realizados um ensaio para cada preparação, totalizando em torno de 14 horas para a realização completa de 1 ensaio, com o trabalho de duas pessoas, mais ajuda externa para a colocação da placa de reação.

Para o segundo modelo foi alterado o procedimento de preparação do solo para lançamento e compactação por camada, o que reduziu este processo para 4 horas. A preparação das fundações e a execução de 7 ensaios de um mesmo grupo, para 6 horas e mais 1 hora para desmonte do equipamento. Para este ciclo de ensaios foram utilizadas por 3 pessoas, totalizando 11 horas em um total de 7 ensaios.

**3.5.1. ANÁLISE A1: RADIER E RADIER ESTAQUEADO DE 1 ESTACA – Caso 9, Caso 10 e Caso 11**

Nesta análise são avaliados os comportamentos carga recalque do caso 10 que é a placa isolada de 95,20mm e dos radiers com uma estaca, íntegra (caso 9) e curta (caso 11), Fig. 3.27.

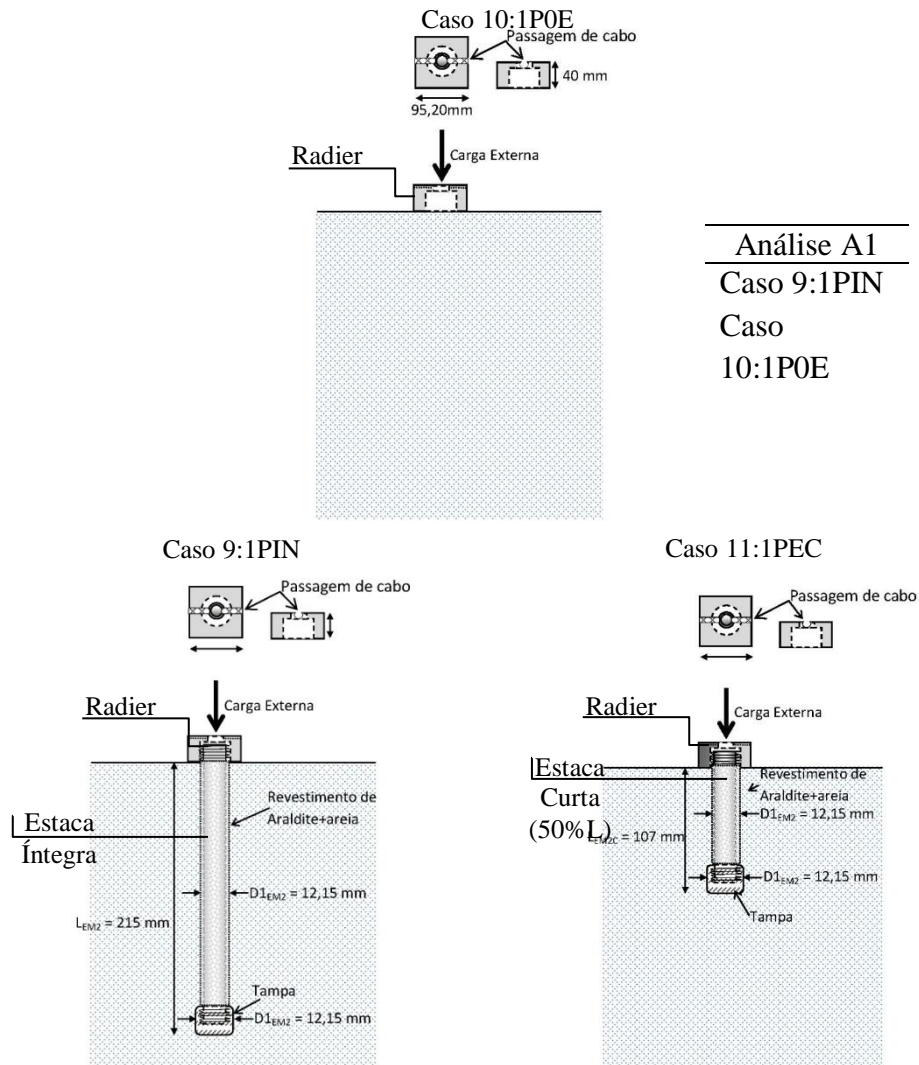


Figura 3.27 – Análise A1: Placa e Radier de 1 estaca – Caso 9, Caso 10 e Caso 11.

### 3.5.2. ANÁLISE A2: GRUPO DE 4 ESTACAS - Caso 12 ao Caso 18

A análise A2 avaliou dois tipos de dano, estacas curtas e estacas ausentes, no grupo de 4 estacas, considerando a placa em contato com o solo, Fig. 3.28.

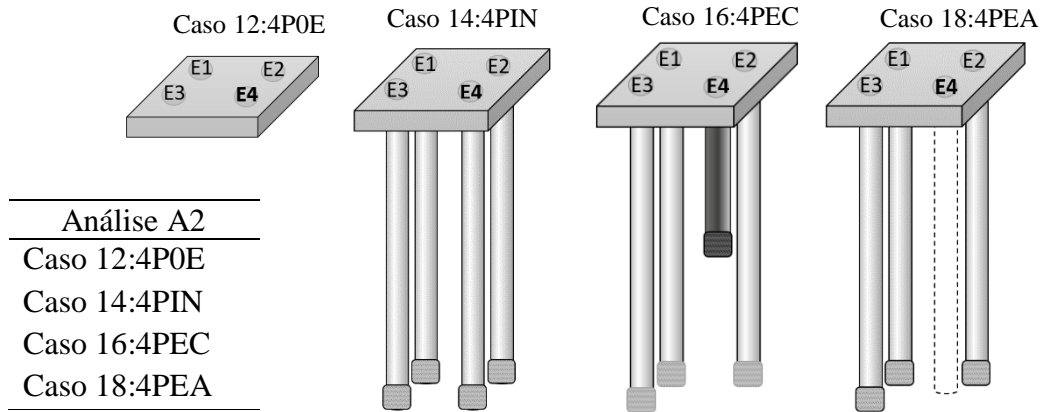


Figura 3.28 – Análise A2: Grupo de 4 estacas: Caso 12, 14, 16 e Caso 18.

A Tab. 3.5 apresenta o resumo dos parâmetros geométricos e elásticos utilizados nas análises realizadas para o radier estaqueado de 4 estacas.

Tabela 3.5 - Características do Radier estaqueado de 4 estacas.

$D_E$ (cm)	$A_E$ (cm <sup>2</sup> )	$t$ (cm)	$L$ (cm)	$L_D$ (cm)	$E_P$ (MPa)
1,471	1,7	1,27	21,5	10,7	$6,43 \times 10^4$
$H/L$	$S/D$	$D_P/D_{50}$	$\nu_P$	$\nu_S$	$\sigma_{aplic}$
2,3	3,4	67	0,34	0,35	<i>variável</i>
$FF$	$A_G/A_R$	$A_C/A_R$	$A_e/A_R$	$B$ (cm)	-
0,11	0,40	0,89	2,65%	8,0	-

$D_E$  - Diâmetro das estacas íntegras;  $A_E$  - Área da seção transversal das estacas;  $t$  - Espessura dos radiers com 4, 9 e 16 estacas;  $L$  - Comprimento da estaca íntegra;  $L_D$  - Comprimento da estaca curta;  $E_P$  - Módulo de elasticidade das estacas;  $H/L$  - Profundidade relativa;  $S/D$  - Espaçamento relativo;  $D_P/D_{50}$  - Relação do diâmetro da estaca com o diâmetro efetivo do grão;  $\nu_P$  - Coeficiente de Poisson da estaca;  $\nu_S$  - Coeficiente de Poisson do solo;  $\sigma_{aplic}$  - Tensão aplicada no centro do radier.  $A_G$  - Área do grupo de estacas;  $A_R$  - Área do radier;  $A_C$  - Área líquida de contato;  $A_e$  - Área da Estaca;  $B$  - largura da placa

### 3.5.3. ANÁLISE A3: GRUPO DE 9 ESTACAS - Caso 19 ao Caso 33

Para a análise A3, grupo de 9 estacas, foram avaliados diferentes posições e intensidades de danos. Os danos foram avaliados para a posição das estacas E5 (centro), E6 (borda) e E9 (canto). Estas posições representam os três tipos possíveis de danos individuais dentro deste grupo, Fig. 3.29.

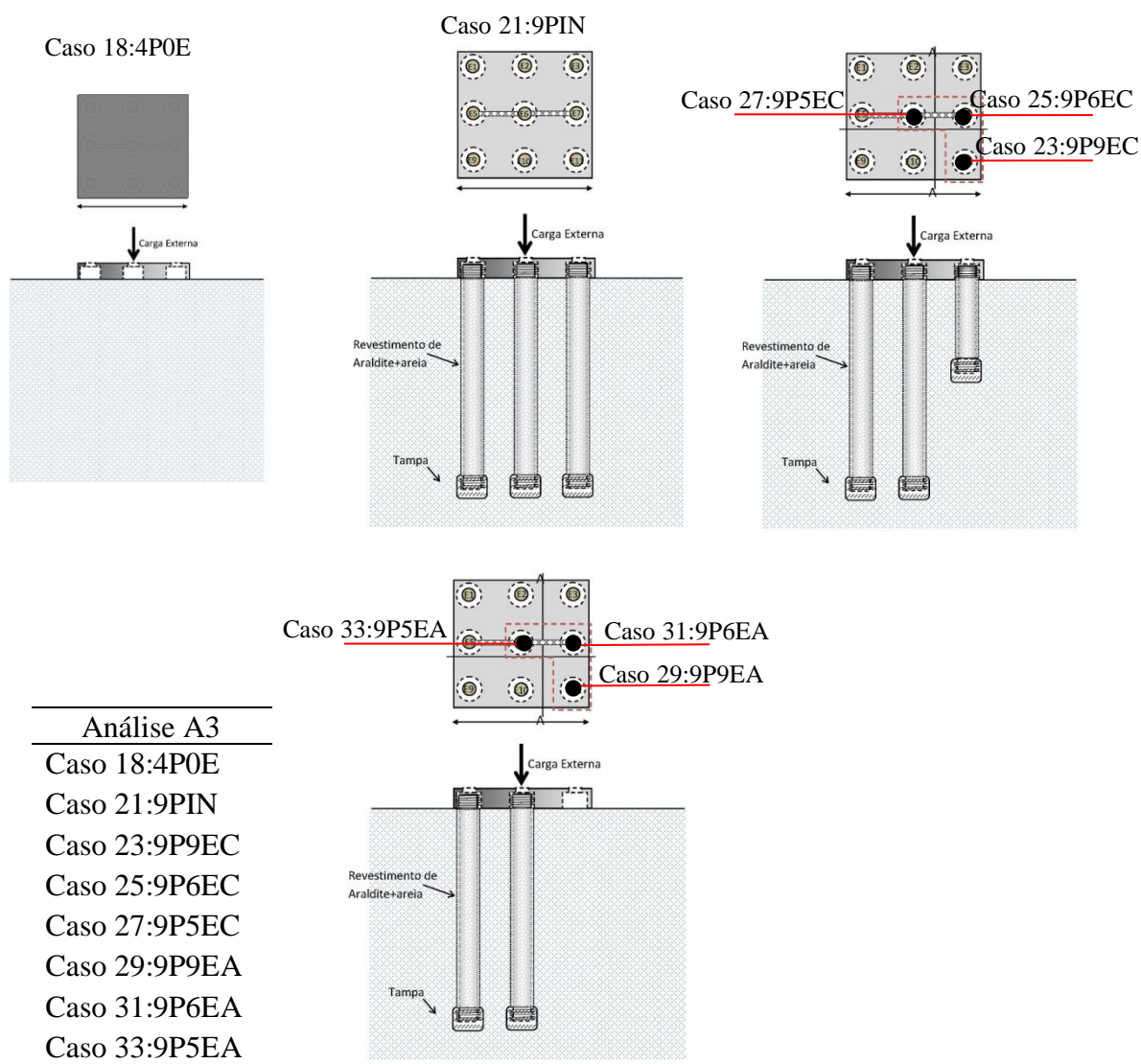


Figura 3.29 – Análise A3: Grupo de 9 estacas: Do Caso 19 ao Caso 33 – Posições E5, E6 e E9.

A Tab. 3.6 apresenta o resumo dos parâmetros geométricos e elásticos utilizados nas análises realizadas nesta pesquisa para o caso de 9 estacas. Os parâmetros que foram calculados são apresentados no apêndice deste trabalho.

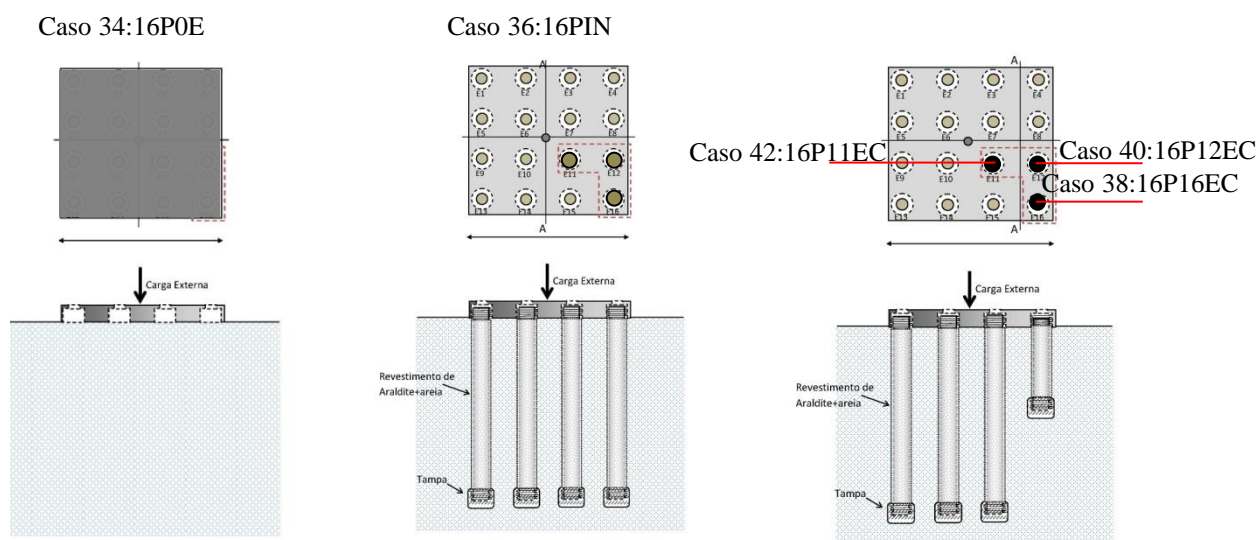
Tabela 3.6 - Características do Radier estaqueado de 9 estacas.

$D_E$ (cm)	$A_E$ (cm <sup>2</sup> )	$t$ (cm)	$L$ (cm)	$L_D$ (cm)	$E_P$ (MPa)
1,471	1,7	1,27	21,5	10,7	$6,43 \times 10^4$
H/L	S/D	$D_P/D_{50}$	$\nu_P$	$\nu_S$	$\sigma_{aplic}$
2,3	2,6	67	0,34	0,35	variável
FF	$A_G/A_R$	$A_C/A_R$	$A_e/A_R$	B (cm)	-
0,20	0,52	0,86	1,54%	10,5	-

$D_E$  - Diâmetro das estacas íntegras;  $A_E$  - Área da seção transversal das estacas;  $t$  - Espessura dos radiers com 9 estacas;  $L$  - Comprimento da estaca íntegra;  $L_D$  - Comprimento da estaca curta;  $E_P$  - Módulo de elasticidade das estacas;  $H/L$  - Profundidade relativa;  $S/D$  - Espaçamento relativo;  $D_P/D_{50}$  - Relação do diâmetro da estaca com o diâmetro efetivo do grão;  $\nu_P$  - Coeficiente de Poisson da estaca;  $\nu_S$  - Coeficiente de Poisson do solo;  $\sigma_{aplic}$  - Tensão aplicada no centro do radier.  $A_G$  - Área do grupo de estacas;  $A_R$  - Área do radier;  $A_C$  - Área líquida de contato;  $A_e$  - Área da Estaca; B - Largura da placa;

### 3.5.4. ANÁLISE A4: GRUPO DE 16 ESTACAS - Caso 34 ao Caso 48

Para a análise A4 foram estudados os casos do grupo de 16 estacas com diferentes posições de danos e dois níveis de dano: estaca curta e estaca ausente. As estacas danificadas foram avaliadas nas posições: E11 (centro), E12 (borda) e E16 (canto), em que também representam as possibilidades de danos individuais neste grupo, Fig. 3.30.



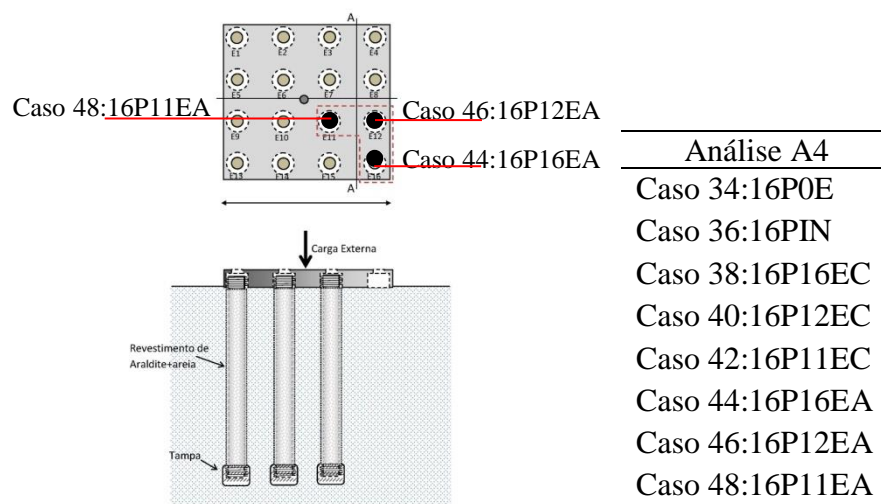


Figura 3.30 – Análise A4: Grupo de 16 estacas: Do Caso 34 ao Caso 48 – Posições E11, E12 e E16.

A Tab. 3.7 apresenta em resumo os valores elásticos do grupo de 16 estacas.

Tabela 3.7 - Características do Radier estaqueado de 16 estacas.

$D_E$ (cm)	$A_E$ (cm <sup>2</sup> )	$t$ (cm)	$L$ (cm)	$L_D$ (cm)	$E_p$ (MPa)
1,471	1,7	1,27	21,5	10,7	$6,43 \times 10^4$
A	S/D	$D_p/D_{50}$	$\nu_p$	$\nu_s$	$\sigma_{aplic}$
2,3	2,56	67	0,34	0,35	variável
FF	$A_G/A_R$	$A_C/A_R$	$A_e/A_R$	B (cm)	-
0,24	0,63	0,86	0,83%	14,3	-

$D_E$  - Diâmetro das estacas íntegras;  $A_E$  - Área da seção transversal das estacas;  $t$  - Espessura dos radiers com 4, 9 e 16 estacas;  $L$  - Comprimento da estaca íntegra;  $L_D$  - Comprimento da estaca curta;  $E_p$  - Módulo de elasticidade das estacas;  $H/L$  - Profundidade relativa;  $S/D$  - Espaçamento relativo;  $D_p/D_{50}$  - Relação do diâmetro da estaca com o diâmetro efetivo do grão;  $\nu_p$  - Coeficiente de Poisson da estaca;  $\nu_s$  - Coeficiente de Poisson do solo;  $\sigma_{aplic}$  - Tensão aplicada no centro do radier.  $A_G$  - Área do grupo de estacas;  $A_R$  - Área do radier;  $A_C$  - Área líquida de contato;  $A_e$  - Área da Estaca; B - Largura da placa;

### 3.6. PRINCIPAIS DIFICULDADES E AJUSTES NOS TESTES REALIZADOS

Este item está sendo incluído a fim de compartilhar com outros pesquisadores as principais dificuldades e alguns ajustes realizados nos experimentos, ajustes estes que ocasionaram grandes aprendizados, mas também consumiram bastante tempo no desenvolvimento desta pesquisa, que em muitas situações poderiam ter sido evitadas.

Esta pesquisa apresentou no estágio inicial outras configurações e modelos de estacas assim como outros procedimentos de preparação do solo que após análises, se observou que em alguns casos não se mantinham os parâmetros referenciais, como as densidades relativas, e os

níveis de confinamento, por exemplo, para que fossem avaliados apenas a alteração de uma variável por vez, como a influência da intensidade e posição do dano no grupo estudados.

### 3.6.1. PREPARAÇÃO DO SOLO

O primeiro deles foi com um dispositivo cilíndrico de madeira para a técnica de “chuva de areia” (*pluviation technique*). Nele a quantidade de solo era controlada pela sua massa, inserida no cilindro de madeira na parte superior do aparato até seu completo preenchimento. Em seguida, era realizado o seu lançamento pelo processo de abre-fechar, com giro ao redor do eixo, conforme Fig. 3.31. Os furos sob a caixa de areia foram uniformemente distribuídos para propiciar um melhor espalhamento do material. Os lançamentos eram realizados até o preenchimento de cada camada pré-definida e delimitada no interior da caixa de ensaio.

Com a utilização deste procedimento não se conseguiu a compactidade suficiente para que fosse possível a leitura das deformações nas estacas. Para baixos níveis de carregamento a estacas atingia ruptura geotécnica, por isso, buscou-se outro procedimento.

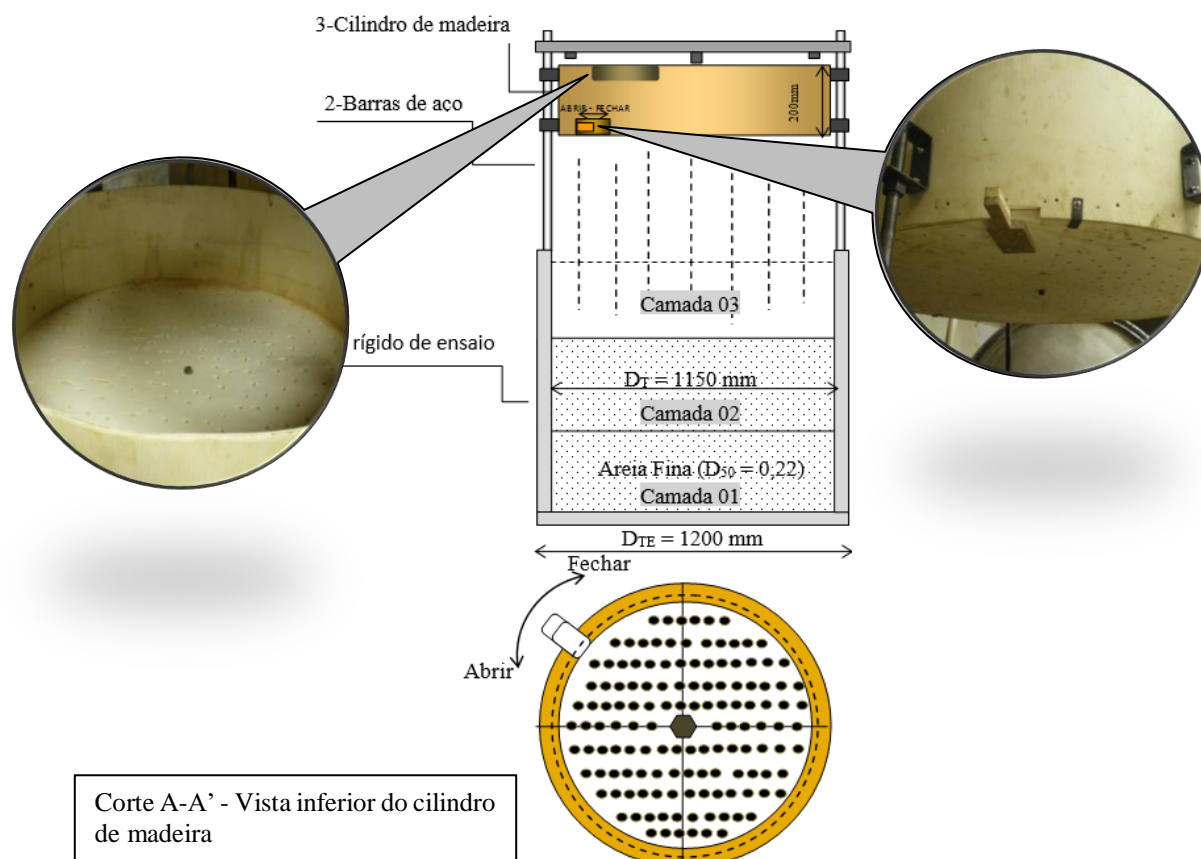


Figura 3.31 – Modelo esquemático do sistema de “chuva de areia” em modelo reduzido, 1g.

A Fig. 3.32 apresenta em detalhe o momento do lançamento da areia para preenchimento e nivelamento da camada.

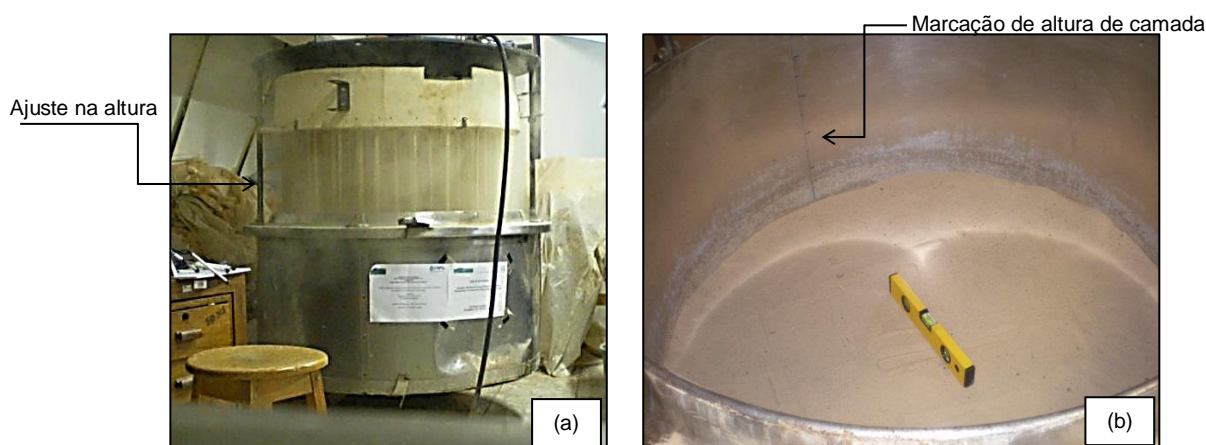


Figura 3.32 – Preparação do modelo do solo. EM1: Solo AP – Areia pluviada, com uso da técnica de “Chuva de Areia”.

Um segundo procedimento de preparação do solo foi após o pluviamento da areia utilizar um vibrador de concreto do tipo mangote para densificar o material, Fig. 3.33. Para a realização do procedimento, cinco locais foram escolhidos para a densificação por um período predefinido. Estes locais eram os pontos onde seriam aplicadas as cargas para cada ensaio. Procurou-se não deixar tocar o vibrador na parede do cilindro do ensaio.

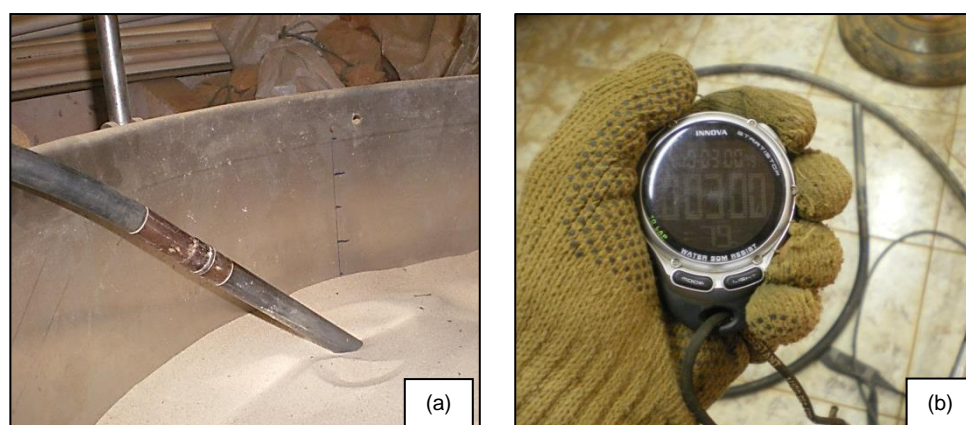


Figura 3.33 – Preparação do modelo do solo: (a) Solo APV (EM<sub>2</sub>) – Areia pluviada e vibrada, com uso do vibrador tipo mangote; (b) controle da vibração pelo tempo com o uso de cronômetro.

Porém, com estas técnicas não foi possível um controle mais preciso da repetibilidade das densidades tanto horizontalmente quanto na vertical, das 3 camadas definidas.

### 3.6.2. INSTRUMENTAÇÃO DAS ESTACAS

Os primeiros modelos de estacas utilizadas nesta pesquisa, denominados E1, foram de tubos de alumínio em que a instrumentação com *strain gauges* (SG) foi fixada externamente nas suas extremidades, Fig. 3.34a. A fiação destas estacas se dava internamente, para o caso



dos SG da base, mas as conexões com os transdutores ainda eram externas, o que diversas vezes provocou a ruptura destes fios. Como já mencionado, trata-se de um modelo de encaixe nas placas, o que não permitia a verticalidade destas quando iniciado o carregamento ou mesmo durante a fase de preparação do ensaio.

A partir daí foi desenvolvido o modelo  $E_{M2}$ , conforme Fig. 3.34b, em que a instrumentação foi realizada por dentro das estacas que ainda eram de tubos de alumínio, mas bi-partidas no formato “meia-cana”. Neste modelo foi inserido mais um nível de instrumentação no meio da estaca. A fiação passava por dentro da estaca e a proteção destes fios aumentou com o uso de silicone. Para manter a verticalidade as estacas foram rosqueadas nas placas.

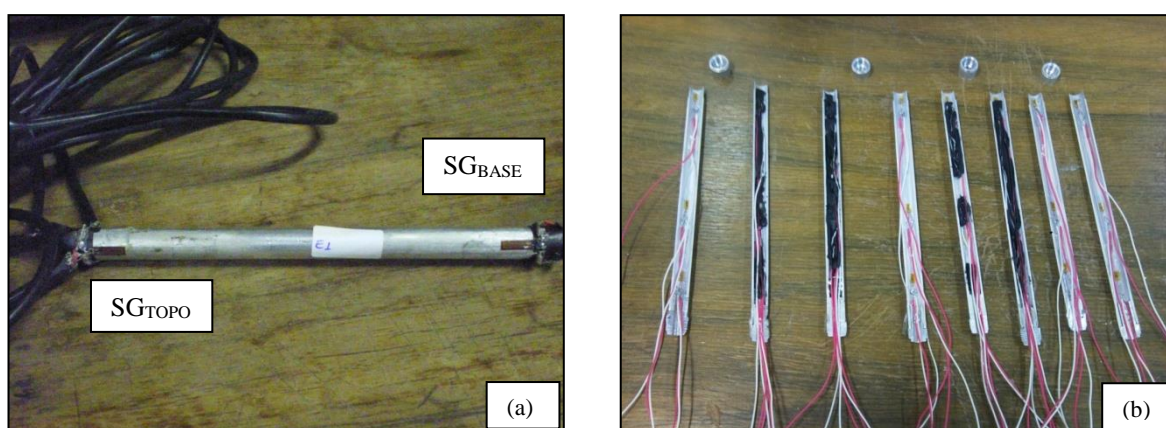


Figura 3.34 – Estacas em modelo reduzido, 1g: (a) Estaca modelo 01- $E_{M1}$  (b) Estaca modelo 02- $E_{M2}$  com corte longitudinal tipo “meia-cana”.

Os detalhes da instrumentação para os dois modelos de estacas são apresentados na Fig. 3.35 e Fig. 3.36.

Estaca  $E_{M1}$  – Instrumentação Externa, sem roscas (embutida na placa).

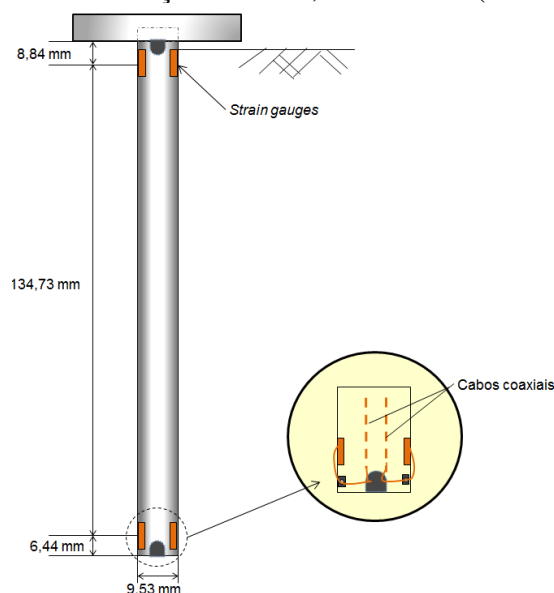
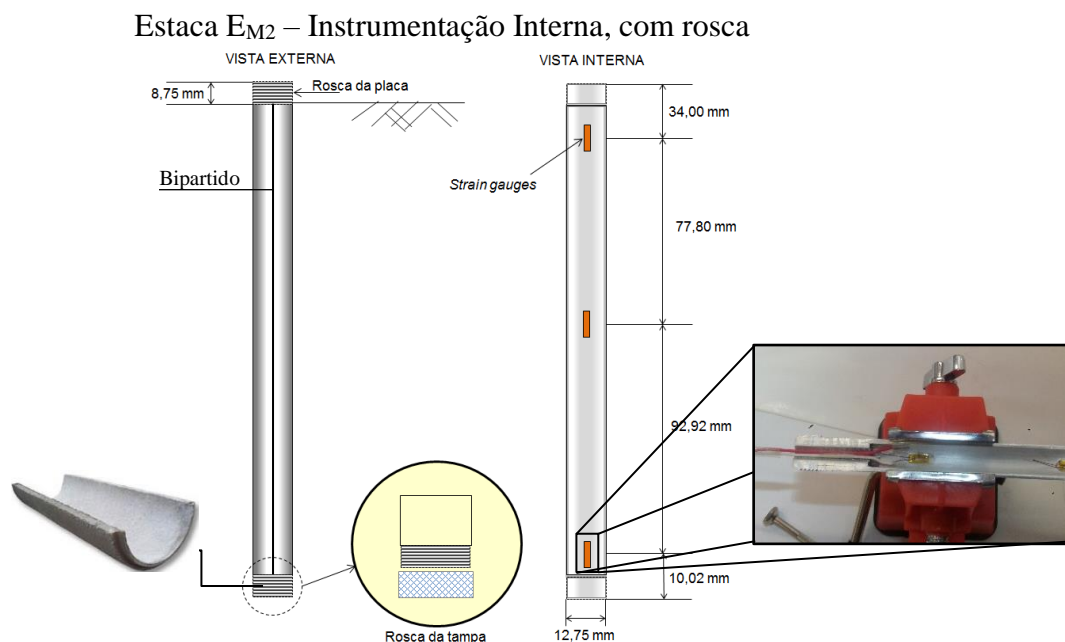
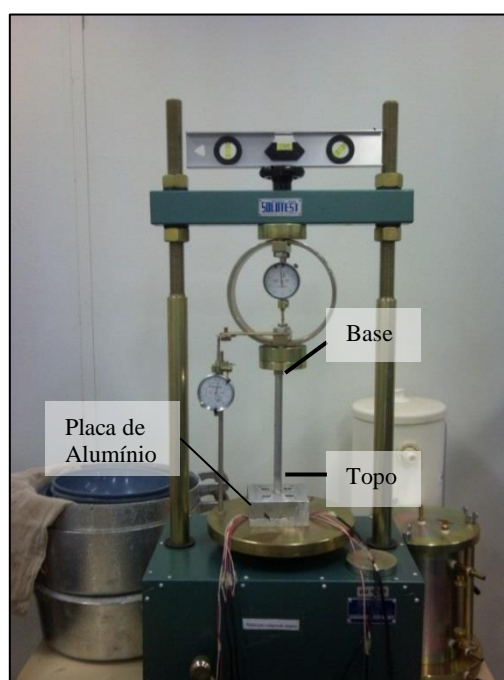


Figura 3.35 – Estacas em modelo reduzido, 1g: (a) Estaca modelo 01- $E_{M1}$ .



O procedimento de calibração das estacas consistiu na aplicação de esforços axiais de compressão nas barras instrumentadas por meio de uma prensa uniaxial, Fig. 3.37, e registradas as deformações sofridas em cada estaca determinando assim, o carregamento aplicado em cada um dos seis (06) *strain gauges*.



A calibração estabeleceu a relação entre os valores de deformação indicados pelo instrumento de medição e os valores correspondentes a uma medida padrão.

### 3.6.3. SIMULAÇÃO DOS DANOS

As estacas do primeiro modelo ( $E_{M1}$ ) foram divididas em seis classificações. A primeira referente as estacas íntegras que apresentam suas dimensões originais de referência, ( $E_{IN1}$ ), Fig. 3.38a. As outras categorias estão relacionadas aos danos estruturais e “geotécnicos”, tais como o solo mole sendo representado por uma massa de modelar. Os danos estruturais são:

1. A estaca curta ( $EC_1$ ) apresenta 50% do comprimento da estaca íntegra, Fig. 3.38b.
2. A estaca com ruptura rápida (ERR) apresenta corte de 45° na metade do comprimento da estaca e é utilizado adesivo plástico da Tigre® para manter o contato entre a parte superior e a parte inferior da estaca, Fig. 3.38c;
3. A estaca com ruptura lenta (ERL) apresenta corte de 45° na metade do comprimento da estaca e é utilizada fita adesiva (polipropileno de acrílico transparente) para manter o contato entre a parte superior e a parte inferior da estaca, Fig. 3.38d;
4. A estaca E4 ausente ( $EA1$ ) é a desconsideração da capacidade de carga da estaca, ou simplesmente 0%L, situação considerada por muitos projetistas para qualquer nível de dano;



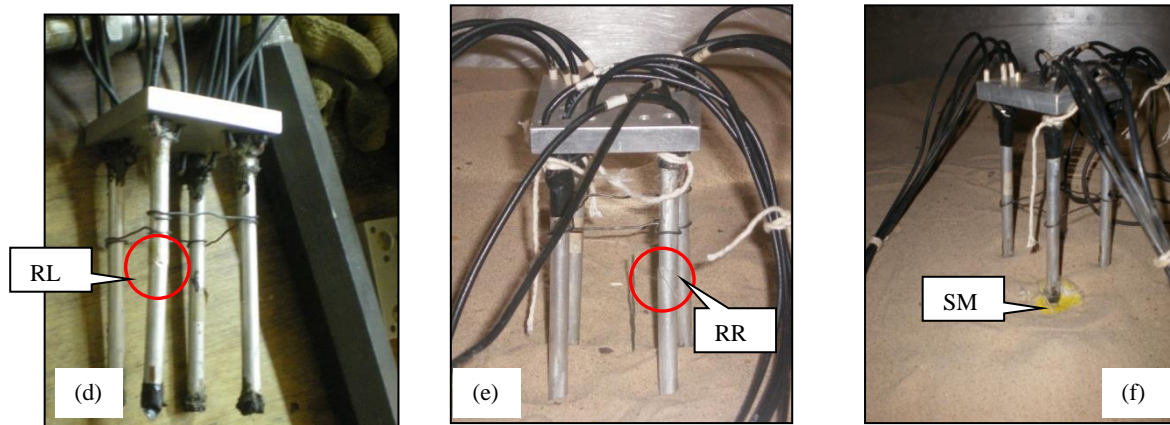


Figura 3.38 – Estacas do modelo  $E_{M1}$ : (a) Estaca Íntegra ( $E_{IN1}$ ) (b) Estaca Curta ( $EC_1$  - 50% do comprimento da estaca íntegra) e (c) Estaca danificada (corte de  $45^\circ$  na metade do comprimento da estaca íntegra); (d) Ruptura Lenta (ERL); (e) Ruptura Rápida (ERR); (f) Solo mole (SM).

Após a realização dos ensaios percebeu-se que os resultados não apresentam uma resposta coerente com a esperada, então os ensaios eram repetidos e os procedimentos checados, mas ainda assim, os resultados não foram suficientes e decidiu-se por retirá-los desta pesquisa.

### 3.7. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram descritos os procedimentos e os ensaios realizados para avaliar o comportamento de distribuição de carga do radier estaqueado com e sem estacas danificadas, além dos detalhes da preparação das estacas, dos blocos, dos carregamentos e dos procedimentos de ensaio que foram realizados em areia sob carregamento vertical em um tanque cilíndrico.

A escala geométrica do modelo utilizado foi de 1/30, com o intuito de avaliar qualitativamente o comportamento de fundações em radiers estaqueados para melhor compreender a influência de um dano, tanto em posição quanto em magnitude em três grupos pré-estabelecidos. Utilizaram-se as dimensões das fundações do trabalho de Freitas Neto (2013) como protótipo.

O programa experimental detalhou a construção do sistema de prova de carga em modelo reduzido com nível de tensão de 1g, a realização de ensaio de laboratório e descreveu como foram realizadas as provas de carga.

E ao final deste capítulo foram apresentadas as principais dificuldades e alguns ajustes que se fizeram necessários para a conclusão desta pesquisa que podem ser elencados a seguir:

- A forma de preparação do solo sofreu alteração de modo a buscar a forma que apresenta a melhor repetibilidade quanto às densidades relativas ( $D_R$ );
- O modelo das estacas sofreu alteração visando buscar conexões engastadas entre as estacas e as placas para garantir a verticalidade nas estacas, tanto durante o processo de instalação quanto no de execução dos ensaios;
- O espaçamento utilizado entre os grupos de estacas foi superior ao recomendado pela literatura (5d), conforme Garnier e Konig (1998).
- O comportamento do sistema foi avaliado principalmente pela curva carga-recalque por meio dos medidores de deslocamento vertical e células de carga;

Desta forma, para os ensaios desta Tese, se utilizou da seguinte metodologia e dos seguintes materiais:

- Preparação do Solo:** Lançamento da areia com massa e volume controlados com o uso de placa metálica para compactar, com 10kPa, 20kPa e 30kPa de energia com espessura de camada de 10cm, 20cm e 20cm, em 4 pontos por camada;
- Fundações Utilizadas:** Foram utilizadas as placas quadradas de 1P (95,25<sup>2</sup>mm), 4P (80<sup>2</sup>mm), 9P (105<sup>2</sup>mm) e 16P (143<sup>2</sup>mm). As estacas utilizadas foram do modelo  $E_{M2}$ , bipartida;
- Danos Simulados:** Variou-se o comprimento da estaca íntegra para simular o dano, em 50%L (estaca curta) e em 0%L (estaca ausente). Para o grupo de 9 e 16 estacas, variou-se também a posição destes danos, na posição de canto, borda e centro do grupo;
- Instalação das Estacas:** As fundações foram prensadas com o auxílio de cilindro hidráulico até atingir a altura previamente definida;
- Procedimento Executivo:** Os ensaios seguiram uma ordem de execução para os mesmos grupos. Para o caso dos grupos de 9 e 16 estacas, os ensaios foram agrupados de acordo com o tipo de dano, variando-se a posição deste;
- Ensaio auxiliares:** Alguns ensaios foram realizados com o objetivo de auxiliar na interpretação de algum parâmetro ou ferramenta. Por exemplo, os ensaios das placas auxiliaram na determinação do fator de redução de recalque. Os ensaios das placas de uma estaca e os ensaios dos grupos de 4, 9 e 16 estacas em que o bloco não está em contato com o solo, auxiliaram no comparativo da ferramenta numérica simplificada.

### 4. RESULTADOS E ANÁLISES

#### 4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados experimentais dos ensaios em modelo 1g que descrevem o comportamento dos radiers estaqueados em função da presença e localização do dano.

Os ensaios forneceram as seguintes informações:

- Capacidade de carga;
- Comportamento carga-recalque com a presença de estacas danificadas;
- Determinação dos fatores de segurança com a presença de estacas danificadas;
- Fator de distribuição de carga com a profundidade,  $\alpha_{pr}$ .

De modo a auxiliar nas interpretações das análises em questão, foram determinados também:

- As rigidezes dos sistemas,  $K$ ;
- O incremento do recalque;
- O fator de redução de recalque,  $S_r$ ;
- O fator de redução de rigidez,  $R_{ks}$ .

Existem diversos critérios para determinação da carga de ruptura convencional, e para esta tese adotou-se como critério para a determinação da carga de ruptura convencional, proposta de Décourt (1993), Décourt (1993/1995) e Décourt (1995), as quais indicam que a carga de ruptura convencional para estacas de deslocamento e estacas escavadas, deve ser equivalente ao recalque correspondente a 10% do seu diâmetro nominal.

Tendo em vista que, em muitos casos, as curvas carga-recalques obtidas experimentalmente para os radiers ensaiados não evidenciaram ruptura geotécnica nítida, estabeleceu-se que a carga de ruptura seria aquela resultante desta própria curva, para um deslocamento igual a 10% do diâmetro nominal da estaca. Portanto, as cargas convencionadas ( $Q_C$ ) para o sistema estaqueado foram para um deslocamento de 1,47mm.

As fundações em radier estaqueado íntegros foram utilizadas como referência para a

determinação da carga máxima aplicada para em seguida se estimar a Carga Limite de Serviço ( $Q_L$ ) das estacas intactas, referente a um “Fator de Segurança” (FS) igual a dois (2,0), para fins de padronização e de acordo com a NBR 6122/2010, Eq. 4.1.

$$Q_{LS} = \frac{Q_C}{FS} \quad (4.1)$$

Para a determinação dos Fatores de Segurança na presença de estacas danificadas (FS), foram mantidas as Cargas Limite de Serviço ( $Q_{LS-IN}$ ) e utilizadas as novas Cargas Convencionadas para os grupos com estacas defeituosas ( $Q_{C-DANO}$ ), Eq. 4.2.

$$FS = \frac{Q_{C-DANO}}{Q_{LS-INTACTO}} \quad (4.2)$$

A Fig. 4.1 apresenta um exemplo esquemático da curva carga-recalque com a identificação das variáveis apresentadas anteriormente.

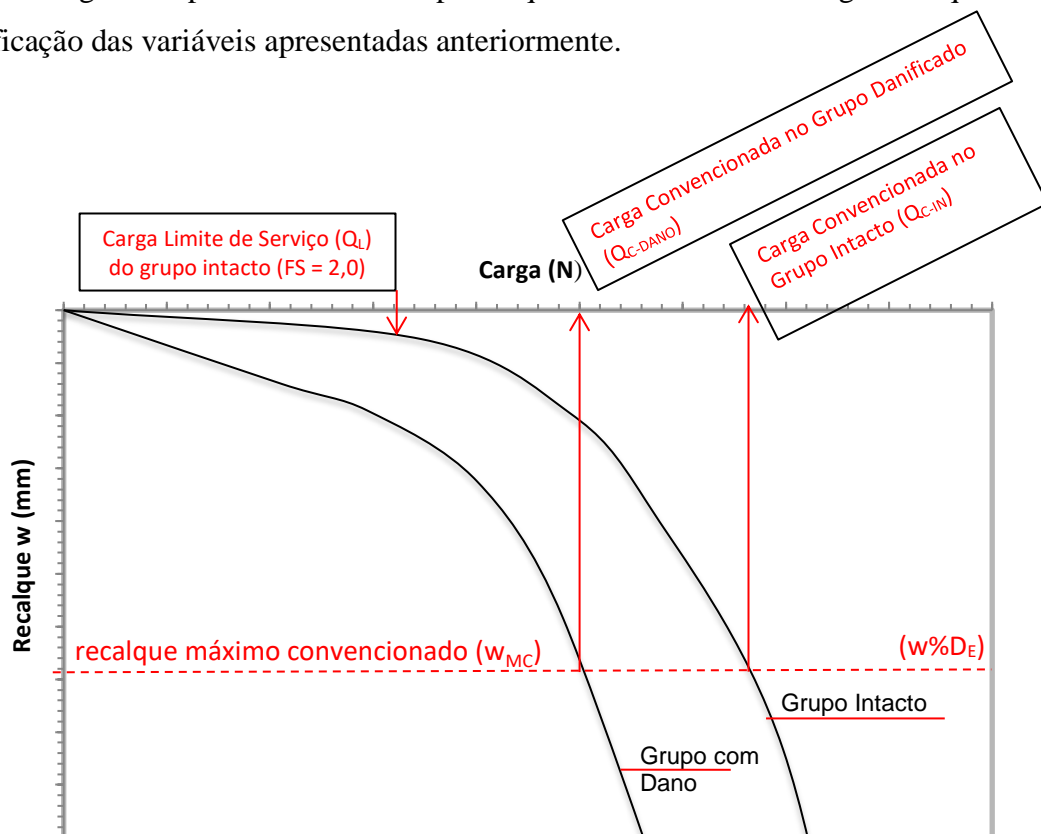


Figura 4.1 – Gráfico Esquemático com identificação das variáveis utilizadas.

