



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Eduardo de Castro Bittencourt**

**Comportamento de Radiers Estaqueados Assentes em Solos  
Arenosos**

**Natal**

**2018**

**Eduardo de Castro Bittencourt**

**Comportamento de Radiers Estaqueados Assentes em Solos  
Arenosos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto

Natal

2018

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Bittencourt, Eduardo de Castro.

Comportamento de radiers estaqueados assentes em solos arenosos / Eduardo de Castro Bittencourt. - 2018.  
190 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto.

1. Método dos elementos finitos - Dissertação. 2. Prova de carga estática - Dissertação. 3. Radier estaqueado - Dissertação. 4. Engenharia de fundações - Dissertação. I. Freitas Neto, Osvaldo de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624.154

**Eduardo de Castro Bittencourt**

**Comportamento de Radiers Estaqueados Assentes em Solos  
Arenosos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto – Orientador (UFRN)

---

Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Junior – Examinador Interno (UFRN)

---

Prof. Dr. Renato Pinto da Cunha – Examinador Externo (UNB)

**Natal/RN, 6 de Abril de 2018.**

## Resumo

Observa-se nas últimas décadas, a busca da otimização de fundações estaqueadas a partir da consideração do benefício que o contato do bloco ou radier com o solo pode conferir para aumento de capacidade de carga e aumento de rigidez. Contribuição que não é inserida no dimensionamento do sistema de fundação pela metodologia tradicional de grupo de estacas. Assim, nesta dissertação foi realizada uma análise do comportamento de uma fundação que foi concebida pela metodologia de grupo de estacas, à luz da técnica de radier estaqueado, através de modelagens numéricas. A obra em estudo é do Instituto do Cérebro, localizada no Campus Central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), cidade de Natal-RN. Pesquisas teóricas e experimentais, destacando trabalhos pioneiros e mais recentes a respeito da temática deste trabalho, foram utilizados como subsídios para apresentar o estado da arte de fundações em radier estaqueado. A fundação analisada é constituída por estacas escavadas do tipo hélice contínua, com comprimentos de 15, 17 e 20 m e diâmetros de 250, 400 e 500 mm. Para análise do comportamento desta fundação, foi utilizado o programa numérico *PLAXIS 3D Foundation*, baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). Para averiguar se o programa foi manuseado de maneira correta, foi realizada a verificação do software por meio de análises comparativas de casos previamente estudados por outros pesquisadores. Os dados de entrada do programa e retroanálise dos parâmetros geotécnicos do solo foram subsidiados por ensaios de simples reconhecimento (SPT), realizados em campo conforme procedimentos recomendados pela NBR 6484/2001 e provas de carga estática em estaca (PCE), realizadas segundo método de execução apresentado na NBR 12131/2006. O subsolo local, modelado assumindo o seu comportamento elástico perfeitamente plástico, é formado por camadas de areia fina e média, pouco siltosa, compacta, até atingir o impenetrável. Observou-se nos resultados obtidos que a interação do bloco de fundação incrementou a capacidade de carga e a rigidez do sistema. O bloco de fundação apresentou até 21% de contribuição no recebimento dos esforços aplicados na fundação. Além disso, observou-se que a capacidade de carga do sistema de fundação em radier estaqueado não se configura apenas na soma algébrica das resistências isoladas do bloco e estaca(s). Diante destes resultados, pode-se concluir que a metodologia de fundação em radier estaqueado se configura como uma técnica positiva para a cidade de Natal para obras de médio porte.