O percentual de carga do conjunto dos elementos da fundação em radier estaqueado foi determinado pela diferença entre a carga total aplicada no sistema e a carga absorvida somente pelas estacas nos grupos estaqueados em um mesmo nível de deslocabilidade entre os casos.

Na série de testes realizados todas as forças são verticais e paralelas ao eixo principal e foram variados os comprimentos das estacas em duas situações de modo a simular o dano, 50%L, para as estacas curtas (EC) e 0%L, para as estacas ausentes (EA), em três posições distintas, posição de canto, borda e centro do bloco, conforme Fig. 3.27 apresentada no capítulo anterior, para os grupos de nove (09) e dezesseis (16) estacas. As dimensões dos radiers variam de acordo com o número de estacas ensaiadas, quatro (4), nove (9) e dezesseis (16) estacas.

Em geral são discutidos os resultados relacionados ao “novo” comportamento do sistema quando possui estacas com dano. Assim os resultados foram divididos em dois grupos, um quanto à resistência e segurança e o outro quanto a rigidez e deslocamentos.

Os parâmetros relacionados à resistência e segurança foram relacionados aos valores de cargas convencionadas e as cargas limites de serviço (cargas de trabalho), com a variação dos fatores de segurança reais de acordo com o incremento de carga, posição, intensidade do dano e do fator de distribuição de carga ( $\alpha_{pr}$ ).

Já os parâmetros relacionados às rigidezes e deslocamentos são apresentados em função dos incrementos de recalques, fator de redução de recalque e fator de redução de rigidez ( $Rks$ ).

## **4.2. RESISTÊNCIA E SEGURANÇA**

### **4.2.1. INTRODUÇÃO**

Neste item são apresentadas as curvas carga-recalque que auxiliam a determinação da carga convencionada pelo recalque admitido de 10% do diâmetro da estaca. A partir daí, são calculados os fatores de segurança de cada sistema (com base nos critérios de carga limite convencionados), ou seja, a relação entre a carga convencionada do grupo em análise com dano pela carga de limite (50% carga limite convencionada) do grupo intacto.

### **4.2.2. RADIERS**

Os resultados das provas de carga realizadas nos radiers isolados, cujas dimensões são as mesmas dos radiers estaqueados, são apresentados e analisados nos gráficos da Fig. 4.2. As provas de carga direta foram realizadas sobre os radiers assentes em areia compactada. Para as fundações superficiais também foram adotados o valor de 10% do diâmetro da estaca como limite máximo de recalque admissível referente a capacidade de carga convencionada ( $Q_C$ ).



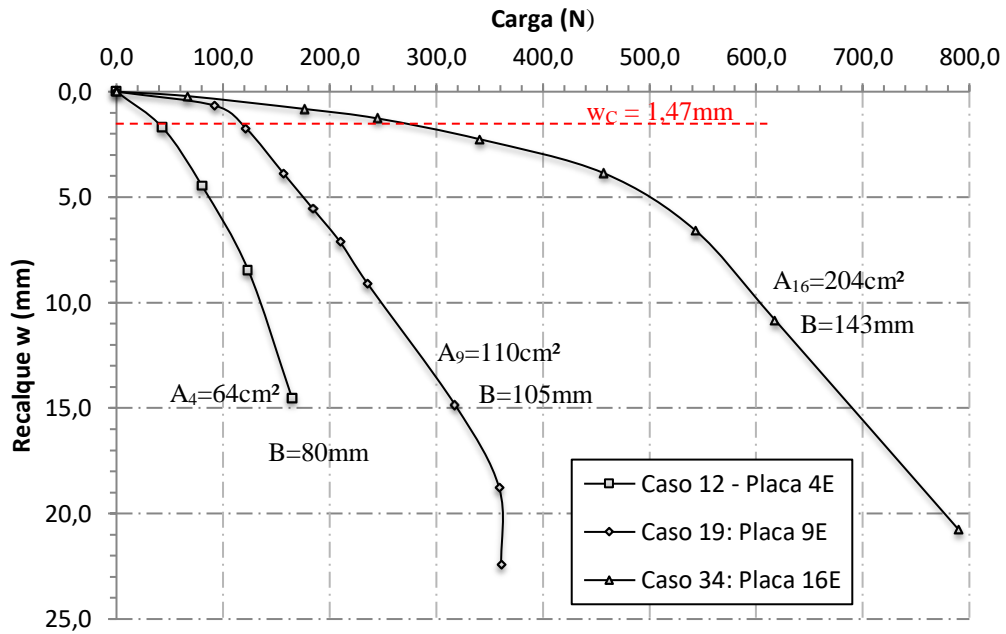


Figura 4.2 – Curva carga recalque para o radier isolado de 4, 9 e 16 estacas.

A Fig. 4.3 apresenta o comportamento dos radiers isolados de 4, 9 e 16 estacas, em que o recalque normalizado foi determinado pela relação entre o recalque medido e a largura do respectivo radier, enquanto a carga normalizada foi determinada pela relação da carga medida e a carga convencionalizada referente a um deslocamento de 10% da largura do respectivo radier isolado.

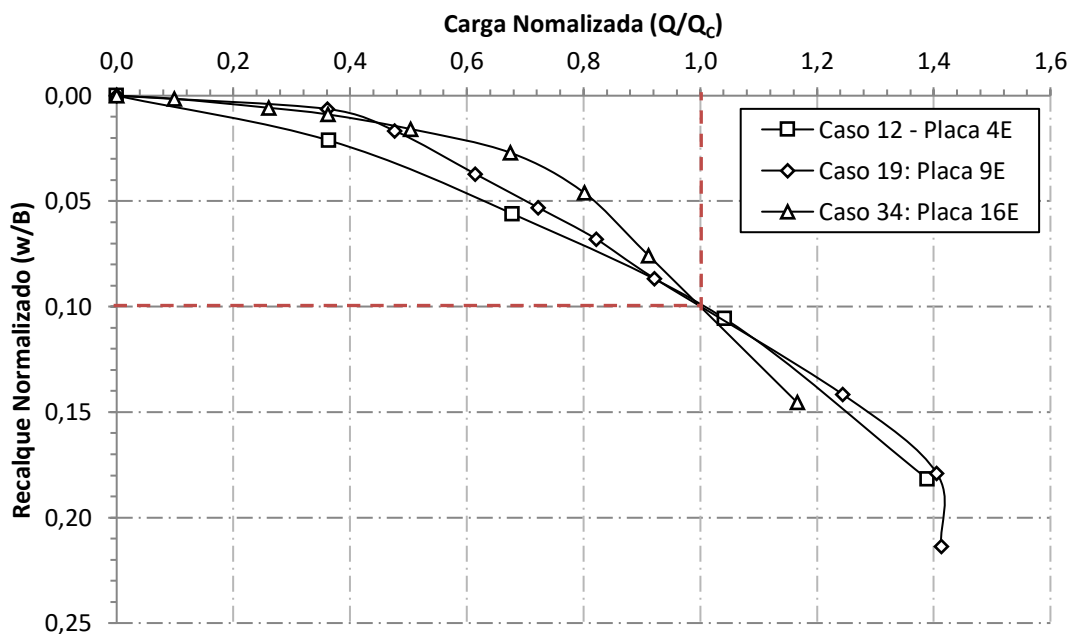


Figura 4.3 – Comportamento carga versus recalque normalizados para o radier isolado de 4, 9 e 16 estacas.

A partir dos critérios estabelecidos foram obtidos os valores de carga de ruptura convencionados com recalque de cada caso e os respectivos fatores de segurança (Tab. 4.1). Pode-se observar que com o aumento da área efetiva de cada bloco, este tende a apresentar maior capacidade de carga em relação à placa menor, porém, nos três casos apresentados, os níveis do comportamento carga-recalque ainda se apresentama no trecho elástico, caracterizado como primeiro trecho da teoria trilinear (PDR-Poulos, Davis, Randolph), (Poulos, 1998). As curvas carga-recalque das fundações superficiais não apresentaram ruptura geotécnica convencional (física), mas pode-se observar uma tendência de aproximação da zona plástica deste elemento de fundação.

Tabela 4.1 – Valores de carga referentes ao critério de recalque equivalente a 10% $D_E$ .

Caso	$Q_c$ (N)	$Q_{LS}$ (N)	$W_{MC}$ (mm)	$W_{LS}$ (mm)	$Q_{LS}/Q_c$	FS
Caso 12: 4P	37,2	18,7	1,47	0,74	50%	2,00
Caso 19: 9P	114,3	57,1	1,47	0,41	50%	2,00
Caso 34: 16P	264,6	132,3	1,47	0,57	50%	2,00

#### 4.2.3. RADIER DE 4 ESTACAS – Dano: Estaca Curta (50%L) e Ausente (0%L)

Para os testes em radiers com quatro (04) estacas foram avaliados os danos em estaca curta, com 50%L (EC) e estaca ausente, com 0%L (EA), em uma das quatro estacas do grupo. As Figs. 4.4 e 4.5 apresentam, respectivamente, uma seção em planta e as configurações para o radier estaqueado de 04 estacas.

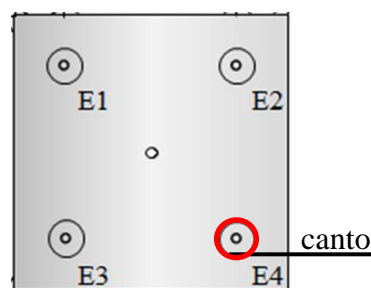


Figura 4.4 - Localização da estaca danificada.

4PIN      4PEC      4PEA

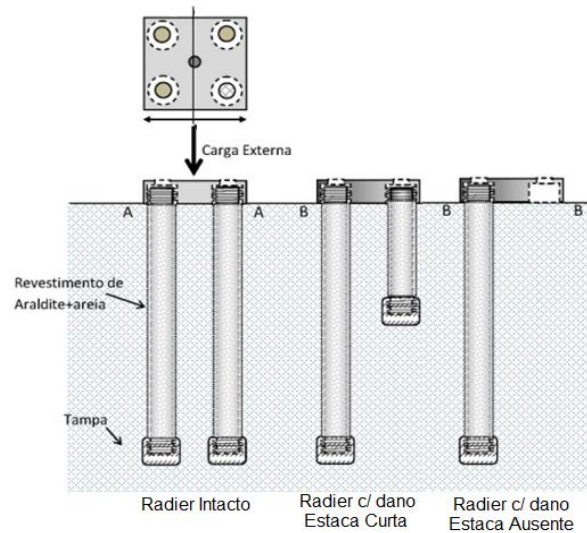


Figura 4.5 – Configurações analisadas para o ensaio de radier estaqueado com 4 estacas.

A Fig. 4.6 apresenta as curvas completas dos ensaios carga-recalque obtidas nos ensaios 1g sobre uma estaca com defeito, haja vista ser um grupo simétrico, logo sem haver a necessidade de simulação em outra posição de estaca. Para este grupo o espaçamento utilizado foi de  $3,4D_E$  com largura do bloco de  $B = 80$  mm e a espessura  $e = 12,7$  mm.

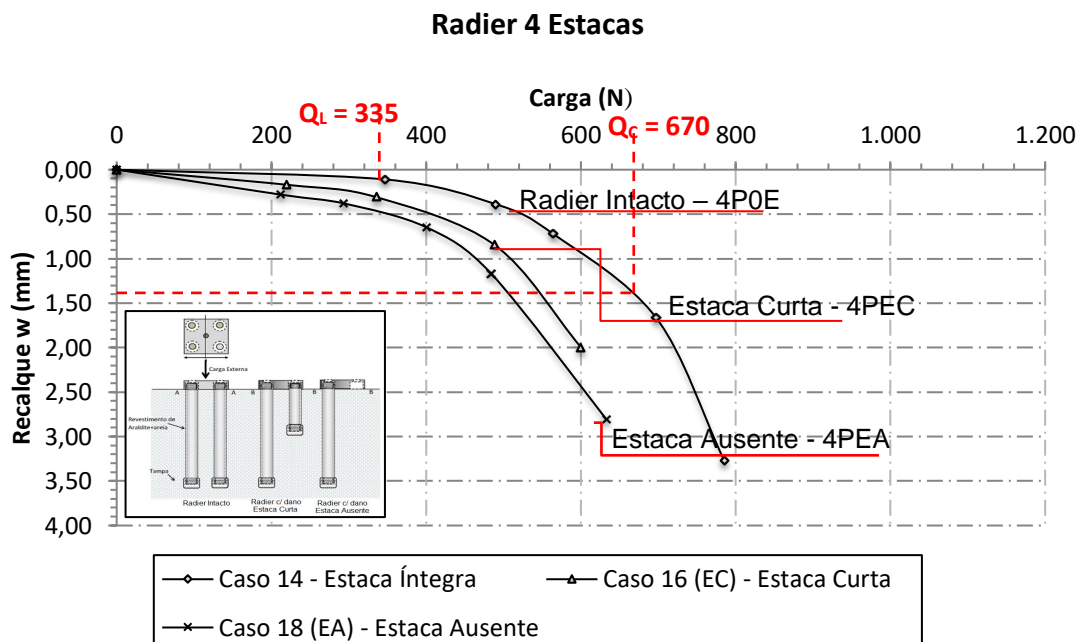


Figura 4.6 - Curva completa carga-recalque para o radier de 4 estacas com estaca curta e ausente.

Para este gráfico pode-se notar que no trecho entre a carga de 440N e 600N as curvas encontram-se paralelas entre si.

A Fig. 4.7 apresenta o comportamento normalizado da curva carga-recalque, tanto para o carregamento aplicado em função da carga convencional ( $Q_C$ ) do radier estaqueado

com as estacas intactas quanto o recalque limite convencionado (1,47mm) pela largura da placa (B) sobre quatro (04) estacas. Neste gráfico são destacados os percentuais dos incrementos de carga em relação a  $Q_C$  e a semelhança entre as curvas com presença de uma estaca danificada, nele é observado o maior recalque quanto mais intenso o dano e o decréscimo da rigidez, em maior destaque para  $Q/Q_C$  menores que 50%. Destaca-se ainda um maior incremento de recalque quando da aproximação de 80% do valor de  $Q_C$ , ponto que o dano começa a se manifestar.

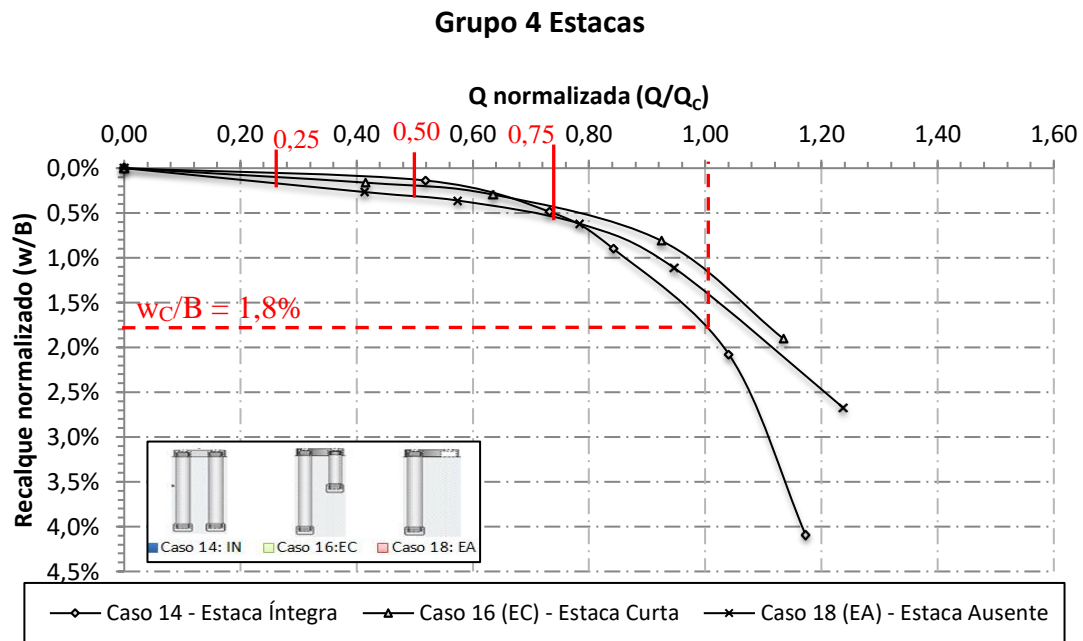


Figura 4.7 - Curva normalizada carga-recalque para o radier de 4 estacas com estaca intactas, curta e ausente.

Para melhor avaliar o comportamento carga-recalque dos radiers estaqueados de 4 estacas a Fig. 4.8 apresenta os deslocamentos de até 2,0 mm dos grupos estudados, para recalques onde notam-se que as estacas já estão sendo completamente mobilizadas e que o radier, a partir deste ponto, teria um papel mais importante, pois estes definiriam o comportamento do conjunto, devido a transferência de carga para este elemento.

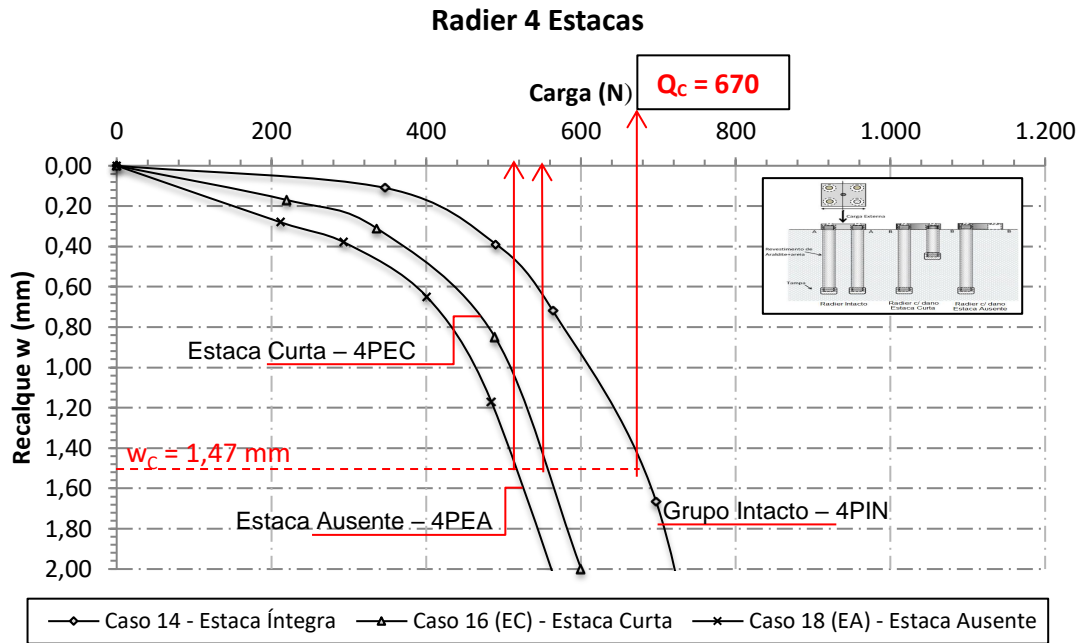


Figura 4.8 - Detalhe da curva carga-recalque para o Radier de 4 estacas com estaca curta e ausente.

A Tab. 4.2 apresenta resumidamente os valores de carga máxima convencional (última), a carga de limite de serviço (trabalho), recalques, a relação entre a carga convencional do grupo danificado (grupo com a estaca curta (4PEC) e com a estacas ausente (4PEA)) e do grupo intacto (4PIN), as perdas de capacidade de carga e os fatores de segurança reais. A perda de capacidade de carga (%PC) foi determinada pela diferença percentual entre as cargas convencionadas dos radiers estaqueados intactos ( $Q_{C-IN}$ ) e os radiers estaqueados que apresentam dano ( $Q_{C-DANO}$ ), conforme Eq. 4.3.

$$\%PC = \frac{(Q_{C-IN} - Q_{C-DANO})}{Q_{C-IN}} \times 100 \quad (4.3)$$

Tabela 4.2 - Valores de carga referentes ao critério de recalque máximo.

Caso	$Q_C$ (N)	$Q_L$ (N)	$w_C$ (mm)	$w_L$ (mm)	$Q_{C-DANO}/Q_{C-IN}$	Perda de capacidade de Carga	FS ( $Q_{C-DANO}/Q_{L-IN}$ )
Caso 14: 4PIN	669,7	334,9	1,47	0,11	1,00	0%	2,00
Caso 16: 4PEC	529,0	264,5	1,47	0,20	0,79	21%	1,58
Caso 18: 4PEA	511,5	255,8	1,47	0,33	0,76	24%	1,53

\*4PIN: Grupo Intacto; 4PEC: Estaca Curta; 4PEA: Estaca Ausente.

A Fig. 4.9 apresenta a variação dos fatores de segurança em função do incremento de carga. Para os níveis iniciais de carregamento ( $25\%Q_{C-IN}$ ), nota-se uma perda do fator de segurança de 21% em relação ao grupo com estaca curta ( $50\%L$ ) e 23,5% em relação ao

grupo com a estaca ausente (0%L). Com o incremento de carga na ordem de 50%  $Q_{C-IN}$  ( $Q_{LS}$ ) o grupo intacto já atinge o limite de fator de segurança (FS) permitido por norma, os grupo com a presença de dano já apresentam valores menores que 2,0, ou seja, 1,58 e 1,53 para o grupo com estaca curta (4PEC) e para o grupo com a estaca ausente (4PEA), respectivamente. Neste ponto, a diferença entre os fatores de segurança dos grupos danificados e do grupo íntegro se encontra na média de 22%. Para 75%  $Q_{C-IN}$  os fatores de segurança dos grupos danificados já estão próximos da unidade e por consequencia da ruptura. Neste estágio a diferença média entre os fatores de segurança reais dos grupos danificados e do grupo íntegro passa a ser de aproximadamente 22%.

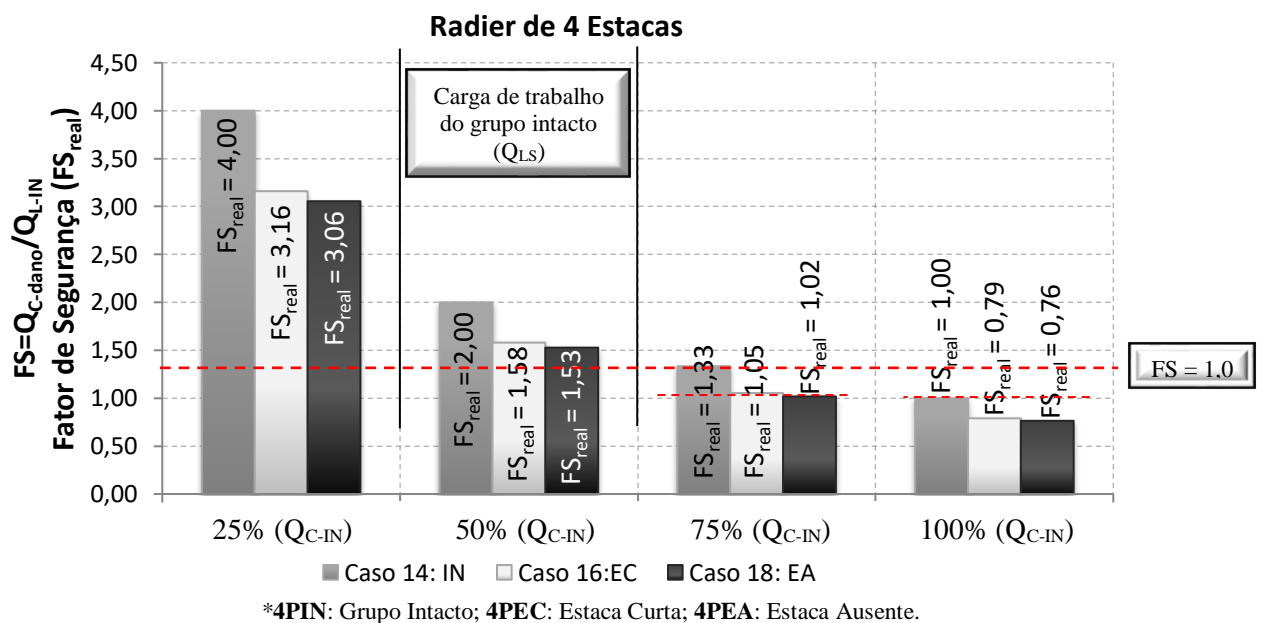
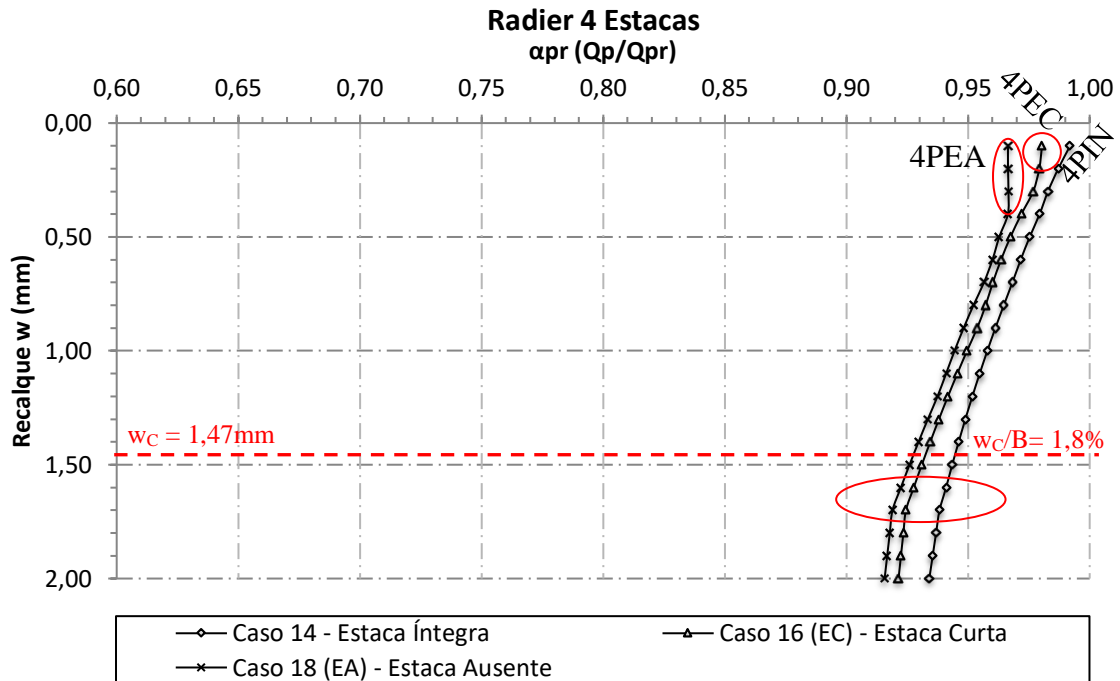


Figura 4.9 – Fatores de Segurança nos níveis de carregamentos.

O fator de distribuição de carga ( $\alpha_{pr}$ ) é necessário para o projeto de radier estaqueado e a influência do comprimento no comportamento do sistema é fundamental para que o projetista otimize seu projeto. Esta mesma influência é importante quando alguma estaca do grupo não apresenta o comprimento previsto. A Fig. 4.10 apresenta os fatores de distribuição de carga para o grupo de 4 estacas com a presença de uma estaca curta (50%L – 4PEC) e uma estaca ausente (0%L – 4PEA) em função dos recalques.



\*4PIN: Grupo Intacto; 4PEC: Estaca Curta; 4PEA: Estaca Ausente.

Figura 4.10 – Fator de distribuição de carga em função da profundidade.

A partir da Fig. 4.10 pode-se observar que para o grupo que apresenta um dado comprimento de estaca, o valor de  $\alpha_{pr}$  é máximo na fase inicial de carregamento, onde o recalque do radier estaqueado é menor. Ao aumentar a carga no radier estaqueado o recalque aumenta e, por sua vez, a proporção de distribuição de carga do sistema de radier estaqueado diminui. A redução no fator de distribuição de carga é gradual para o grupo intacto, um pouco mais acentuado para o grupo com a estaca curta, com recalque em torno de  $2\%D_E$ , ( $w=0,25\text{mm}$ ), e com recalque em torno de  $3\%D_E$  ( $w=0,4\text{mm}$ ) para o conjunto com a ausência de uma estaca. O início da segunda fase pode ser percebido a partir do deslocamento de  $11,5\%D_E$  ( $w=1,7\text{mm}$ ) onde a transferência de carga para o radier está começando a ocorrer. Esse comportamento mostra a redução de rigidez estaca-solo com o aumento do recalque. Embora a rigidez radier-solo reduza, não é ao nível da rigidez estaca-solo.

A relação entre  $\alpha_{pr}$  e o recalque do radier estaqueado descrito é observado em todos os testes independentemente do nível do dano da estaca. No entanto, a magnitude de  $\alpha_{pr}$  é alterada para diferentes níveis de dano em um determinado nível de recalque. Assim, é claramente evidente que a partir dos resultados, embora os grupos com diferentes níveis de dano mostrem uma tendência similar na distribuição de carga, o valor de distribuição de carga,  $\alpha_{pr}$ , em um determinado nível de recalque, é menor para o grupo que apresenta maiores intensidades de dano (estacas mais curtas, por exemplo). Isso indica que a redução

na distribuição de carga torna-se significativa para um grupo de estacas com maior nível de dano, o que pode ser atribuída à redução global da rigidez do grupo de estacas-solo para os grupos mais afetados.

#### 4.2.4. RADIER DE 9 ESTACAS – Dano: Estaca Curta (50%L) e Estaca Ausente (0%L)

Para as análises a seguir serão apresentadas as curvas obtidas dos ensaios de radier sobre nove (09) estacas íntegras e também para os casos com dano em três (03) posições distintas: canto, borda e centro, conforme apresentado na Fig. 4.11.

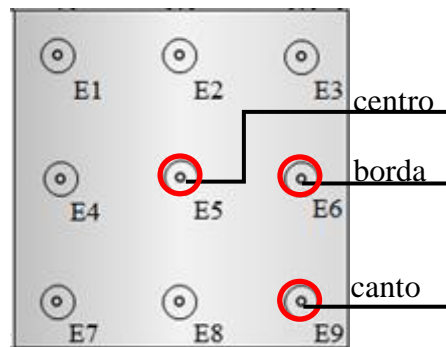


Figura 4.11 - Posição do dano dentro do radier de 9 estacas.

A Fig. 4.12 apresenta a seção transversal do caso com 09 estacas em que são apresentados os casos com estaca curta (50%L) e estaca ausente (0%L).

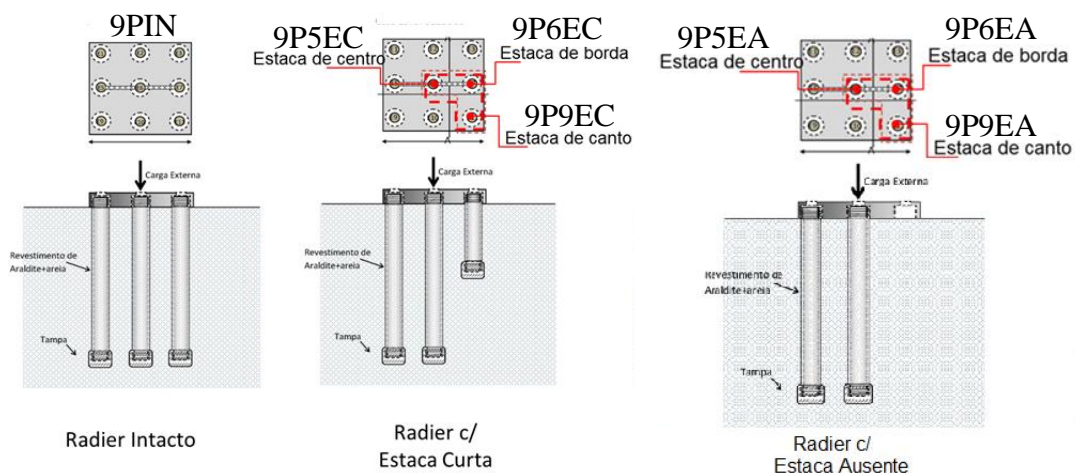


Figura 4.12 – Seção transversal do grupo de 9 estacas.



A Fig. 4.13 apresenta as curvas completas do comportamento carga-recalque obtidas nos ensaios 1g do radier de 9 estacas, tanto para o grupo com uma estaca curta (9PEC) quanto para o grupo com uma estaca ausente (9PEA), em três posições distintas de dano. O efeito do comprimento da estaca sobre o comportamento carga-recalque foi estudado com o espaçamento entre estacas de  $2,56D_E$ . A largura do bloco é de  $B = 105 \text{ mm}$  e a espessura  $e = 12,7 \text{ mm}$ .

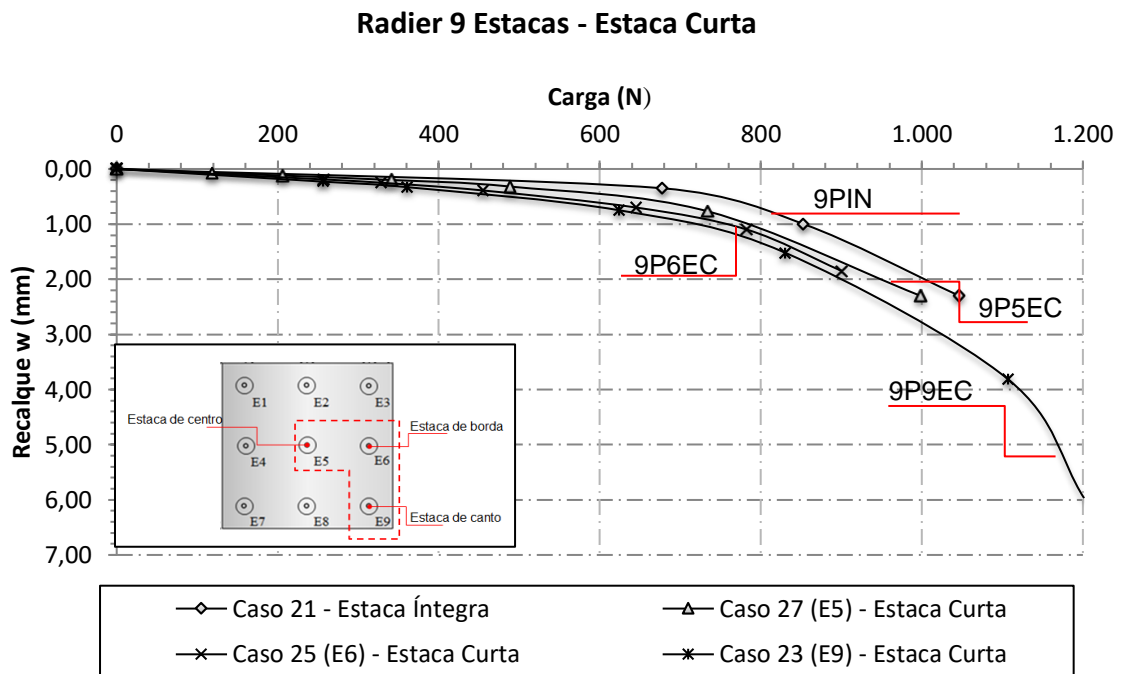


Figura 4.13 - Curva carga-recalque para o radier de 9 estacas com estaca curta.

Ainda quanto a Fig. 4.13 nota-se que na carga de trabalho, praticamente não houve variação dos valores de capacidade de carga, mesmo com a estaca mais curta que o previsto, independentemente da posição da estaca defeituosa. A Fig. 4.14 apresenta a curva em maiores detalhes, até 2,5 mm de recalque, para melhor analisar o comportamento do sistema nos estágios iniciais de carregamento, onde é destacado que a diferença da variação dos valores de capacidade de carga se mostra mais acentuada devido a escala do gráfico, mas a tendência foi a mesma observada na Fig. 4.13.

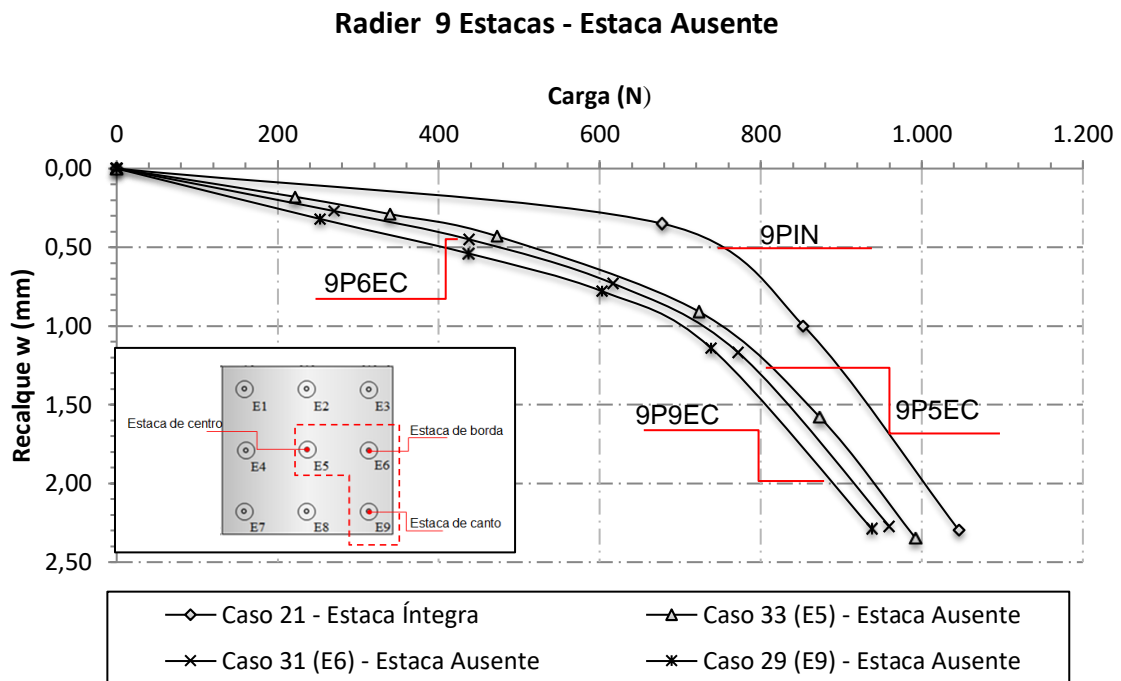


Figura 4.14 - Curva Carga-Recalque para o Radier de 9 estacas com estaca ausente.

As relações entre os parâmetros adimensionais são apresentadas nas Figs. 4.15 e 4.16, e mostram a carga normalizada, carga aplicada em função da carga limite convencional ( $Q/Q_C$ ) versus recalque normalizado, este obtido pela relação entre o recalque medido e a largura da placa ( $w/B$ , em %). A partir das curvas carga-recalque foram definidos os valores de carga referente ao recalque absoluto de 1,47mm (10% do diâmetro nominal da estaca), ou em termos percentuais, o que representa uma relação entre recalque e largura da placa ( $B$ ) de 1,4%. Nestes gráficos são destacados os percentuais de cargas aplicadas em função da carga máxima convencional, ( $25\%Q_C$ ,  $50\%Q_C$  e  $75\%Q_C$ ). Destaca-se ainda que até o limite convencional a rigidez do conjunto é maior, quanto menor o dano e este comportamento está diretamente relacionado com a sua posição, sendo que a posição 5 é menos relevante que a 6 e do que a 9, por apresentar maior interação que as demais estacas. Destaca-se ainda o comportamento das respectivas curvas após o limite convencional do conjunto íntegro em que as curvas seguem paralelas, pois a placa governa o recalque.

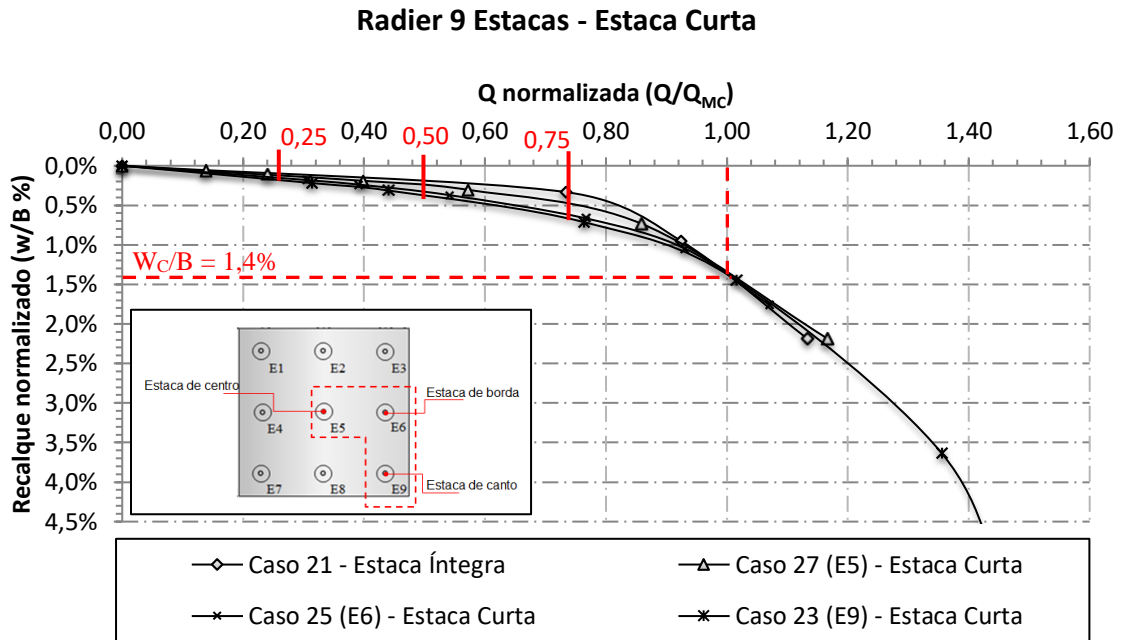


Figura 4.15 - Curva normalizada carga-recalque para o radier de 9 estacas com estaca curta.

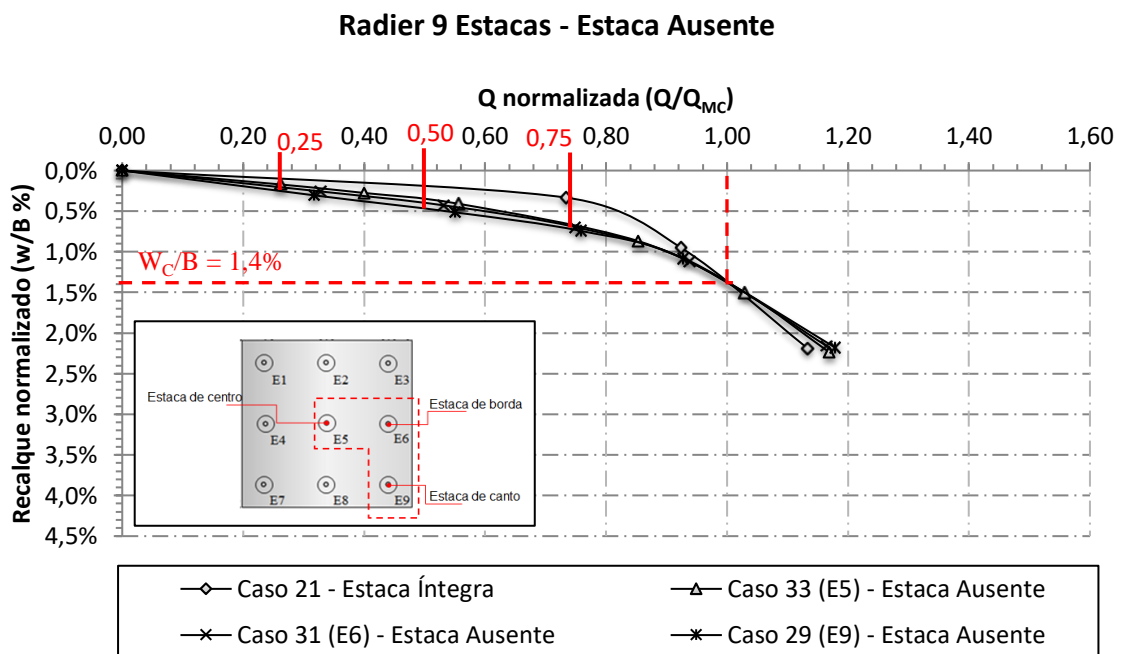


Figura 4.16 - Curva normalizada carga-recalque para o radier de 9 estacas com estaca ausente.

As Figs. 4.17 e 4.18 apresentam em detalhes as Figs. 4.13 e 4.14 que por sua vez destacam o recalque máximo convencional das curvas carga-recalques.

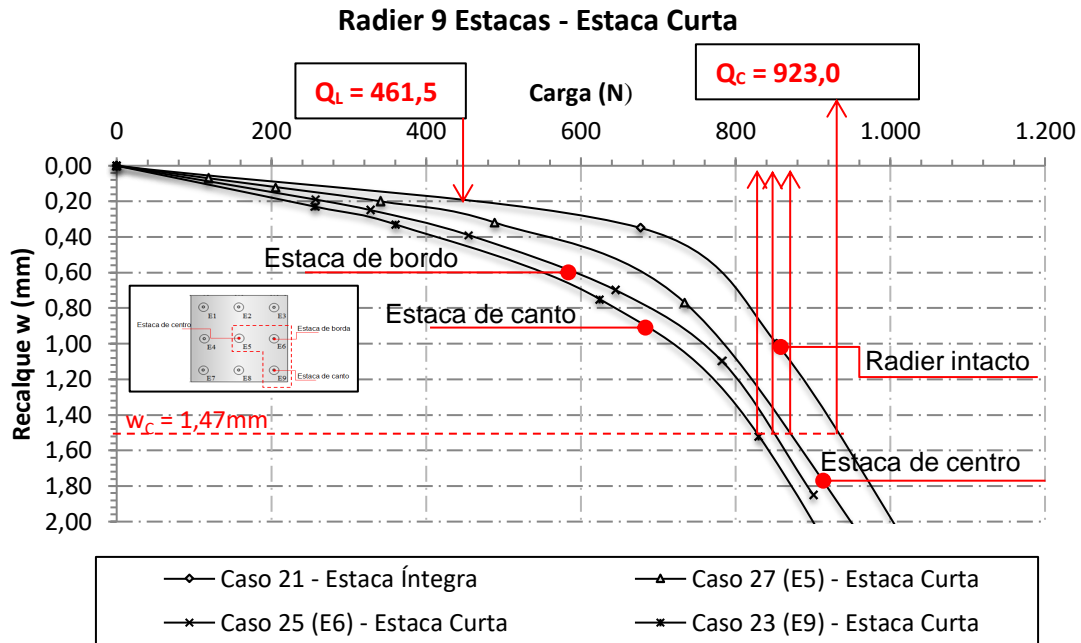


Figura 4.17 - Detalhe da curva carga-recalque para o radier de 9 estacas com estaca curta.

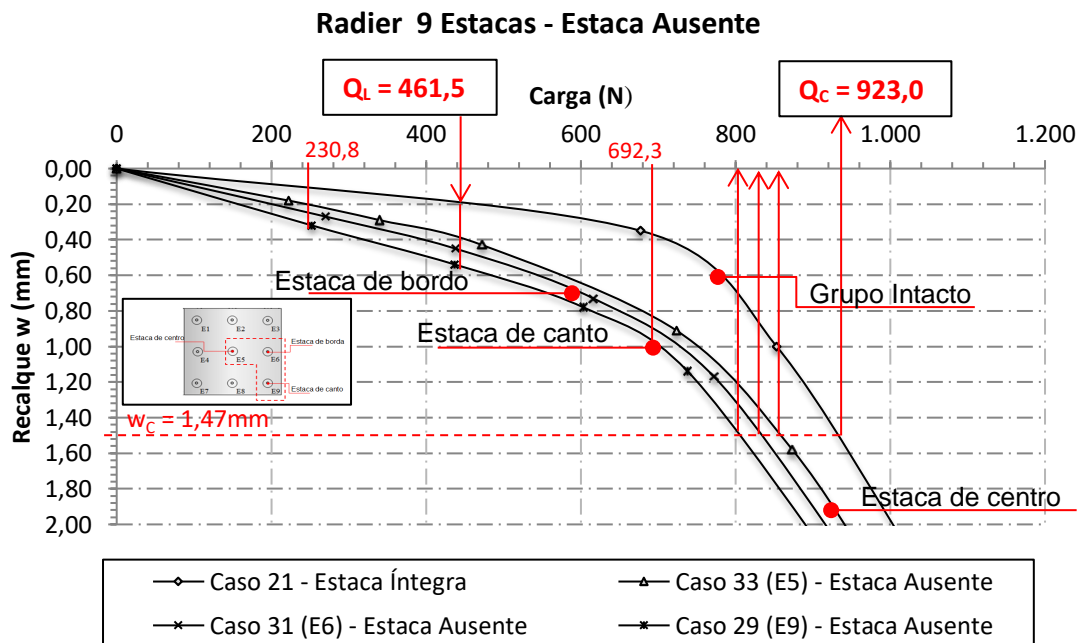


Figura 4.18 - Detalhe da curva carga-recalque para o Radier de 9 estacas com estaca ausente.