Palavras chave: Método dos Elementos Finitos. Prova de Carga Estática. Radier  
Estaqueado

## **Abstract**

It is observed in the last decades, the search of the optimization of pile foundations from the analysis of the benefit that the contact of the pile cap or raft with the ground can confer to increase the load capacity and stiffness. Contribution that is not inserted in the design of the foundation system by the traditional methodology of pile group. Thus, in the present dissertation an analysis of the behavior of a foundation conceived by the pile group methodology was carried out, in light of the piled raft, through numerical modeling. The study work is from Instituto Cérebro, located in the Central Campus of the Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN), Natal-RN. Theoretical and experimental studies, highlighting pioneering and more recent searches on the theme of this work, were used as subsidies to present the state of the art of foundations in piled raft. The study foundation consists of bored piles of the continuous flight auger, composed of lengths of 15, 17 and 20 m and diameters of 250, 400 and 500 mm. For the analysis of the behavior of this foundation, the numerical program PLAXIS 3D Foundation, based on the Finite Element Method (FEM). To verify if the program was handled correctly, the verification of the software was done through comparative analysis of cases previously studied by other researchers. The program input data and back-analysis of soil geotechnical parameters were subsidized by Standard Penetration Test (SPT), carried out in the field according to the procedures recommended by NBR 6484/2001 and static load tests (PCE), carried out according in NBR 12131/2006. The local subsoil, which was modeled assuming its elastic behavior perfectly plastic, is formed by layers of fine and medium sand, little compact silt, until reaching the impenetrable. The water level was not detected in any of the 13 boring performed. It was observed in the results obtained that the interaction of the pile cap with the soil increased the load capacity and stiffness of the system. The pile cap presented up to 21% contribution in receiving the efforts applied in the foundation. In addition, it has been observed that the load capacity of the piled raft foundation system is not confined to the algebraic sum of the isolated resistances of the pile cap and pile(s). Considering these results, it can be concluded that the methodology of foundation in piled raft is configured as a positive foundation technique for the city of Natal for medium-sized buildings.

Keyword: Finite Element Method. Static Load Tests. Piled Raft.

## DEDICATÓRIA

À minha mãe Maria Dolores, por tornar meu sonho possível, pelo seu amor, confiança e apoio incondicional durante todos os momentos que passei.

Você é a minha fonte que me dá força para continuar lutando pelos meus ideais e objetivos de vida. Obrigado por tudo.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Osvaldo de Freitas. Por aceitar me orientar e me auxiliar no meu crescimento durante esses dois anos de mestrado. Pela sua amizade, orientação, confiança, compreensão e conselhos fundamentais.

Ao meu professor Cleber Decarli por me incentivar e acreditar no meu potencial desde o início da minha graduação. Seus ensinamentos e conselhos foram fundamentais para que eu pudesse estar hoje concluindo este mestrado.

Aos meus amigos de mestrado, Eduardo Eiler, Pedro Campos, Didoney Vilhete, Ray de Araújo, Thaís Sousa, Luiz Augusto, Daniela da Fonseca, Breno Marques, Nathalia Marinho e David Esteban. Sei que não teria sido possível concluir essa minha jornada sem o apoio de todos vocês. Obrigado por serem minha segunda família aqui em Natal.

Aos professores Fagner Alexandre e Olavo Francisco pelos grandes ensinamentos ao longo da minha pós-graduação. Obrigado pela paciência e disponibilidade em sempre ouvir minhas dúvidas e anseios.

A Superintendência de Infraestrutura da UFRN, por disponibilizar meu acesso a obra do instituto do Cérebro e o engenheiro Pedro Mitzcun pela disponibilidade em sempre tirar dúvidas sobre o projeto de estudo.

As minhas irmãs Mariana e Vitória. Vocês são o meu espelho. Tudo que faço e conquisto é por vocês. O meu sucesso também é o sucesso de vocês.

A minha companheira fiel Ana Paula. Você sabe as dificuldades que passei para conseguir desenvolver minha pesquisa. Foram meses um ajudando o outro a não desistir, seguir em frente e superar todas as adversidades que apareciam no nosso caminho. Muito obrigado pelo apoio minha amiga, essa vitória também é sua.

A todos os colegas do grupo “Em Busca de Aventura”. A companhia e atividades que tive com vocês foram fundamentais para ser um refúgio de lazer e descanso ao longo desses dois anos de mestrado.

A minha namorada Andreia Lino. No final da minha jornada tive a sorte de te encontrar. O quanto eu aprendi com você é algo imensurável. Obrigado por me apoiar incondicionalmente, toda a alegria e dor compartilhada.