Para o primeiro estágio de carregamento,  $25\%Q_{C-IN}$ , com a carga de 230,8N já se percebe a maior inclinação da curva dos grupos com a presença de dano em relação ao grupo intacto, ainda que todos estejam no trecho elástico e a carga seja compartilhada entre os elementos. No segundo estágio de carregamento, na carga de trabalho com 461,5N, apenas aumenta esta dispersão, até que no terceiro estágio de carregamento, com  $75\%Q_{C-IN}$ , próximo a carga de 700N, as estacas são completamente mobilizadas, e esse é definido como primeiro estágio do modelo PDR (Poulos, Davis e Randolph), e a partir deste ponto todo

acréscimo de carga é resistido pela placa. Embora a taxa de incremento na carga não esteja diretamente relacionada com a posição do dano, pode-se observar que a perda de capacidade de carga é maior para danos no canto (9P9EC) do que na borda (9P6EC) e no centro (9P5EC), conforme apresentado na Tab. 4.3.

Os valores das cargas convencionadas obtidas dessas curvas estão apresentados resumidamente nas Tabs. 4.3 e 4.4, em que a primeira se referem aos ensaios com o dano em estaca curta (9PEC) e a segunda ao dano na ausência de uma estaca (9PEA).

Tabela 4.3 - Valores de carga referentes ao critério de recalque equivalente a 10% do diâmetro da estaca, 9PEC.

Caso	Q <sub>C</sub> (N)	Q <sub>L</sub> (N)	w <sub>C</sub> (mm)	w <sub>L</sub> (mm)	Q <sub>C-DANO</sub> /Q <sub>C-IN</sub>	Perda de capacidade de Carga	FS (Q <sub>C-DANO</sub> /Q <sub>L-IN</sub> )
Caso 21: 9PIN	923,0	461,5	1,47	0,24	1,00	0%	2,00
Caso 23: 9P9EC	817,0	408,5	1,47	0,41	0,89	11%	1,77
Caso 25: 9P6EC	840,9	420,4	1,47	0,35	0,91	9%	1,82
Caso 27: 9P5EC	855,2	427,6	1,47	0,27	0,93	7%	1,85

\*9PIN: Grupo Intacto; 9P9EC: Estaca Canto Curta; 9P6EC: Estaca Borda Curta; 9P5EC: Estaca Centro Curta.

Para os grupos com estaca curta (9PEA), Tab. 4.3 observa-se a perda máxima de capacidade de carga para o grupo com o dano na estaca de canto (9P9EC), com 11% em relação ao grupo intacto e 7% para a estaca de centro (9P5EC). Os fatores de segurança, por consequência tendem às proporções inversas, maiores para a central (E5) e menores para a de canto (E9).

Tabela 4.4 - Valores de carga referentes ao critério de recalque equivalente a 10% do diâmetro da estaca, 9PEA.

Caso	Q <sub>C</sub> (N)	Q <sub>L</sub> (N)	w <sub>C</sub> (mm)	w <sub>L</sub> (mm)	Q <sub>C-DANO</sub> /Q <sub>C-IN</sub>	Perda de capacidade de Carga	FS (Q <sub>C-DANO</sub> /Q <sub>L-IN</sub> )
Caso 21: 9PIN	923,0	461,5	1,47	0,24	1,00	0%	2,00
Caso 29: 9P9EA	795,5	397,7	1,47	0,49	0,86	14%	1,72
Caso 31: 9P6EA	823,2	411,6	1,47	0,42	0,89	11%	1,78
Caso 33: 9P5EA	848,8	424,4	1,47	0,38	0,92	8%	1,84

\*9PIN: Grupo Intacto; 9P9EA: Estaca Canto Ausente; 9P6EA: Estaca Borda Ausente; 9P5EA: Estaca Centro Ausente.

Para as estacas ausentes, conforme Tab. 4.4, as posições de maiores influências seguem a mesma ordem, canto, borda e centro, aumentando apenas a magnitude em relação aos grupos com estacas curtas, 14%, 11% e 8%, respectivamente, em função da variação de rigidez causada pela interação entre as estacas, conforme Fig. 4.19.

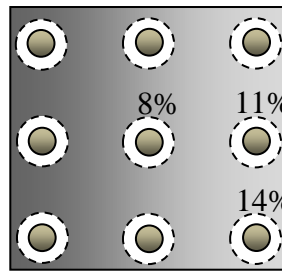


Figura 4.19 – Perdas de carga em função das posições.

As Figs. 4.20 e 4.21 apresenta a variação do fator de segurança em função do incremento de carga para as duas situações de dano, estaca curta e estaca ausente.

\***9PIN**: Grupo Intacto; **9P9EC**: Estaca Canto Curta; **9P6EC**: Estaca Borda Curta; **9P5EC**: Estaca Centro Curta.  
**9P9EA**: Estaca Canto Ausente; **9P6EA**: Estaca Borda Ausente; **9P5EA**: Estaca Centro Ausente.

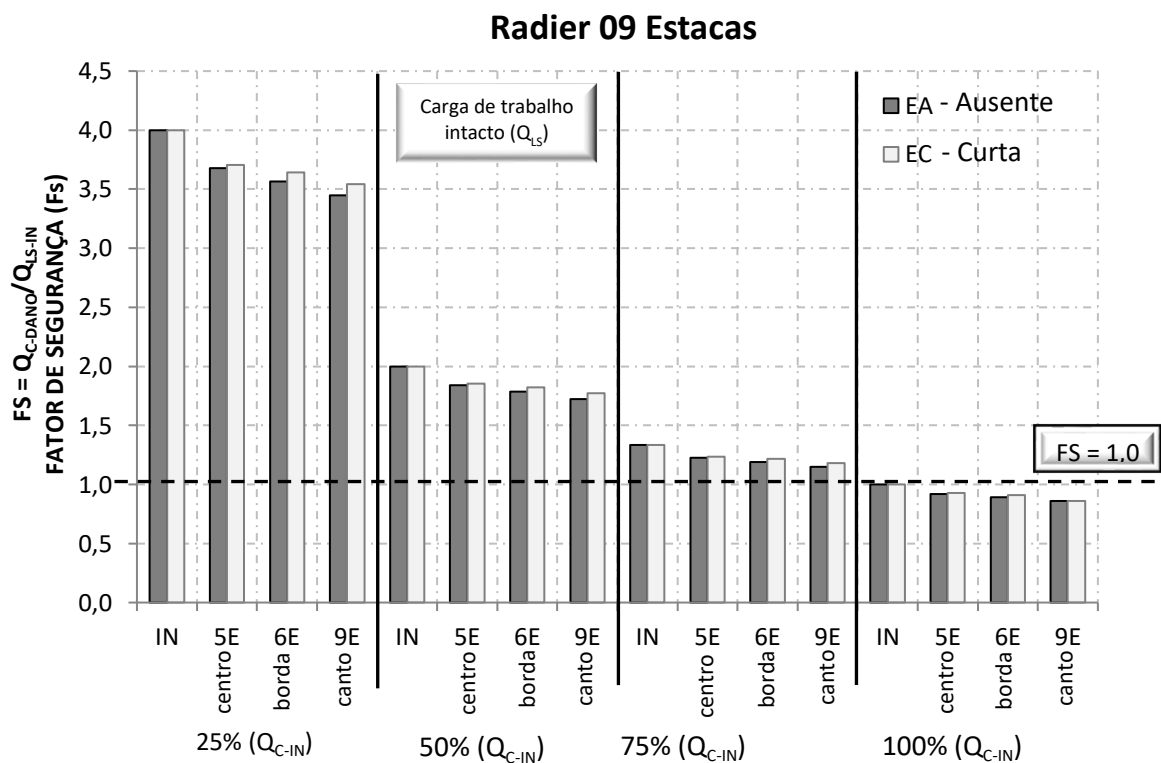
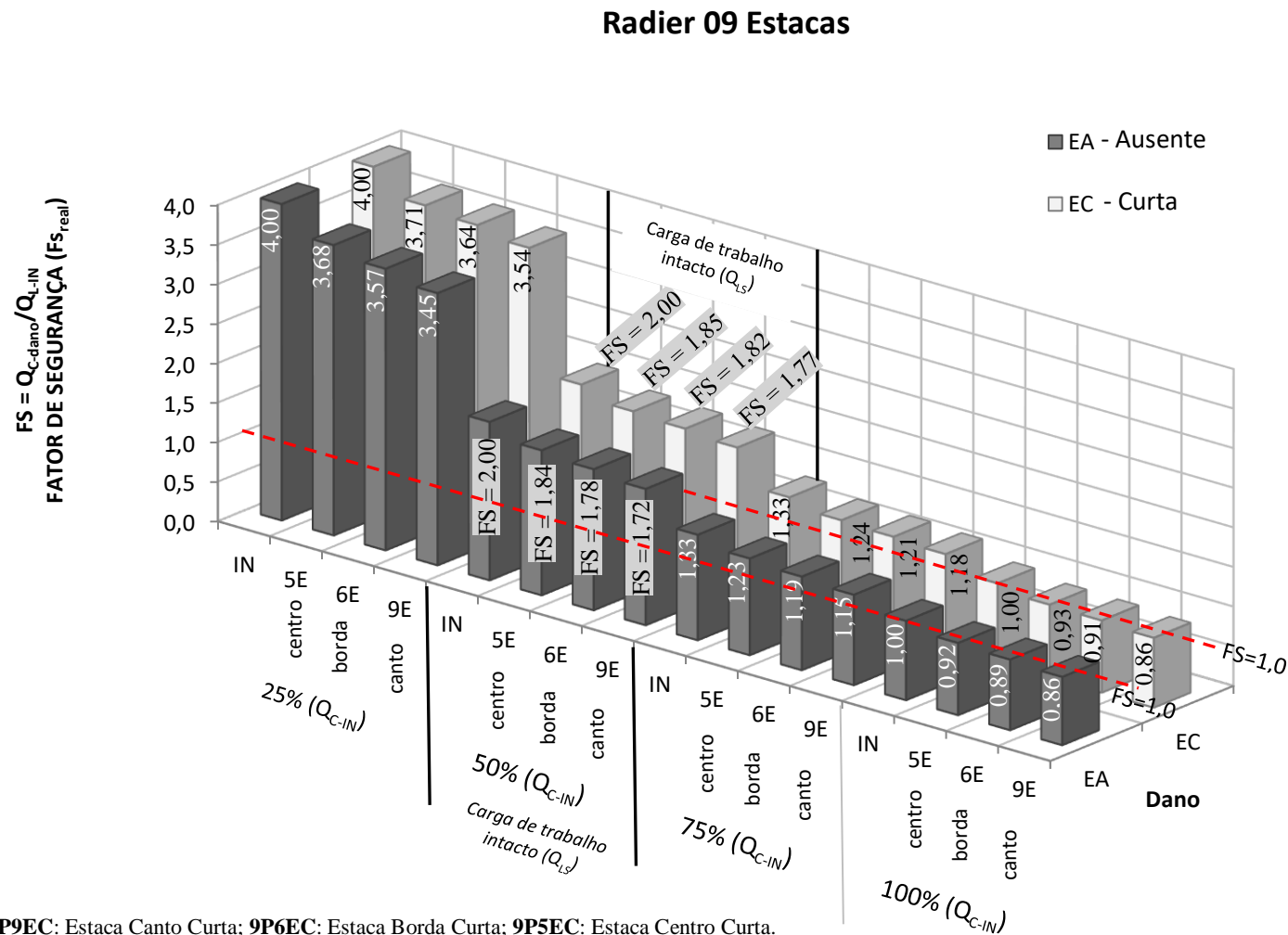


Figura 4.20 - Variação do Fator de Segurança em função da posição do dano, para estacas curtas e ausentes.



\*9PIN: Grupo Intacto; 9P9EC: Estaca Canto Curta; 9P6EC: Estaca Borda Curta; 9P5EC: Estaca Centro Curta.  
9P9EA: Estaca Canto Ausente; 9P6EA: Estaca Borda Ausente; 9P5EA: Estaca Centro Ausente.

Figura 4.21 – Variação do Fator de Segurança em função da posição do dano, para estacas curtas e ausentes.

Na Fig. 4.21 é possível observar que para o primeiro nível de carregamento  $25\% Q_{C-IN}$  tanto para as estacas ausentes (EA) quanto para as estacas curtas (EC) são pequenas as variações do fator de segurança em relação ao grupo intacto, na ordem de 7,25%, 9,0% e 9,75% para 9P5EC, 9P6EC e 9P9EC e para as ausentes de 8,0%, 10,75% e 13,75% para 9P5EA, 9P6EA e 9P9EA, respectivamente. Esta diferença tende a diminuir com o aumento do nível do carregamento.

Para a carga de trabalho,  $Q_{L-IN}$  ( $50\% Q_{C-IN}$ ), os grupos com a presença de dano já se encontram com fator de segurança abaixo do permitido por norma, todos em torno de 1,80. Até que para os níveis finais de carregamento,  $100\% Q_{C-IN}$ , as estacas se encontram abaixo da unidade ( $<1,0$ ), com diferença em relação ao grupo intacto um pouco abaixo de 10%.

Ressalta-se ainda que as perdas de carga dos grupos de estacas ausentes são maiores do que os de estacas curtas, porém, em ambas as situações, tanto os grupos danificados quanto os grupos intactos tendem a diminuir as variações de valores quanto mais próximo da ruptura se encontram.

As Figs. 4.22 e 4.23 representam a variação do fator de distribuição de carga com o recalque do radier estaqueado de 9 estacas com a presença de estacas danificadas em 3 posições distintas, canto, borda e centro.

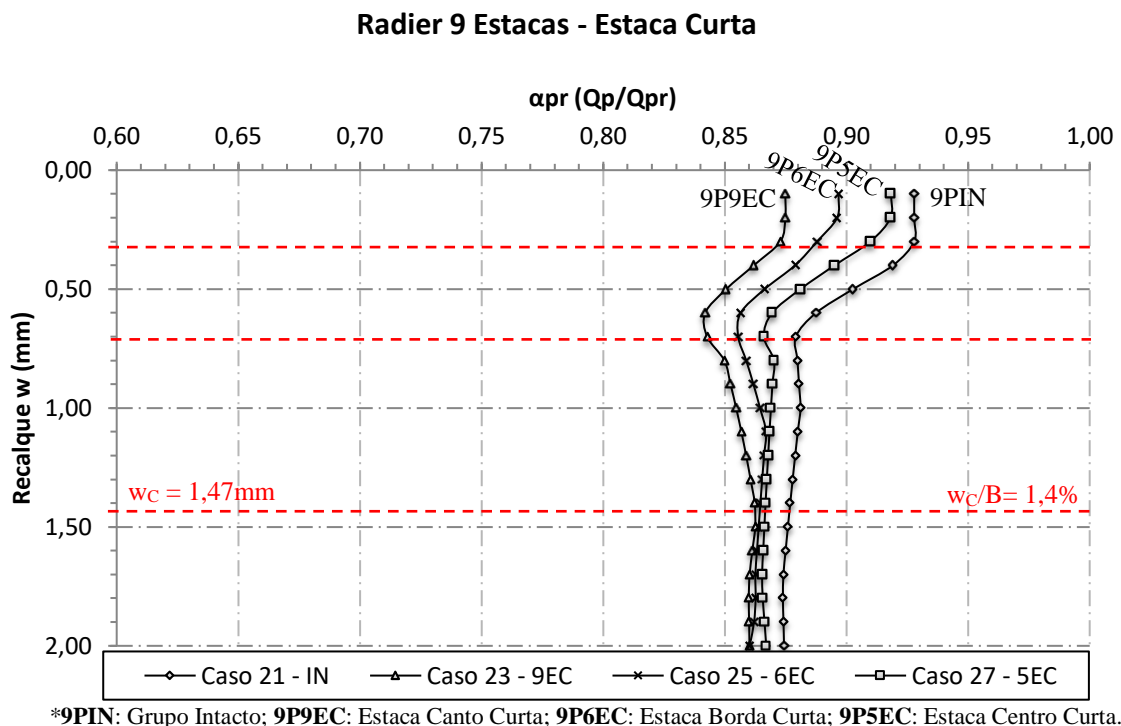
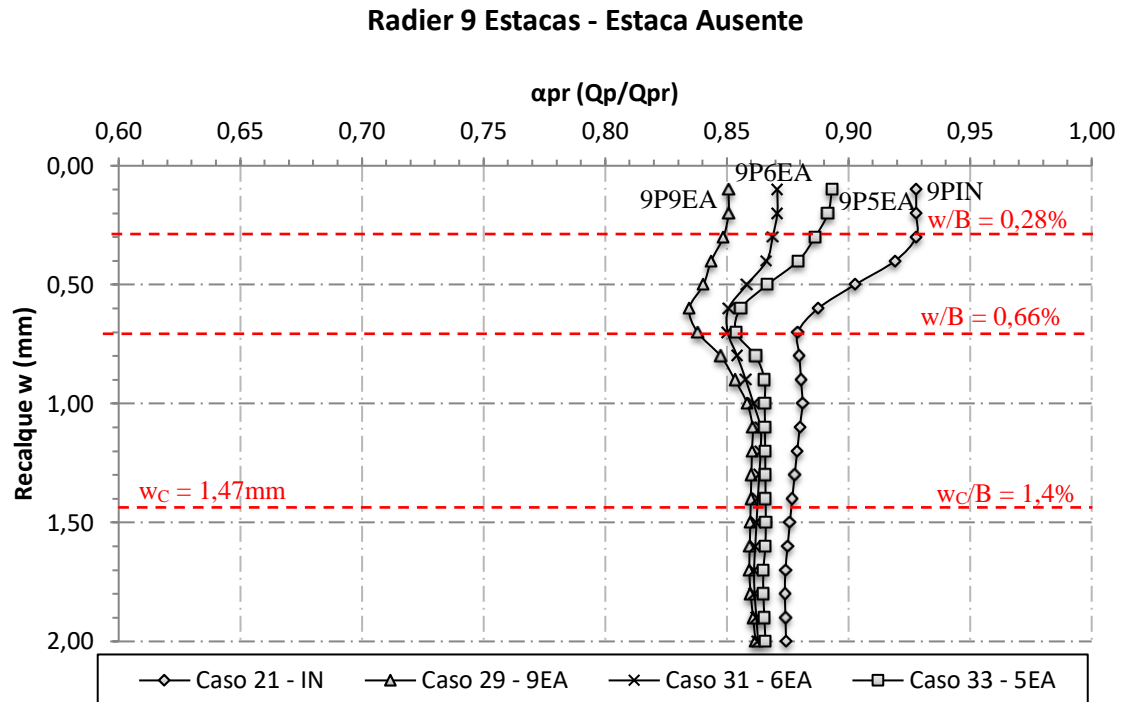


Figura 4.22 – Variação do  $\alpha_{pr}$  com o recalque para o grupo de 9 estacas com a presença de uma estaca curta em posições distintas.





\*9PIN: Grupo Intacto; 9P9EA: Estaca Canto Ausente; 9P6EA: Estaca Borda Ausente; 9P5EA: Estaca Centro Ausente.

Figura 4.23 – Variação do  $\alpha_{pr}$  com o recalque para o grupo de 9 estacas com a presença de uma estaca ausente em posições distintas.

A resposta de  $\alpha_{pr}$  com recalque mantém o mesmo princípio já apresentado de que o grupo com maior comprimento de estaca (grupo intacto – 9PIN) apresenta os maiores valores do fator de distribuição. Para os casos estudados, o dano na estaca central (9P5EC) apresentou maiores valores, seguido pelo grupo com dano na estaca de borda (9P6EC) e depois pelo grupo com o dano na estaca de canto (9P9EC). Ou seja, este comportamento corrobora com os já discutidos neste trabalho, que para mesmos comprimentos, ou mesmos níveis de dano, mas em posições diferentes, a distribuição de carga do sistema varia. Para o conjunto de 9 estacas, o decréscimo mais acentuado de  $\alpha_{pr}$  se dá em torno de  $w/B = 0,28\%$  ou  $2\%D_E$  ( $w = 0,3\text{mm}$ ) até próximo de  $w/B = 0,66\%$  ou  $4,5\%D_E$  ( $w = 0,7\text{mm}$ ) onde o fator tende a incrementar. Enquanto os recalques causados pela carga forem inferiores a  $2\%D_E$ , as estacas absorvem mais carga, a partir daí, os radiers tendem a participar mais da distribuição de carga, até que os valores de  $\alpha_{pr}$  para os grupos com estacas danificadas com recalques entre  $4\%D_E$  e  $7\%D_E$  apresentam um incremento nos seus valores o que se pode entender como um ajuste na distribuição de carga devido ao dano, com um incremento da participação das estacas, o que faz com que estas ainda não se comportem como elementos redutores de recalque. Quando a parcela da estaca permanece quase que constante, esta é a indicação que as estacas servem como elementos redutores de recalque.

#### 4.2.5. RADIER DE 16 ESTACAS – Dano: Estaca Curta (50%L) e Ausente (0%L)

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios para os radiers de 16 estacas, também com os danos estaca curta (16PEC) e ausente (16PEA), sempre acompanhados de um ensaio em radier com estacas íntegras para comparação. A Fig. 4.24 apresenta a posição das estacas com dano e a seção transversal dos casos estudados.

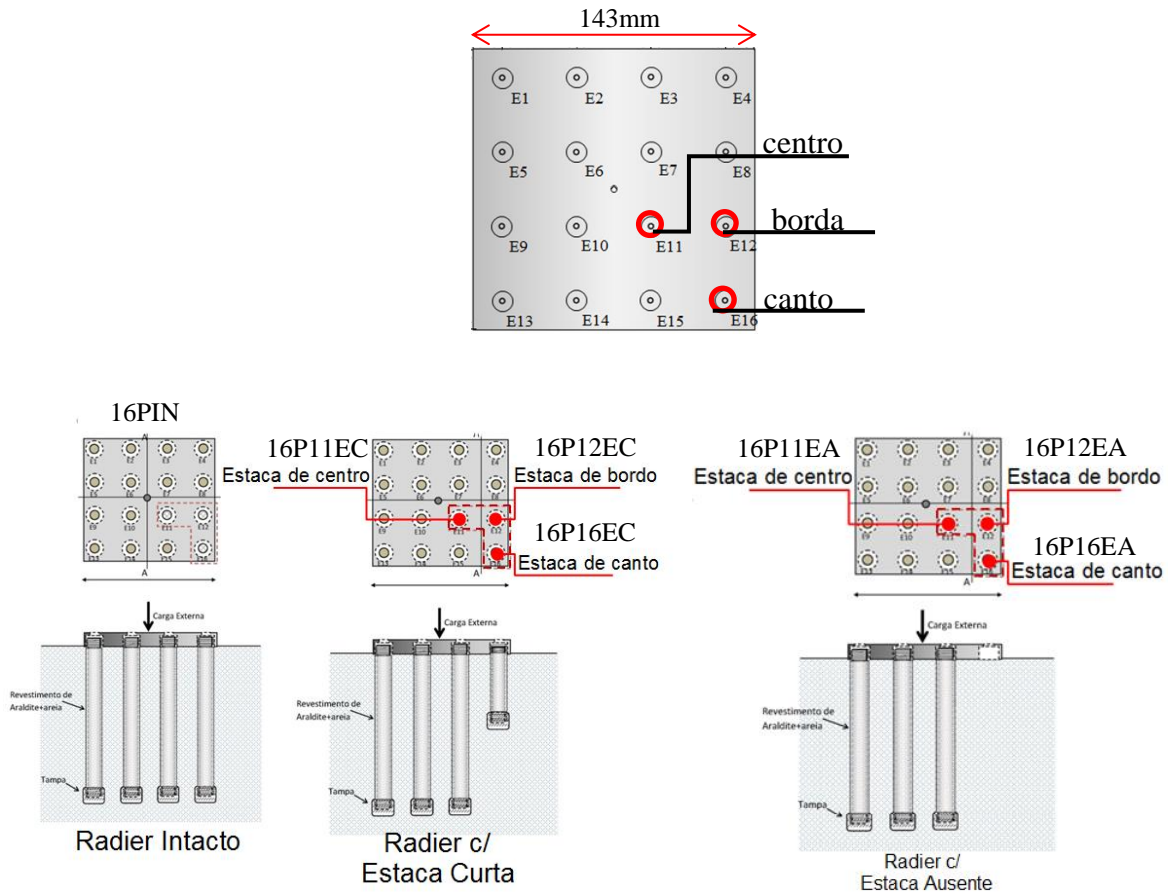
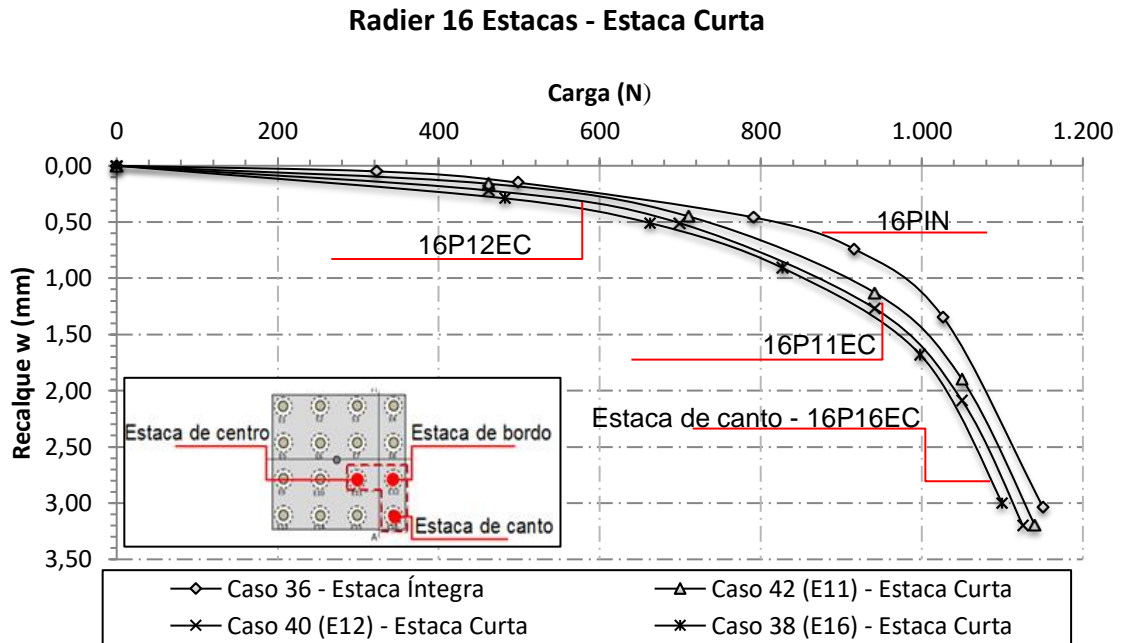


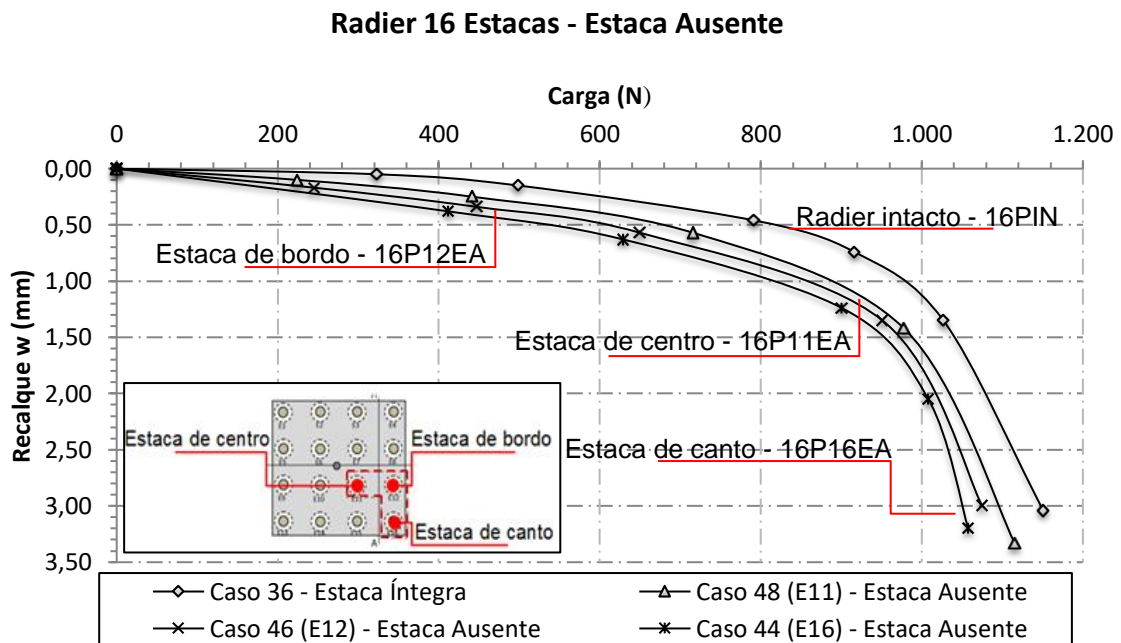
Figura 4.24 – Caso de Radiers Estaqueado de 16 estacas.

As Figs. 4.25 e 4.26 apresentam as curvas completas dos ensaios dos grupos de 16 estacas com a presença de uma estaca curta e para uma estaca ausente, respectivamente. Nelas se observa que o recalque máximo do ensaio foi na ordem de 3,0mm devido a estabilização dos recalques.



\*16PIN: Grupo Intacto; 16P16EC: Estaca Canto Curta; 16P12EC: Estaca Borda Curta; 16P11EC: Estaca Centro Curta.

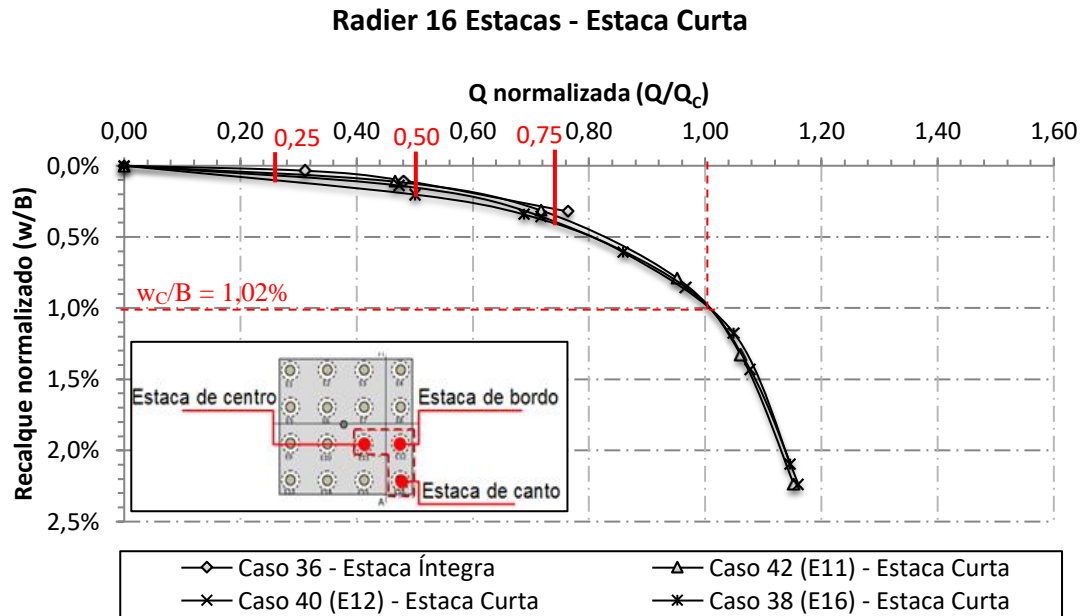
Figura 4.25 - Curva carga-recalque para o radier de 16 estacas com 01 estaca curta.



\*16PIN: Grupo Intacto; 16P16EA: Estaca Canto Ausente; 16P12EA: Estaca Borda Ausente; 16P11EA: Estaca Centro Ausente.

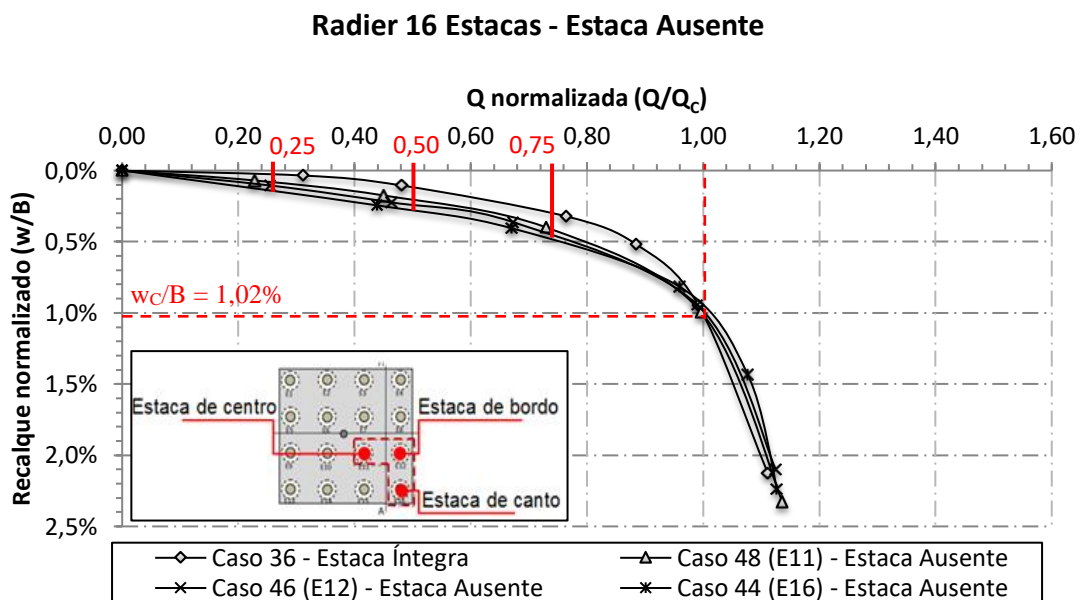
Figura 4.26 - Curva carga-recalque para o radier de 16 estacas com estaca ausente.

As Figs. 4.27 e 4.28 apresentam as curvas normalizadas completas destacando os níveis de carregamentos estudados. Nestes gráficos é observada a proximidades entre as curvas, o que significa que os danos possuem menor representação no conjunto, ou seja, a rigidez apresentou pouca variação devido a quantidade de estacas danificadas no conjunto, na ordem de 6%.



\*16PIN: Grupo Intacto; 16P16EC: Estaca Canto Curta; 16P12EC: Estaca Borda Curta; 16P11EC: Estaca Centro Curta.

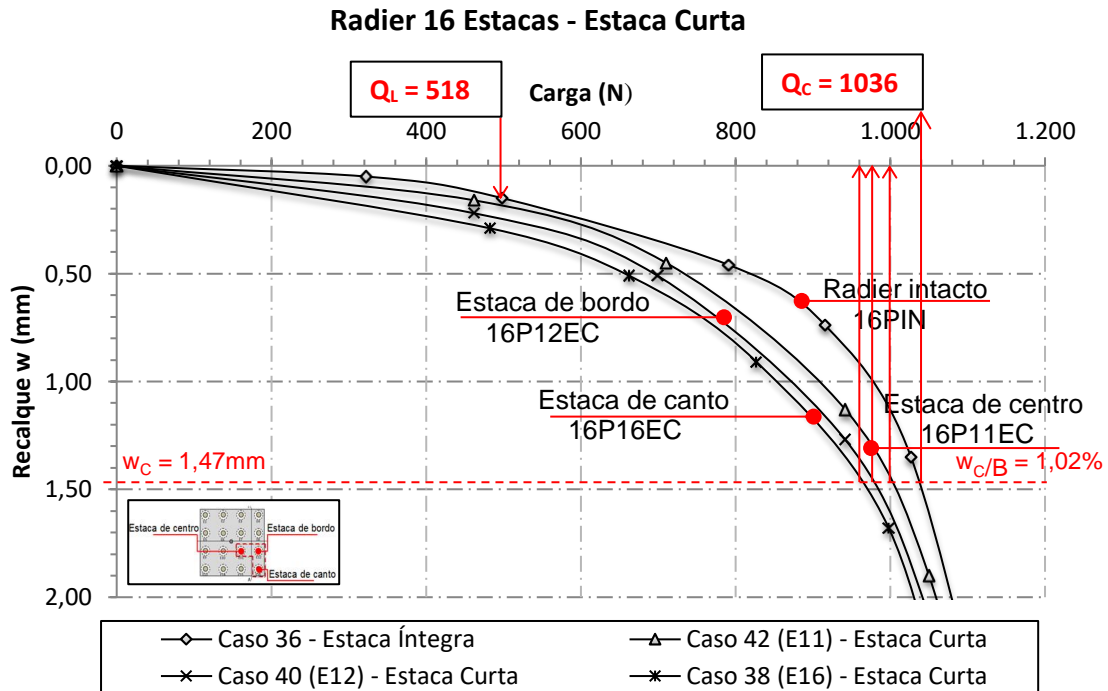
Figura 4.27 - Curva normalizada carga-recalque para o radier de 16 estacas com estaca curta.



\*16PIN: Grupo Intacto; 16P16EA: Estaca Canto Ausente; 16P12EA: Estaca Borda Ausente; 16P11EA: Estaca Centro Ausente.

Figura 4.28 - Curva normalizada carga-recalque para o radier de 16 estacas com estaca ausente.

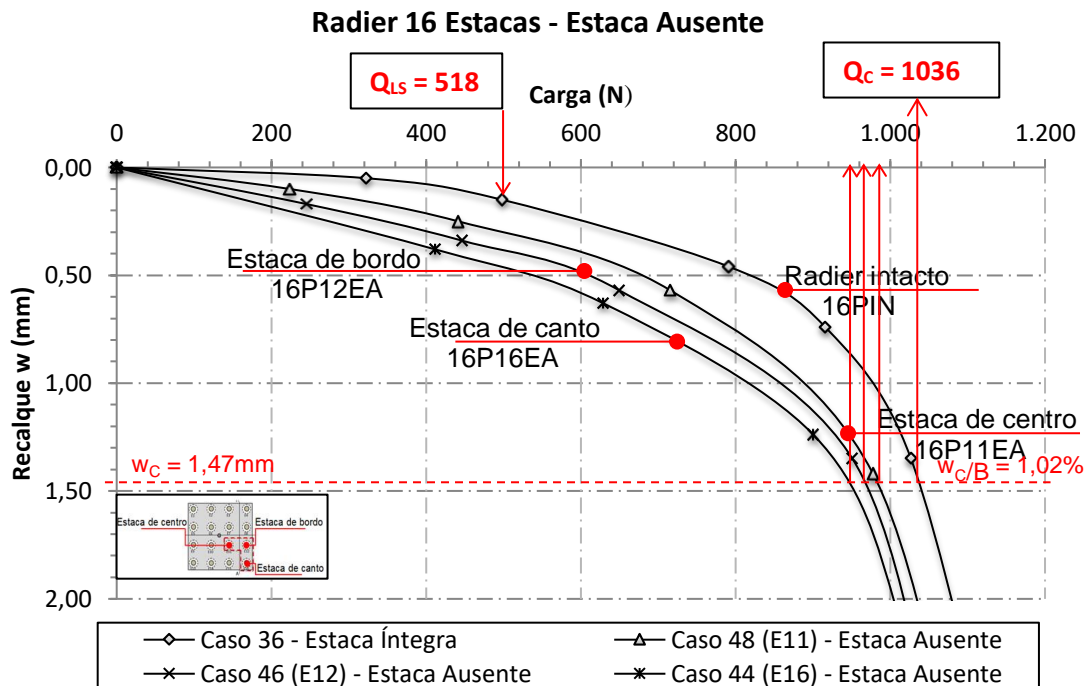
Para a determinação da carga máxima convencional, destacou-se o recalque máximo, referente a  $10\% D_E$  ( $w_c/B = 1,02\%$ ) e se determinou a carga máxima dos grupos. Com a carga do grupo intacto referente ao recalque máximo convencional foi determinado a carga limite de serviço, conforme apresentado nas Figs. 4.29 e 4.30.



\*16PIN: Grupo Intacto; 16P16EC: Estaca Canto Curta; 16P12EC: Estaca Borda Curta; 16P11EC: Estaca Centro Curta.

Figura 4.29 - Detalhe da curva carga-recalque para o Radier de 16 estacas com estaca curta.

Após a determinação das cargas convencionadas ( $Q_C$ ) e as cargas limites de serviço ( $Q_{LS}$ ) do grupo intacto os fatores de segurança reais para cada caso foram determinados.



\*16PIN: Grupo Intacto; 16P16EA: Estaca Canto Ausente; 16P12EA: Estaca Borda Ausente; 16P11EA: Estaca Centro Ausente.

Figura 4.30 - Detalhe da curva carga-recalque para o radier de 16 estacas com estaca ausente.

As Tabs. 4.5 e 4.6 apresentam as cargas convencionadas ( $Q_C$  – cargas últimas) e cargas de limite ( $Q_L$  – cargas de trabalho) para cada caso e seus respectivos fatores de segurança e perdas de capacidade de carga em relação ao grupo intacto.

Tabela 4.5 - Valores de carga referentes ao critério de recalque máximo, 16PEC.

Caso	$Q_C$ (N)	$Q_L$ (N)	$w_C$ (mm)	$w_L$ (mm)	$Q_{C-DANO}/Q_{C-IN}$	Perda de capacidade de Carga	FS ( $Q_{C-DANO}/Q_{L-IN}$ )
36: 16PIN	1035,5	517,8	1,47	0,17	1,00	0%	2,00
38: 16P16EC	951,5	475,8	1,47	0,29	0,92	8%	1,84
40: 16P12EC	968,2	484,5	1,47	0,25	0,93	6%	1,87
42: 16P11EC	989,6	494,8	1,47	0,20	0,96	4%	1,91

\*16PIN: Grupo Intacto; 16P16EC: Estaca Canto Curta; 16P12EC: Estaca Borda Curta; 16P11EC: Estaca Centro Curta.

Tabela 4.6 - Valores de carga referentes ao critério de recalque máximo, 16PEA.

Caso	$Q_C$ (N)	$Q_{LS}$ (N)	$w_C$ (mm)	$w_L$ (mm)	$Q_{C-DANO}/Q_{C-IN}$	Perda de capacidade de Carga	FS ( $Q_{C-DANO}/Q_{L-IN}$ )
36: 16PIN	1035,5	517,77	1,47	0,17	1,00	0%	2,00
44: 16P16EA	931,3	465,63	1,47	0,44	0,90	10%	1,80
46: 16P12EA	960,0	480,02	1,47	0,38	0,93	7%	1,85
48: 16P11EA	981,3	490,66	1,47	0,31	0,95	5%	1,90

\*16PIN: Grupo Intacto; 16P16EA: Estaca Canto Ausente; 16P12EA: Estaca Borda Ausente; 16P11EA: Estaca Centro Ausente.

A Fig. 4.31 apresenta a variação dos fatores de segurança em função do incremento de carga para os grupos com estacas curtas e estacas ausentes.

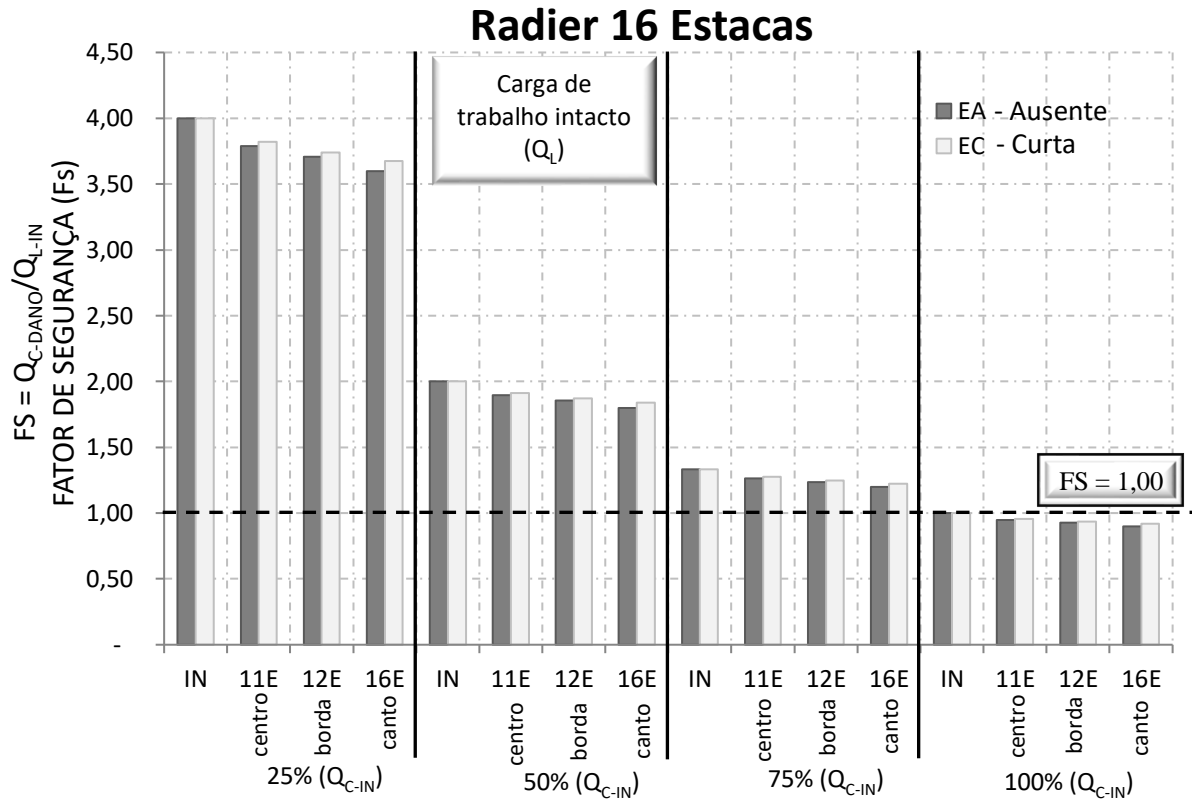
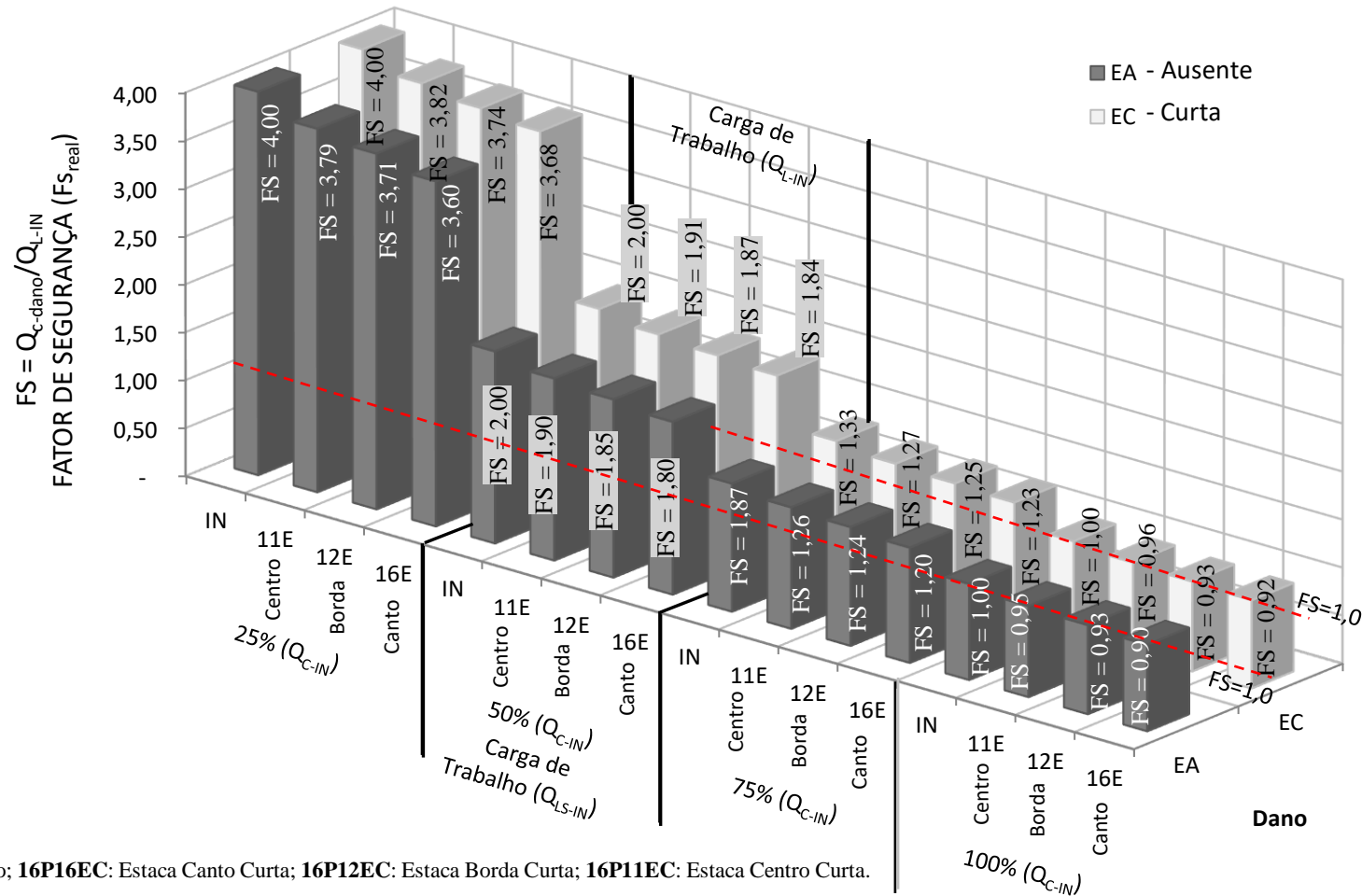


Figura 4.31 – Variação do Fator de Segurança em função do incremento de carga.

A Fig. 4.32 apresenta em detalhes a variação dos fatores de segurança com os respectivos valores para cada nível de carregamento.

### Radier 16 Estacas



\*16PIN: Grupo Intacto; 16P16EC: Estaca Canto Curta; 16P12EC: Estaca Borda Curta; 16P11EC: Estaca Centro Curta.  
 16P16EA: Estaca Canto Ausente; 16P12EA: Estaca Borda Ausente; 16P11EA: Estaca Centro Ausente.

Figura 4.32 – Variação do Fator de Segurança em função do incremento de carga.

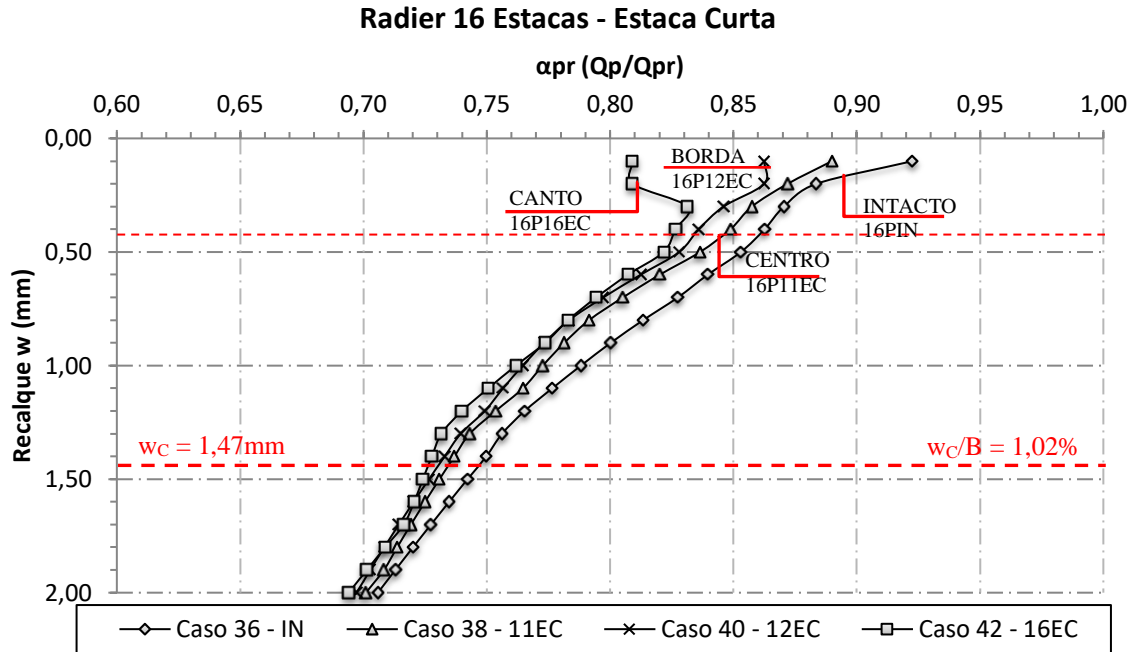


Conforme apresentado na Fig. 4.32, para o primeiro nível de carregamento ( $25\%Q_{MC-IN}$ ), os grupos que apresentam uma estaca curta, possuem uma queda nos fatores de segurança na ordem de 4,5%, 6,5% e 8,25% em relação ao caso intacto, para a posição de centro (16P11EC), borda (16P12EC) e canto (16P16EC), respectivamente. Já os grupos com estacas ausentes apresentam variação nos fatores de segurança na ordem de 5,25%, 7,25% e 10,0%, ou seja, pequenas perdas de capacidade de carga para o estágio inicial e com pequena variação em relação a posição e a intensidade do dano.

Porém, este cenário altera quando o grupo se encontra no segundo estágio de carregamento, na carga de trabalho ( $50\%Q_{C-IN}$ ). Neste nível todos os fatores de segurança oscilam mais que 50% do fator de segurança do grupo intacto, tanto para as diversas posições quanto para diferentes intensidades de dano, estando assim, todas as situações equivalentes. E a partir daí todas as situações tendem a unidade.

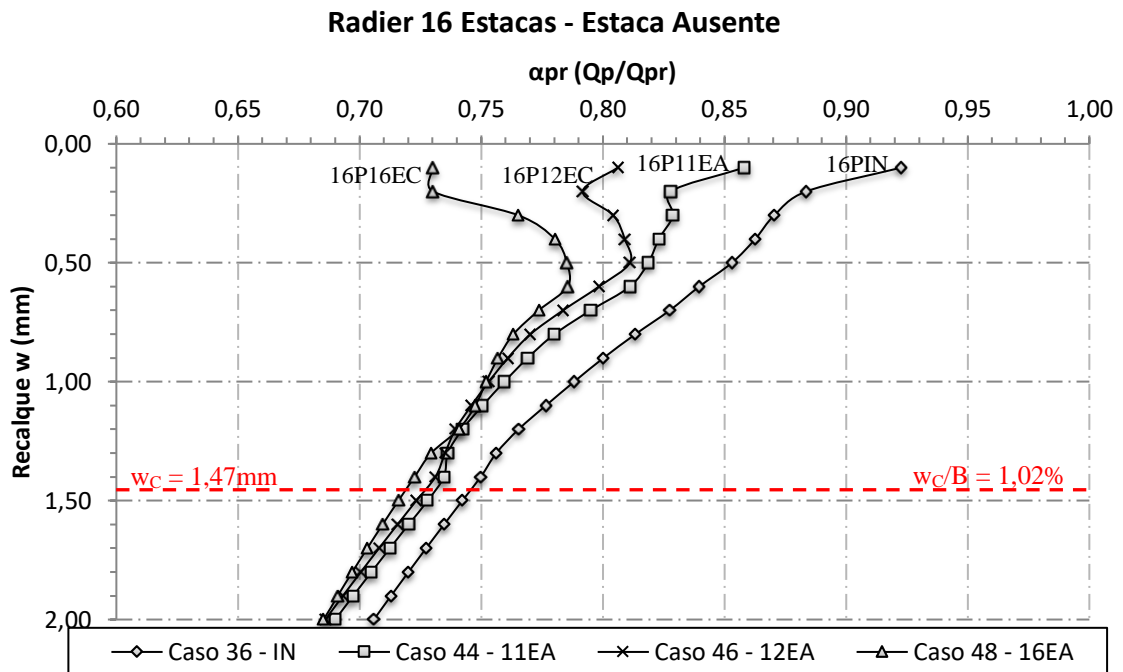
As Figs. 4.33 e 4.34 apresentam a variação do fator de distribuição de carga com o recalque do radier estaqueado de 16 estacas com a presença de estacas danificadas, estacas curtas ( $50\%L$ ) e ausentes ( $0\%L$ ), em 3 posições distintas, canto, borda e centro. Devido ao menor percentual de dano em relação as estacas íntegras (6%), os grupos com as estacas curtas se apresentaram com comportamento similar ao grupo intacto, principalmente o grupo com o dano na estaca do centro (16P11EC), já o grupo com a estaca de canto (16P16EC) apresenta com um maior decréscimo no valor de  $\alpha_{pr}$  haja vista sofrer maior influência do dano.

Para os grupos com estacas ausentes ( $0\%L$ ) os valores de  $\alpha_{pr}$  tendem a serem mais dispersos nos estágios iniciais e com incrementos crescentes, com recalques em torno de  $3\%D_E$ , a partir deste nível os fatores de distribuição tendem a decrescer como forma a transferir as cargas para os radiers fato que se deve ao posicionamento das estacas com dano, pois, devido a placa ser rígida maiores cargas são transferidas para as estacas de canto, e na ausência desta, a carga foi transferida para a fundação superficial.



\*16PIN: Grupo Intacto; 16P16EC: Estaca Canto Curta; 16P12EC: Estaca Borda Curta; 16P11EC: Estaca Centro Curta.

Figura 4.33 – Variação do  $\alpha_{pr}$  com o recalque para o grupo de 16 estacas com a presença de uma estaca curta em posições distintas.



\*16PIN: Grupo Intacto; 16P16EA: Estaca Canto Ausente; 16P12EA: Estaca Borda Ausente; 16P11EA: Estaca Centro Ausente.

Figura 4.34 – Variação do  $\alpha_{pr}$  com o recalque para o grupo de 16 estacas com a presença de uma estaca ausente em posições distintas.

#### 4.2.6. SÍNTESE SOBRE A RESISTÊNCIA E SEGURANÇA

Em resumo, para o radier de 4 estacas, os primeiros níveis de carregamento já implicam numa perda de capacidade de carga, utilizando-se como referência para comparação a carga convencionada. Observou-se que essa redução na capacidade de carga superou 20%, independente da intensidade do dano. O fator de segurança real tende a se aproximar da unidade com o aumento do carregamento, onde o dano representa 25% das estacas do grupo.

Para o primeiro nível de carregamento do radier de 9 estacas, a maior perda de capacidade de carga foi da ordem de 10%. O caso mais grave ocorreu para o caso em que a estaca de canto foi retirada (ausente) a qual apresenta perda de 11%, tendendo a diminuir a variação dos valores quanto mais se aproximou da ruptura estabelecida. Para este caso o dano representa 11% das estacas danificadas.

Para o grupo de 16 estacas, uma estaca danificada representa aproximadamente 6% do total de estacas. Para este grupo o comportamento das curvas é mais próximo e varia pouco em relação a posição e ao nível de dano, conforme Fig. 4.35.

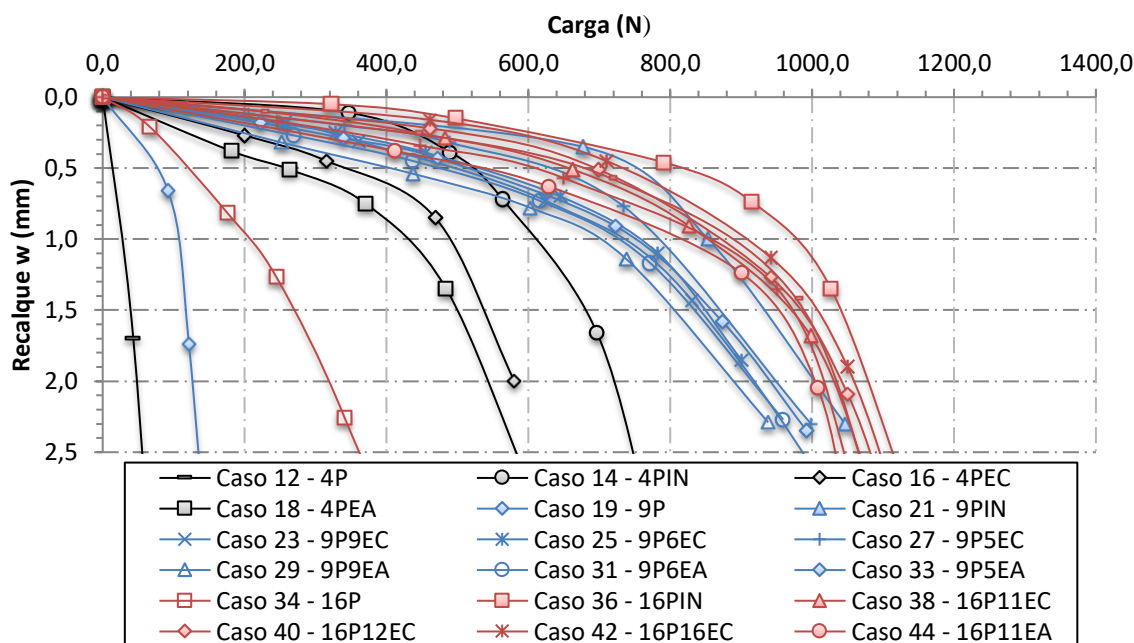


Figura 4.35 – Curva carga-recalque para todos os radiers estaqueados estudados.

Os fatores de distribuição de carga oriundas dos experimentos conduzidos foram apresentados para vários recalques, e a influência dos parâmetros das estacas e da posição do dano sobre o  $\alpha_{pr}$  para um dado recalque foi analisado.

A partir dos estudos em modelo reduzido observou-se que, independentemente do tamanho do grupo, a resposta carga-recalque do radier estaqueado com a presença de estacas

danificada se apresenta com uma tendência de comportamento similar, porém, quanto maior o percentual de estacas danificadas na fundação estaqueada há uma maior dispersão dos valores de  $\alpha_{pr}$  nos estágios iniciais de recalque. A resposta carga-recalque para os grupos intactos foi linear e para os radiers estaqueados com dano esta curva é caracterizada pela mudança da inclinação da curva de acordo com o nível de carregamento, com o comportamento não-linear. As Figs. 4.36 e 4.38 apresentam resumidamente a relação do fator de segurança real para os grupos estudados em função do incremento de carga para os casos com a presença de estacas curtas (50%L), e as Figs. 4.37 e 4.39 os fatores de segurança dos radiers estaqueados estudados com 0%L (estaca ausente).

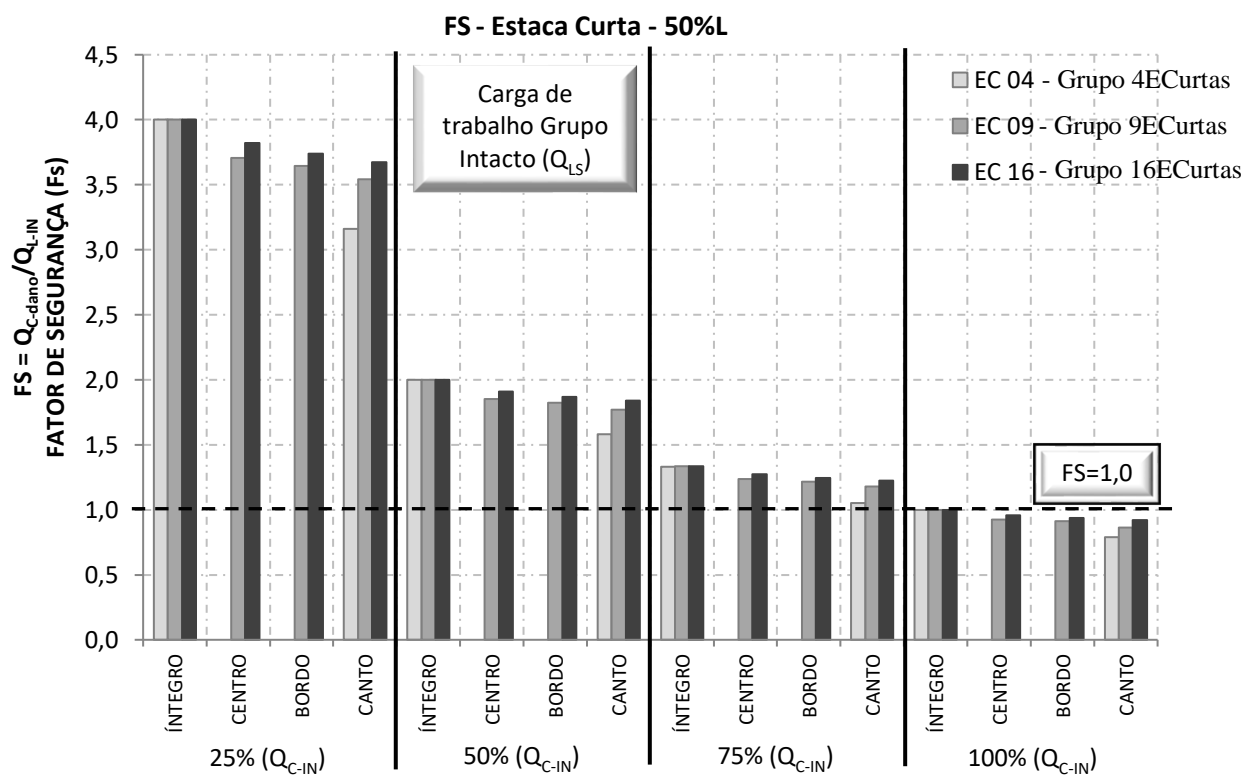


Figura 4.36 - Visão Geral do FS em função do incremento de carga para os casos com a presença de estacas curtas.

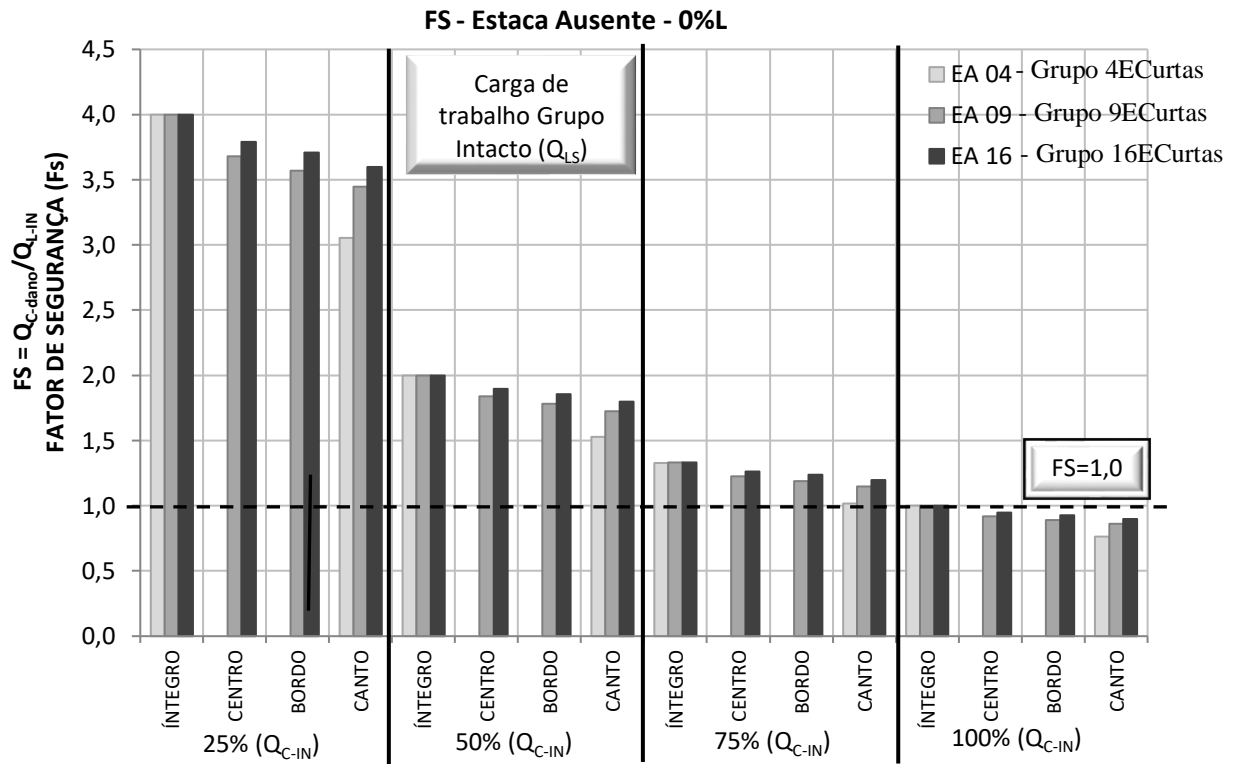


Figura 4.37 – Visão Geral do FS em função do incremento de carga para os casos com a presença de estacas ausentes.

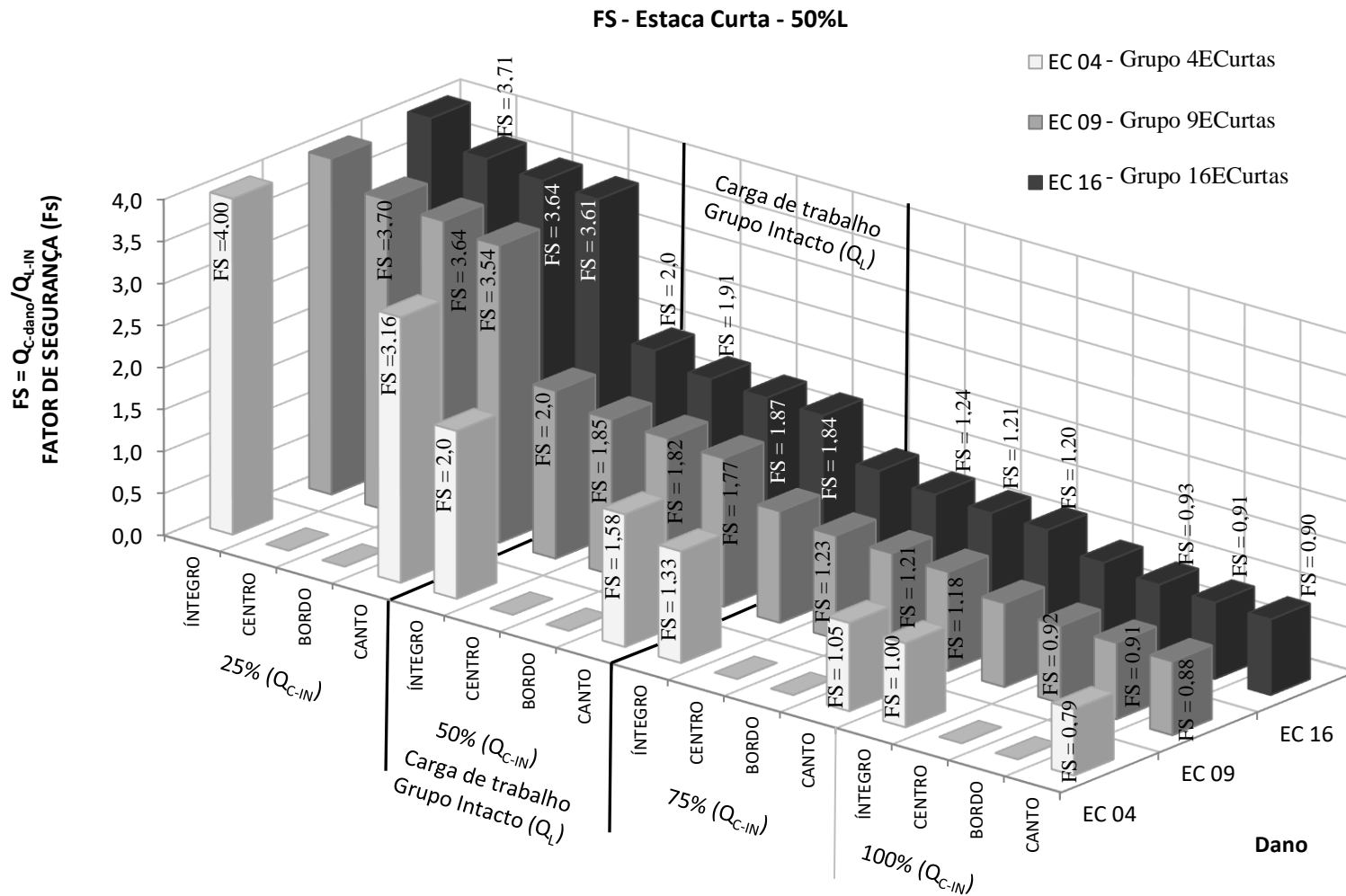


Figura 4.38 – Visão Geral detalhada do FS em função do incremento de carga para os casos com a presença de estacas curtas.

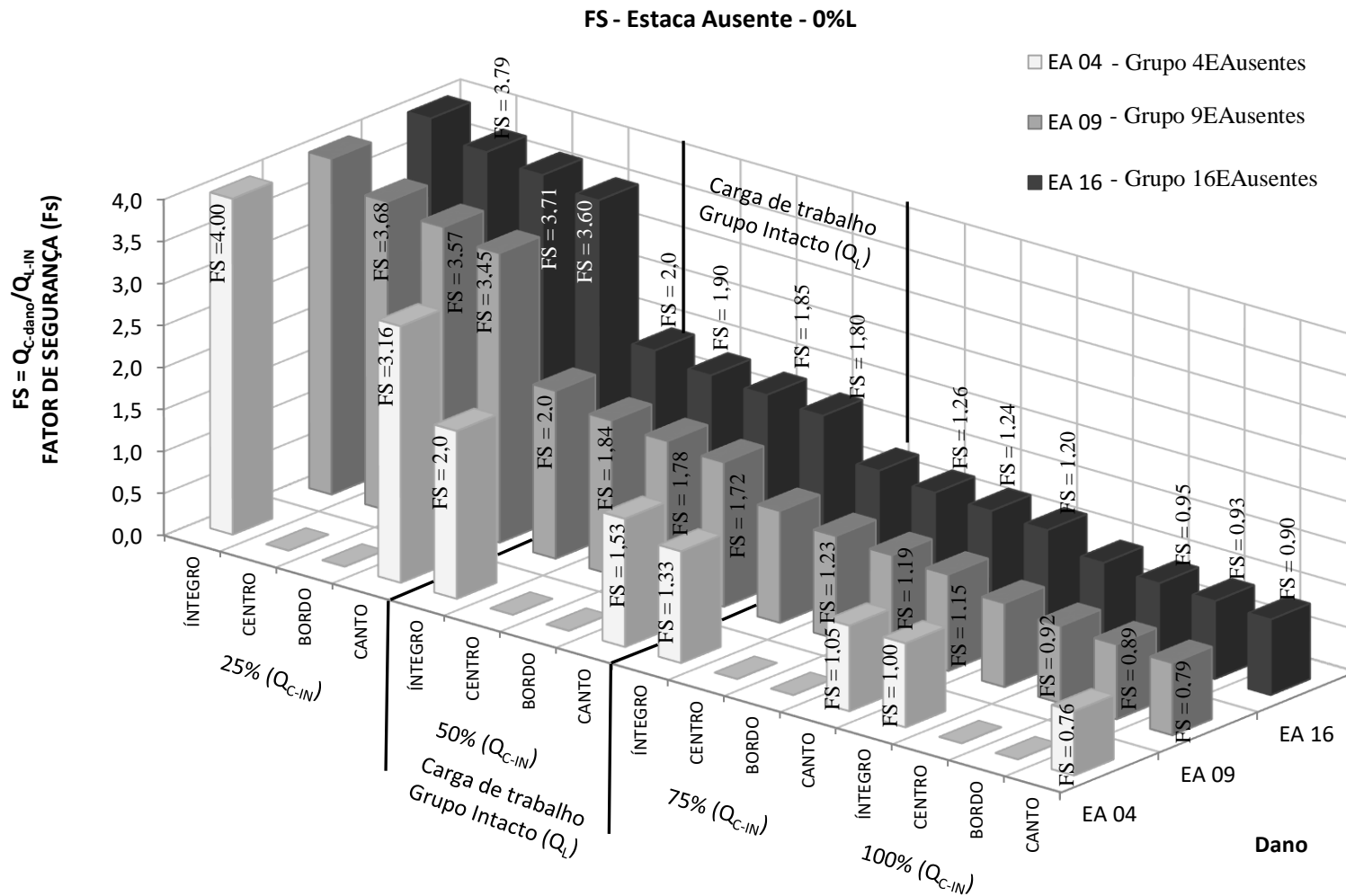


Figura 4.39 – Visão Geral do FS em função do incremento de carga para os casos com a presença de estacas ausentes.

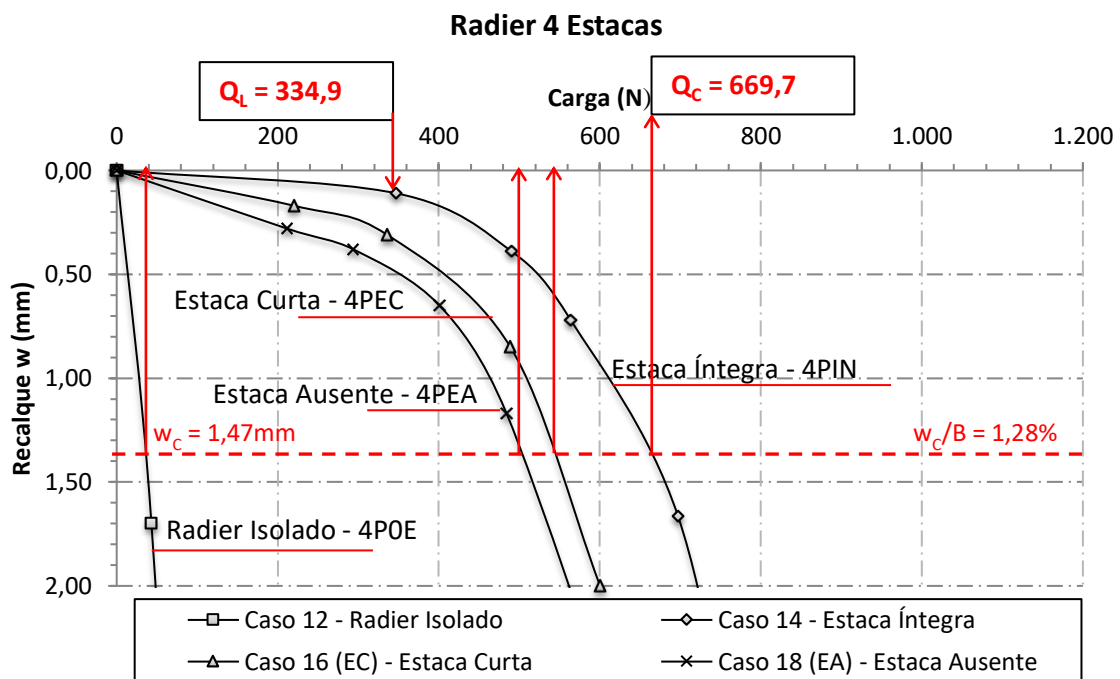
### 4.3. RIGIDEZ (K) E DESLOCAMENTO ( $\Delta$ )

#### 4.3.1. INTRODUÇÃO

O comportamento de estacas sob carregamento vertical é basicamente influenciado pelas propriedades tanto do solo quanto da própria estaca. A capacidade do grupo para redistribuir as cargas de estacas defeituosas para estacas íntegras e/ou para o radier resulta em uma redução menos severa da rigidez axial do que no caso de uma única estaca isolada defeituosa, desta forma serão avaliadas as variações de rigidezes e recalques dos grupos em diferentes posições de estacas danificadas.

#### 4.3.2. RADIER DE 4 ESTACAS – Dano: Estaca Curta (50%L) e Ausente (0%L)

A Fig. 4.40 apresenta o comportamento carga-recalque do radier isolado em comparação aos demais grupos de 4 estacas com a presença de estacas defeituosas. A partir desta curva pode-se determinar o fator de redução de recalque,  $S_r$ .



\*4PIN: Grupo Intacto; 4PEC: Estaca Curta; 4PEA: Estaca Ausente.

Figura 4.40 - Curva carga-recalque do radier isolado.

Conforme proposto por Bajad e Sahu (2008), uma forma de avaliar a influência da inclusão das estacas sob um radier seria por meio da relação de redução de recalque,  $S_r$ . Este parâmetro permite relacionar o recalque do radier isolado ( $d_{ri}$ ) e o recalque do radier estaqueado ( $d_{re}$ ), conforme Eq. 4.4.



$$S_r = \frac{d_{ri} - d_{re}}{d_{ri}} \quad (4.4)$$

Em que:

$d_{ri}$ : recalques do radier isolado;

$d_{re}$ : recalques do radier estaqueado, para cada dado carregamento.

Assim, quando ocorre um incremento de carga no sistema e o recalque das estacas é aumentado, o radier tende a apresentar uma maior absorção de carga. Para o caso dos radiers estaqueados com estacas defeituosas, pode-se usar este conceito para avaliar qual posição ou intensidade de dano sofrerá maior influência, conforme apresentado na Fig. 4.41. Nesta figura são observados os decréscimos dos fatores de redução de recalques em relação ao nível de dano do radier de 4 estacas. Com isso, para a situação de radiers de 4 estacas com uma estaca ausente, 0%L, (4PEA) o radier estará absorvendo maiores carregamentos, pois este apresentou menores valores do fator de redução de recalque do que o radier estaqueado com a presença do dano de estaca curta (4PEC).

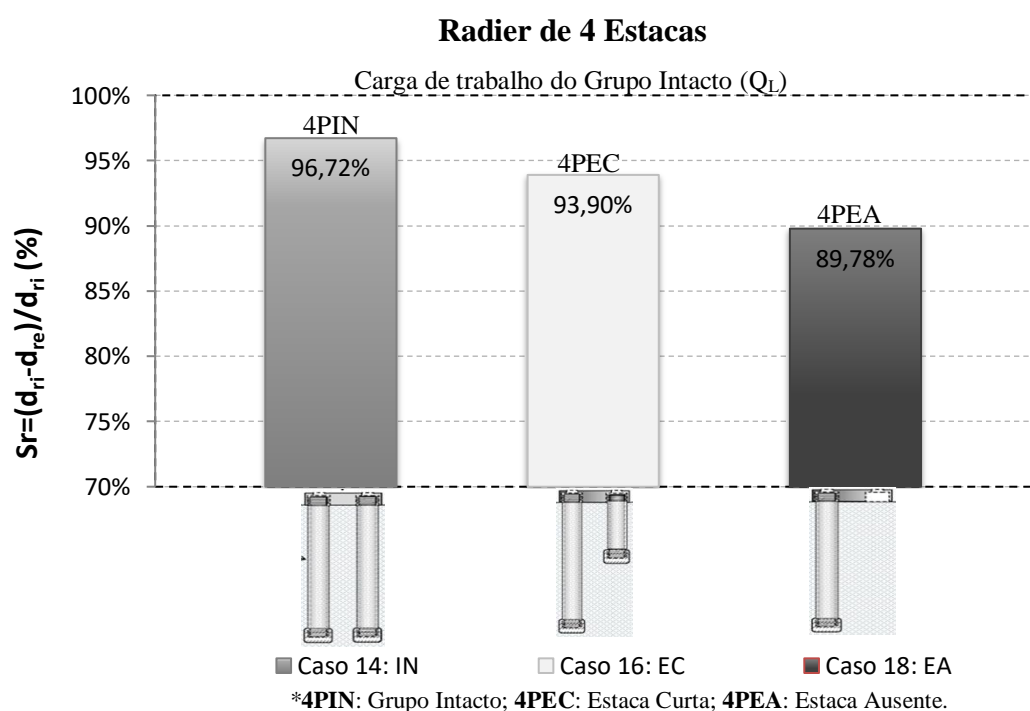


Figura 4.41 - Fator de redução de recalques.

Conforme apresentado na Fig. 4.41, a influência da intensidade do dano na relação de redução de recalque ( $S_r$ ) possui variação inferior a 4% para o caso em questão e para o nível de deslocamento máximo convencional.

A Tab. 4.7 apresenta o incremento de rigidez de acordo com os níveis de deslocamento e seus respectivos carregamentos. Os deslocamentos em relação ao percentual do diâmetro da estaca, onde 10% $D_E$  ou  $w_C/B = 1,8\%$  ( $w_C = 1,47\text{mm}$ ) representa o recalque referente a carga convencional ( $Q_C$ ), em destaque na tabela. Também é destacado o caso do grupo intacto como referência.

Tabela 4.7 - Efeito do tipo de dano sobre a carga aplicada e rigidez.

Caso	2,5% $D_E$ (0,36mm)		5,00% $D_E$ (0,73mm)		10% $D_E$ (1,47mm)	
	Carga (N)	Rigidez (N/mm)	Carga (N)	Rigidez (N/mm)	Carga (N)	Rigidez (N/mm)
14 – 4PIN	475,2	1319,9	565,3	774,3	669,7	455,6
16 – 4PEC	350,1	972,6	455,0	623,2	549,0	373,5
18 – 4PEA	277,5	770,9	413,7	566,7	511,5	348,0

\*4PIN: Grupo Intacto; 4PEC: Estaca Curta; 4PEA: Estaca Ausente.

A Fig. 4.42 demonstra a relação da rigidez com o nível de deslocamento do grupo. Assim como os danos tendem a se igualar quando tendem a se aproximar dos deslocamentos máximos, estes também diminuem suas diferenças em relação ao grupo intacto, pois este também se aproxima de seu limite de serventia, com diferença de rigidez média entre o grupo intacto e com dano na ordem de 20%.

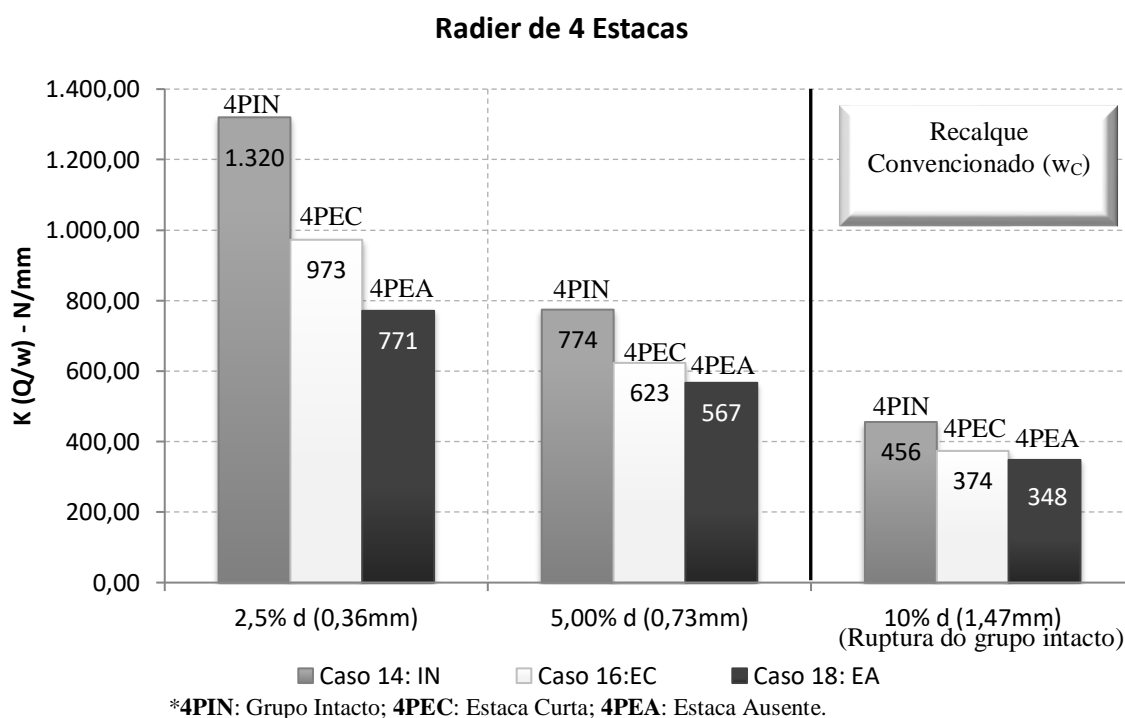


Figura 4.42 - Efeito do tipo de dano sobre a carga aplicada e rigidez.

Para o deslocamento inicial (2,5% $D_E$ ) a 4PEC apresenta uma diminuição na ordem

de 26% enquanto que para a 4PEA essa diminuição foi de 41%, ou seja, uma diferença de quase 21% devido a intensidade do dano. Diferença que tende a diminuir para 9% para o segundo nível de deslocamento e 7% para o deslocamento máximo de 10% D<sub>E</sub> (1,47mm).

A Fig. 4.43 apresenta o incremento de recalque em relação à intensidade do dano e demonstra desde os primeiros carregamentos há um grande incremento de recalque para os casos danificados, e um equilíbrio quando se aproxima da carga de ruptura convencional.

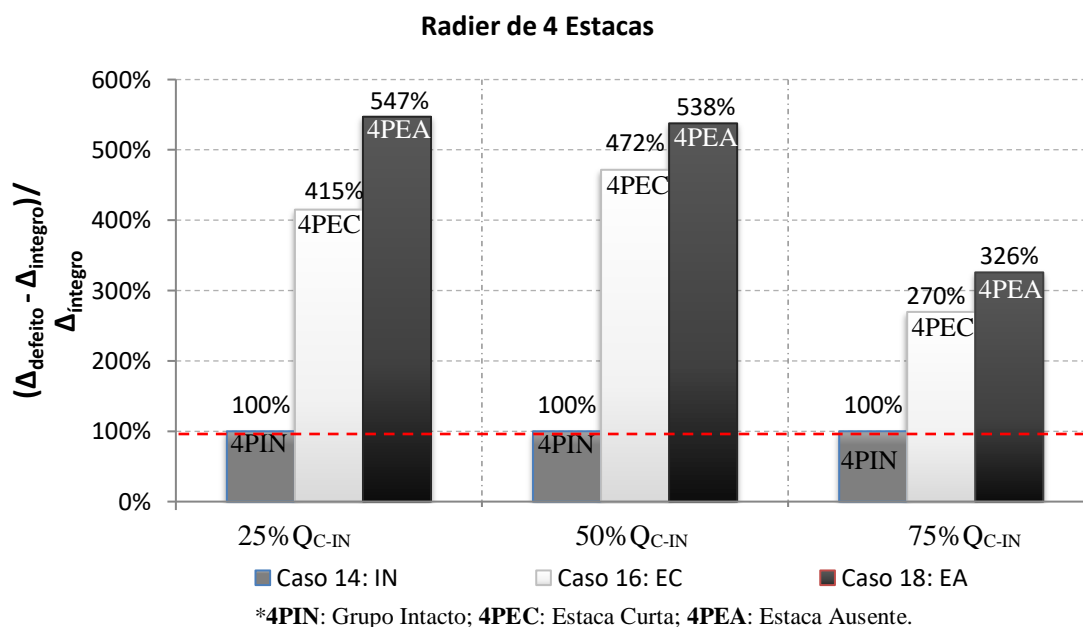
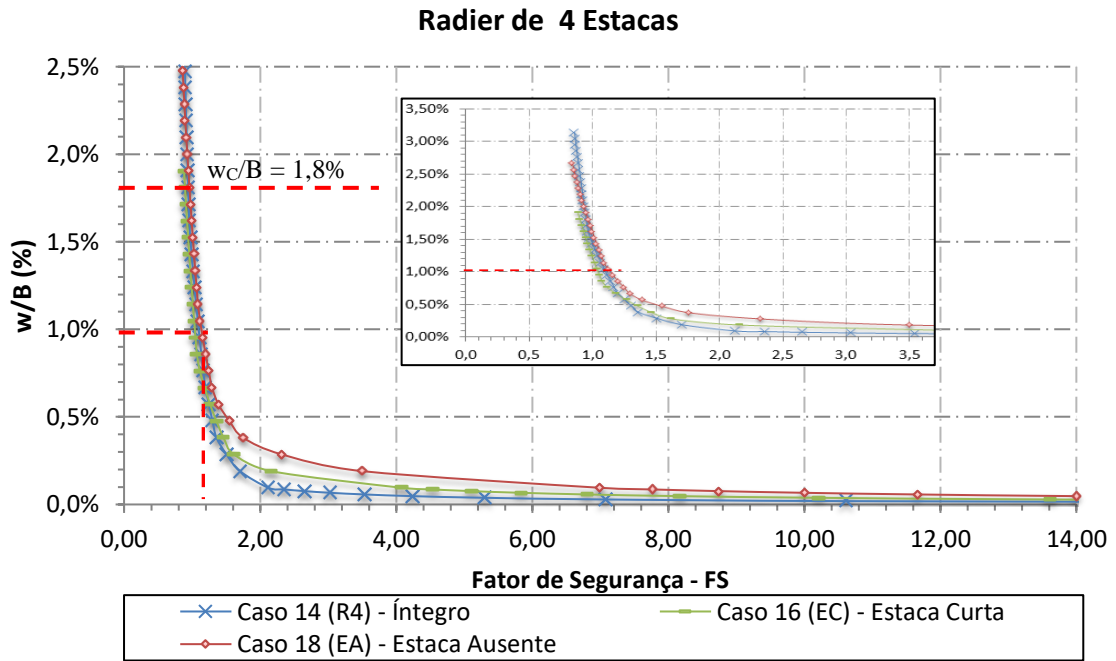


Figura 4.43 - Relação do percentual de incremento de recalque em função do tipo de dano.

Analisando os radiers estaqueados em termos de fator de segurança referente aos recalques normalizados, na Fig. 4.44, observa-se a tendência de que a partir de 0,5% do recalque normalizado os fatores de segurança estão menores que o permitido por norma (<2,0).

Ainda na Fig. 4.44, o fator de segurança (FS), relação entre a carga convencional na situação de dano (Q<sub>C-DANO</sub>) e a carga limite de serviço (Q<sub>L-IN</sub>), nota-se que para os menores valores de recalque têm-se os maiores fatores de segurança e com o aumento dos deslocamentos os fatores de segurança tendem a se aproximar da unidade. A variação da intensidade do dano tende a apresentar valores de fator de segurança mais dispersos para os menores valores de recalque até o fator de segurança de 2,0. Já entre os fatores de segurança 2,0 e 1,0 os recalques tendem a convergir e se comportar de maneira mais equivalente.



\*4PIN: Grupo Intacto; 4PEC: Estaca Curta; 4PEA: Estaca Ausente.

Figura 4.44 - Recalque normalizado com fator de segurança global dos radiers estaqueados.

Desta forma nota-se que os radiers na presença de estacas danificadas sofrem alteração significativa nos valores de fator de segurança (FS) quando o estágio de carga está próximo da carga de ruptura, devido à diminuição de sua capacidade de carga.

A Fig. 4.45 apresenta o Fator de Redução de Rigidez,  $R_{ks}$  que é a relação de rigidez da estaca danificada pela rigidez da estaca íntegra (Poulos, 1997). Pode-se notar que mesmo que os grupos tenham a mesma área líquida de contato ( $A_G/A_R = 0,40$ ) o sistema tende a perder rigidez com a presença de estacas danificadas mesmo que não haja alteração nos espaçamentos entre estas.

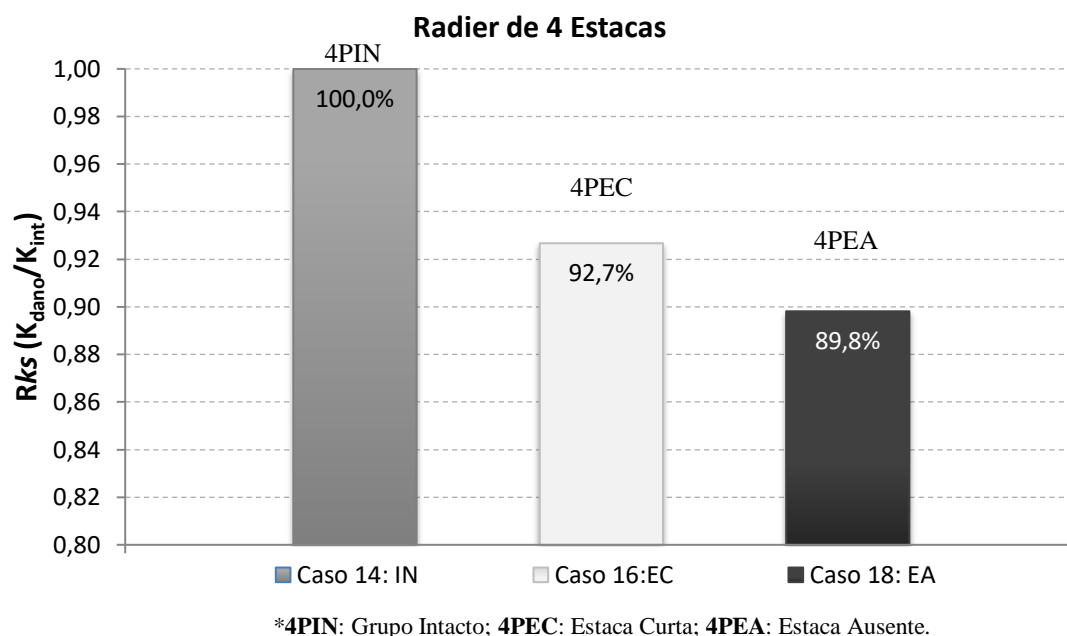


Figura 4.45 - Fator de Redução de Rigidez,  $R_{ks}$ .