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUÇÃO .....	1
<b>1.1 Justificativa</b> .....	2
<b>1.2 Objetivos da pesquisa</b> .....	3
1.2.1 Objetivos geral .....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO 2 .....	5
REVISÃO DA LITERATURA .....	5
<b>2.1 Introdução</b> .....	5
<b>2.2 Concepção da fundação em radier estaqueado</b> .....	6
<b>2.3 Metodologias de projeto de radier estaqueado</b> .....	8
2.3.1 Método simplificado Poulos – Davis – Randolph (PDR).....	12
2.3.2 Método PDR modificado (Mandolini <i>et al.</i> 2017) .....	15
2.3.3 Método simplificado proposto por Randolph (1983) .....	16
2.3.4 Método simplificado proposto por Burland (1995) .....	17
2.3.5 Método simplificado baseado em análises experimentais .....	19
2.3.6 Método dos Elementos Finitos (MEF) .....	20
2.3.7 Considerações acerca dos métodos de análise.....	21
<b>2.4 Vantagens e limitações da fundação em radier estaqueado</b> .....	22
<b>2.5 Capacidade de carga de radier estaqueado</b> .....	29
2.5.1 Efeito de grupo de estacas na capacidade de carga .....	32
<b>2.6 Capacidade de carga de fundação profunda e superficial</b> .....	35
2.6.1 Capacidade de carga a partir de PCE.....	36
2.6.2 Capacidade de carga de estacas a partir dos métodos semi-empíricos e sapatas .....	39
<b>2.7 Fatores que influenciam no comportamento de radier estaqueado</b> .....	44
2.7.1 Efeito do espaçamento entre estacas .....	47
2.7.2 Efeito do comprimento das estacas .....	51
2.7.3 Efeito do diâmetro das estacas .....	61
2.7.4 Efeito do número de estacas.....	65
2.7.5 Efeito da espessura do radier.....	69
2.7.6 Efeito do comprimento do radier.....	73
2.7.7 Efeito da densidade do solo .....	73
2.7.8 Efeito da rigidez do bloco de fundação.....	75
CAPÍTULO 3 .....	77

MATERIAIS E MÉTODOS .....	77
<b>3.1 Características e local da fundação da obra analisada</b> .....	77
<b>3.2 Caracterização geotécnica</b> .....	79
3.2.1 Sondagem de Simples Reconhecimento (SPT).....	79
<b>3.3 Prova de Carga Estática (PCE)</b> .....	83
<b>3.4 Ensaio de Integridade em Estaca (PIT)</b> .....	87
<b>3.5 Análises Numéricas</b> .....	90
3.5.1 Verificação do Programa PLAXIS 3D <i>Foundation</i> .....	91
3.5.1.1 Estaca isolada (Ottaviani, 1975).....	92
3.5.1.2 Radier sobre 9 e 15 estacas (Poulos <i>et al.</i> 1997).....	94
3.5.1.3 Radier sobre 9 Estacas (Kuwabara, 1989).....	98
3.5.1.4 Radier sobre 16 estacas (Proposto pelo Comitê TC-18).....	100
3.5.1.5 Radier isolado e blocos e radiers sobre 1, 2 e 4 estacas (Soares, 2011).....	102
3.5.1.5.1 Radier isolado.....	102
3.5.1.5.2 Radier com uma estaca .....	103
3.5.1.5.3 Radier com duas estacas.....	103
3.5.1.5.4 Radier com quatro estacas.....	104
3.5.1.5.5 Bloco sobre uma estaca .....	105
3.5.1.5.6 Bloco sobre duas estacas .....	105
3.5.1.5.7 Bloco sobre quatro estacas .....	106
3.5.1.5.8 Distribuição dos esforços no radier estaqueado.....	111
3.5.1.6 Considerações finais da verificação do PLAXIS 3D <i>Foundation</i> .....	113
3.5.2 Retroanálise numérica dos parâmetros geotécnicos do solo .....	113
3.5.2.1 Parâmetros geotécnicos iniciais.....	113
3.5.2.2 Condições de contorno .....	117
3.5.2.3 Retroanálise com prova de carga 1.....	119
3.5.2.4 Retroanálise com prova de carga 2.....	119
3.5.2.5 Retroanálise com prova de carga 3.....	120
3.5.2.6 Considerações finais da retroanálise do PLAXIS 3D <i>Foundation</i> .....	121
CAPÍTULO 4 .....	123
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	123
<b>4.1 Bloco e radier sobre uma estaca de <math>\phi</math> 25cm e L 15m</b> .....	124
4.1.1 Capacidade de carga a partir da curva carga recalque .....	125
4.1.2 Distribuição dos esforços no radier estaqueado.....	127
4.1.3 Capacidade de carga do bloco isolado .....	129
4.1.4 Recalques diferenciais.....	129