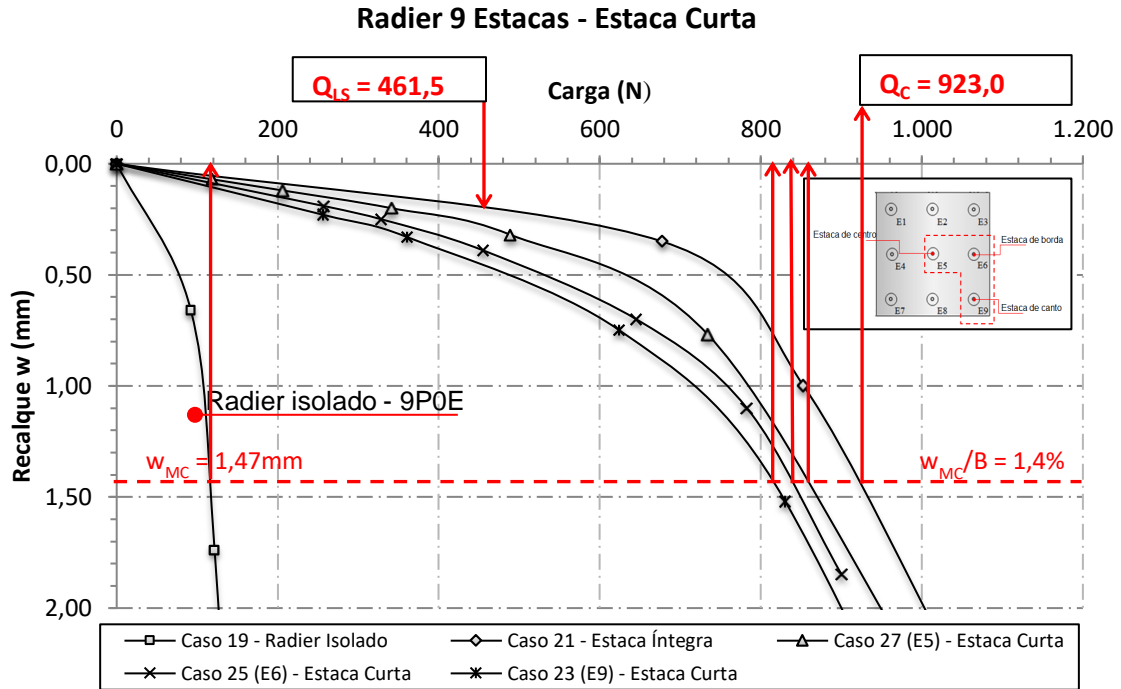
A Tab. 4.8 apresenta em resumo os valores dos fatores de redução de rigidez.

Tabela 4.8 - Fator de Redução de Rigidez.

CASO	$R_{ks}$
4PIN: Radier Íntegro de 4 Estacas	1
4PEC: Radier Estaca Curta (EC)	0,93
4PEA: Radier Estaca Ausente (EA)	0,90

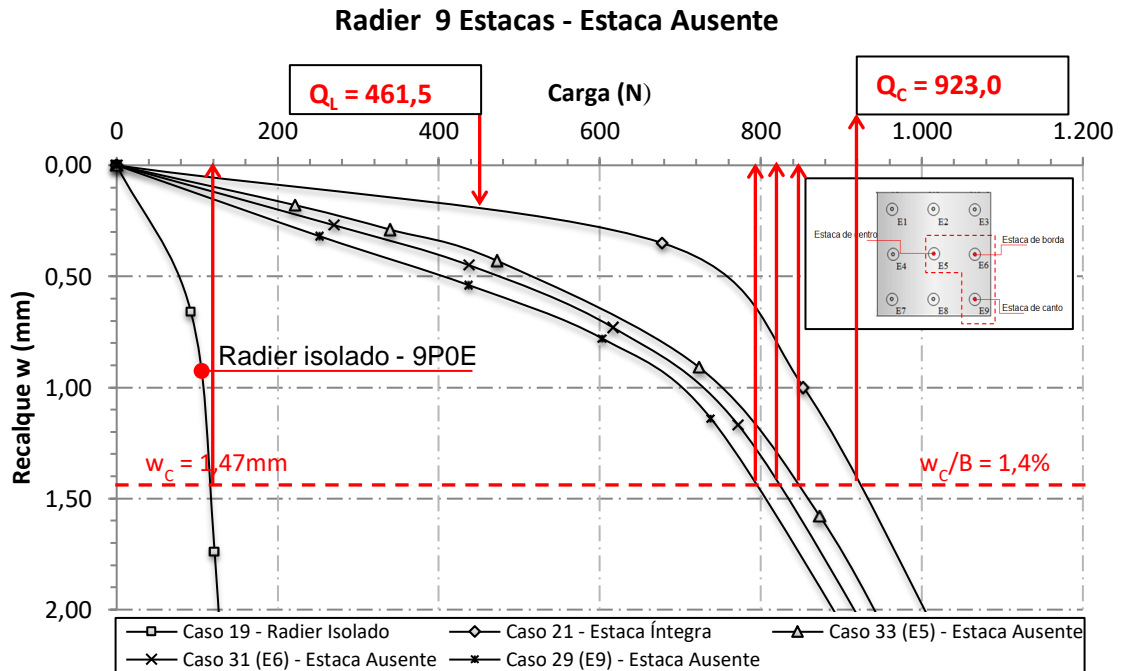
### 4.3.3. RADIER DE 9 ESTACAS – Dano: Estaca Curta (50%L) e Ausente (0%L)

As Figs. 4.46 e 4.47 apresentam o comportamento carga-recalque do radier isolado em comparação aos demais grupos de 9 estacas com a presença de estacas defeituosas a fim de avaliar o fator de redução de recalque,  $S_r$ .



\*9PIN: Grupo Intacto; 9P9EC: Estaca Canto Curta; 9P6EC: Estaca Borda Curta; 9P5EC: Estaca Centro Curta.

Figura 4.46 - Curva carga-recalque do radier isolado, 9PEC.

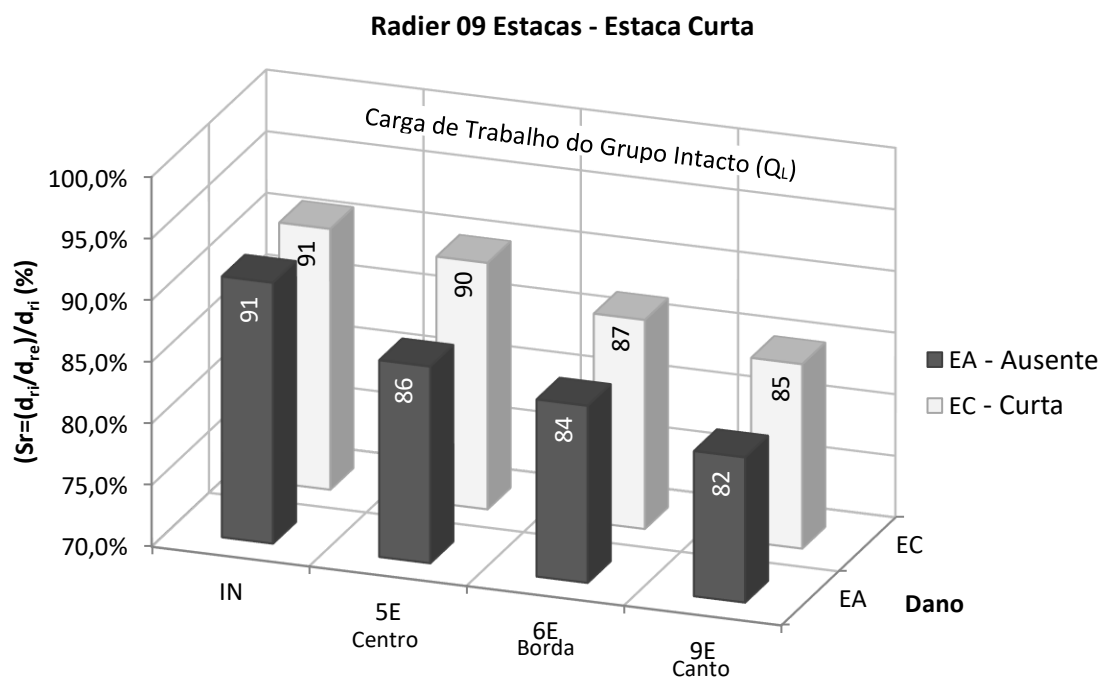


\*9PIN: Grupo Intacto; 9P9EA: Estaca Canto Ausente; 9P6EA: Estaca Borda Ausente; 9P5EA: Estaca Centro Ausente.

Figura 4.47 - Curva carga-recalque do radier isolado, 9PEA.

Na Fig. 4.48 é observado um decréscimo no recalque, maior valor de  $S_r$ , para o grupo que apresentou o dano na estaca central (E5) e menor para o grupo em que o dano se encontra na estaca de canto (E9). Com isso, o radier, para a situação de dano no canto (E9) estará

absorvendo maiores carregamentos do que o radier estaqueado com a presença do dano na estaca central (E5).



\***9P9IN**: Grupo Intacto; **9P9EC**: Estaca Canto Curta; **9P6EC**: Estaca Borda Curta; **9P5EC**: Estaca Centro Curta.  
 \***9P9EA**: Estaca Canto Ausente; **9P6EA**: Estaca Borda Ausente; **9P5EA**: Estaca Centro Ausente.

Figura 4.48 - Relação de redução de recalques, EC.

Conforme apresentado na Fig. 4.48, dentre os casos apresentados, a influência da posição do dano em função do fator redução de recalque ( $S_r$ ) possui variação inferior a 7% quando o conjunto está sob o carregamento de 50%  $Q_{C-IN}$  para os casos com o dano com 50% do comprimento das estacas íntegras. Pode-se observar também que a estaca de canto (E9) possui maior absorção de carga e menor valor do fator de redução de recalque do que a presença do dano nas demais posições. Para a situação mais grave de intensidade de dano, com a ausência de uma estaca (0%L) a variação percentual do fator de redução de recalque é maior que 8% entre as diferentes posições de dano. Para a posição de dano na estaca central, estaca (E5), houve uma perda de 1,2% para 50%L e 5% para a ausência de estaca nesta posição.

Com o incremento de carga e por consequência de deslocamento (5%  $D_E$ ) na ordem de 43% na redução de rigidez do grupo intacto, a diferença entre os grupos danificados e o grupo intacto diminui consideravelmente, onde 9% para a estaca 9P5EC, 16% para a estaca 9P6EC e 22% para a 9P9EC. Para os casos ausentes a principal diferença se dá na estaca central, em que se apresenta com uma perda de rigidez em relação ao grupo intacto de 19%, enquanto a rigidez da estaca de borda (9P6EC) danificada é de 21% e para a estaca de canto (9P9EC) 27%.

Vale destacar a diferença de perda de rigidez entre as estacas centrais para o caso de dano curto e ausente, ela se dá principalmente pelo efeito de redistribuição de carga absorvida pelas demais estacas, até seus limites. Pois, a partir disso, até estas não poderão compartilhar destes carregamentos adicionais, fato que pode ser comprovado pelo nível de recalque seguinte ( $10\%D_E$ ), onde os grupos com estacas curtas se apresentam com perda de rigidez de 7% para a 9P5EC, 9% para a 9P6EC e 11% para a 9P9EC em relação ao grupo intacto. Fato que não é diferente, mas um pouco mais agravado, para o grupo das estacas ausentes, que apresentam perde de rigidezes de 8% para 9P5EA, 11% para a 9P6EA e 14% para a 9P9EA. As Tab. 4.9 e 4.10 apresentam a evolução das rigidezes para os casos ensaiados.

Tabela 4.9 - Efeito do tipo de dano sobre a carga aplicada e rigidez para 9PEC.

Caso	2,5% $D_E$ (0,36mm)		5,00% $D_E$ (0,73mm)		10% $D_E$ (1,47mm)	
	Carga (N)	Rigidez (N/mm)	Carga (N)	Rigidez (N/mm)	Carga (N)	Rigidez (N/mm)
21 – 9PIN	680,3	1889,8	780,3	1068,9	923,0	627,9
27 – 9P5EC	511,1	1419,8	712,7	976,3	855,2	581,8
25 – 9P6EC	428,1	1189,2	655,8	898,3	840,9	572,0
23 – 9P9EC	379,5	1054,2	611,9	838,2	817,0	555,8

\*9PIN: Grupo Intacto; 9P9EC: Estaca Canto Curta; 9P6EC: Estaca Borda Curta; 9P5EC: Estaca Centro Curta.

Tabela 4.10 - Efeito do tipo de dano sobre a carga aplicada e rigidez para 9PEA.

Caso	2,5% $D_E$ (0,36mm)		5,00% $D_E$ (0,73mm)		10% $D_E$ (1,47mm)	
	Carga (N)	Rigidez (N/mm)	Carga (N)	Rigidez (N/mm)	Carga (N)	Rigidez (N/mm)
21 – 9PIN	680,3	1889,8	780,3	1068,9	923,0	627,9
33 – 9P5EA	406,3	1128,6	629,4	862,2	848,8	577,4
31 – 9P6EA	354,0	983,4	616,3	844,2	823,2	560,0
29 – 9P9EA	286,2	795,1	568,7	779,1	795,5	541,1

\*9PIN: Grupo Intacto; 9P9EA: Estaca Canto Ausente; 9P6EA: Estaca Borda Ausente; 9P5EA: Estaca Centro Ausente.

Logo, pode-se concluir para este caso que existe uma variação tanto em relação a posição do dano quanto para a intensidade do dano para o caso de 9 estacas que é mais destacado para os níveis iniciais de deslocamento e que tende a se comportar de maneira similar, com menores variação de valores, nos deslocamentos próximos ao máximo convencional. As Figs. 4.49 e 4.50 demonstram esse comportamento de perda de rigidez dos grupos em função de diferentes níveis de recalque, onde nota-se que a diferença entre o maior valor e o menor para cada nível de carregamento tende a diminuir.



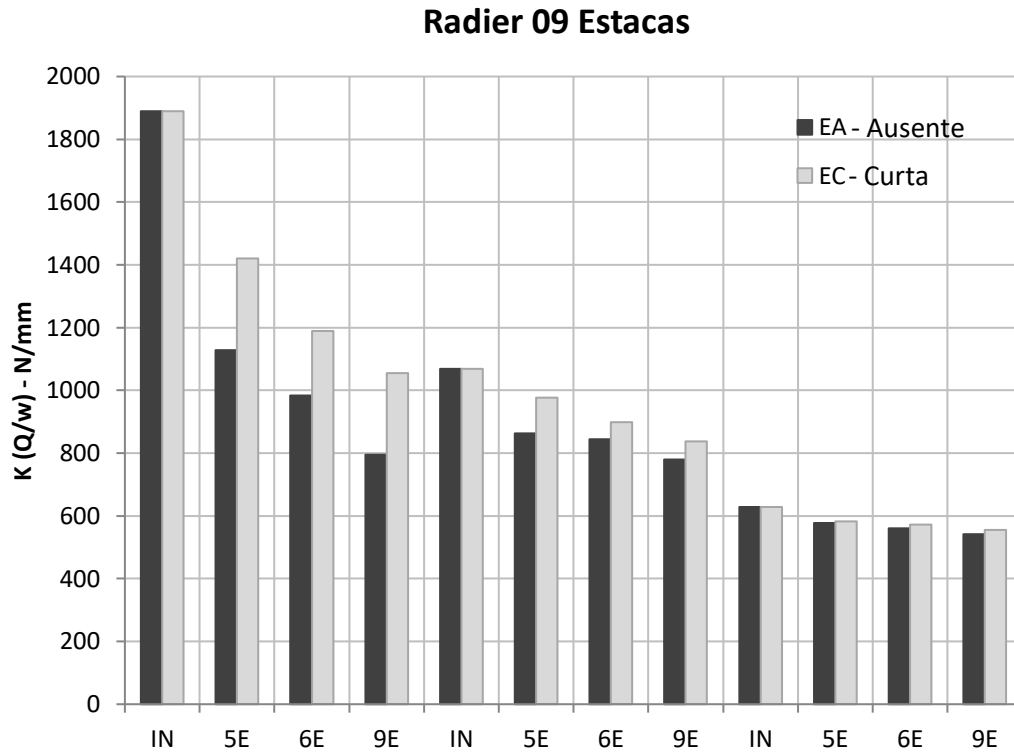
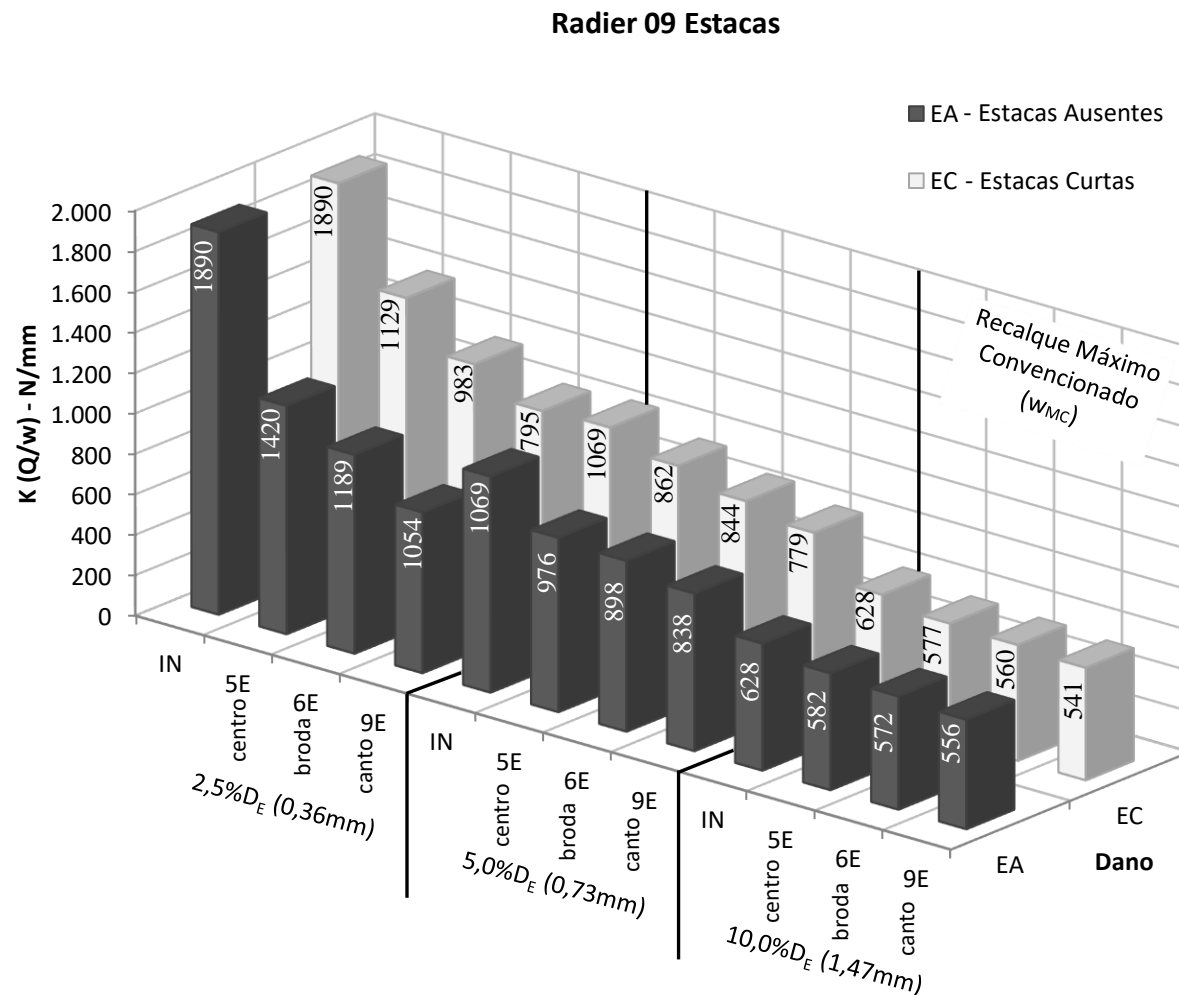


Figura 4.49 - Efeito do tipo de dano e posição do dano em relação à rigidez do sistema



\***9PIN**: Grupo Intacto; **9P9EA**: Estaca Canto Ausente; **9P6EA**: Estaca Borda Ausente; **9P5EA**: Estaca Centro Ausente.

\***9PIN**: Grupo Intacto; **9P9EC**: Estaca Canto Curta; **9P6EC**: Estaca Borda Curta; **9P5EC**: Estaca Centro Curta.

Figura 4.50 – Efeito do tipo de dano e posição do dano em relação à rigidez do sistema.

Conforme apresentado nas Tab. 4.9 e 4.10, os grupos de nove (09) estacas em um mesmo nível inicial de recalque ( $2,5\%D_E$ ) tem-se uma perda de 25% para a estaca curta central (9P5EC), de 37% para a estaca curta de borda (9P6EC) e 44% para a estaca curta de canto (9P9EC) em relação ao grupo intacto. Já para os casos ausentes tem-se uma maior perda de rigidez na ordem de 40%, 48% e 58%, para centro, borda e canto, respectivamente.

As Figs. 4.51 e 4.52 apresentam o percentual de incremento de recalque em função da posição da estaca danificada, e nela pode-se notar que nos carregamentos iniciais, com  $25\%Q_{C-IN}$ , o acréscimo de recalque pode chegar a 43% a mais do que o grupo intacto, quando o dano se encontra no canto do grupo (E9), e de apenas 11% a mais que o grupo intacto para o grupo com estaca danificada na posição central (E5) e de maneira intermediária, com 30% a mais do que o grupo intacto, para as estacas de bordo (E6). Porém, com o aumento dos carregamentos para  $50\%Q_{C-IN}$  e  $75\%Q_{C-IN}$ , o incremento de recalque dos grupos danificados tende a se distanciar do grupo intacto, ao passo que para os mesmos níveis de carregamentos a diferença entre os incrementos dos recalques dos grupos danificados, tende a diminuir, ou seja, até a carga de trabalho a posição do dano pode influenciar em até 30% nos incrementos de recalque, quando o nível de carregamento chega aos  $75\%Q_{C-IN}$ , essa diferença fica abaixo de 20%.

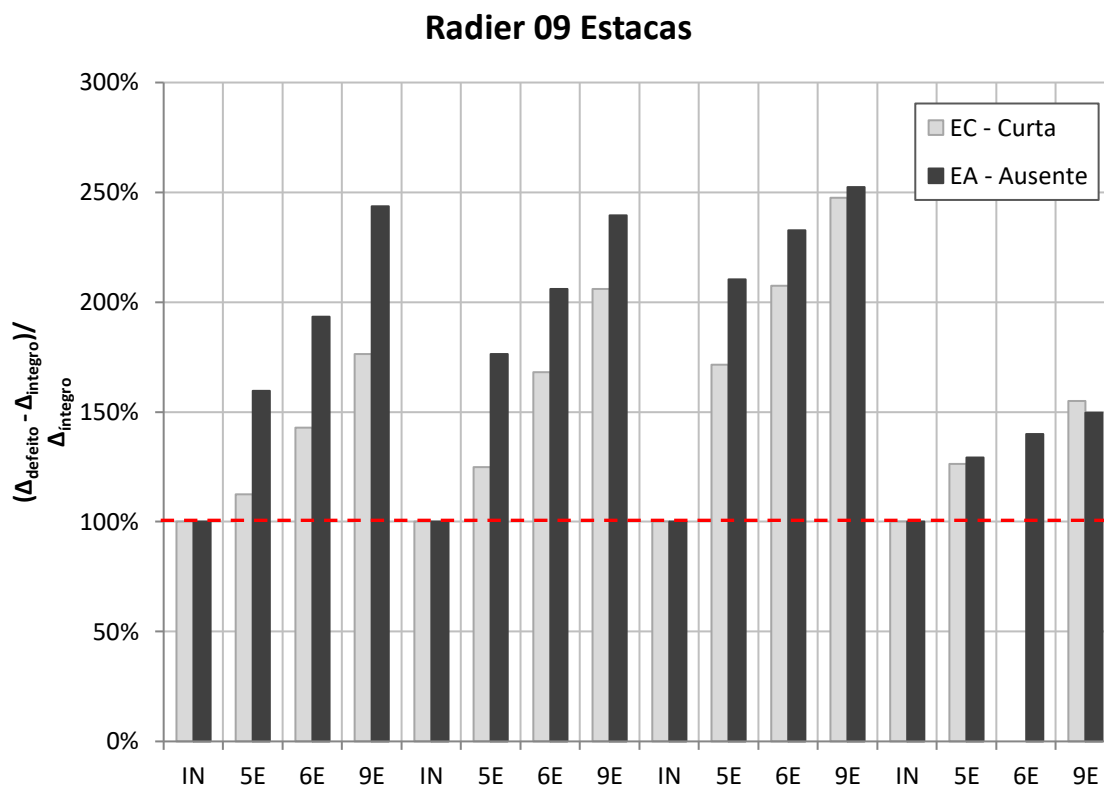


Figura 4.51 - Incremento de recalque em função da posição da estaca danificada.

Outro fato importante de ser destacado é o comportamento apresentado pelo grupo com o dano na estaca de canto (E9), em que desde os carregamentos iniciais, já apresenta maior incremento de recalque e a menor variação para os três (03) níveis de carregamento, 16 pontos percentuais (143% a 159%).

Situação oposta acontece com o caso com dano na posição central (E5) que aumenta 31%.

Desta forma, o grupo com dano central apresenta menores recalques que os demais grupos, porém, maiores variações de acordo com o nível de carregamento. Enquanto o grupo com o dano no canto (E9) já apresenta os maiores recalques desde o início com pequenos incrementos de recalque com o aumento dos carregamentos.

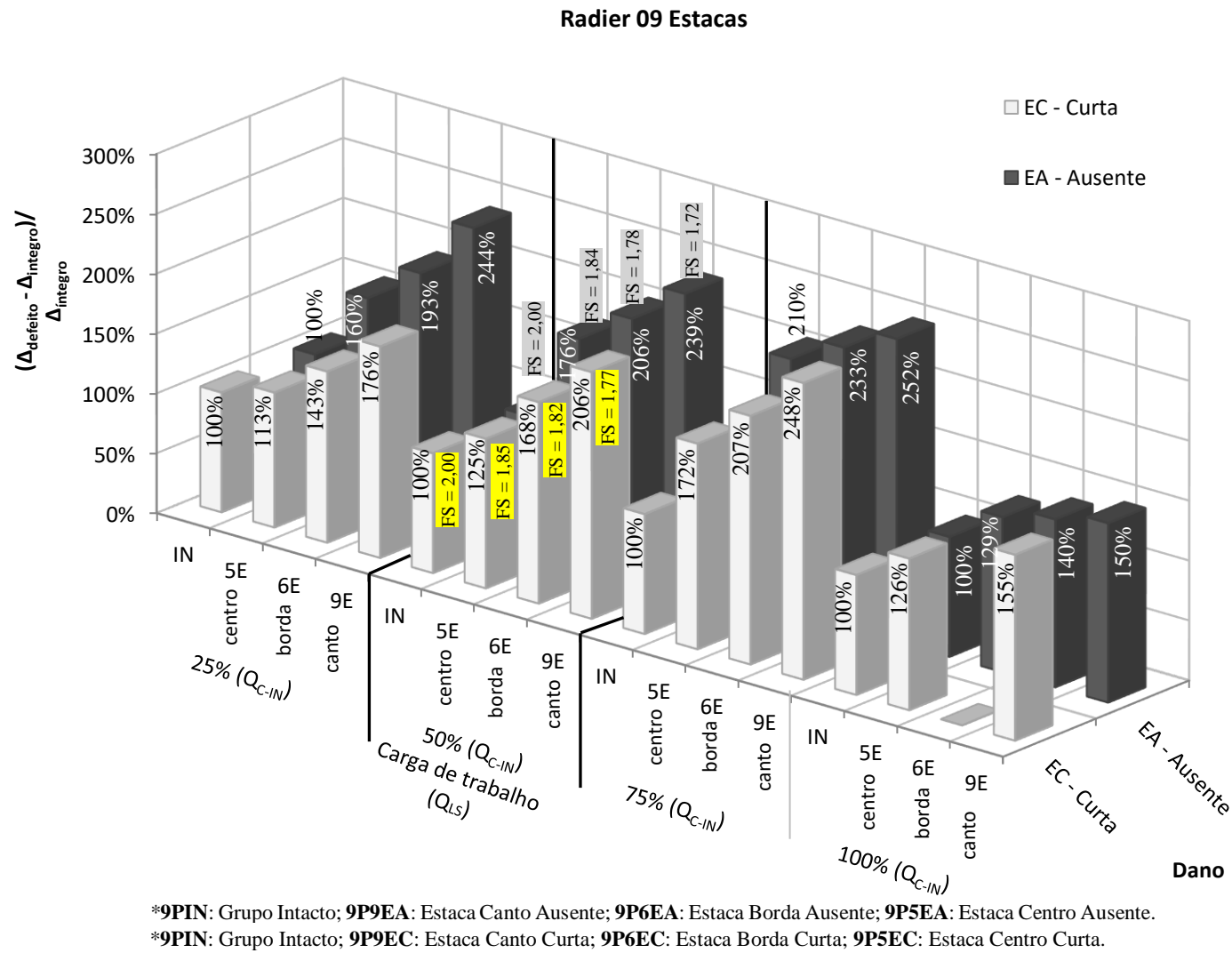


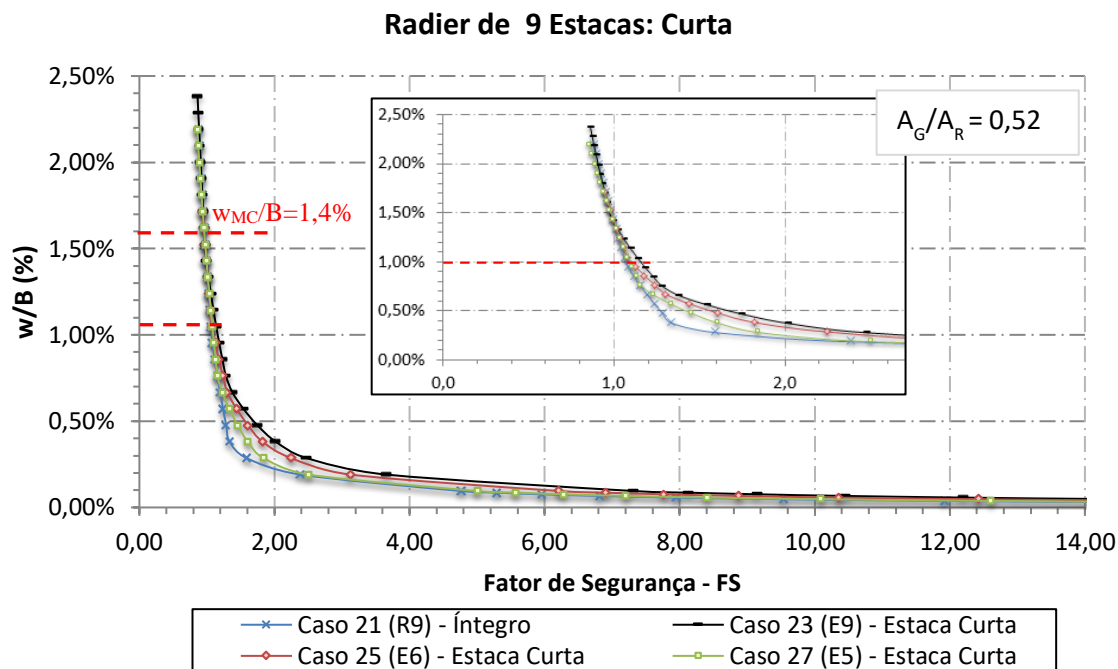
Figura 4.52 – Incremento de recalque em função da posição da estaca danificada.

Para o caso dos grupos com as estacas ausentes (0%L) essa situação se destaca ainda mais devido os incrementos dos recalques que estão 34% maiores que os grupos intactos, para o caso (E5) e 52% para o caso das estacas de canto (E9). Porém com diferenças de incremento de 22, 14 e 7 pontos percentuais para o primeiro (25% $Q_{C-IN}$ ), segundo (50% $Q_{C-IN}$ ) e terceiro estágio (75% $Q_{C-IN}$ ), respectivamente. Ou seja, menores do que o caso de dano com as estacas curtas, com 50%L.

Desta forma, quando o dano referente ao comprimento da estaca se apresenta extremo (0%L) a posição sofre menos influência, porém em maiores níveis de recalque e em qualquer nível de carregamento. Para os casos com 50%L, este fato ocorre a partir da carga de trabalho, 50% $Q_{C-IN}$ .

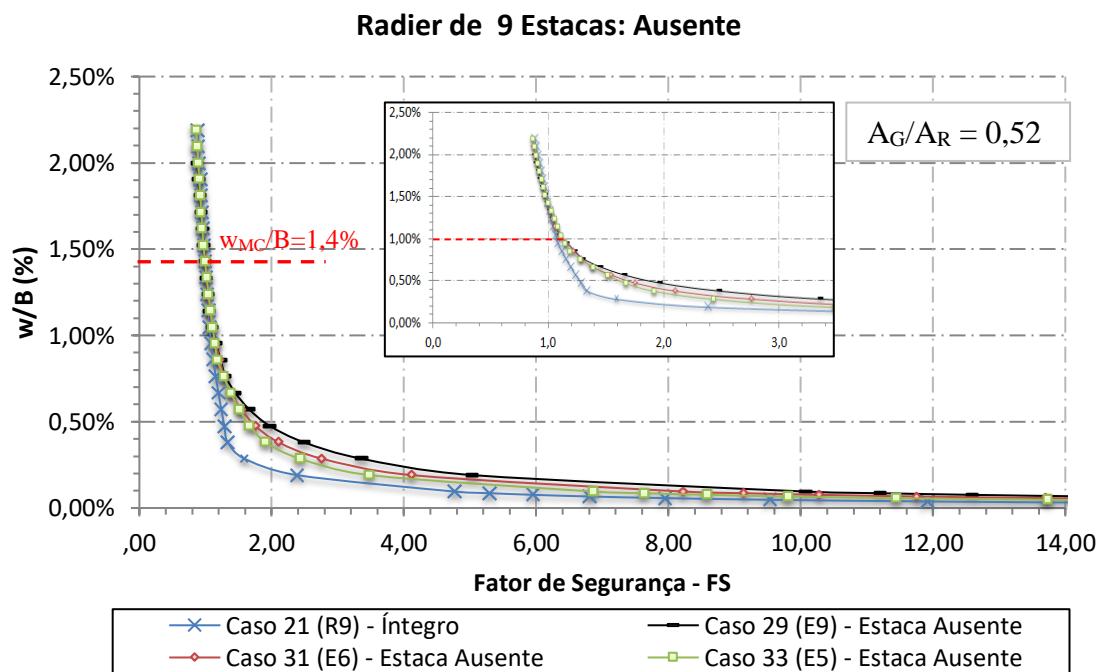
Analisando os radiers estaqueados, em termos de fator de segurança referente aos recalques normalizados, nas Figs. 4.53 e 4.54, observa-se que existe a tendência de que até 1% do recalque normalizado esses radiers apresentem  $FS < 1$ .

A Fig. 4.53 apresenta a relação entre o incremento de recalque normalizado ( $w/B$ ) e o fator de segurança real ( $FS$ ). Nela se observa que para os menores valores de recalque têm-se os maiores valores de fator de segurança, e conseqüentemente com o aumento do recalque os fatores de segurança tendem a se aproximar da unidade. Para os casos dos grupos com a presença de estaca curta o valor da relação  $w/B$  entre 0,2% e 0,4% do recalque normalizado, ou seja, entre 0,2 mm e 0,4 mm, são apresentados fatores de segurança em torno de 2,0. Conforme Fig. 4.54, para os grupos com estaca ausentes, o qual apresentam maior nível de recalque, e mais dispersos, do que os casos com estaca curta, que estão mais próximos do grupo intacto.



\*9PIN: Grupo Intacto; 9P9EC: Estaca Canto Curta; 9P6EC: Estaca Borda Curta; 9P5EC: Estaca Centro Curta.

Figura 4.53 - Recalque normalizado com fator de segurança real dos rádier estaqueados, 9PEC.



\*9PIN: Grupo Intacto; 9P9EA: Estaca Canto Ausente; 9P6EA: Estaca Borda Ausente; 9P5EA: Estaca Centro Ausente.

Figura 4.54 – Recalque normalizado com fator de segurança real dos rádier estaqueados, 9PEA.

Desta forma, nota-se que os radiers na presença de estacas danificadas sofrem alteração significativa no comportamento do fator de segurança quando o estágio de carga está próximo da carga de ruptura, devido à diminuição de sua capacidade de carga.

A Fig. 4.55 apresenta o Fator de Redução de Rigidez,  $R_{ks}$ . Nota-se que mesmo que os grupos tenham a mesma área líquida de contato ( $A_G/A_R = 0,52$ ) as estacas tendem a perder a rigidez mesmo que não haja alteração nos espaçamentos entre as estacas.

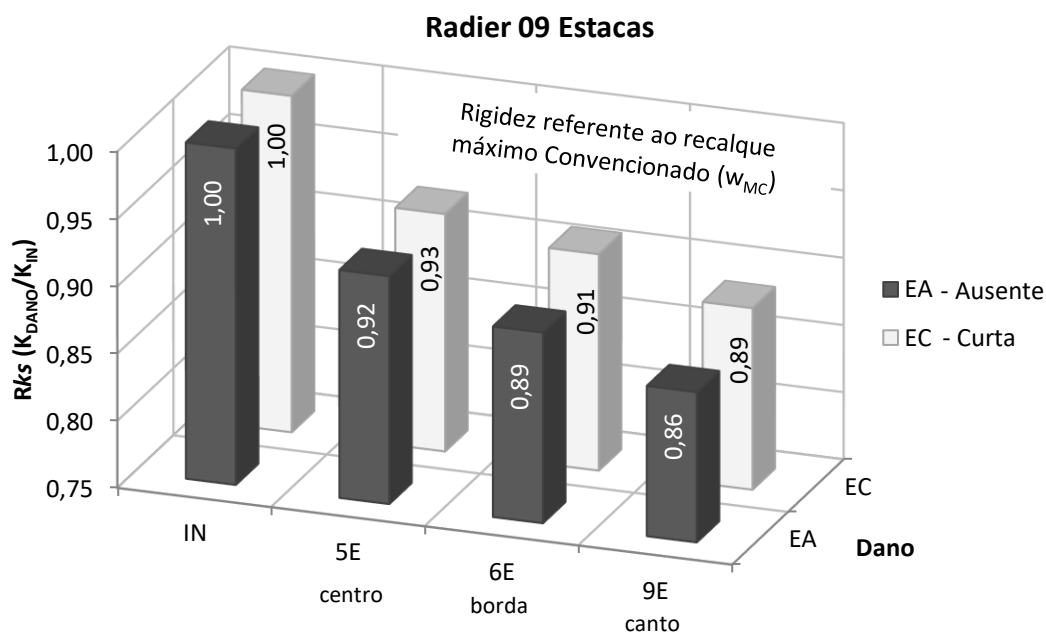


Figura 4.55 - Fator de Redução de Rigidez,  $R_{ks}$ .

A Tab. 4.11 apresenta em resumo dos valores dos fatores de redução das rigidezes dos grupos com a presença de estacas curtas.

Tabela 4.11 - Fator de Redução de Rigidez, EC.

CASO	$R_{ks}$
Radier Íntegro de 9 Estacas (9PIN)	1,00
Radier Estaca do Centro Curta (9P5EC)	0,93
Radier Estaca de Borda Curta (9P6EC)	0,91
Radier Estaca do Canto Curta (9P9EC)	0,89

A Tab. 4.12 apresenta em resumo os valores dos fatores de redução das rigidezes dos grupos com a presença de estacas ausentes.



Tabela 4.12 - Fator de Redução de Rigidez, EA.

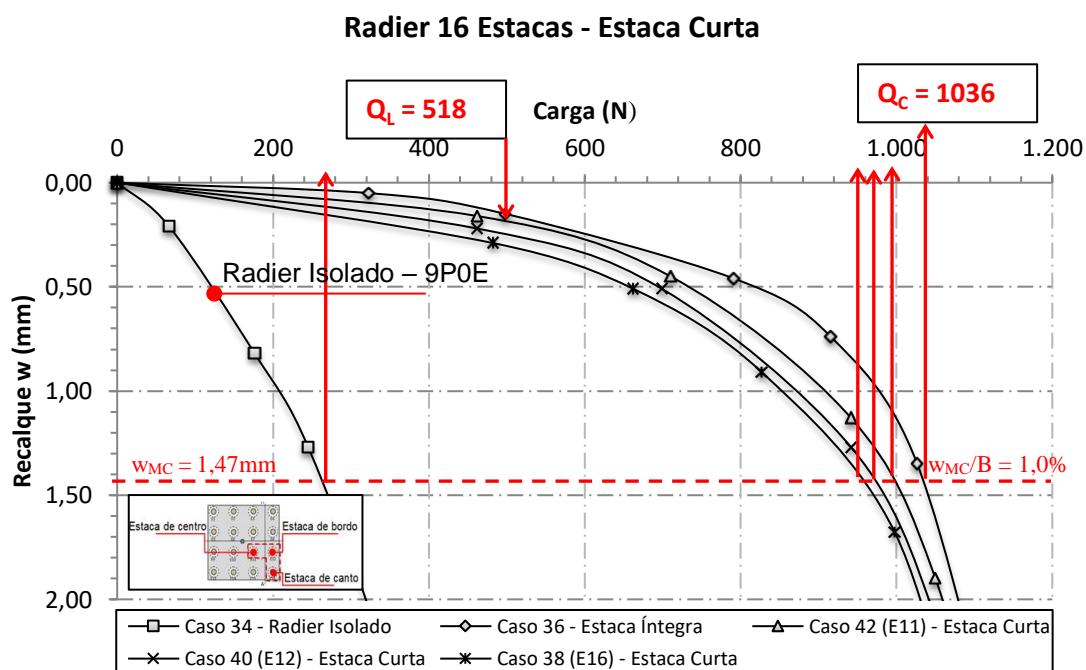
CASO	$R_{ks}$
Radier Íntegro de 9 Estacas (9PIN)	1,00
Radier Estaca do Centro Ausente (9P5EA)	0,92
Radier Estaca de Borda Ausente (9P6EA)	0,89
Radier Estaca do Canto Ausente (9P9EA)	0,86

Destá forma conclui-se para o grupo de 9 estacas que tanto os grupos com estacas curtas (50%L) quanto com estacas ausentes (0%L) a variação do fator de redução de rigidez entre os grupos com dano está muito próximo, em torno de 3% para as estacas curtas e 4% para as estacas ausentes, e estas de 7% e 8% em relação ao grupo intacto, respectivamente para os estágios finais de carregamento.

Pode-se observar que quanto maior a solicitação da estaca em função da sua posição mais significativa a influência do tipo de dano.

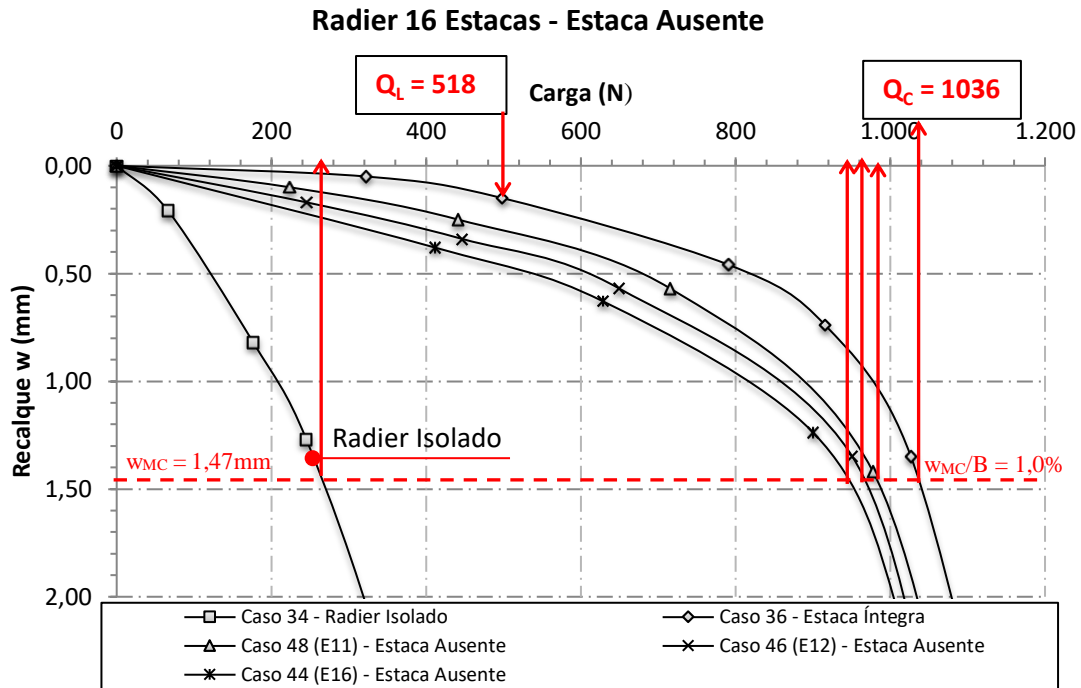
#### 4.3.4. RADIER DE 16 ESTACAS – Dano: Estaca Curta (50%L) e Ausente (0%L)

As Fig. 4.56 e 4.57 apresentam o comportamento carga-recalque do radier isolado em comparação aos demais grupos de 16 estacas com a presença de estacas defeituosas, onde a partir deste, pode-se determinar o fator de redução de recalque,  $S_r$ .



\*16PIN: Grupo Intacto; 16P16EC: Estaca Canto Curta; 16P12EC: Estaca Borda Curta; 16P11EC: Estaca Centro

Figura 4.56 - Curva carga-recalque do radier isolado, 16PEC.



\*16PIN: Grupo Intacto; 16P16EA: Estaca Canto Ausente; 16P12EA: Estaca Borda Ausente; 16P11EA: Estaca Centro Ausente.

Figura 4.57 - Curva carga-recalque do radier isolado, 16PEA.

Na Fig. 4.58 é observado um decréscimo no recalque, maior valor de  $S_r$ , para o grupo que apresentou o dano na estaca central (16P11EA) e menor para o grupo em que o dano se encontra na estaca de canto (16P16EA). Com isso, o radier, para a situação de dano no canto (16P12EA) estará absorvendo maiores carregamentos do que o radier estaqueado com a presença do dano na estaca central (16P11EA).

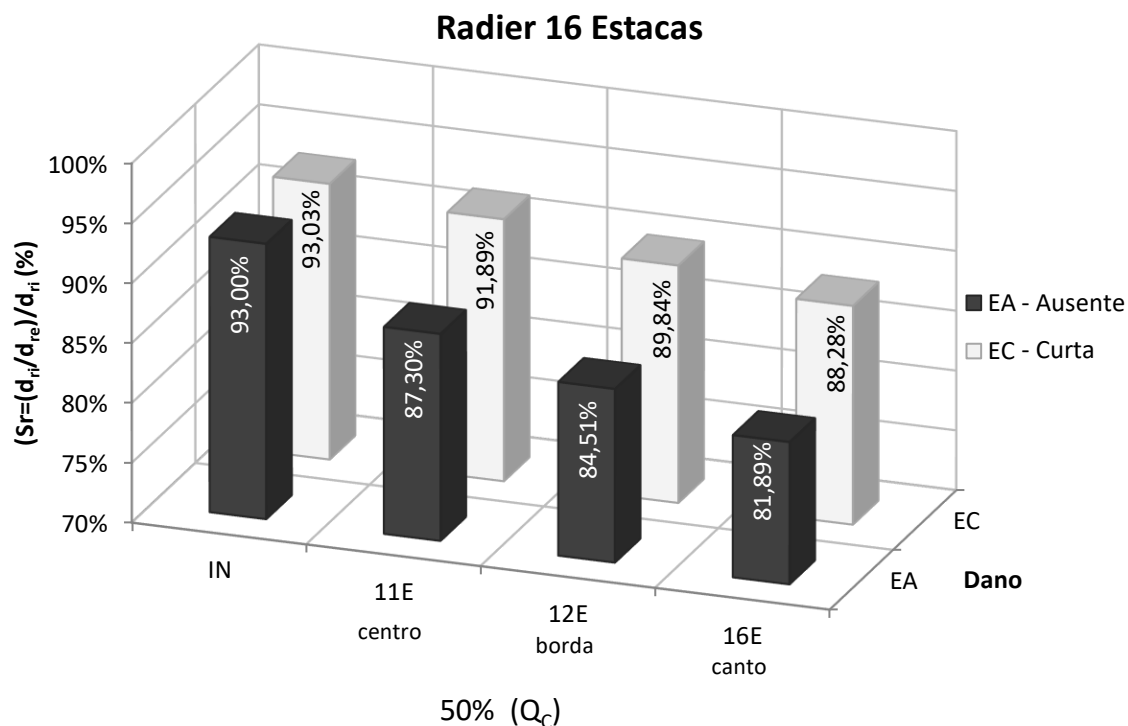


Figura 4.58 - Relação de redução de recalques,  $S_r$ .

Conforme apresentado na Fig. 4.58, a influência da posição do dano na relação de redução de recalque ( $S_r$ ) possui variação inferior a 06 pontos percentuais para o caso em questão das estacas ausentes e menor que 4,0 para os casos das estacas curtas, porém, mantém a tendência do comportamento onde a estaca de canto (16P16E) possui maior absorção de carga o que influencia no maior percentual de recalque, ou seja, menor  $S_r$ . A diferença entre a magnitude de dano para o grupo de 16 estacas é na ordem de 5 pontos percentuais, o que confirma a pequena influência para esse caso.

A Tab. 4.13 apresenta os valores de rigidezes para os diferentes níveis de deslocamento para os grupos com estacas curtas.

Tabela 4.13 - Efeito do tipo de dano sobre a carga aplicada e rigidez (16PEC).

Caso	2,5% $D_E$ (0,36mm)		5,00% $D_E$ (0,73mm)		10% $D_E$ (1,47mm)	
	Carga (N)	Rigidez (N/mm)	Carga (N)	Rigidez (N/mm)	Carga (N)	Rigidez (N/mm)
36 – 16PIN	696,9	1935,7	911,5	1248,6	1035,5	704,4
42 – 16P11EC	633,1	1758,7	805,6	1103,5	989,6	673,2
40 – 16P12EC	576,4	1601,2	769,4	1054,0	968,2	658,7
38 – 16P16EC	539,9	1499,7	753,2	1031,7	951,5	647,3

\*16PIN: Grupo Intacto; 16P16EC: Estaca Canto Curta; 16P12EC: Estaca Borda Curta; 16P11EC: Estaca Centro

A Tab. 4.14 apresenta os valores de rigidezes para os diferentes níveis de

deslocamento para os grupos com estacas ausentes.

Tabela 4.14 - Efeito do tipo de dano sobre a carga aplicada e rigidez (16PEA).

Caso	2,5% d (0,36mm)		5,00% d (0,73mm)		10% d (1,47mm)	
	Carga (N)	Rigidez (N/mm)	Carga (N)	Rigidez (N/mm)	Carga (N)	Rigidez (N/mm)
36 – 16PIN	696,9	1935,7	911,5	1248,6	1035,5	704,4
48 – 16P11EA	535,8	1488,4	765,0	1048,0	981,3	667,6
46 – 16P12EA	464,8	1291,1	711,6	974,8	960,0	653,1
44 – 16P16EA	390,2	1083,9	673,7	922,9	931,3	633,5

\*16PIN: Grupo Intacto; 16P16EA: Estaca Canto Ausente; 16P12EA: Estaca Borda Ausente; 16P11EA: Estaca Centro Ausente.

Com isso, conclui-se que para este caso existe uma variação tanto em relação a posição do dano quanto na intensidade do dano para o caso de 16 estacas que são mais notórias para os níveis iniciais de deslocamento e que tendem a se comportar de maneira similar, com menor variação de valores, nos deslocamentos próximos ao máximo convencional.

As Figs. 4.59 e 4.60 demonstram esse comportamento de perda de rigidez dos grupos em função de diferentes níveis de recalque, onde se nota a maior diferença no primeiro nível de deslocamento e para os demais níveis as barras tendem a se ajustar para os mesmos níveis de rigidez.

### Radier 16 Estacas

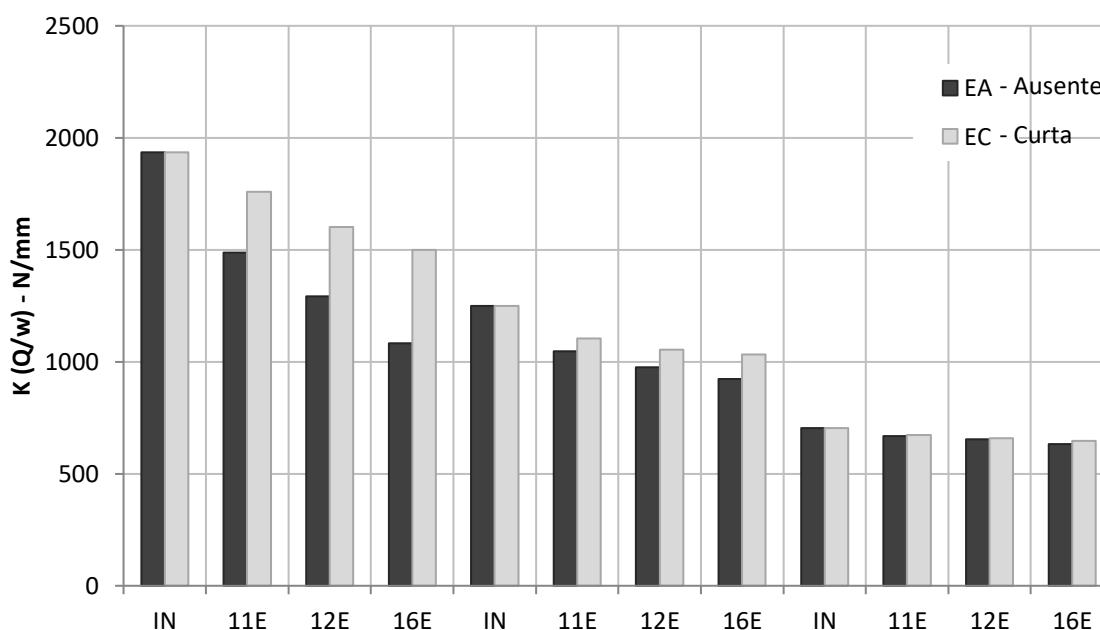
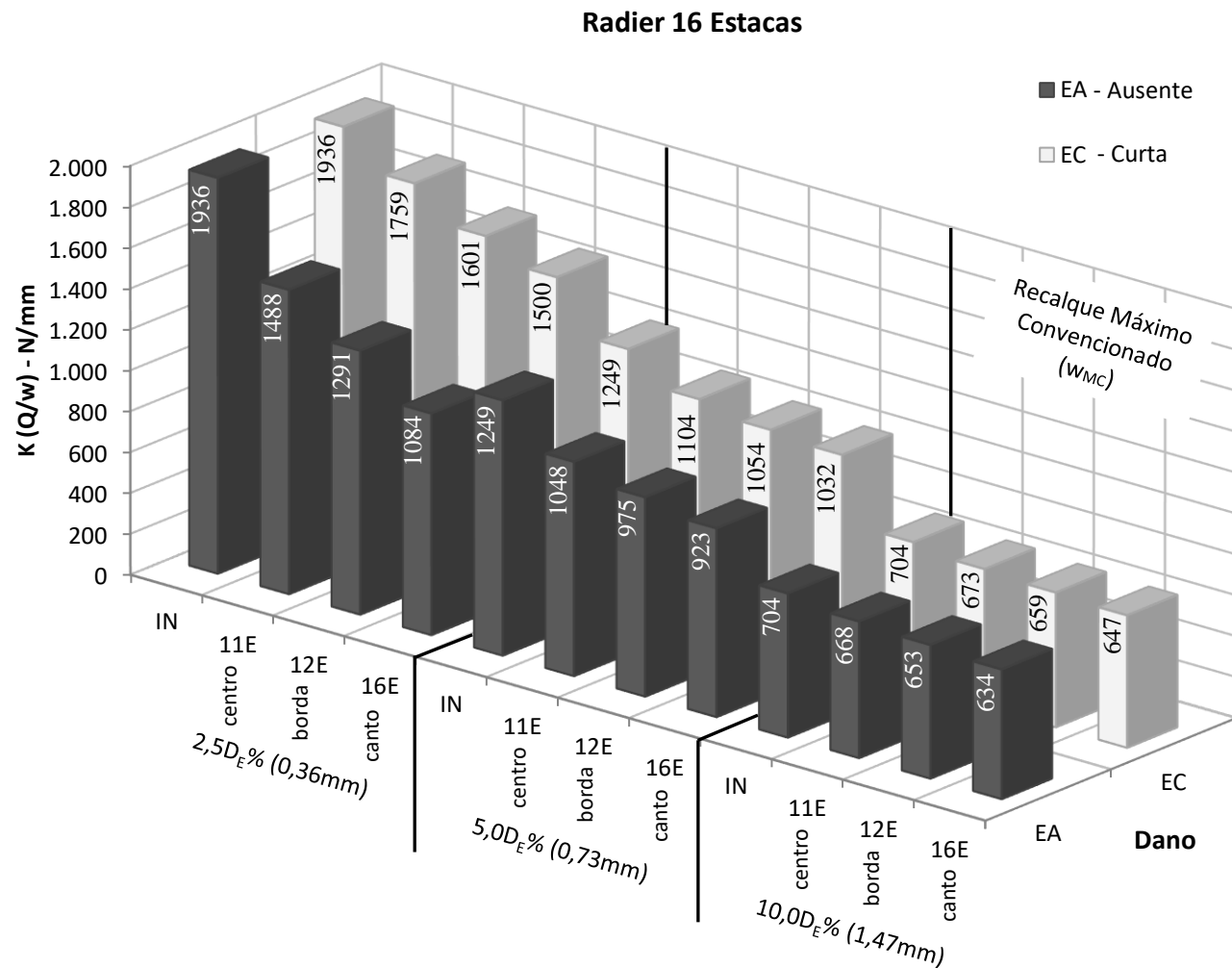


Figura 4.59 - Efeito do tipo de dano e posição do dano em relação à rigidez do sistema.



\***16PIN**: Grupo Intacto; **16P16EC**: Estaca Canto Curta; **16P12EC**: Estaca Borda Curta; **16P11EC**: Estaca Centro Curta  
**16P16EA**: Estaca Canto Ausente; **16P12EA**: Estaca Borda Ausente; **16P11EA**: Estaca Centro Ausente.

Figura 4.60 - Efeito do tipo de dano sobre o nível de recalque e rigidez.

Para o grupo de 16 estacas desde o primeiro nível de deslocamento ( $2,5\% D_E$ ) o grupo já apresenta uma perda significativa de rigidez que é mais intensa quanto maior a intensidade de dano, pois para este primeiro estágio, quando na presença de estacas curtas ( $50\%L$ ) a perda média de rigidez é de 16% enquanto que para níveis de dano mais severos ( $0\%L$  – estaca ausente) estas perdas médias chegam a 33%.

Para o segundo nível de deslocamento ( $5,0\% D_E$ ) essa diferença de perda de rigidez entre os níveis de dano diminui e a localização do dano tem menos influência para este estágio, pois, para as estacas curtas a perda média passa para 15% e para o dano  $0\%L$  (estaca ausente) para 21%.

Para os deslocamentos de  $10\% D_E$  essas diferenças são ainda menores, para  $50\%L$  as perdas médias são na ordem de 6% e para  $0\%L$  estas perdas médias chegam a 8%. Ou seja, nos estágios iniciais de carregamento a presença de danos é mais significativa tanto em intensidade quanto em localização do que nos estágios finais de carregamento.

As Figs. 4.61 e 4.62 apresentam o percentual de incremento de recalque devido a intensidade e posição da estaca danificada em relação ao radier estaqueado intacto, nela se nota que nos carregamentos iniciais, com  $25\% Q_{C-IN}$ , o acréscimo de recalque varia de 129% para o caso da estaca curta se na posição central do grupo (16P11EC) até 341%, para o caso mais extremo, em que na posição de canto (16P16EA) a estaca é retirada ( $0\%L$ ). Essas variações tendem a diminuir com o aumento do nível de carregamento e conseqüentemente na proximidade do recalque máximo convencionado, pois, na carga de trabalho (carga limite de serviço –  $Q_{LS}$ ) o incremento em relação ao recalque do grupo intacto para a estaca central com  $50\%L$  é de 132% (16P11EC), porém para a estaca ausente de canto (16P16EA) passou para 295%.

O principal ponto a ser destacado nestas figuras, Figs. 4.61 e 4.62, se dá pelo fato de que os incrementos de recalques para os radiers estaqueados com 6,25% de estacas danificadas tendem a elevados fatores de incrementos de recalque, ainda que haja uma redistribuição de carga, porém destacado desde os primeiros carregamentos. Observa-se ainda que para o aumento nos níveis de carregamento, tanto a magnitude do dano quanto a posição dele, se aproximam do comportamento limite do grupo intacto.

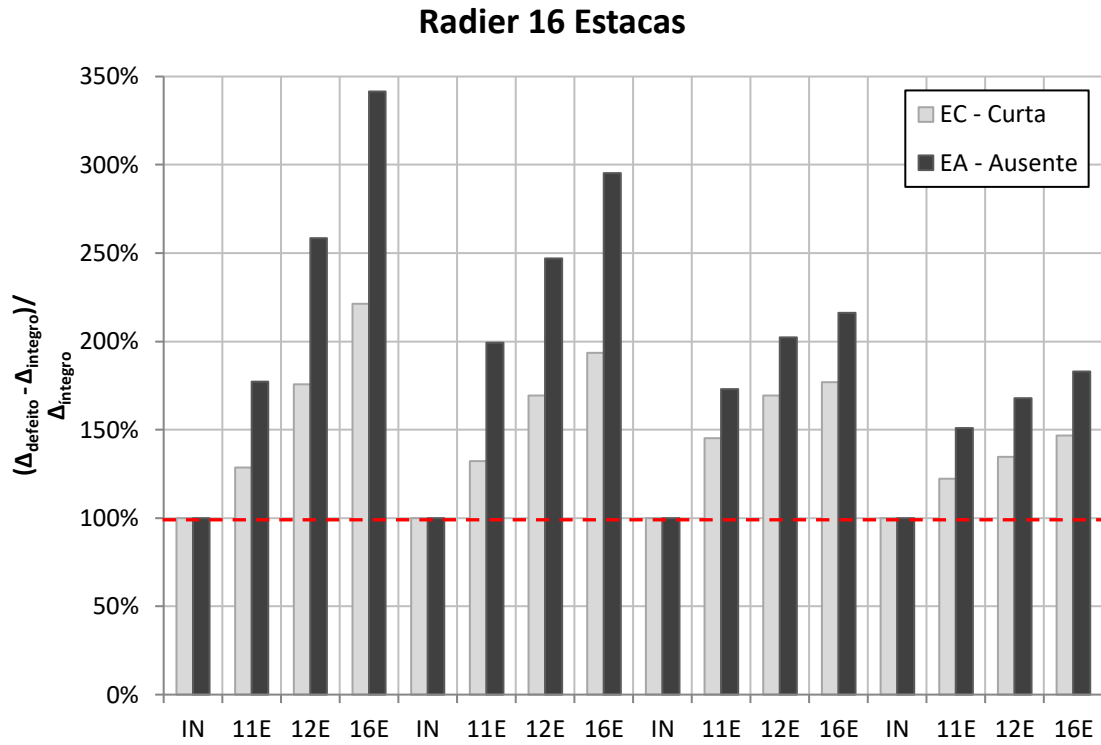
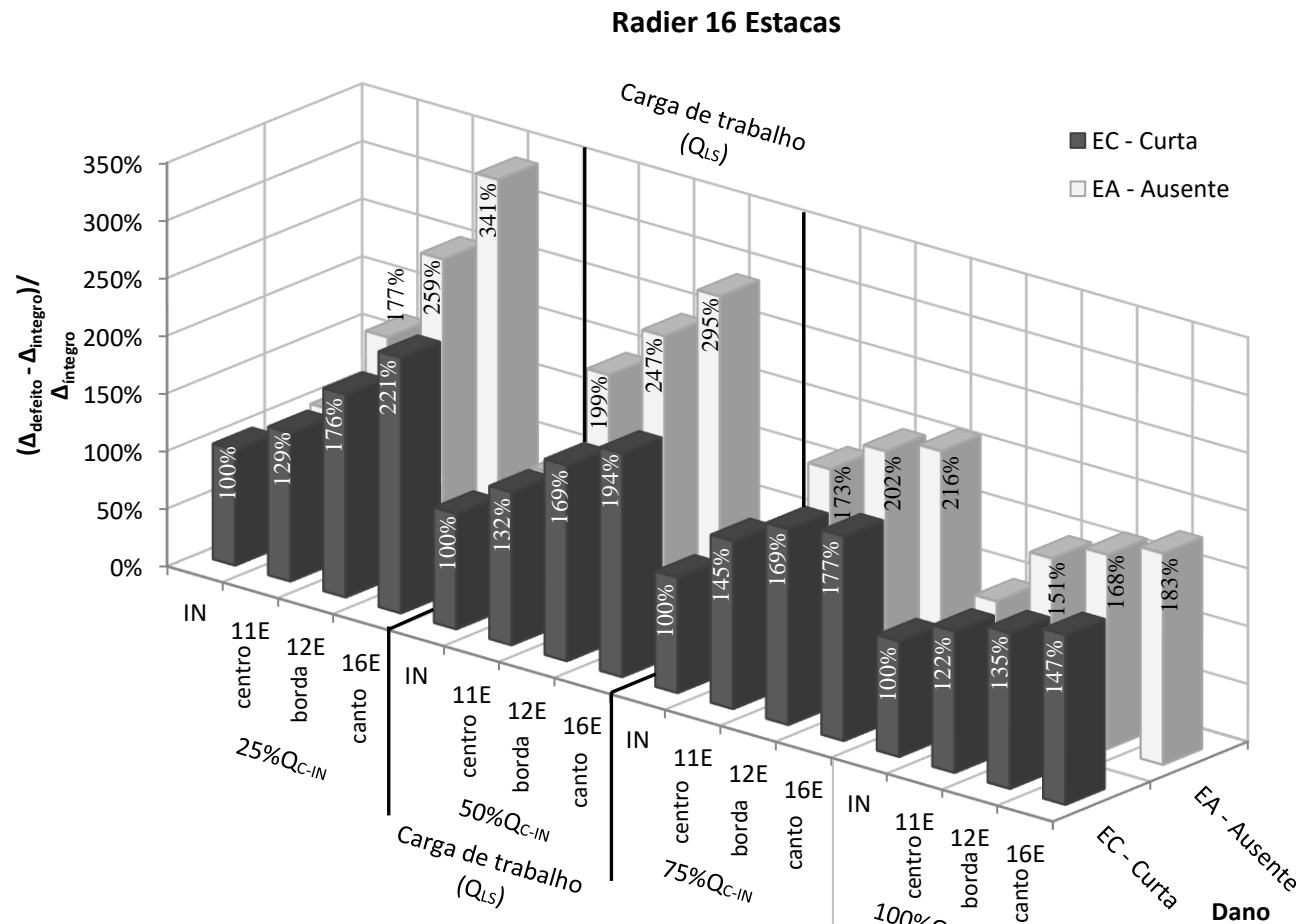


Figura 4.61 - Incremento de recalque em função da posição da estaca danificada.



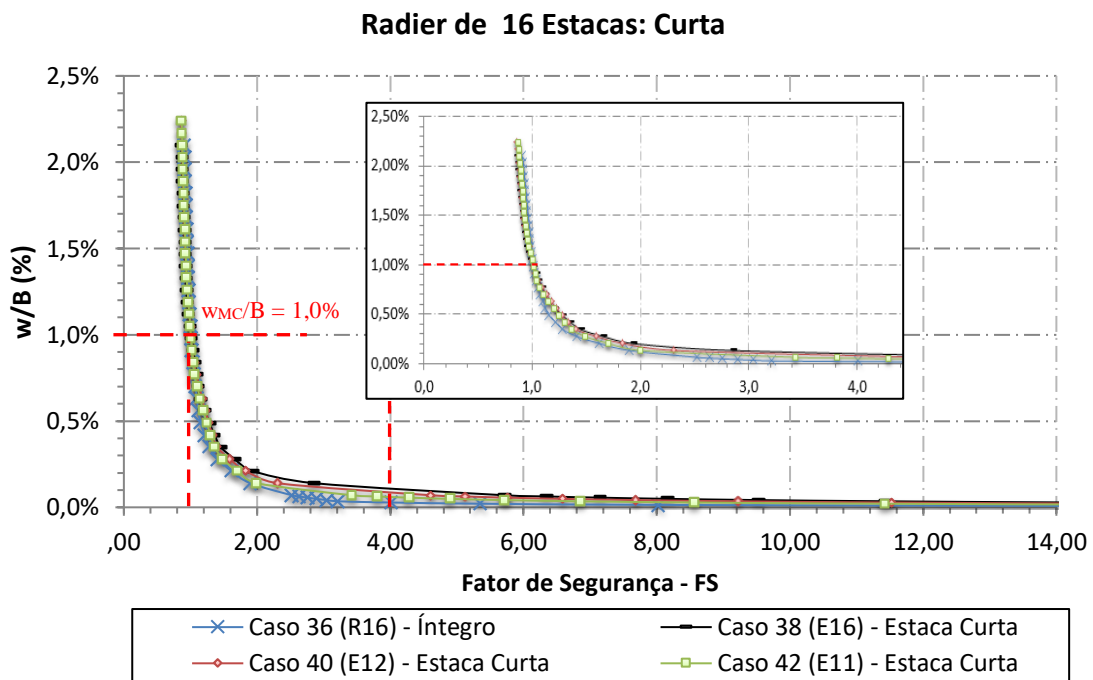
\*16PIN: Grupo Intacto; 16P16EC: Estaca Canto Curta; 16P12EC: Estaca Borda Curta; 16P11EC: Estaca Centro Curta.  
 16P16EA: Estaca Canto Ausente; 16P12EA: Estaca Borda Ausente; 16P11EA: Estaca Centro Ausente.

Figura 4.62 - Incremento do recalque em função da posição do dano.



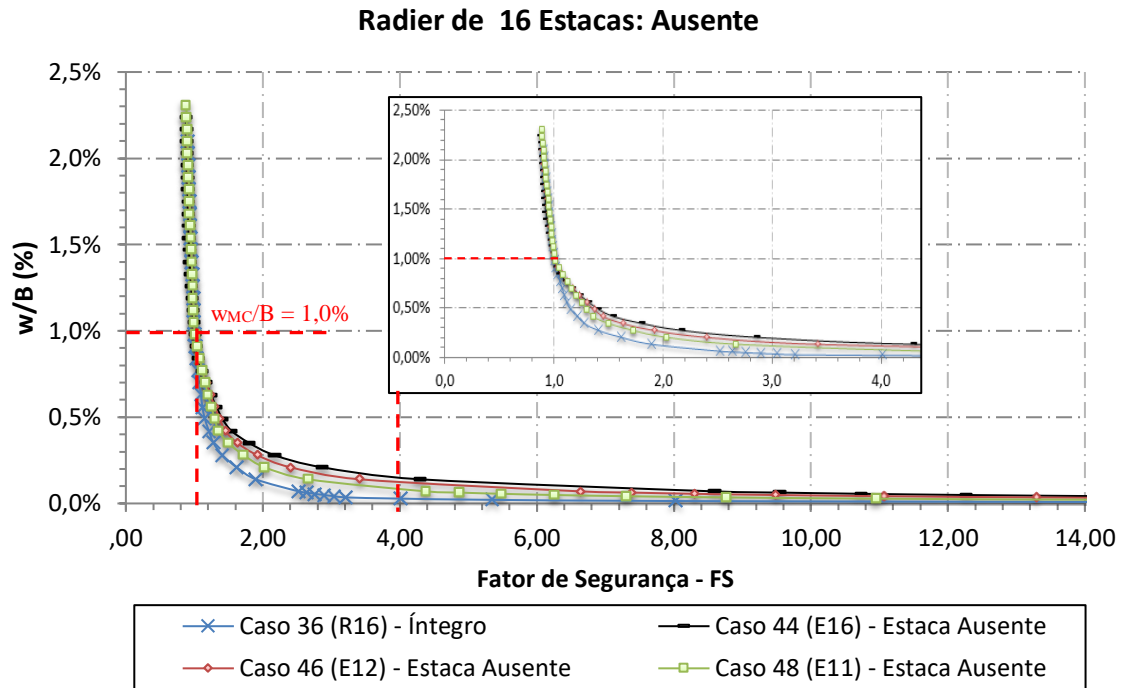
As Figs. 4.63 e 4.64 apresentam os fatores de segurança referente aos recalques normalizados. Observa-se que existe a tendência de que a partir de 0,5% do recalque normalizado esses radiers apresentem fatores de segurança menores que 2,0.

Destaca-se ainda que para o grupo de 16 estacas os níveis de deslocamento para o caso do grupo com estacas curtas, Fig. 4.63, se apresentam com menores variações dos valores de FS, ao passo que para o grupo com danos mais intensos (0%L), Fig. 4.64, os valores sofreram maior variação em relação aos grupos intactos no intervalo entre 0% w/B a 0,5% w/B.



\*16PIN: Grupo Intacto; 16P16EC: Estaca Canto Curta; 16P12EC: Estaca Borda Curta; 16P11EC: Estaca Centro Curta.

Figura 4.63 - Recalque normalizado com fator de segurança real dos radiers estaqueados, 16PEC.



\*16PIN: Grupo Intacto; 16P16EA: Estaca Canto Ausente; 16P12EA: Estaca Borda Ausente; 16P11EA: Estaca Centro Ausente.  
 Figura 4.64 - Recalque normalizado com fator de segurança real dos radiers estaqueados, 16PEA.

Desta forma, nota-se que os radiers na presença de estacas danificadas sofrem alteração significativa no comportamento do fator de segurança quando o estágio de carga está próximo da carga de ruptura, devido à diminuição de sua capacidade de carga e que para a magnitude do dano tende a espaçar mais estes deslocamentos no intervalo de fatores de segurança entre 1,0 e 2,0.

A Figura 4.65 apresenta o Fator de Redução de Rigidez,  $Rks$ . Nota-se que mesmo que os grupos tenham a mesma área líquida de contato ( $A_G/A_R = 0,63$ ) as estacas tendem a perder a rigidez mesmo que não haja alteração nos espaçamentos entre as estacas.

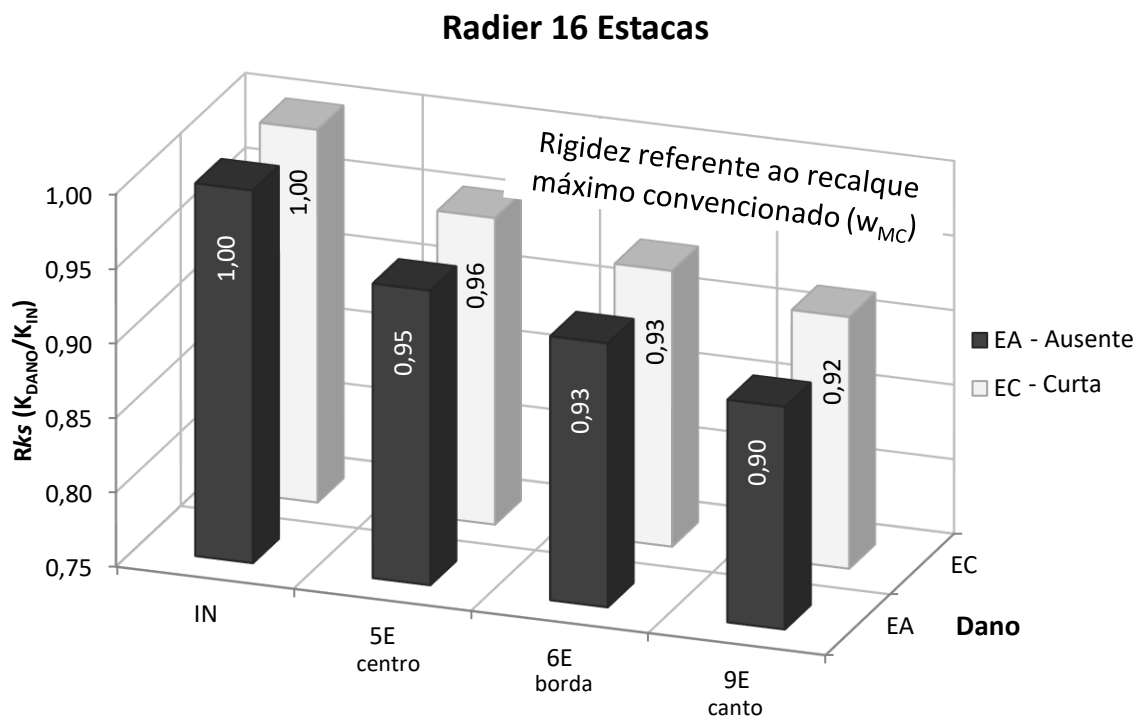


Figura 4.65 - Fator de Redução de Rigidez,  $R_{ks}$ .

A Tab. 4.15 apresenta um resumo dos valores dos fatores de redução das rigidezes dos grupos com a presença de estacas curtas.

Tabela 4.15 - Fator de Redução de Rigidez, 16PEC.

CASO	$R_{ks}$
Radier Íntegro de 16 Estacas (16PIN)	1,00
Radier Estaca do Centro Curta (16P11EC)	0,96
Radier Estaca de Borda Curta (16P12EC)	0,93
Radier Estaca do Canto Curta (16P16EC)	0,92

A Tab. 4.16 apresenta em resumo dos valores dos fatores de redução das rigidezes dos grupos com a presença de estacas ausentes.

Tabela 4.16 - Fator de Redução de Rigidez, 16PEA.

CASO	$R_{ks}$
Radier Íntegro de 16 Estacas (16PIN)	1,00
Radier Estaca do Centro Ausente (16P11EA)	0,95
Radier Estaca de Borda Ausente (16P12EA)	0,93
Radier Estaca do Canto Ausente (16P16EA)	0,90

Desta forma conclui-se para o grupo de 16 estacas que tanto os grupos com estacas

curtas (50%L) quanto na ausência de uma estaca (0%L) a variação do fator de redução de rigidez entre os grupos com dano está muito próximo, 4%, para as estacas curtas e 5% para as estacas ausentes, e estas de 8% e 10% em relação ao grupo intacto, respectivamente para os estágios finais de carregamento.

Pode-se observar que quanto maior a sollicitação da estaca em função da sua posição, mais significativa é a influência do tipo de dano.

#### 4.3.5. SÍNTESE SOBRE A RIGIDEZ E DESLOCAMENTO

Para o grupo de 4 estacas com dano a diferença entre os níveis de recalques para as diferentes intensidades de dano tendem a se igualar quando se aproximam dos deslocamentos máximos convencionados.

Para o grupo de 9 estacas observa-se a diferença entre a magnitude do dano e sua posição para os níveis iniciais de deslocamento, diferença esta que diminui a partir do deslocamento de  $5\%D_E$  ( $w/B = 0,7\%$ ).

Para o grupo de 16 estacas se nota que devido ao menor percentual de estacas danificadas, 6,25%, o comportamento do conjunto tende a ser muito similar, onde, neste caso, a magnitude e a posição do dano tem menor influência do que nos demais grupos. As Figs. 4.66 a 4.69 apresentam de maneira geral a variação da rigidez em função do incremento de recalque para os grupos estudados, em diversas posições de dano.

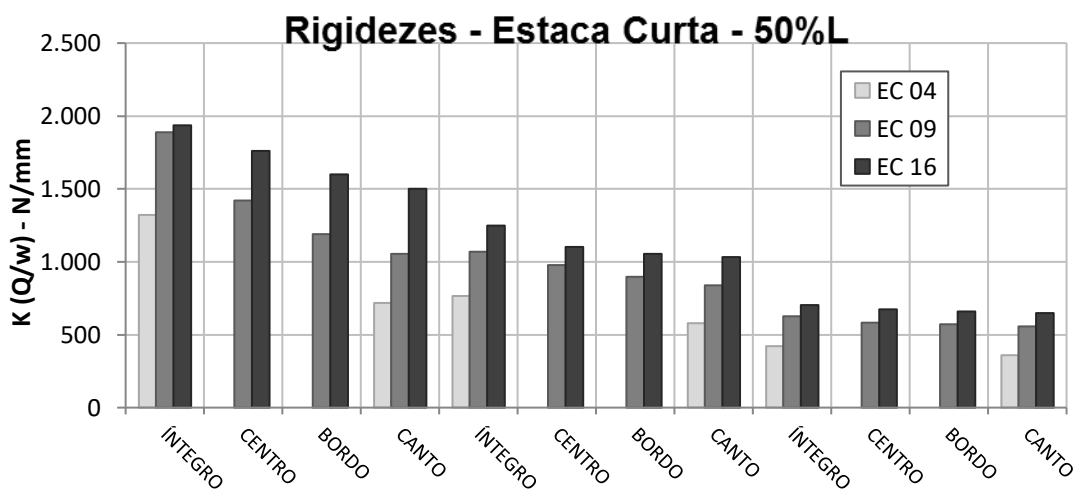


Figura 4.66 – Visão Geral da variação da rigidez em função do incremento de recalque para os casos com a presença de estacas curtas.

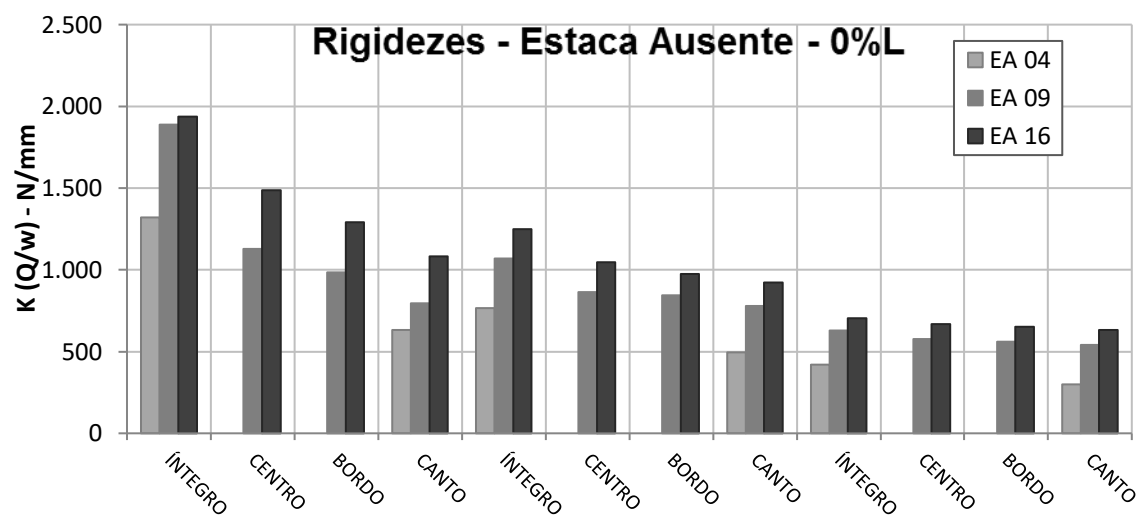


Figura 4.67 – Visão Geral da variação da rigidez em função do incremento de recalque para os casos de dano 0%L.

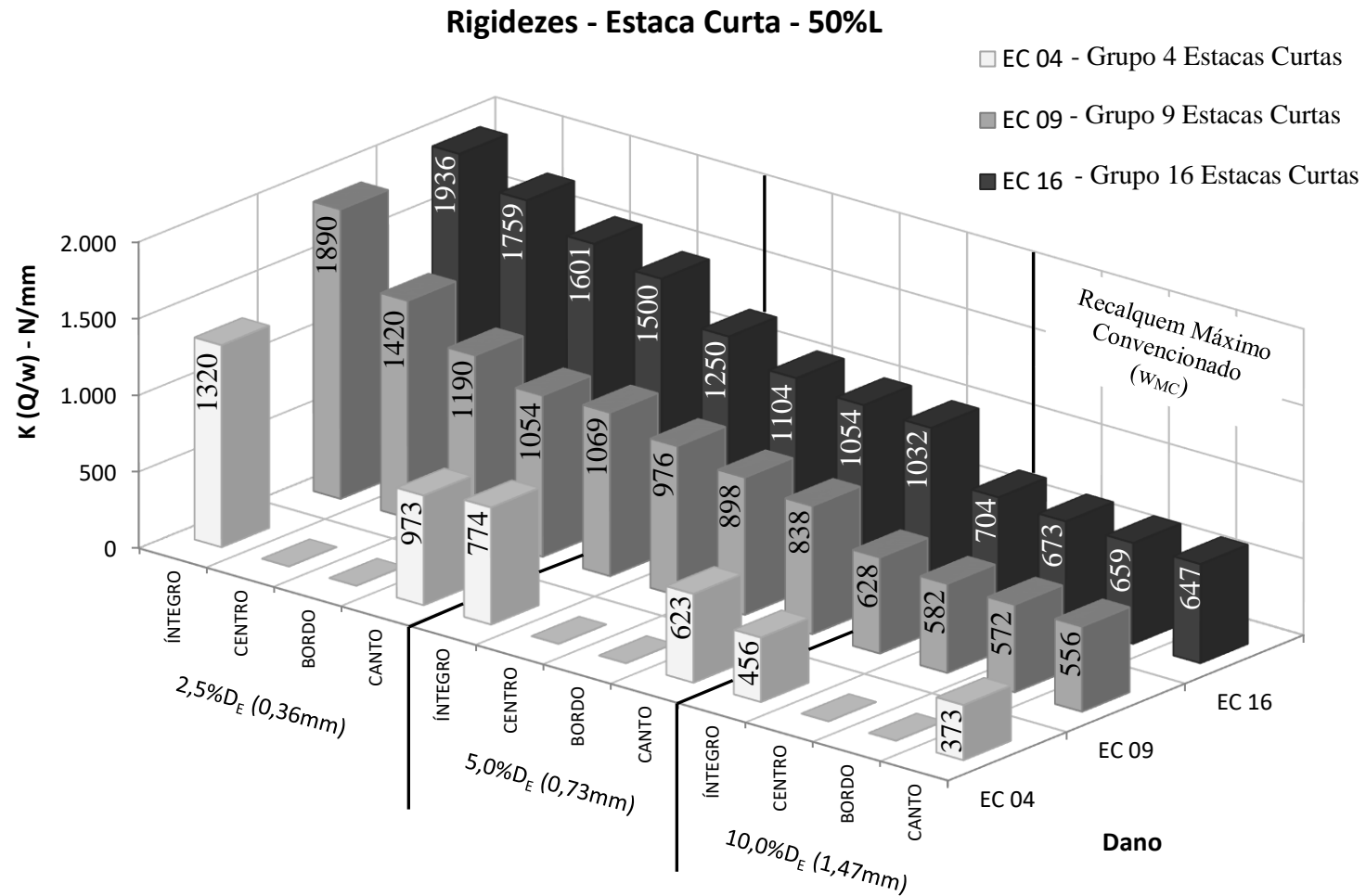


Figura 4.68 - Visão Geral da variação da rigidez em função do incremento de recalque para os casos com a presença de estacas curtas.

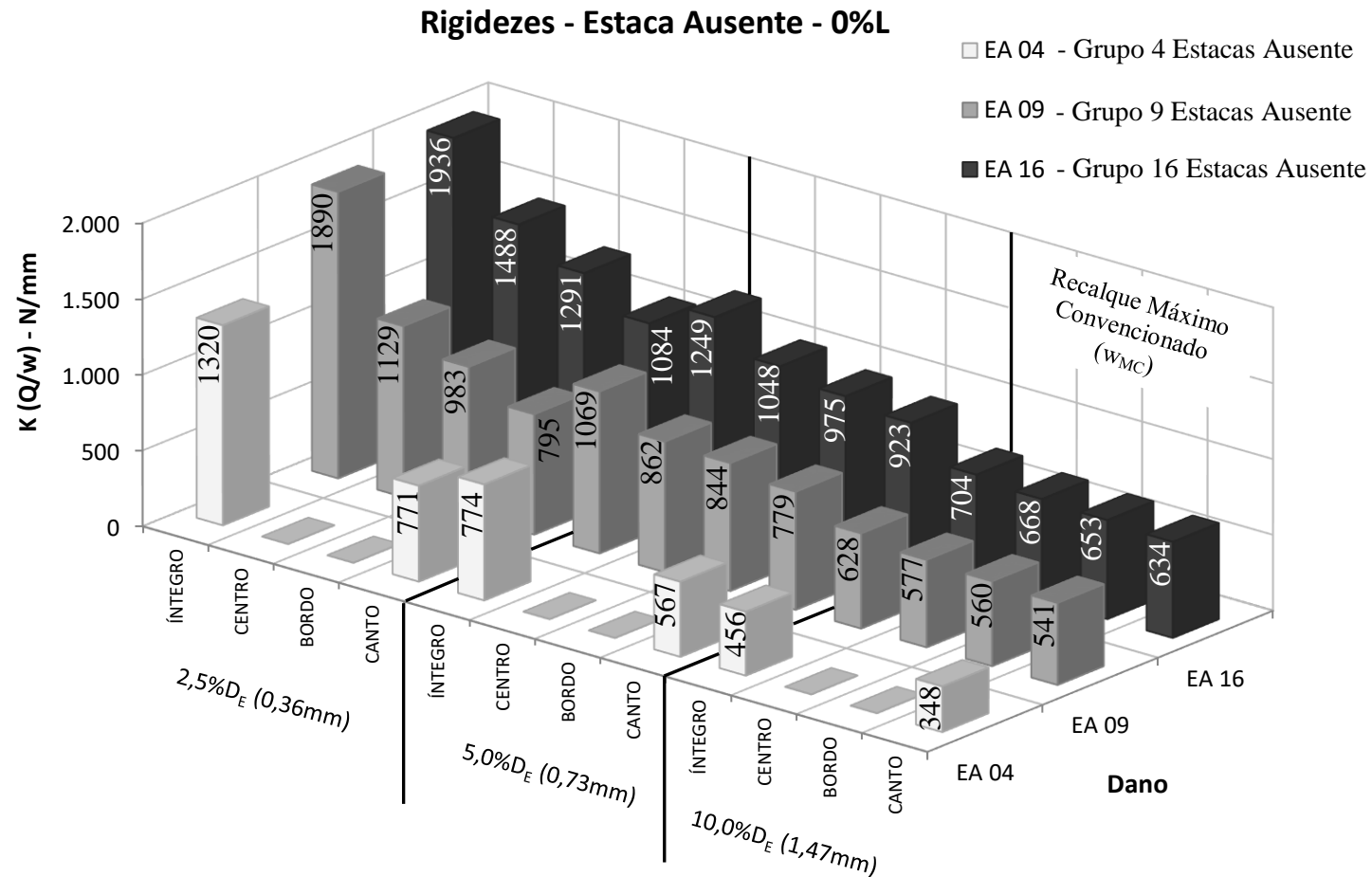


Figura 4.69 – Visão Geral da variação da rigidez em função do incremento de recalque para os casos de dano 0%L.

### 4.3.6. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este trabalho buscou analisar qualitativamente o comportamento de radier estaqueado com e sem presença de estacas danificadas em escala reduzida com níveis de tensão 1g. Porém, diante dos resultados apresentados esta seção busca comparar estes resultados com algumas pesquisas já realizadas em verdadeira grandeza a fim de se avaliar algumas tendências de comportamento, para tal a Tab. 4.17 apresenta alguns parâmetros comparativos adimensionais de pesquisas correlatas.

Tabela 4.17 – Valores comparativos entre alguns trabalhos.

Característica	Tamanho do Bloco por num. de estacas	Soares (2011)	Freitas Neto (2013)	Garcia (2015)	Cordeiro (2017)
s/d	R1E	3,50	-	5,00	-
	R2E	3,50	-	5,00	-
	R3E	-	5,00	5,00	-
	R4E	3,50	5,00	5,00	3,4
	R9E	-	-	-	2,6
	R16E	-	-	-	2,6
$A_G/A$ (m <sup>2</sup> )	R1E	0,03	0,14	0,14	0,02
	R2E	0,17	-	0,14	-
	R3E	-	0,32	0,32	-
	R4E	0,46	0,46	0,46	0,40
	R9E	-	-	-	0,68
	R16E	-	-	-	0,63
[ $A_G/A$ (m <sup>2</sup> )]/[s/d]	R1E	-	-	-	-
	R2E	0,04	-	0,03	-
	R3E	-	0,06	0,06	-
	R4E	0,13	0,09	0,09	0,12
	R9E	-	-	-	0,27
	R16E	-	-	-	0,25
Diâmetro (m)	-	0,3	0,25	0,25	1,471E-03
Comprimento (m)	-	4,5	5	5	2,148E-02
L/d	-	15	20	20	15

Dentre os trabalhos supracitados Freitas Neto (2013) foi o que avaliou o comportamento de uma estaca danifica, de ruptura brusca na carga de trabalho, no sistema de fundação em radier estaqueado com 3 e 4 estacas, o que corroborou com os resultados apresentados a seguir.



De maneira geral pode-se observar, conforme apresentado na Fig. 4.70, que quanto maior o número de estacas do grupo, e conseqüentemente, menor o número “relativo” de estacas danificadas no grupo, o “novo” comportamento do sistema tende a se aproximar do comportamento do grupo intacto em termos de capacidade de carga. Para efeitos comparativos foram utilizados os mesmos critérios máximos de recalques ( $10\%D_E$ ) com seus carregamentos correspondentes.

Para os valores apresentados por Freitas Neto (2013) pode-se observar que para os radiers sobre 4 estacas com a presença de uma estaca defeituosa a capacidade de carga convencionalizada foi na ordem de 60% da capacidade do conjunto íntegro, porém destaca-se que para a situação da prova de carga apresentada pelo autor o dano foi imposto a uma ruptura abrupta durante o processo de carregamento, devido a variação da rigidez do material da estaca, com espaçamento relativo de  $S/d$  de 5,0, quase o dobro do valor estudado nesta pesquisa ( $s/d = 2,56$ ).

Para o caso do radier sobre 3 estacas apresentados por Freitas Neta (2013), houve um imprevisto durante a preparação da execução da prova de carga, o corpo de prova pré-moldado, que funciona como a zona defeituosa da estaca, não teve contato com o trecho íntegro inferior da estaca, o que pode ser comparado ao de um radier com uma estaca defeituosa, cujo defeito seria a presença de uma estaca mais curta do que as demais estacas. Desta forma, a capacidade de carga do radier sobre 3 estacas com uma estaca defeituosa foi de 63% da capacidade do radier sobre 3 estacas íntegras, corroborando com o apresentado por Cordeiro (2007) que a variação do comprimento das estacas exerce mais influência sobre o fator de segurança da fundação do que a variação do módulo de elasticidade, causada, por exemplo, pela ocorrência de material de qualidade resistência e rigidez inferiores em zonas específicas das estacas. Este comportamento fez com que o comportamento deste grupo se aproximasse da curva de tendência do modelo reduzido estudado.

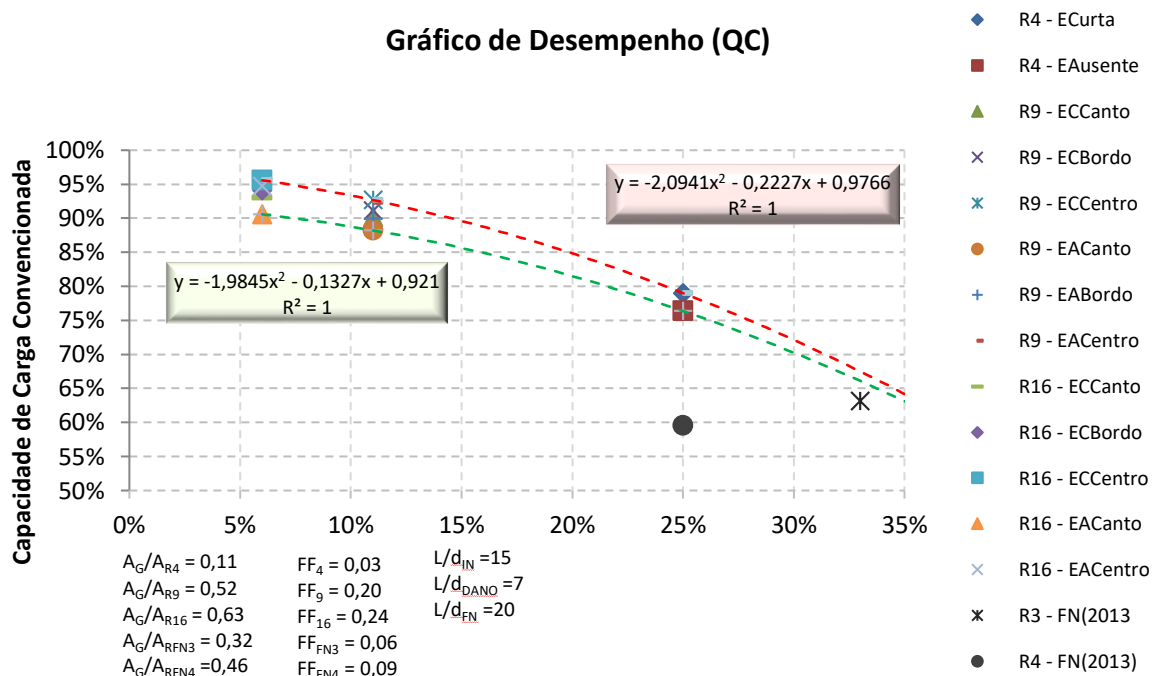


Figura 4.70 – Gráfico de Desempenho de Capacidade de Carga *versus* Percentual de estacas danificadas.

O comportamento apresentado no gráfico descreve uma tendência de estabilização entre 9 e 16 estacas, onde nestes grupos são apresentados apenas uma estaca danificada, ou seja, com o nível de dano de 11% e 6%, respectivamente. Esta tendência se repete tanto para estacas com 50%L quanto para os casos de estacas 0%L (ausentes), com capacidades de cargas próximas às capacidades de grupos intactos, ou seja, próximo de 95% das capacidades originais, ao passo que para os grupos menores de 4 estacas (25% de dano), essa capacidade em torno de 78%.

O grupo de 4 estacas apresentou uma variação entre suas respectivas capacidades de carga na ordem de 1,31% enquanto o grupo de 9 e 16 estacas com a presença de uma estaca curta na ordem de 0,90%, ou seja, a posição do dano nestes grupos tem pouca influência quando comparada ao grupo menor. Porém, para os danos “ausentes” esse desvio foi um pouco maior, na ordem de 1,50%, o que ainda é muito pequeno.