<b>4.2</b>	<b>Bloco e radier sobre uma estaca de <math>\phi</math> 40 e L15</b> .....	130
4.2.1	Capacidade de carga a partir da curva carga recalque .....	130
4.2.2	Distribuição dos esforços no radier estaqueado.....	132
4.2.3	Capacidade do bloco isolado.....	133
4.2.4	Recalques diferenciais.....	133
<b>4.3</b>	<b>Bloco e radier sobre duas estacas de <math>\phi</math> 40 e L15</b> .....	134
4.3.1	Capacidade de carga a partir da curva carga recalque .....	135
4.3.2	Distribuição dos esforços no radier estaqueado.....	137
4.3.3	Capacidade de carga do bloco isolado .....	138
4.3.4	Recalques diferenciais.....	138
<b>4.4</b>	<b>Bloco e radier sobre quatro estacas de <math>\phi</math> 40 e L15</b> .....	139
4.4.1	Capacidade de carga a partir da curva carga recalque .....	139
4.4.2	Distribuição dos esforços no radier estaqueado.....	141
4.4.3	Capacidade de carga do bloco isolado .....	142
4.4.4	Recalques diferenciais.....	142
<b>4.5</b>	<b>Bloco e radier sobre quatro estacas de <math>\phi</math> 25 e L17</b> .....	143
4.5.1	Capacidade de carga a partir da curva carga recalque .....	144
4.5.2	Distribuição dos esforços no radier estaqueado.....	145
4.5.3	Capacidade de carga do bloco isolado .....	146
4.5.4	Recalques diferenciais.....	146
<b>4.6</b>	<b>Bloco e radier sobre quatro estacas de <math>\phi</math> 50cm e L 20m</b> .....	147
4.6.1	Capacidade de carga a partir da curva carga recalque .....	148
4.6.3	Capacidade de carga do bloco isolado .....	149
4.6.4	Recalques diferenciais.....	149
<b>4.7</b>	<b>Bloco e radier sobre cinco estacas de <math>\phi</math> 50 e L15</b> .....	150
4.7.1	Capacidade de carga a partir da curva carga recalque .....	151
4.7.2	Distribuição dos esforços no radier estaqueado.....	152
4.7.3	Capacidade de carga do bloco isolado .....	153
4.7.4	Recalques diferenciais.....	153
<b>4.8</b>	<b>Bloco e radier sobre nove estacas de <math>\phi</math> 40 e L15</b> .....	154
4.8.1	Capacidade de carga a partir da curva carga recalque .....	155
4.8.2	Distribuição dos esforços no radier estaqueado.....	156
4.8.3	Capacidade de carga do bloco isolado .....	157
4.8.4	Recalques diferenciais.....	158
<b>4.9</b>	<b>Considerações finais dos resultados das análises numéricas</b> .....	158
<b>CAPÍTULO 5</b> .....		161

CONCLUSÃO .....	161
<b>5.1 Sugestões para pesquisas futuras</b> .....	162
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	163
ANEXO A – SONDAGENS DE SIMPLES RECONHECIMENTO (SPT) .....	172
ANEXO B – LOCAL DA EXECUÇÃO DAS PROVAS DE CARGA E PROJETO DE FUNDAÇÃO DO INSTITUTO DO CÉREBRO.....	186