Por consequência, tais comportamentos podem ser confirmados na Fig. 4.71 em que são relacionadas as variações dos Fatores de Segurança em função do número de estacas totais, com percentuais de estacas danificadas no sistema e com a variação da posição da estaca danificada.

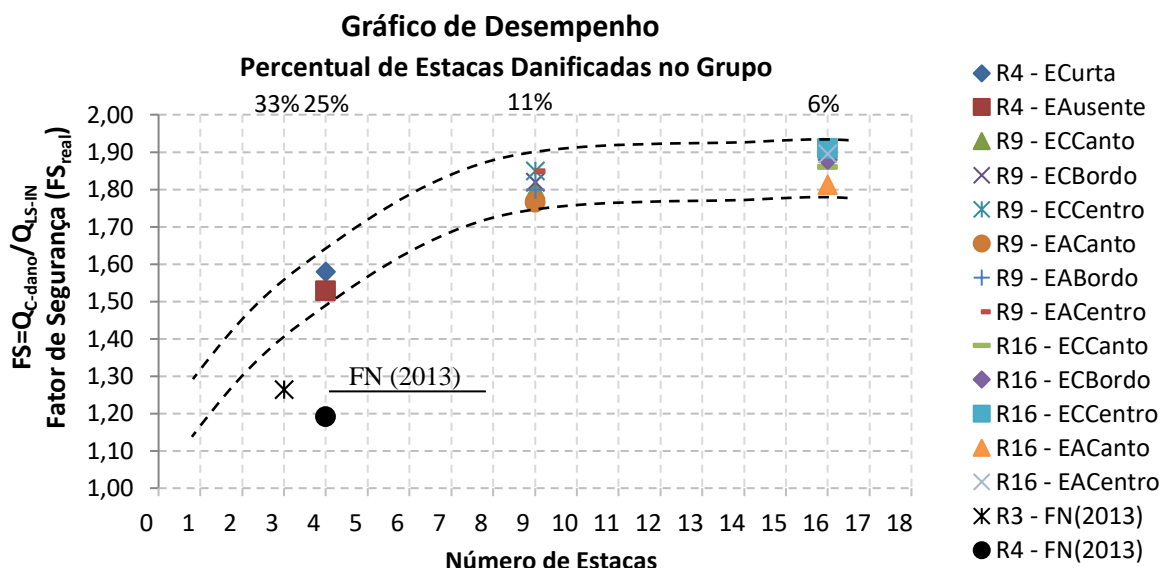


Figura 4.71 – Gráfico de Desempenho quanto aos Fatores de Segurança *versus* Percentual de estacas danificadas.

Para a análise quanto ao nível de recalque absoluto em relação ao aumento do número de estacas no sistema, a Fig. 4.72 apresenta uma faixa de variação do nível de recalque em função do número de estacas e da variação da posição do dano. Nota-se que mesmo com o aumento do grupo os níveis de recalque ainda apresentam grande faixa de dispersão.

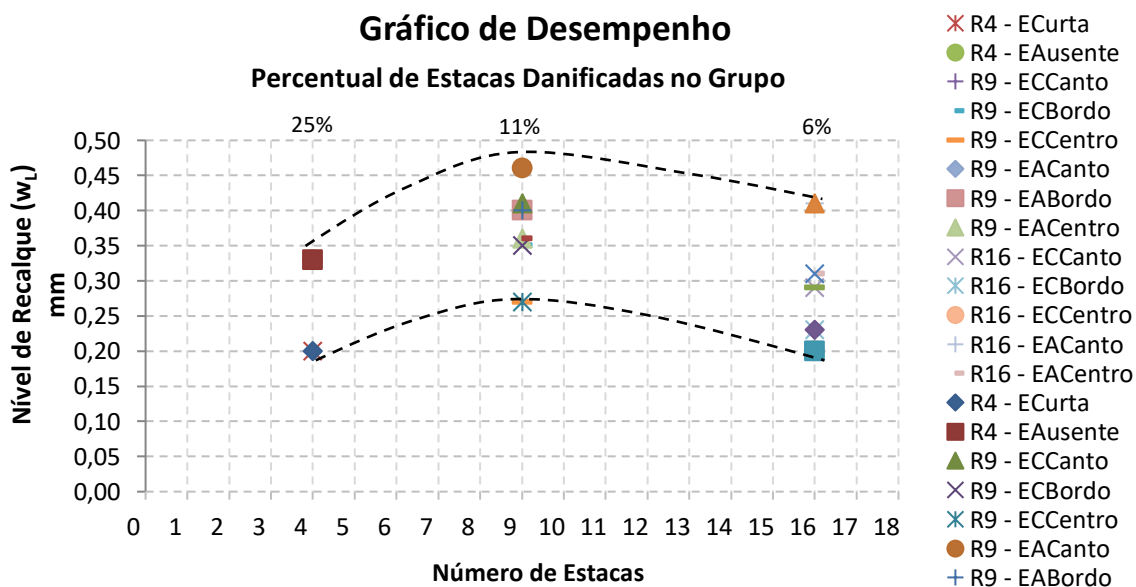


Figura 4.72 – Gráfico de Desempenho quanto ao Recalque *versus* número de estacas e do percentual de estacas danificadas.

Conforme discutido anteriormente, a redução de recalque é um dos principais requisitos de um sistema de radier estaqueado, independentemente do tamanho do radier. Neste estudo em particular, é de se notar, conforme apresentado na Fig. 4.73, que dentro de

um mesmo grupo a variação da intensidade do nível de dano, ou mesmo a variação da posição deste dentro do grupo, provoca alteração nos fatores de redução de recalque para os diferentes recalques ( $w_L$ ).

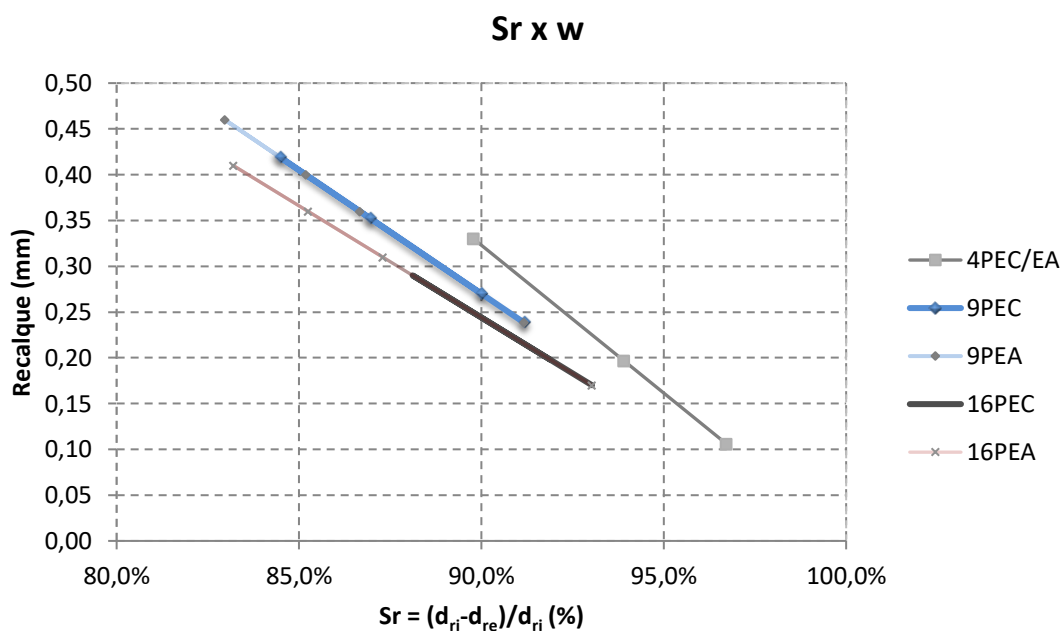


Figura 4.73 – Recalque em função do Fator de Redução de Recalque.

As Figs. 4.74 e 4.75 apresentam o comportamento do fator de distribuição de carga em função do nível do incremento de recalque para os casos estudados. Vale ressaltar que para a determinação das cargas absorvidas pelas estacas foram determinadas as diferenças entre as cargas totais aplicadas aos radiers estaqueados e as cargas aplicadas aos radiers isolados. Com isso, as placas com maiores números de estacas apresentam maiores capacidades de carga, o que faz com que estes radiers tenham maior participação no conjunto, mesmo sabendo que para a avaliação do percentual de carga entre os elementos seja também influenciado pela rigidez das estacas, do radier, tamanho do radier, etc. Desta forma, neste gráfico nota-se a tendência dos grupos menores se aproximarem da unidade, obtendo assim, um comportamento mais próximo de grupos estaqueados, onde o bloco não está em contato com o solo e possui função apenas de transferência de carga. Já para os grupos maiores percebe-se maior variação do fator de distribuição nos recalques iniciais, onde as estacas absorvem a maior parte do carregamento e paulatinamente as cargas são transferidas para o radier a partir dos recalques da ordem de 0,5mm ( $3,4\% D_E$ ), onde percebe-se a alteração da rigidez do sistema.

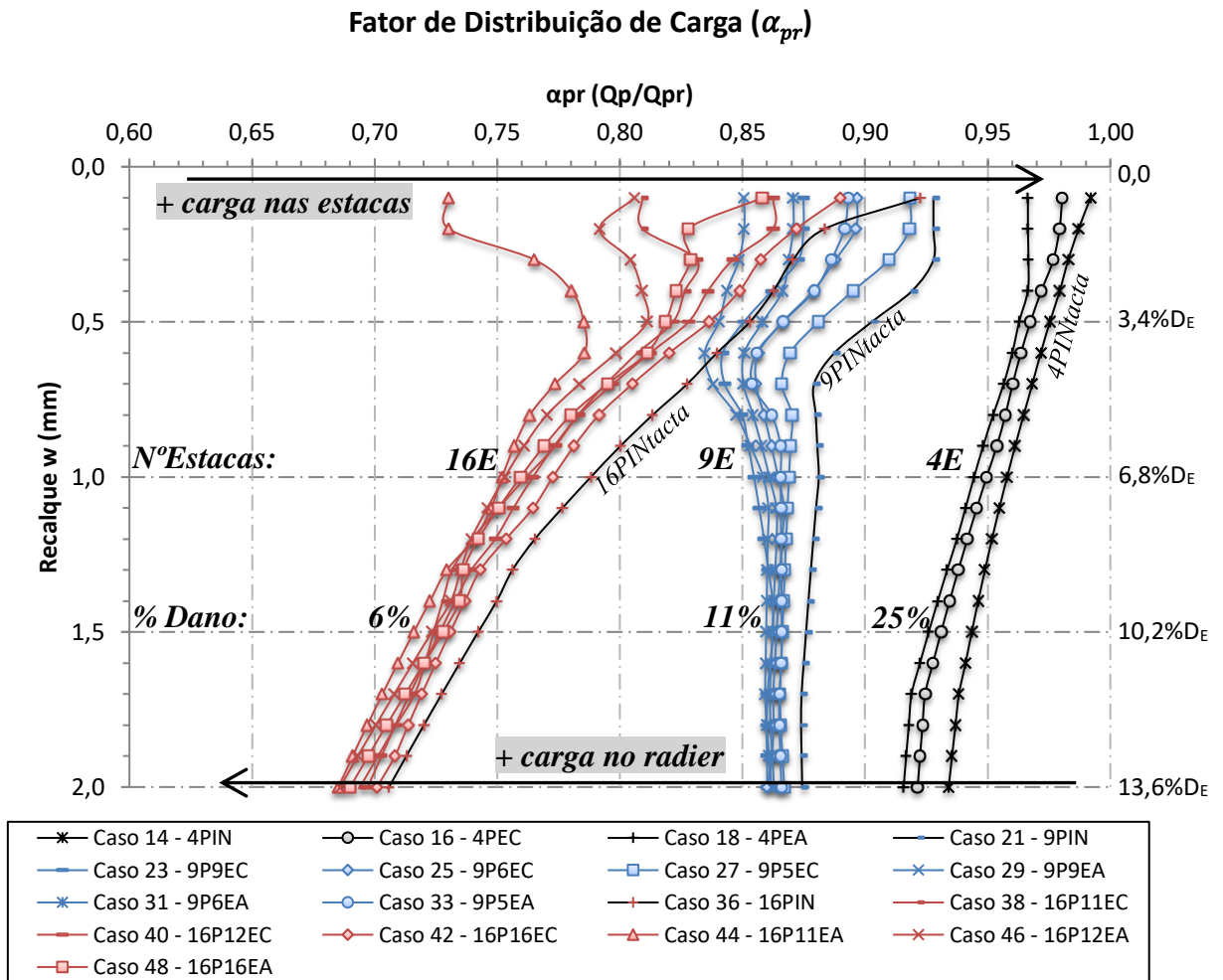


Figura 4.74 – Fator de Distribuição de carga em função da profundidade para todos os grupos estudados.

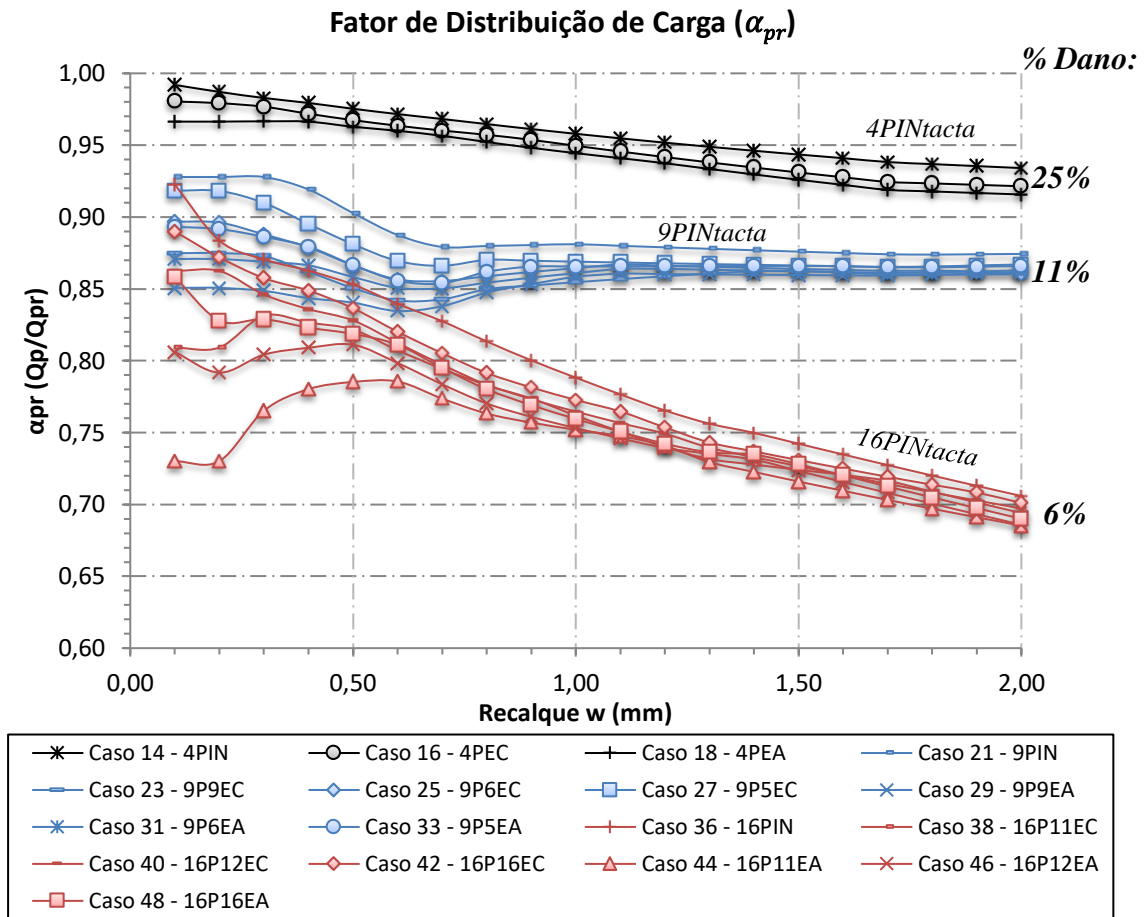


Figura 4.75 – Fator de Distribuição de carga em função do nível de dano.

### 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

#### 5.1. INTRODUÇÃO

As principais observações e conclusões são apresentadas e discutidas neste capítulo, e ao final, são delineadas algumas sugestões de pesquisas futuras.

A pesquisa apresentou um estudo sobre sistema de fundação com enfoque em modelagem física em escala reduzida 1g de radiers estaqueados em areia sob carregamento vertical com a presença de estacas danificadas. Também foram revisados alguns métodos de análise de fundações superficiais e profundas que são utilizados atualmente em obras reais e sua aplicabilidade em fundações em escala reduzida.

Uma campanha de 20 casos de provas de carga em modelo reduzido em areia foi analisada quanto à capacidade de carga, fatores de segurança, recalques e valores de rigidezes.

As curvas carga-recalques das fundações foram lidas e não apresentaram ruptura física, desta forma, os recalques máximos foram convencionados a  $10\%D_E$  (10% do diâmetro nominal da estaca).

#### 5.2. RESISTÊNCIA E SEGURANÇA

Para as fundações superficiais observou-se ganho de capacidade de carga com o aumento do tamanho do bloco, como esperado. Para o critério de carga referente ao deslocamento de 1,47mm, foram obtidas cargas de aproximadamente 37N, 114N e 265N, para áreas de 64cm<sup>2</sup>, 110cm<sup>2</sup> e 204cm<sup>2</sup>, ou seja, 0,6 N/cm<sup>2</sup>, 1,0N/cm<sup>2</sup> e 1,3N/cm<sup>2</sup> para as placas do grupo de 4, 9 e 16 estacas, respectivamente.

Para os grupos com 4 estacas, em que os danos representam 25% da quantidade total de estacas, pôde-se destacar pela curva carga-recalque que para o carregamento de 50% da carga convencionada do radier estaqueado íntegro ( $50\%Q_{C-IN}$ ), onde se estimava  $FS = 2,0$ , o conjunto apresentou  $FS = 1,5$ , ou seja, em torno de 20 a 24% de perda de capacidade de

carga, de acordo com a intensidade do dano (50%L e 0%L).

Para os grupos de 9 estacas (que uma estaca defeituosa representa 11% de dano no conjunto) e 16 estacas (que uma estaca defeituosa representa 6% de dano no conjunto) os valores dos fatores de segurança são maiores que o caso anterior, mas ainda são significativos, tais como,  $FS_9 = 1,8$  para o grupo de 9 estacas, e perda de capacidade média em torno de 10%, e  $FS_{16} = 1,9$  para o grupo de 16 estacas que apresenta perda de capacidade média em torno de 6,5%.

Quando os valores dos fatores de segurança para os radiers estaqueados sobre 4 estacas são analisados em diferentes níveis de carregamento, pode-se notar que nos estágios iniciais de carregamento (25%  $Q_{C-IN}$ ) esta variação em relação ao mesmo grupo íntegro, foi de aproximadamente 23% para o caso da ausência de uma estaca. Com o incremento de carga para 50%  $Q_{C-IN}$ , ou seja, metade do carregamento convencional, o conjunto com a presença de uma estaca defeituosa apresenta valor abaixo do limite permitido pela norma NBR 6122/2010 (<2,0).

Além da variação da intensidade de dano (50%L e 0%L) os grupos de 9 e 16 estacas foram avaliados variando a posição da estaca danificada em relação ao grupo. Pôde-se observar que para 11% de estacas defeituosas no grupo de 9 estacas e 6% de estacas danificadas no conjunto de 16 estacas, a posição e o nível de dano tem um menor impacto do que o relatado no grupo de 4 estacas, podendo ser atribuído a maior interação entre as estacas. Para os grupos de 9 estacas esses valores foram em torno de 13% e para os grupos de 16 estacas essa variação foi em torno de 10%, com perda de carga alcançando níveis de 14% e 10%, respectivamente.

Embora o desempenho do radier estaqueado seja avaliado pela combinação da redução de recalque do grupo, a economia no projeto se dá pelo número de estacas alocadas no sistema, porém, isto só é possível pela distribuição de carga entre o radier e as estacas, medido por meio do fator de distribuição de carga ( $\alpha_{pr}$ ) em função do incremento de recalque. Nos estágios iniciais de carregamento, o recalque absoluto do radier estaqueado íntegro é pequeno e as estacas ainda não foram totalmente mobilizadas, então uma maior proporção de carga aplicada é recebida pelas estacas. Com o incremento da carga o recalque aumenta e a carga é redistribuída para o radier que começará a absorver mais carga. Para maiores valores de recalque a porcentagem de carga das estacas permanece pouco alterada.

Para o grupo de 4 estacas o valor é máximo na fase inicial de carregamento, onde os recalques dos radiers são menores e elásticos. Com o incremento de carga o recalque também



aumenta e a proporção de distribuição de carga entre os elementos tende a diminuir. Para este grupo a variação do nível de dano (variação do comprimento de uma estaca) influenciou no comportamento de  $\alpha_{pr}$  nos estágios iniciais (até 0,5 mm de recalque ou 3,4%  $D_E$ ) fazendo com que o grupo intacto apresentasse valores mais próximos a unidade e com as estacas absorvendo maiores proporções de carga do que a placa, ou seja, comportamento que tende a se aproximar de um comportamento de “grupo de estacas” (sem contato do bloco com o solo, em que as cargas são absorvidas exclusivamente pelas estacas), enquanto os demais grupos apresentaram menores valores de  $\alpha_{pr}$ , tendo então um comportamento que tende a apresentar maior interação entre os elementos deste sistema de estacas, ou seja, e neste caso, maior proporção de carga absorvida pela placa.

Para os grupos de 9 estacas a variação da posição do dano apresentou maior influência no  $\alpha_{pr}$  do que a variação da intensidade do dano, que foi simulado pela variação do comprimento de uma estaca, comportamento que se manteve para o grupo de 16 estacas.

Desta forma, é claramente evidente a partir dos resultados que, embora as estacas de diferentes comprimentos mostrem uma tendência similar na distribuição de carga, a magnitude do fator distribuição de carga em um dado nível de recalque é menor para maiores grupos de estacas. E isso pode ser atribuído a redução global de rigidez grupo de estaca-solo para grupos maiores.

Também pôde-se comparar os dados medidos em escala reduzida com valores medidos em radiers estaqueados com estacas danificadas em verdadeira grandeza (Freitas Neto, 2013). Os valores percentuais de capacidade de carga do grupo com 4 estacas, do referido autor, com a presença de uma estaca defeituosa foram menores, na ordem de 20%, que os valores medidos em escala reduzida. O caso em verdadeira grandeza apresenta uma ruptura abrupta durante o processo de carregamento enquanto o caso em escala reduzida o dano se apresenta desde os carregamentos iniciais. Outro fato que pode ter contribuído para uma menor capacidade de carga após a ruptura é valor do espaçamento relativo ( $s/D = 5,0$ ) que faz com que haja maior participação da placa e menor influência das estacas. Já o radier estaqueado com 3 estacas sendo uma delas defeituosa, obteve a capacidade de carga mais próxima da curva de tendência. Fato que se deu devido a um problema de execução do sistema de fundação em verdadeira grandeza e fez com que a simulação do dano se assemelhasse ao modelo 1g, ou seja, com a simulação do dano desde o início do carregamento.

### 5.3 RIGIDEZ E DESLOCAMENTO

Para o grupo de quatro (4) estacas a perda de rigidez inicial, ao nível de recalque igual a  $2,5\%D_E$  ( $2,5\%$  do diâmetro da estaca, ou recalque de  $0,36\text{mm}$ ), foi na ordem de  $40\%$  para o caso da ausência de uma estaca e de  $26\%$  para a presença de uma estaca curta. Ou seja, a variação de  $50\%$  da intensidade do dano em um grupo de 4 estacas representa uma variação de  $35\%$  da rigidez neste nível de recalque. Variação esta que tende a diminuir com a aproximação do recalque máximo convencionado ( $10\%D_E$ ).

Para os grupos de nove (9) estacas com a presença de uma estaca danificada em diferentes posições ou intensidades são comparadas em um mesmo nível de recalque ( $2,5\%D_E$ ) observou-se uma perda significativa de rigidez tanto na variação da posição do dano quanto na intensidade do dano, em média de  $35\%$  para as estacas curtas, e  $44\%$  para as estacas ausentes, com uma variação média de  $15\%$  em relação a intensidade do dano, com isso, essa variação tendeu a  $9\%$  para os níveis finais de recalque ( $10\%D_E$ ).

Para os grupos de 16 estacas a intensidade do dano se mostrou mais significativo no estágio inicial de deslocamento ( $2,5\%D_E$ ), com perda de rigidez média de  $22,5\%$  para as estacas curtas e  $44\%$  para o grupo de estacas ausentes. Porém, no segundo nível de recalque ( $5\%D_E$ ) esta diferença já diminuiu para  $17\%$  para as estacas curtas e  $26\%$  para as estacas ausentes.

### 5.4. CONCLUSÕES

Conclui-se, mediante os resultados obtidos experimentalmente em escala reduzida  $1g$ , que é de fundamental importância o controle do comportamento carga-recalque desde o início das obras, além do já convencional controle na etapa de projeto, pois, desta forma pode-se antever a uma possibilidade de defeito nas estacas. Pois, com recalques da ordem de  $2,5\%$  do diâmetro nominal da estaca ( $2,5\%D_E$ ), dentre os casos estudados, além das estacas ainda estarem sendo mobilizadas, o sistema de fundações apresenta altos fatores de segurança, podendo então ser realizada alguma interferência para garantir a segurança do empreendimento e das pessoas.

Além disso, sugere-se que para o dimensionamento de fundações sejam realizadas com base (além da capacidade de carga) nos recalques em diferentes níveis de carregamento ou mesmo das rigidezes, o que pode auxiliar no controle de alguma anomalia que ocorra nas fundações.

ou seja, danos que já se encontravam nos grupos desde os carregamentos iniciais. Porém, o que se sugere acima de tudo, é que em cada nova configuração dentro de um mesmo grupo sejam avaliadas por estágios de carregamento, não apenas para as cargas últimas e de trabalho, auxiliando desta forma a realização de retroanálises e, baseado nos recalques ou rigidezes, prever sua nova capacidade de carga e propor assim um melhor momento e local para a intervenção.

O ensaio em modelo 1g em areias é uma boa alternativa para investigar o comportamento de fundações em estacas isoladas e grupos de estacas com a presença de estacas defeituosas.

Apesar das dificuldades de similitude e da pouca literatura a respeito de modelagem física 1g foi possível apresentar alguns gráficos qualitativos de tendências a respeito do nível de dano em função da capacidade de carga de um sistema em radier estaqueado e compará-los com dados em verdadeira grandeza. Apesar de serem comparados com apenas dois casos em escala real, os resultados poderiam ser eventualmente utilizados como forma de comparação com outros casos, desde que usados com discrição e cuidado.

Vale ressaltar que o aprendizado sobre este assunto é importante e se faz necessário para melhor compreender o comportamento de radiers estaqueados com defeito com custos mais baixos quando comparados com os testes em centrífugas ou em verdadeira grandeza.

É importante destacar também que os resultados apresentados nesta tese, são de ordem qualitativa, e não devem ser extrapoladas indiscriminadamente para outros casos.

## **5.5. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

- Apresentar estudos adimensionais em modelos 1g com esforços horizontais e momentos;
- Realizar trabalhos com argila e avaliar o efeito da pressão neutra no dano;
- Avaliar a variação do espaçamento entre estacas em grupos de fundações estaqueadas com a presença de estacas danificadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALBUQUERQUE, P. J. R. (2001). Estacas escavadas, Hélice Contínua e Ômega: Estudo do comportamento à compressão em solo residual de diabásio, através de provas de carga instrumentadas em profundidade. Tese (Doutorado em Engenharia de Solos) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 260 p.

ALBUQUERQUE, P. J. R.; GARCIA, J. R.; FREITAS NETO, O.; CUNHA, RENATO PINTO DA; SANTOS JUNIOR, O. F.. Behavioral evaluation of small-diameter defective and intact bored piles subjected to axial compression. *SOILS & ROCKS*, v. 40, p. 109-121, 2017.

ALENCAR JUNIOR, J. A.; DE SOUZA, R. M.; COMIN, C.; BANHA, G. S.; TAGLIARINI, E. M.; Apresentação e Interpretação de Prova de Carga Monitorada em Perfil Metálico para Fundação de Prédio Alto na Cidade de Belém-PA. Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 2015, São Paulo.

ALONSO, U.R.. (1998). Previsão e Controle das Fundações. 2a Ed. São Paulo, SP, Ed. Edgard Blücher Ltda. 1998. 142 f.

ALVA, F. G. (2017). Análise do comportamento de radier estaqueados com estaca defeituosa carregados horizontalmente em solo tropical. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-135/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, D.F. 169p.

ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A. (2004). Extensometria Básica. 46 f. Apostila. Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural – Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, SP, 2004. Disponível em: <<http://www.nepae.feis.unesp.br/downloads.php>>. Acesso em: 20 agosto 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12131/06: Estacas – Provas de Carga estática. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122/2010: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro.

ASTM Standard D5882, “Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, [www.astm.org](http://www.astm.org).

BAJAD, S.P. & SAHU, R.B. (2008). An experimental study on the behavior of vertically loaded piled raft on soft clay The 12th Intl. Conf. of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India, pp. 84-90

BALAKUMAR, V., (2008). Experimental Studies Of Model Piled Rafts On Sand And Field Study Of Prototype Behaviour. Thesis Doctor of Philosophy. Faculty of Civil Engineering Anna University. Chennai, Tamil Nadu - India. – 600 025. July 2008.

- BAUER, J., KEMPFERT, H.-G. & REUL, O. (2014). Lateral pressure on piles due to horizontal soil movement — 1 g model tests on single piles and pile rows. *Physical Modelling in Geotechnics - International Conferences on Physical Modelling in Geotechnics - ICPMG 2014*. Perth, Australia. 839-845p.
- BEZERRA, J. E. (2003). Estudo do Comportamento de Fundações em Radier Estaqueado: Conceitos e Aplicações. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, UnB, Brasília, p. 193.
- BURLAND, J. B. (1995). Piles as settlement reduces Proceedings. 19th Italian National Conference on Soil Mechanics, Pavia.
- BUTTERFIELD. R. & BANERJEE. P. K. (1971). The elastic analysis of compressible piles and pile groups. *Geotechnique* 21, No. 1, 43-60.
- BROMS, B.B. (1995). Damage of piles during driving, *Developments in Deep Foundations and Ground Improvement Schemes*, Balasubramaniam *et al.* (eds), Belkema, Rotterdam.
- CAMBEFORT, M. (1964). Essai sur le Comportement em terrain homogène des pieux isolés et des groups de pieux. *Annales de l'Institut du Batiment et des Travaux Public*, n.204, Décembre.
- CARVALHO, S.L. (2015). Metodologia Híbrida Aplicada em uma Ferramenta Numérica para Análise de Radier Estaqueado. Dissertação de Mestrado. UFG. Goiânia, p.142.
- CHAN, K.S., KARASUDHI, P. & LEE, S.L. (1996). Force at a point in the interior of layered elastic half-space, *Int. J. Solids Struct.* **10** (11), pp. 1179–1199.
- CHOI, Y.S. (2012). Investigation of the Response of Pile Groups Subjected to Combined Loads. Ph.D. Thesis, Purdue University. West Lafayette, Indiana. 238p.
- CHOW, H. and SMALL, J. C. (2005). Finite layer analysis of combined pile-raft foundations with piles of different lengths. *Proc. 11th Int. Conf. IACMAG*, Turin, Italy, Vol. 2, pp. 429–436.
- CHOW H. (2007), Analysis of piled-raft foundation with piles of different lengths and diameters, Ph.D. Thesis, School of Civil Engineering, the University of Sydney.
- CLANCY, P. and RANDOLPH, M.F. (1992). Analysis and design of piled raft foundations. Research report G1062, University of Western Australia, Perth.
- CLANCY, P. and RANDOLPH, M.F. (1993). An Approximate Analysis Procedure for Piled Raft Foundations. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 17, No.12, 849 – 869.
- CONTE, G., MANDOLINI, A. and RANDOLPH, M. F. (2003). Centrifuge modeling to investigate the performance of piled rafts, *Proceedings of the Fourth International Conference on Foundations on Bored and Auger Piles, BAP IV*, pp. 359-366.

COOKE, R.W. (1974). The Settlement of Friction Pile Foundations. Proc. Conf. on Tall Buildings, Kuala Lumpur, pp. 7-19.

COOKE, R. W. (1986). Piled raft foundations on stiff clays – a contribution to design philosophy.

CORDEIRO, A. F. (2007). Avaliação Numérica de Reforço de Grupo de Estacas pela Introdução de Estacas Adicionais. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. UnB. Brasília, p.118.

CORDEIRO, A.F.B.; CUNHA, R. P. ; BEZERRA, J. E. (2009). Numerical simulation of the installation of in additional pile in defective piled raft systems. In: Int. Conf. on Deep Foundations CPRF and Energy Piles, 2009, Frankfurt. Int. Conf. on Deep Foundations CPRF and Energy Piles, v. Único. p. 57-71

CORDEIRO, A.F., CUNHA, R.P., BEZERRA., J.E., (2009). Numerical Simulation of the Installation of an Additional Pile in Defective Piled Raft Systems. Int. Conf. On Deep Foundations 2009. TU Darmstadt.15p.

COX, W.R., DIXON, D.A., and MURPHY, B.S. (1984). Lateral load tests of 5,4 mm diameter piles in very soft clay in side-by-side and in-line groups. Laterally Loaded Deep Foundations: Analysis and Performance, ASTM, West Conshohocken, PA.

CRUZ JUNIOR, A.J. (2016). Instrumentação de fundações estaqueadas. Dissertação de Mestrado. UFG. Goiânia, p.118.

CUNHA, R. P.; CORDEIRO, A. F.; SALES, M. M.; Small, J. C. (2007). Parametric Analyses of Pile Groups with Defective Piles: Observed Numerical Behaviour and Remediation. In: 10th. Australia New Zealand Conference on Geomechanics, 2007, Brisbane. 10th. Australia New Zealand Conference on Geomechanics, 2007. v. 1. p. 454-459.

CUNHA, R.P. (2008). “Quality evaluation criteria for pile integrity test on deep foundation bored in tropical soil”, Proceedings, 8th. International Conf. on the Application of Stress Wave Theory to Piles – SWAVE’08, Lisboa, Portugal, Vol. 1, pp 465-470.

CUNHA, R. P.; CORDEIRO, A.F.B. (2009). Simulação numérica do reforço de sistemas de fundação em radier estaqueado com uma estaca defeituosa. In: Evento de Engenharia de Fundações - Passado Recente e Perspectivas - Homenagem ao Prof. Nelson Aoki, 2009, São Carlos. Evento de Engenharia de Fundações - Passado Recente e Perspectivas - Homenagem ao Prof. Nelson Aoki, 2009. v. Único. p. 55-64.

CUNHA, R. P.; CORDEIRO, A.F.B. (2009). Comportamento pós-reforço de grupos de fundação com uma única estaca defeituosa. In: XV Jornadas Geotécnicas de La Ingeniería Colombiana, Bogotá, 2009, Bogotá. XV Jornadas Geotécnicas de La Ingeniería Colombiana, Bogotá, 2009. v. 1. p. 113-118.

CUNHA, R. P., CORDEIRO, A. F. B. & SALES, M. M. (2010). Numerical assessment of an imperfect pile group with defective pile both at initial and reinforced conditions. Soil and Rock, São Paulo, v. 33, n.2, p. 81-93, May-August.

CUNHA, R. P.; CORDEIRO, A.F.B; CARDENAS, J.C.R (2012).. Comparison of integrity and echo tests in the assessment of defects in pile foundations. In: Baltic Piling Days, 2012, Taillinn. Baltic Piling Days, 2012. v. CD Rom. p. 1-5.

CUNHA, H.L., DOMINGUES, V.R., RESENDE, C. & MOTA, N.M.B., (2015). Importância da Execução de Prova de Carga Estática Antes da Elaboração do Projeto: Estudo de Caso. SEFE8. São Paulo - SP. 10p.

CUNHA, R. P.; Freitas Neto, O.; CORDEIRO, A. F. (2016). Influência da presença de estaca defeituosa em grupo de fundações profundas escavadas e flutuantes. In: Homenagem aos Profs. Willy Lacerda e Jacques de Medina. Coppe-UFRJ, 2016, Rio de Janeiro. Willy Lacerda-Doutor no Saber e na Arte de Viver. Livro Comemorativo do Evento em Homenagem aos Profs. Willy Lacerda e Jacques de Medina, 2016. v. Único. p. 264-272.

CURADO, T.S. (2015). Comparação de Teorias de Interação entre Estacas. Dissertação de Mestrado. UFG. Goiânia, p.151.

DÉCOURT, L. (2008) Provas de carga em estacas podem dizer muito mais do que têm dito. Anais 6º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo. v.1, pp. 221-245.

FIORAVANTE, V. (2010). Load Transfer Mechanism Between a Pile and a Raft with an Interposed Granular Layer. In press on Geotechnique.

FIORAVANTE, V & JAMIOLKOWSKI, M.B. (2005). Physical Modelling of Piled Raft. In Proceedings of the International Geotechnical Conference on Soil-Structure Interaction, Saint Petersburg. Ulitsky, V.M. Ed. ASV Publishers Saint Petersburg- Moscow, pp 89-95.

FIORAVANTE, V. & GIRETTI, D. (2010). Load transfer mechanisms of piled raft foundations. Physical Modelling in Geotechnics - International Conferences on Physical Modelling in Geotechnics - ICPMG 2010. Zurich, Switzerland. 861-866p.

FRANKE, E., LUTZ, B. & EL-MOSSALAMY, Y. (1994). Measurements and numerical modelling of high-rise building foundations on Frankfurt clay. Conference on Vertical and Horizontal Def. of Found. and Embankments, Texas, ASCE Geot. Special Publ., v. 40, n.2, p. 1325-1336.

FREITAS NETO, O. (2013). Avaliação Experimental e Numérica de Radiers Estaqueados com Estacas Defeituosas em Solo Tropical do Brasil. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-088/2013, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 253p.

GARCIA. J. R. (2015). Análise Experimental e Numérica de Radieres Estaqueados Executados em Solo da Região de Campinas/SP. Dissertação de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil, 359 p.

GARNIER, J. & KÖNIG, D. (1998). Scale effects in piles and nails loading tests in sands, Centrifuge'98, Tokyo, Kimura et al. (Ed.), Balkema, 1998, 1, pp. 205–210.

- GIRETTI, D. (2009). Modelling of Piled Raft Foundations in Sand. Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria. Università degli Studi di Ferrara. 207p.
- GOBLE, G.G. & RAUSCHE, F. (1979). Pile drivability predictions by CAPWAP, Proc. Int. Conf. on Numerical Methods in Offshore Piling, London: ICE, pp. 29-36.
- HAIN, S.J. & LEE, I.K. (1974). Rational Analysis of Raft Foundations. Jnl. Geot. Div., Proc., ASCE, 200, No. GT7, 843-860.
- HAIN, S.J. & LEE, I.K. (1978). The analysis of flexible raft-pile systems. Geotechnique, 28(1). p. 65-83.
- HARRIS, H. G.; SABNIS G. M. (1999). Structural modeling and experimental techniques. 2nd edition. CRC PRESS. Boca Raton.
- HETTLER, A. (2010). Possibilities and limitations of 1-g model techniques. Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG 2010), Zurich, Switzerland. pp.135-140.
- HORIKOSHI, K. (1995). Optimum Design of Piled Raft Foundations, Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy, University of Western Australia.
- HORIKOSHI, K. & RANDOLPH, M.F. (1996). Centrifuge modelling of piled raft foundations on clay. Geotechnique, 46(4): 741-752.
- JANDA, T., CUNHA, R.P., KUKLIK, P. e ANJOS, G.M. (2009). Three dimensional finite element analysis and back-analysis of CDA standard pile groups and piled rafts founded on tropical soil. Soil and Rocks, v. 32, n. 1, p. 3-18.
- JARDINE, R. J., POTTS, D. M., FOURIE, A. B. & BURLAND, J. B. (1986). Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction. Geotechnique 36, No. 3, p. 377-396.
- KATZENBACH, R., ARSLAN, U., MOORMANN, C. & REUL, O. (1998). Piled Raft Foundation – Interaction Between Piles and Raft. Darmstadt Geotechnics, Darmstadt Univ. of Technology, n. 4, p. 279-296.
- KATZENBACH, R.; ARSLAN, U.; MOORMANN, C. (2000). Piled raft foundation Projects in Germany. In: Hemsley, J. A. (editor). Design applications of Raft Foundations. 1<sup>st</sup> London: Thomas Telford Ltd. 2000. pp. 323-391.
- KITIYODOM, P. & MATSUMOTO, T. (2003). A simplified analysis method for piled raft foundations in non-homogeneous soils. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, n. 27, pp. 85–109.
- KUWABARA, F. (1989). An elastic analysis for piled raft foundations in a homogeneous soil. Soils and Foundations, v. 29, n. 1, pp. 82-92.
- LAMBE, T. W., WHITMAN, R. V. (1969). Soil Mechanics. Nova Iorque: John Wiley & Sons.



- LEE J. (2008). Experimental Investigation of the Load Response of Model Piles in Sand. Thesis. Doctor of Philosophy. Purdue University - West Lafayette, Indiana. 243p.
- LEE S.H., and CHUNG C.K. (2005). An experimental study of the interaction of vertical loaded pile groups in sand, Canadian Geotechnical Journal, vol 42, pp 1485-1493.
- MANDOLINI, A. (2007). Piles Foundations from Research to Practice. Notas de Aula. Curso de Extensão, Universidade de Brasília, departamento de Engenharia Civil e Ambiental.
- MANDOLINI, A.; DI LAORA, R.; MASCARUCCI, Y. (2013). Rational Design of Piled Raft. Proc. 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST (57): 45 - 52.
- MANDOLINI, A.; DI LAORA, R.; IODICE, C. (2017). Simple Approach to Static and Seismic Design of Piled Rafts. 3<sup>rd</sup> Bolivian International Conference on Deep Foundations, pp. 107-124.
- MELO, B.N. & ALBUQUERQUE, P.J.R DE, (2015). Prova de Carga Estática em Estaca Escavada Analisada pelo Método de Rigidez. SEFE8. São Paulo - SP. 10 p.
- MILITITSKY, J & CONSOLI, N. C. & SCHNAID, F. (2005). Patologia das Fundações. São Paulo: Oficina de Textos.
- NISHIMOTO, S. & TOMISAWA, K. AND MIURA, S. (2010). An experimental study of the vertical bearing mechanism of piled raft foundations. Physical Modelling in Geotechnics – International Conferences on Physical Modelling in Geotechnics – ICPMG 2010. Zurich, Switzerland, pp. 885-890.
- NIYAMA, S.; AOKI, N.; CHAMECKI, P. R. (1998). Verificação de desempenho. In: hachich, W.; Falconi, F. F.; Saes, J. L.; Frota, R. G. Q.; Carvalho, C. S.; Niyama, S. (Editores). Fundações: teoria e prática. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: PINI, 1998, pp. 723-749.
- O'Neill M.W., O. I. Ghazzaly & H. B. Ha, (1977). Analysis of three-dimensional pile groups with nonlinear soil response and pile-soil-pile interaction, Proc. 9th Offshore Technology Conf. , 2 245-256.
- O'NEILL, M. W. (1983) Group action on piles offshore. Proc. Conference on Geotechnical practice in offshore engineering, p.25-64.
- POULOS, H. G. (1980). Comparisons between theoretical and observed behavior of pile foundations. Australia-New Zealand Conference on Geomechanics, pp. 95-104.
- 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. (1989). Pile behavior – theory and application. Géotechnique 39, No. 3, 365 – 415.
- POULOS, H.G. (1994a). Alternative design strategies for piled raft foundations. 3rd Int. Conf. Deep Foundations, Singapore, Proc. 3rd Int. Conf. Deep Foundations, pp. 239-244.

- POULOS, H.G. (1994b). An approximate numerical analysis of pile-raft interaction. *Int. Journal for Num. & Anal.Meth.in Geomechanics*, v. 18, pp.73-92.
- POULOS, H. G. (1997). Behaviour of pile groups with defective piles. *Proc., 14<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mechanics Foundation Engineering. Hamburg. 2.* pp. 871-876.
- POULOS, H.G. (1998). The pile-enhanced raft. An economical foundation system. *Proc. XI Brazilian Congress on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Brasília. v. 4.* pp. 27-43.
- POULOS, H. G. (1999). Common procedures for foundations settlement analysis – are they adequate? *Proc. 8th Australian-New Zealand Conference on Geomechanics, Hobart, Australia, 1,* pp. 3-25.
- POULOS, H.G. (2001). Piled raft foundations: design and applications. *Geotechnique*, Vol 51, N° 2, pp. 95-113.
- POULOS, H.G. (2008). *The Piled Raft Foundation for the Burj Dubai – Design & Performance. IGS – Ferroco Terzaghi, Oration, 2008.*
- POULOS, H.G. & DAVIS, E.H. (1980). *Pile Foundations Analysis and Design. John Wiley and Sons, New York, 397 p.*
- POULOS, H. G., SMALL, J. C., TA, L. D., SINHA, J. & CHEN, L. (1997). Comparison of some methods for analysis of piled rafts. *Proced. XIV ICSMFE, Hamburg, v. 2,* pp. 1119-1129.
- PRAKOSO, W. A. & KULHAWY, F.H. (2001): Contribution to piled raft foundation design. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127(1),* pp.17-24.
- RANDOLPH, M. F. (1983). *Design of Piled Raft Foundations. Cambridge University, Eng. Depart. Research Report, Soils TR143.*
- RANDOLPH, M. F. (1994). Design methods for pile groups and piled rafts. *International Conference on soil mechanics and foundation engineering, 13. New Delhi. v. 5.* pp. 61-82.
- RANDOLPH, M. F. & WORTH, C. P. (1978). Analysis of deformation of vertically loaded piles. *Journal of Geot. Eng. Div., ASCE, v. 104, n. 12,* pp.1465-1488.
- RANDOLPH, M. F. & WROTH, C. P. (1979). Analyses of deformation of vertically loaded pile groups. *Géotechnique, v.29, n.4,* pp.423-439.
- RAO, S. N. (1996). *Defective Piles In Clay. Proced. Sixth International Conference & Exhibition On Piling And Deep Foundations, 8 p.*
- REINHORN, A. M. (2008). *Experimental methods in structural engineering. Lecture notes of Departamento of Civil. Structural and Environmental Engineering of University at Buffalo. Buffalo - New York.*

- REUL, O. & RANDOLPH, M.F. (2002). Study of the influence of finite element mesh refinement on the calculated bearing behavior of a piled raft. 8<sup>th</sup> International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, Rome, Balkema, 259-264.
- RINCON, E.R. (2016). Análise experimental do comportamento de sistemas de radier estaqueado em solos moles em processos de adensamentos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-119/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 237 p.
- RUSSO, G. (1998). Numerical analysis of piled rafts. *Int. Journ. For Num. and Anal.Meth.in Geomech.*, v. 22, n. 6, pp. 477-493.
- RUSSO, G. AND VIGGIANI, C. (1998). Factors Controlling Soil-Structure Interaction for Piled Rafts. *Darmstadt Geotechnics*, Darmstadt Univ. of Technology, No. 4, pp. 297-322.
- SALES, M. M. (2000). Análise do comportamento de sapatas estaqueadas. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF.
- SALGADO, R. (2008). *The engineering of foundations*. New York: Mc Graw-Hill, 896 p.
- SMALL, J. C., & ZHANG, H. H. (2002). Behavior of piled raft foundations under lateral and vertical loading. *International Journal of Geomechanics*, 2(1), pp. 29-45.
- SOARES, W. C. (2011). Radier Estaqueado Com Estacas Hollow Auger Em Solo Arenoso. 2011, 302p. Tese de Doutorado Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Engenharia Civil.
- 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.
- SOUSA, M.A.P. (2014). Análise do Efeito do Comportamento não linear dos solos em Radier Estaqueado. Dissertação de Mestrado. UFG. Goiânia, 160 p.
- SPRINGMAN, S.M. (2007). *Modelling in Geotechnics*. Encontro de Modelagem Física COOPERJ, Rio de Janeiro, 2007.
- SPRINGMAN, S.M., LAUE, J. & HERZOG, R. (2014). The evolution of a physical modelling course over two decades. *Physical Modelling in Geotechnics – International Conferences on Physical Modelling in Geotechnics – ICPMG 2014*. Perth, Australia. pp 433-439.
- TA, L. D. & SMALL, J. C. (1996). Analysis of piled raft systems in layered soils. *Int. Journal for Num. & Anal.Meth.in Geomechanics*, v. 20, pp. 57-72.
- TAVARES, M.V.C.F. (2012). Avaliação Experimental de Fundações Estaqueadas em Modelos 1g. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Publicação E. Dm-001A/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 155p.

TAYLOR, D. W. (1948). Fundamentals of soil mechanics. Wiley, New York.

THORBURN, S. & THORBURN, J.Q. (1977). Review of problems associated with the construction of cast-in-place concrete piles, DOE and CIRIA Piling Development Group, Rep. PG2, CIRIA, London.

VAN IMPE, W.F. (1991). Deformation of deep foundations. Proc. X Eur. Conf. Soil Mech. FOUND. ENG., FIRENZE, 3, 1031-1064.

VAN IMPE, W.F. AND LUNGU, I. (1996) Technical Report on Settlement Prediction Methods for Piled Raft Foundations. Ghent Univ., Belgium.

VELLOSO, D. A. & LOPES, F. R. (2002). Fundações Volume 2 – Fundações Profundas. COPPE/UFRJ, p. 472, Rio de Janeiro.

VELLOSO, D. A. & LOPES, F. R., (2010). Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

VIGGIANI, C. (1998). Pile groups and piled rafts behavior. Proc. BAP III, Ghent, pp. 77-94.

WINKLER, E. (1867). Teoria da Elasticidade e da Força (em Alemão). Dominicus. Prag..

XU, K. J. (2000). General Analysis of Pile Foundations and Application to Defective Piles. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Sydney University, Sydney. 404p.

## **APÊNDICES**

**APÊNDICE A – Calibração da Instrumentação das Estacas**

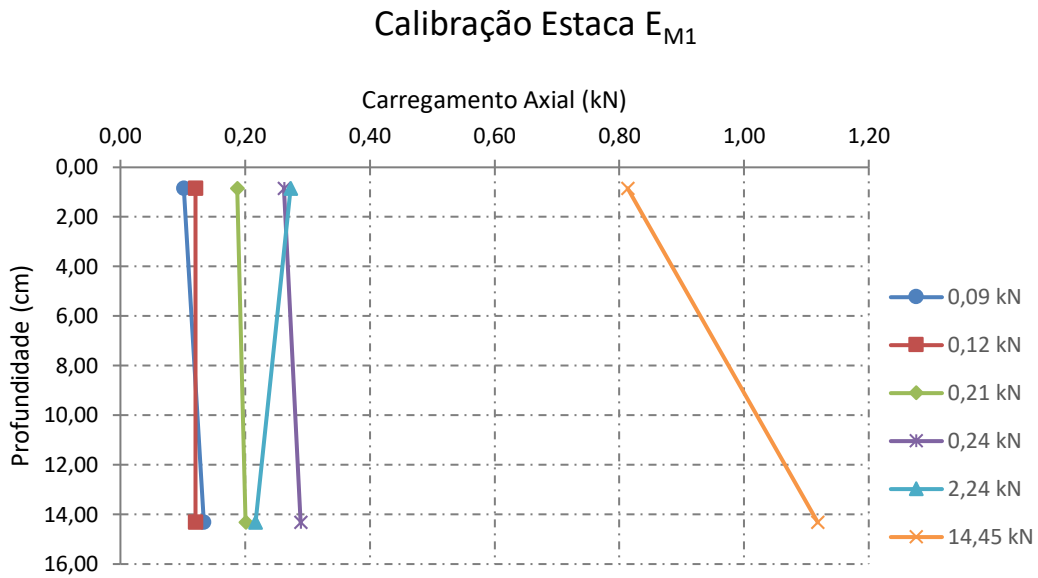


Figura A.1 – Carga recebida nos *strain gauge* da estaca E<sub>M1</sub> (topo e base).

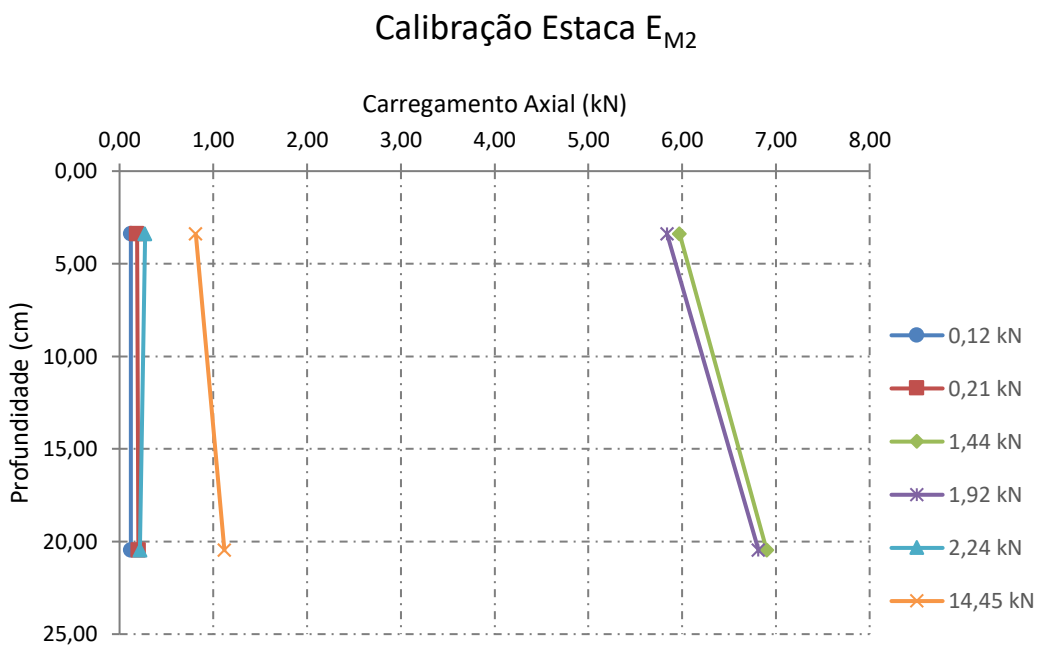


Figura A.2 – Carga recebida nos *strain gauge* da estaca E<sub>M2</sub> (topo e base).

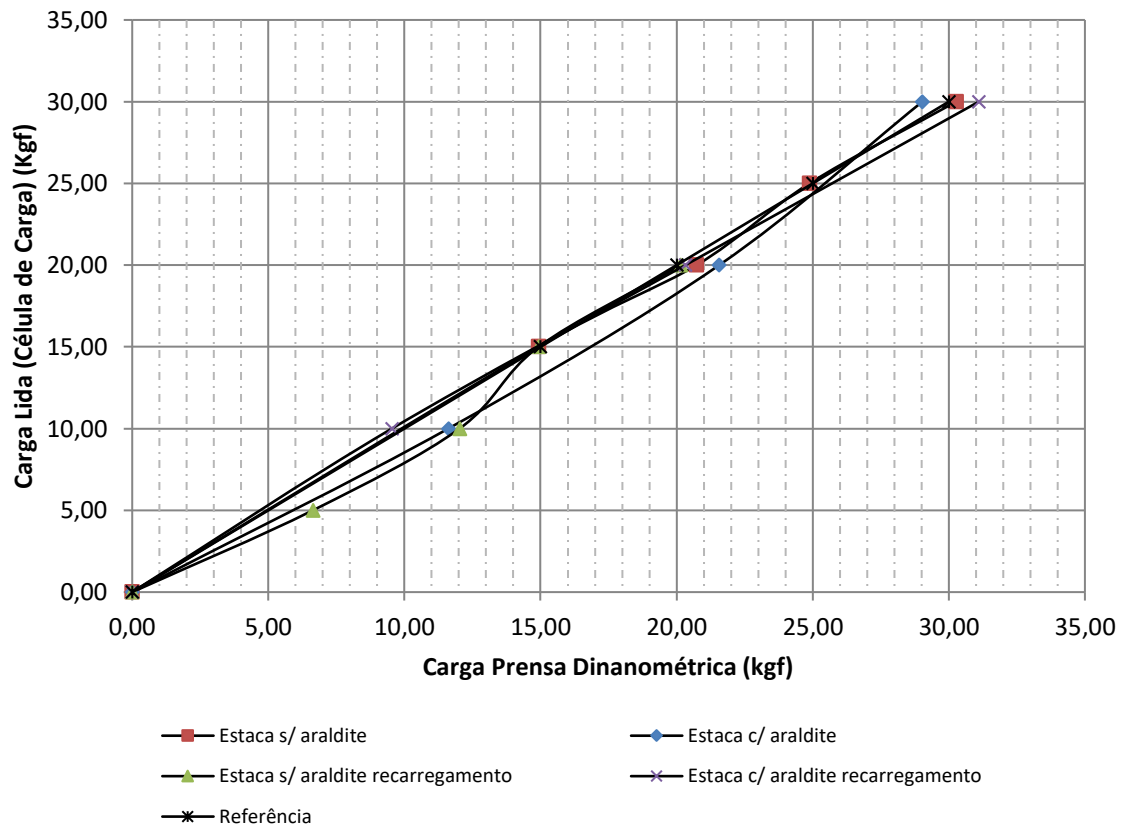


Figura A.3 – Ensaio de Calibração do sistema de leitura de carga.

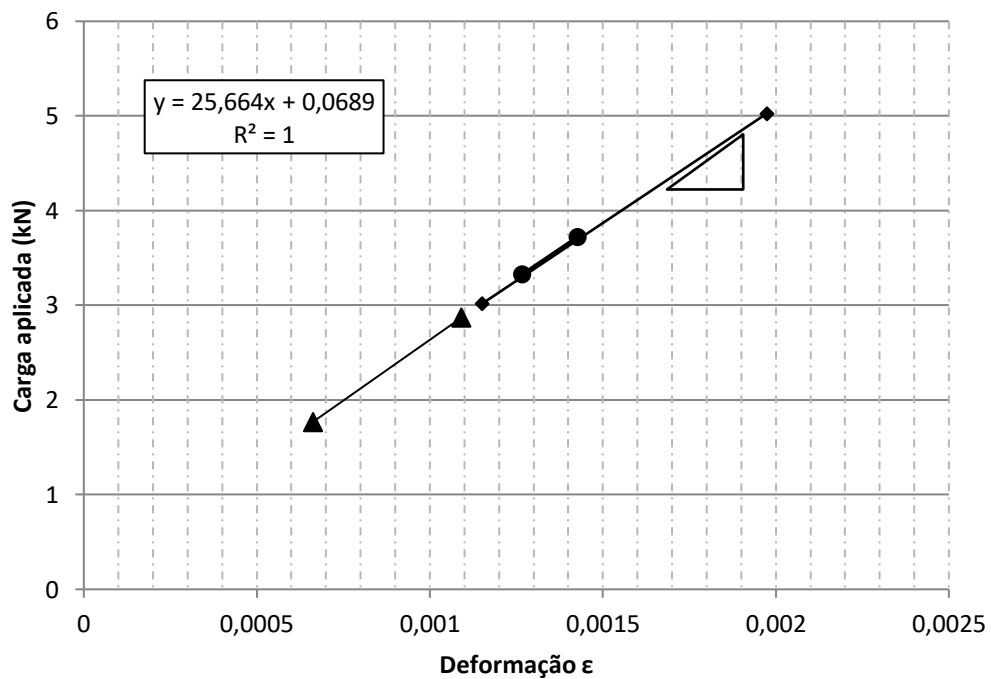


Figura A.4 – Determinação do Módulo de Young da Estaca.



**APÊNDICE B** – Ensaio no Solo

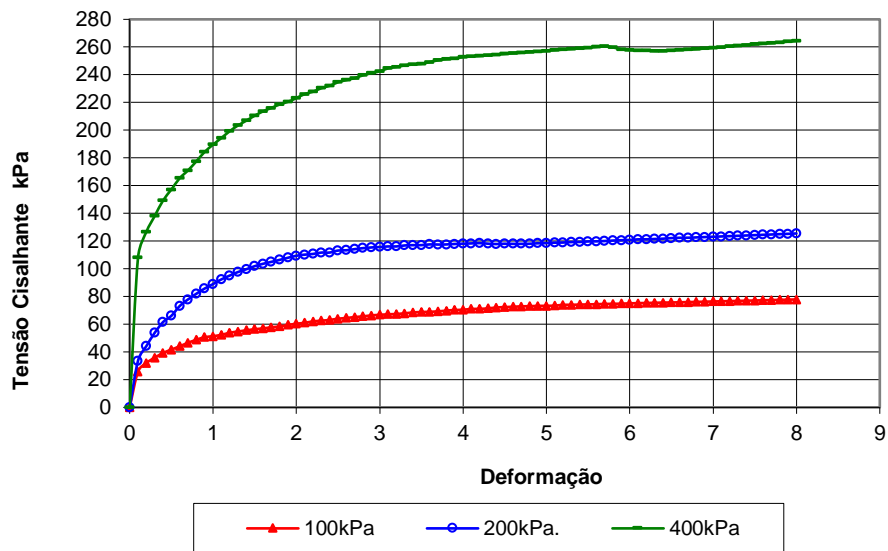


Figura B.1 – Ensaio de Cisalhamento direto na areia.

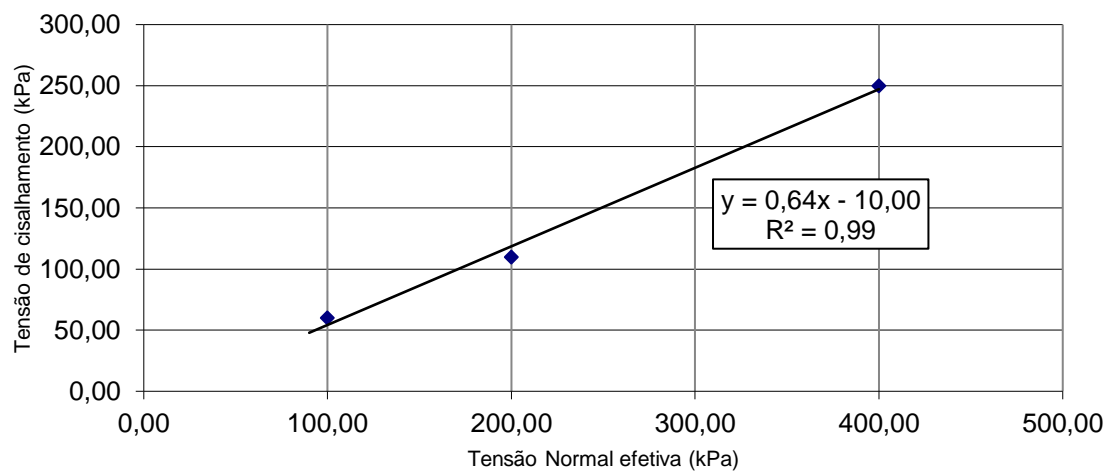


Figura B.2 – Regressão linear do ensaio de cisalhamento direto.

Tabela B.1 – Determinação das Densidades.

<b>Fundação</b>	<b>Posição</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade Média (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Desv. Padrão</b>
Radier Estaqueado com 4 Estacas	Topo	78,6%	84,4%	0,11
	Meio	77,1%		
	Base	97,5%		
Radier Estaqueado com 9 Estacas (E5)	Topo	73,8%	81,3%	0,14
	Meio	72,6%		
	Base	97,5%		
Radier Estaqueado com 9 Estacas (E6)	Topo	86,2%	86,1%	0,11
	Meio	74,7%		
	Base	97,5%		
Radier Estaqueado com 9 Estacas (E9)	Topo	73,8%	80,0%	0,11
	Meio	73,5%		
	Base	92,7%		
Radier Estaqueado com 16 Estacas (E11)	Topo	73,8%	81,7%	0,14
	Meio	73,8%		
	Base	97,5%		
Radier Estaqueado com 16 Estacas (E12)	Topo	72,1%	83,5%	0,13
	Meio	80,9%		
	Base	97,5%		
Radier Estaqueado com 16 Estacas (E16)	Topo	75,3%	82,7%	0,13
	Meio	75,3%		
	Base	97,5%		

**APÊNDICE C – Ferramenta Numérica Simplificada**

## ANÁLISES NUMÉRICAS PARA OS ENSAIOS DO MODELO 1g

### Introdução

Muitos problemas geotécnicos apresentam bons resultados com análises simplificadas e satisfazem quanto às condições de compatibilidade quanto de equilíbrio. Se for possível estabelecer um modelo numérico, ainda que simplificado, composto de modelo do material apropriado e relações constitutivas, combinando-os com equações de equilíbrio e compatibilidade, é possível obter soluções aceitáveis, mesmo que não sejam exatas, ainda são apropriadas para avaliar o comportamento do modelo.

A imprecisão que ocorre nesses modelos é devido a várias hipóteses relacionadas a geometria, idealização do comportamento do material, condições de contorno, etc. No entanto, é possível obter soluções razoavelmente acuradas para os vários problemas geotécnicos através de análises numéricas rigorosas ou mesmo métodos simplificados.

Para o problema em que se relaciona um grupo de estacas, onde não há contato do bloco com o solo, uma ferramenta simplificada com solução fechada é suficiente para prever seu comportamento carga-recalque enquanto que para um problema associado ao radier estaqueado a performance do sistema de fundação é devido à carga estrutural e à interação entre os três elementos independentes do sistema de fundação, radier, estacas e solo. Esse problema se agrava quando são incluídos estacas de diferentes comprimentos, o que pode ser a simulação de um dano neste conjunto, e ainda, em posições distintas, o que é tratado como um novo sistema.

Em muitas estruturas as tensões iniciais geradas pelas cargas de construção previstas em projetos estão normalmente dentro da faixa elásticas de deformação. Portanto, a idealização do material como elástico torna-se aceitável. Porém, no caso do solo a idealização adequada para seu comportamento é não-linear, desta forma, se os resultados previstos e observados concordarem em uma determinada faixa o modelo pode ser usado para o problema real. Essa não-linearidade também pode ser modelada de forma aproximada para a análises de estacas individuais através da utilização de métodos de análise de transferência de carga, onde o solo contínuo é substituído por uma série de molas que atuam ao longo do comprimento da estaca. A extensão de tal análises para grupos só é possível adotando um modelo híbrido do solo, combinando os efeitos interativos elásticos com análises de transferência de carga para as estacas isoladas (O'Neill et al., 1977).

Durante o período de doutorado *sandwich* realizado na *Secondà Università di Napoli* foi desenvolvido uma rotina simplificada na linguagem *Visual Basic* (VB) com os seguintes objetivos:

- Desenvolver uma ferramenta numérica simplificada para verificar a influência de cada variável;
- Avaliar se esta ferramenta simplificada pode ser aplicada a casos em pequenas dimensões;
- Avaliar se esta ferramenta pode servir para referência inicial para análises numéricas avançadas.

Para tal buscou-se avaliar a distribuição de cargas e obter a previsão de recalque para o grupo de estacas, sem contato do bloco com o solo, em comparação aos dados obtidos experimentalmente desta tese. Para tal, foram utilizadas as formulações de Randolph & Wroth (1978) onde os autores propuseram uma solução baseada no tratamento separados do deslocamento ao longo da lateral da estaca com o deslocamento da base, Eq. C.1.

$$\frac{P_T}{G_L \cdot r_0 \cdot w_t} = \frac{\frac{4 \eta}{(1 - \nu)^\xi} + \rho \frac{2 \pi}{\zeta} \frac{\operatorname{tgh}(\mu L)}{\mu L} \frac{L}{r_0}}{1 + \frac{1}{\pi \lambda} \frac{4 \eta}{(1 - \nu)^\xi} \frac{\operatorname{tgh}(\mu L)}{\mu L} \frac{L}{r_0}} \quad (\text{C.1})$$

Em que:

w = recalque	$\mu L = (L/r_0)\sqrt{2/\zeta\lambda}$
G = módulo cisalhante	$r_0 = \text{raio da estaca}$
$\nu = \text{coeficiente de Poisson}$	$P_T = \text{carga total}$
$\eta = r_b/r_0$	$L = \text{comprimento da estaca}$
$\rho = G/G_L$ (variação do módulo com a profundidade)	$\xi = G_L/G_b$
$\zeta = \ln(r_m/r_0)$ (medida do raio de influência)	$\lambda = E_p/G_L$

Para o desenvolvimento do código foi elaborado uma arquitetura computacional para apresentar a lógica de programação desta rotina, Fig. C.1.

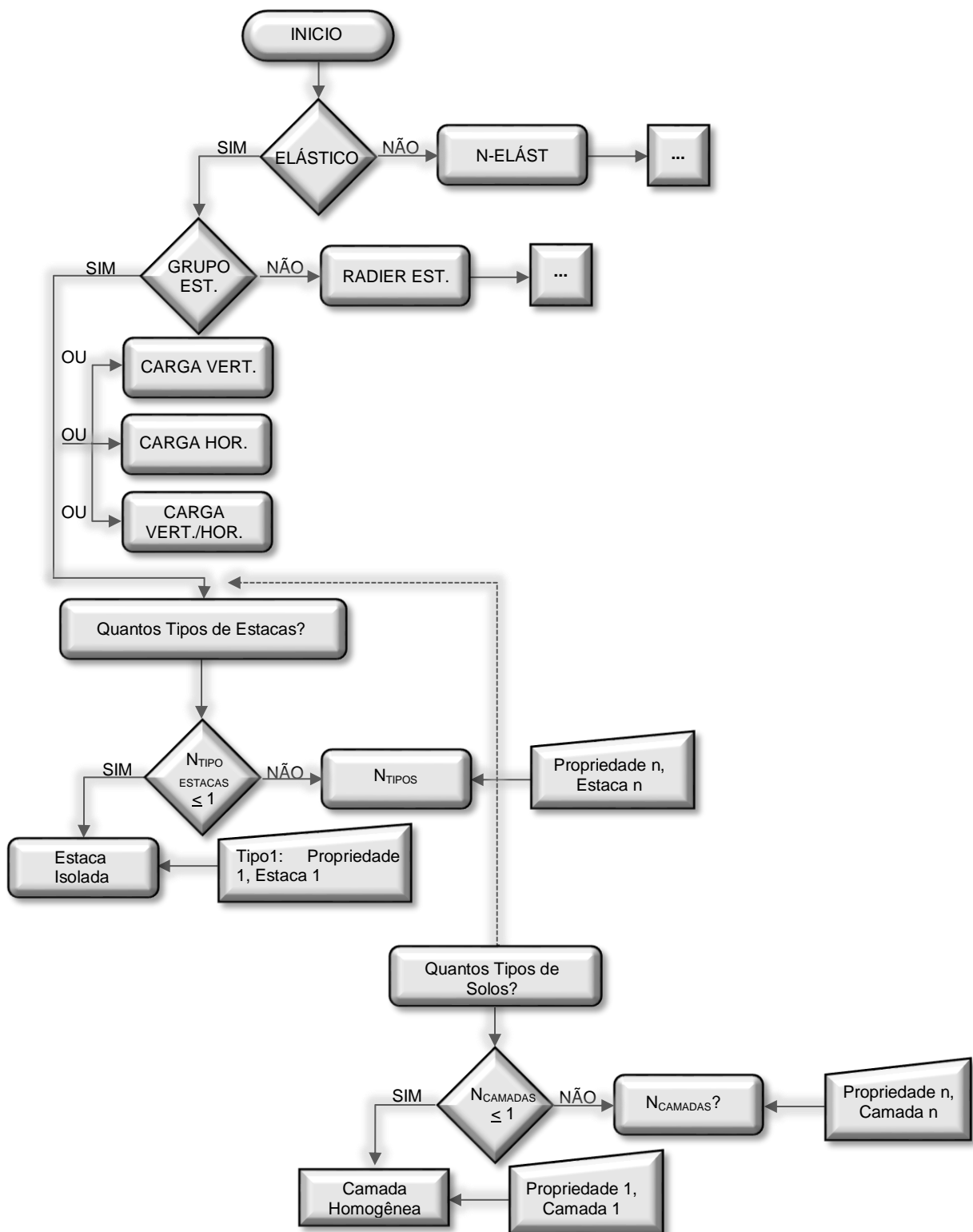


Figura C.1 – Arquitetura da Rotina Simplificada VB.

Por ainda se tratar de uma ferramenta numérica em fase inicial, buscou-se desenvolver em módulos bem definidos e independentes para que outros pesquisadores possam dar continuidade, caso seja de interesse, a essa rotina sem comprometer os módulos já desenvolvidos.

De forma resumida, a rotina inicia com a definição de material elástico ou não elástico, em seguida, qual filosofia de projeto será considerado, se de grupo de estacas, sem o contato do bloco com o solo, ou de radier estaqueado, em que há o contato entre a placa e o solo. A partir daí, são definidos os carregamentos, vertical, horizontal ou combinado, a quantidade e se as estacas serão todas iguais ou serão diferentes entre si, e finalmente, o número de camadas e se homogêneo ou heterogêneo, com as suas respectivas propriedades. Vale ressaltar que a ferramenta numérica apresentada nesta tese de doutorado se limitou a:

- material elástico;
- grupo de estacas (sem contato do bloco com o solo);
- um tipo de estaca;
- um tipo de solo.
- carga vertical;

### **Modelagem simplificada do grupo de estacas**

Para este trabalho o solo foi modelado como um material elástico linear com uma rigidez que varia linearmente com a profundidade. O bloco do topo da estaca é assumido como sendo rígido e não estando em contato com o solo, logo, não há transferência de carga entre o bloco e o solo. Uma das condições limitantes se dá pela escolha das estacas que são assumidas com o mesmo tipo, diâmetro e comprimento.

A rigidez é caracterizada pelo módulo cisalhante,  $G$ , e pelo coeficiente de Poisson,  $\nu$ , onde o módulo cisalhante é descrito em função do módulo de Young,  $E$ , conforme Eq. C.2.

$$E = 2(1 + \nu) \quad (C.2)$$

A solução de estacas isoladas axialmente carregadas é baseada na técnica de tratamento da transferência de carga da lateral da estaca separadamente da sua base.

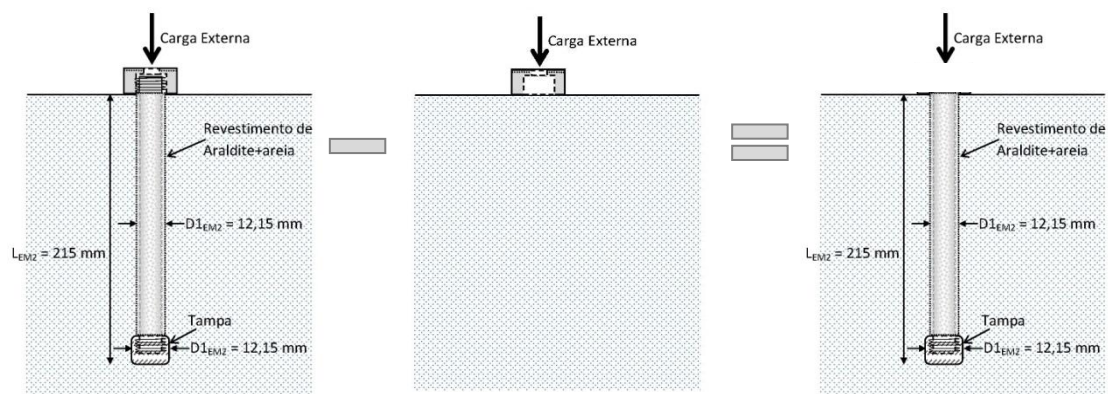
Para estender a solução para grupos de estacas é considerada a interação entre as estacas vizinhas pela superposição dos deslocamentos de cada estaca. Além disso, o recalque de uma estaca será a soma do recalque devido a um carregamento da própria estaca e o recalque devido ao deslocamento sofrido pelas demais estacas adjacentes.



Os resultados encontrados foram comparados com os resultados calculados pelo programa PIGLET, versão 4.2 em que segue a mesma formulação, porém com incrementos realizados por meio de chamadas na linguagem Fortran dynamic link library (DLL), ainda que mantendo as formulações técnicas. Além do carregamento vertical, o programa também avalia o caso de carregamentos verticais e horizontais acoplados e carregamentos gerais tridimensionais, incluindo torsão. Para estes casos o grupo de estacas é assumido com um *cap* rígido, com as estacas conectadas ou fixadas no seu topo.

### Modelagem de uma estaca isolada

A estaca isolada íntegra de 21,5cm (L) de comprimento e 1,47cm de diâmetro nominal foi simulada numericamente por meio de retroanálise para a determinação dos parâmetros do solo e esta comparada com o comportamento da curva carga-recalque medido dos ensaios realizados, onde a estaca foi fixada no bloco por meio de rosca na sua extremidade e a partir daí, foi realizada uma hipótese simplificadora para avaliar somente o comportamento do elemento profundo, efetuou-se a diferença entre o comportamento carga-recalque do radier estaqueado e o comportamento do radier, que este foi ensaiado isoladamente. Esse procedimento foi repetido para a estaca curta, com 10,7cm de comprimento (50%L), conforme Fig. C.2.



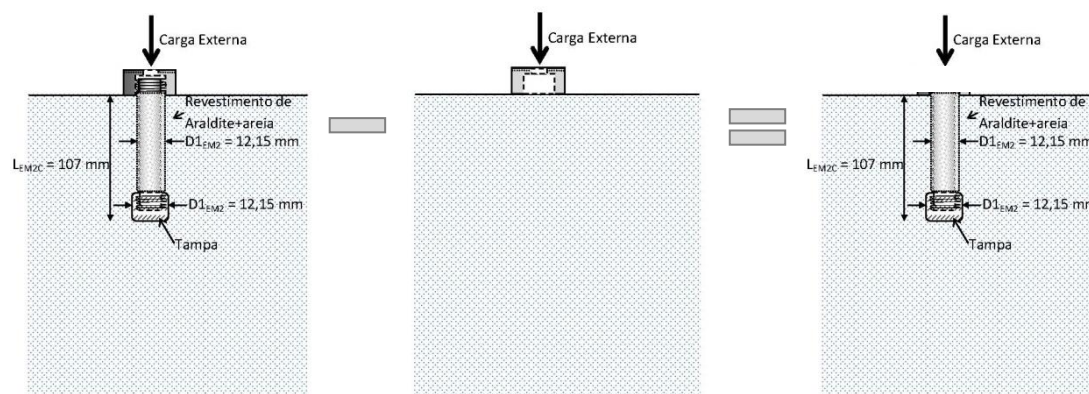


Figura C.2 – Desenho esquemático das estacas isoladas.

A estaca foi cravada em um tanque cilindro que possui profundidade de 600mm, onde foi carregada axialmente em um solo arenoso de granulometria média, conforme descrito no Capítulo 3.

A Fig. C.3 apresenta a comparação entre os casos medidos, tanto estaca isolada intacta (Medido-EIN) quanto estaca curta (Medido-EC), com os casos calculos com o *software* PIGLET (PIGLET-EIN: para estaca íntegra; PIGLET-EC: para a estaca curta) e com a rotina em *Visual Basic* (VB-EIN: para a estaca íntegra; VB-EC: para a estaca curta).

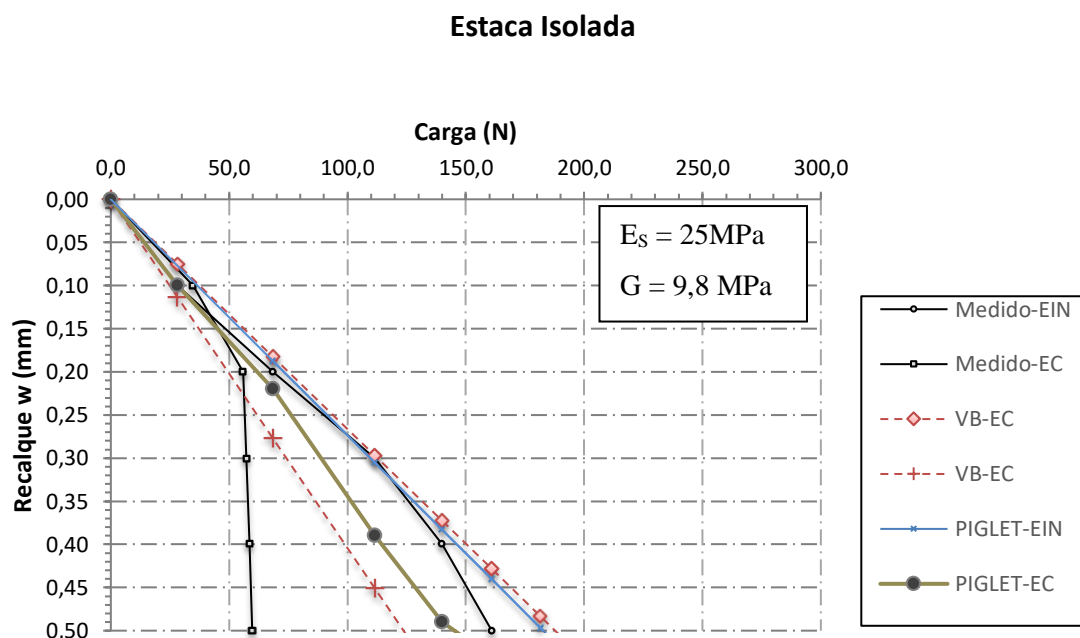


Figura C.3 – Análise comparativa para as estacas isoladas.

Após retroanálises, pode-se obter os parâmetros que compatibilizassem os comportamentos medidos com os calculados, para os primeiros níveis de carregamento, ainda na zona elástico-linear.

### Modelagem do grupo de 4 estacas

Para o grupo de 4 estacas também foram realizadas retroanálises para a obtenção dos referidos parâmetros do solo e assim buscar a equivalência entre os parâmetros medidos (Medido – G4) e os calculados (PIGLET – G4 e VB-G4IN). Ressaltando que por se tratar de uma ferramenta numérica simplificada linear elástico, somente os trechos iniciais obtêm-se esta aproximação. O valor do módulo de elasticidade determinado por meio de retroanálises para a aferição está apresentado na Fig.C.5.

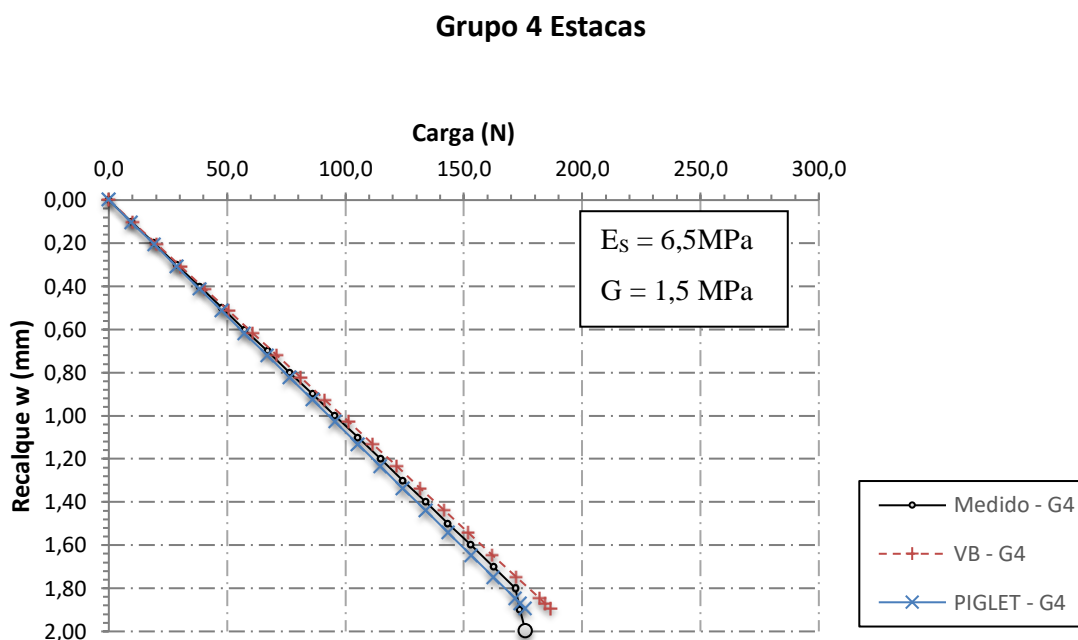


Figura C.4 – Comportamento carga-recalque do grupo de 4 Estacas.

Após determinados os parâmetros foram avaliadas a distribuição de carga entre as estacas do grupo com o uso da ferramenta PIGLET, onde se constatou a distribuição de carga igual entre as estacas, Fig. C.5.

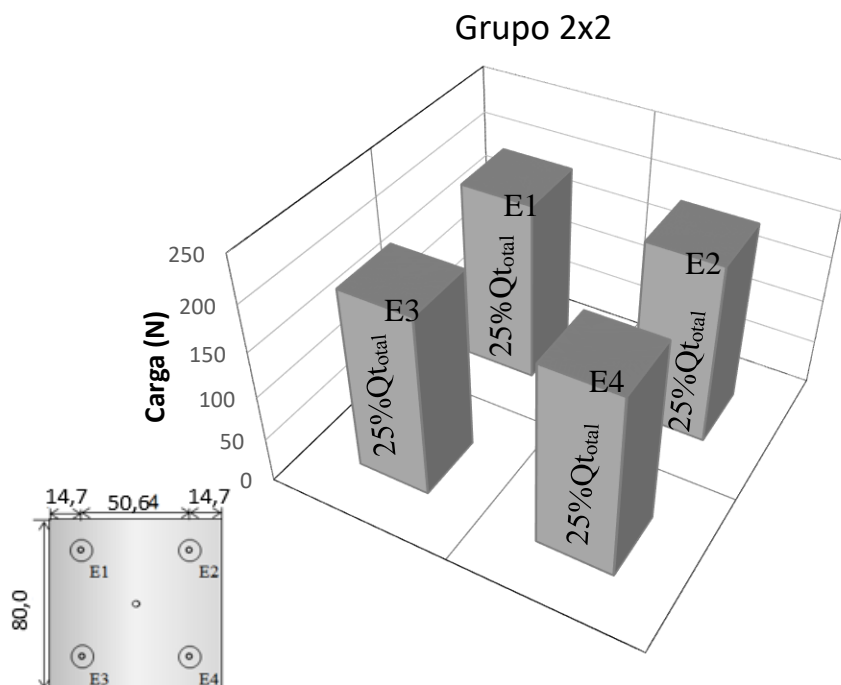


Figura C.5 – Distribuição de carga entre as estacas do grupo de 4 estacas.

### Modelagem do grupo de 9 estacas

O procedimento de retroanálise para a aferição dos parâmetros do solo também foi realizado para o caso do grupo de 9 estacas, onde o valor do módulo de elasticidade necessário para que se alcançasse a compatibilidade entre as curvas medidas e calculadas foi de 13,75 MPa. A Fig. C.6 apresenta o comportamento carga-recalque do grupo de 9 estacas obtidos pelas ferramentas simplificadas e o comportamento do grupo de 9 estacas obtidas por meio de medições em escala reduzida.

## Grupo 9 Estacas

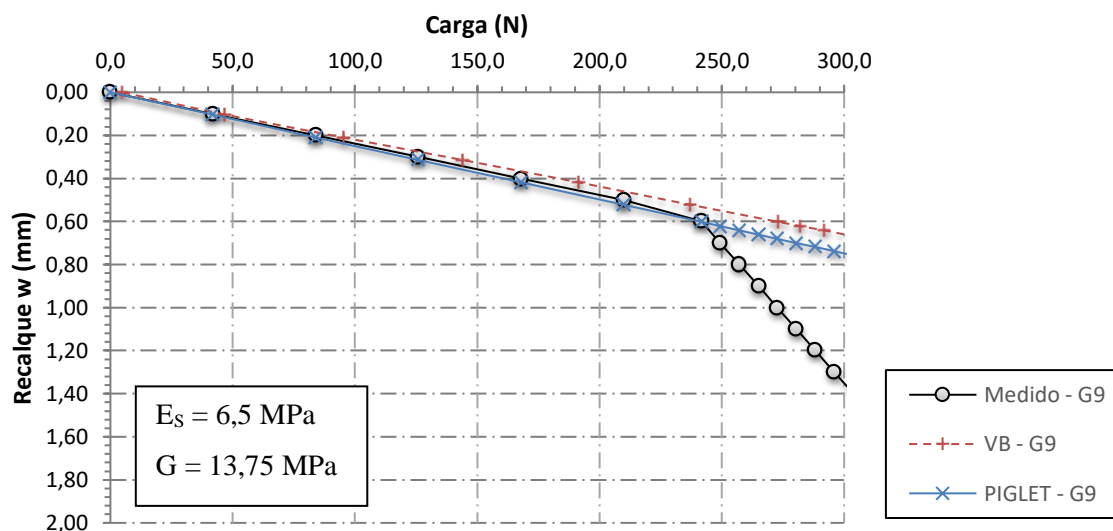


Figura C.6 - Comportamento carga-recalque do grupo de 9 Estacas.

Após avaliado a compatibilidade entre os valores dos parâmetros dos casos comparados, analisou-se a distribuição de carga entres as estacas e pode-se constatar que, devido a rigidez do bloco as estacas de canto absorveram mais cargas seguidas pelas estacas de borda e estacas estacas de centro, respectivamente, Fig. C.6.

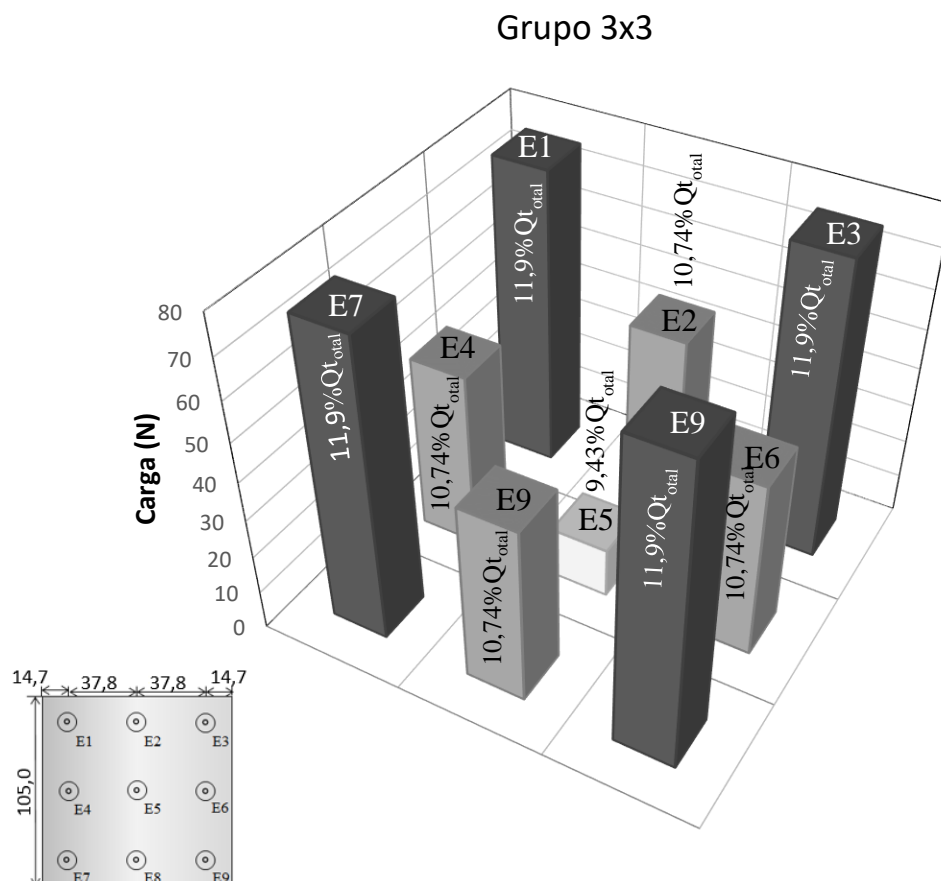


Figura C.7 – Distribuição de carga entre as estacas do grupo de 9 estacas.

### Modelagem do grupo de 16 estacas

Assim como realizado para os grupos de 4 e 9 estacas, o grupo de 16 estacas também foi retroanalisado para a determinação dos parâmetros do solo e o módulo de elasticidade que alcançou valor mais aproximado foi o mesmo que o valor do grupo de 9 estacas,  $E_S = 13,75$  MPa. Assim como os demais grupos, obteve-se a concordância entre as curvas, Fig.C8, e a distribuição de carga do grupo acompanhou a proporção de absorção de mais carga para as estacas do canto, seguida pelas estaca de borda e centrais, Fig. C9.

Grupo 16 Estacas

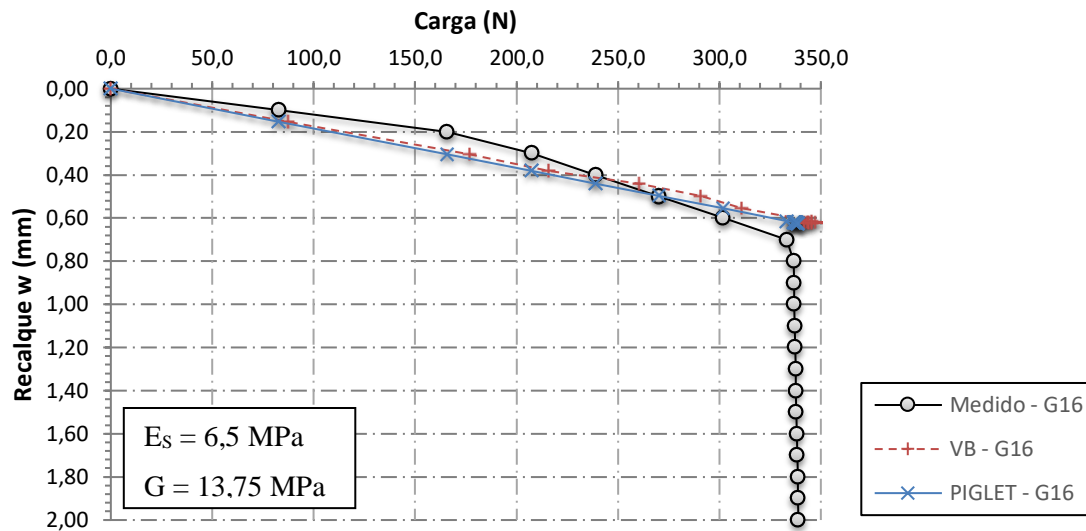


Figura C.8 - Comportamento carga-recalque do grupo de 16 Estacas.

Grupo 4x4

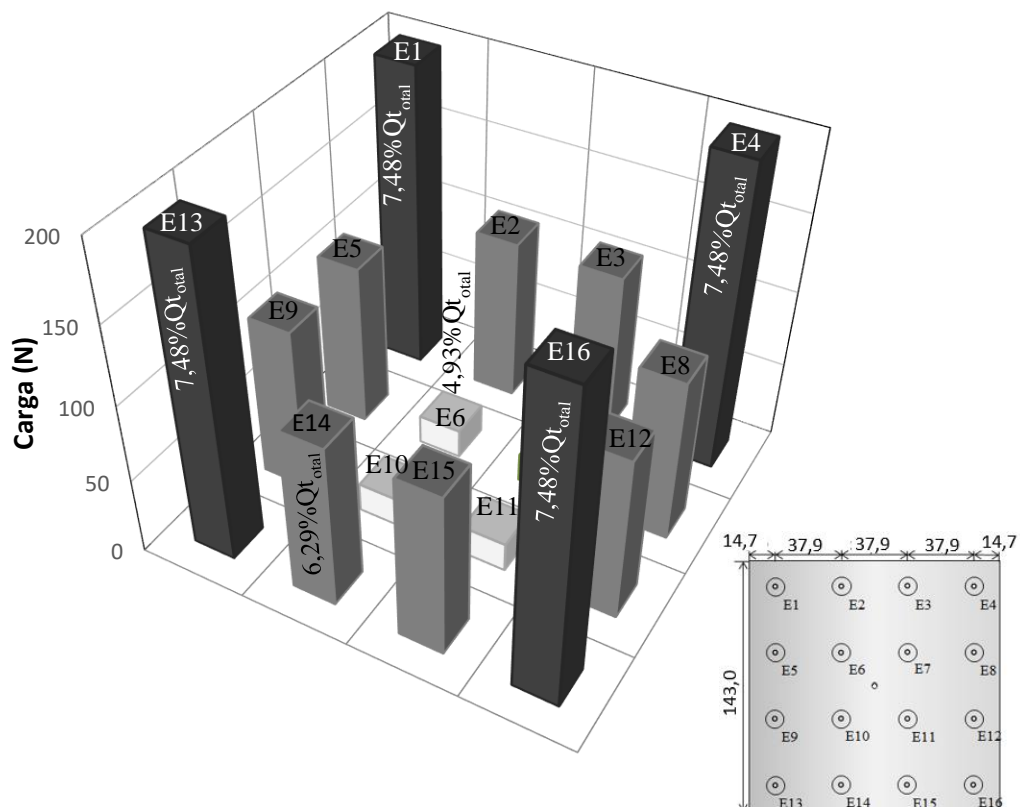


Figura C.9 - Distribuição de carga entre as estacas do grupo de 16 estacas.

### **Considerações Finais**

O principal objetivo do desenvolvimento desta ferramenta numérica foi melhor perceber a influência de cada parâmetro utilizado nas formulações de Randolph & Wroth, (1978) e utilizar o PIGLET como instrumento de comparação. Logo, pode-se perceber que mesmo que sejam utilizadas as mesmas formulações, ainda existirá diferenças entre os cálculos, o que pode ser atribuído aos níveis de precisão de cada formulação.

Além disso, foi comparado com os dados adquiridos em ensaios em pequenas dimensões e verificou-se que é válido desde que os parâmetros sejam calibrados e aferidos com tais ferramentas, e isso só foi possível por meio de retroanálises. Assim, pode-se concluir que esses métodos mais simples podem ser utilizados como uma ferramenta a mais para análises iniciais e que aliados a experiência do projetista, podem servir como um controle de análises numéricas avançadas.