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de fundação de acordo com o valor do coeficiente proposto por Mandolini (modificada). (Mandolini <i>et al.</i> 2003).....	7
Figura 2 - Porcentagem de carga resistida pelo radier (modificada) Mandolini <i>et al.</i> (2013). Dados coletados por Mandolini <i>et al.</i> (2005).....	7
Figura 3 - Filosofias de projeto para radier estaqueado (modificada). Poulos (2001).....	9
Figura 4 - Filosofias de projeto para radier estaqueado (modificada). Poulos (2001).....	12
Figura 5 - Curva carga <i>versus</i> recalque trilinear do método PDR. (modificada). Poulos & Davis. (1980).....	12
Figura 6 – Método simplificado proposto por Burland (1995). (modificada). Deka (2014).....	18
Figura 7 – Redução da carga do pilar pelo método simplificado de Burland (1995). (modificada). Deka (2014).....	18
Figura 8 – Distribuição dos esforços entre radier e estacas. (modificada). Long (2015).....	19
Figura 9 - Comparação da curva carga recalque entre o sistema de fundação em grupo de estaca e radier estaqueado. (modificada). Balakumar <i>et al.</i> (2013).....	23
Figura 10 – Distribuição dos esforços do radier estaqueado com: A) 1 estaca. B) 2 estacas. C) 4 estacas. (modificada). Soares <i>et al.</i> (2014).....	25
Figura 11 - Curvas carga recalque para estaca isolada e radier estaqueado. Soares <i>et al.</i> (2014).....	26
Figura 12 - Curvas carga recalque para grupo de 2 estacas e radier estaqueado. Soares <i>et al.</i> (2014).....	26
Figura 13 - Curvas carga recalque para grupo de 4 estacas e radier estaqueado. Soares <i>et al.</i> (2014).....	26
Figura 14 – Variação dos fatores $\alpha_r$ e $\alpha_{pg}$ devido a interação estaca-radier. Akinmusuru (1980).....	32
Figura 15 – Análise de resultado de $N_{SPT}$ antes e depois do estaqueamento. Philcox (1962). (modificada) Poulos e Davis (1980).....	34
Figura 16 – Carga de ruptura convencionalizada (NBR 6122/10). ....	37
Figura 17 - Método de extrapolação proposto por Davisson (1972).....	38

Figura 18 - Efeito do espaçamento entre estacas no comportamento da fundação em radier estaqueado. (modificada). Balakumar (2008). .....	47
Figura 19 - Efeito do espaçamento entre estacas na distribuição dos esforços entre radier e estacas para espessura de radier de 10mm. (modificada). Balakumar (2008).....	48
Figura 20 - Efeito do espaçamento entre estacas na distribuição dos esforços entre radier e estacas para espessura de radier de 10mm. (modificada). Balakumar (2008).....	48
Figura 21 - Efeito do espaçamento entre as estacas no recebimento dos esforços pelas estacas. (modificada). Elwakil e Azzam (2015). .....	49
Figura 22 - Efeito do espaçamento entre as estacas no valor de $\alpha_{pr}$ . (modificada). Alshenawy <i>et al.</i> (2016).....	50
Figura 23 - Efeito da variação do comprimento das estacas no valor de $\alpha_{pr}$ em areia fofa. (modificada). Balakumar (2008). .....	51
Figura 24 - Efeito da variação do comprimento das estacas no valor de $\alpha_{pr}$ em areia compacta. (modificada). Balakumar (2008).....	51
Figura 25 - Variação de $S_R$ para diferentes comprimentos de estaca. (modificada). Balakumar e Ilamparuthi (2008) .....	52
Figura 26 - Variação de $\alpha_{pr}$ para diversos comprimentos de estacas para diferentes níveis de recalque. (modificada). Balakumar e Ilamparuthi (2008).....	53
Figura 27 – Efeito do comprimento das estacas no valor do coeficiente $\alpha_{pr}$ . (modificada). Bourgeois <i>et al.</i> (2013). .....	53
Figura 28 - Efeito do comprimento das estacas no recalque normalizado $I_v$ , em termos de coeficiente de poisson para radier estaqueado e grupo de estacas. (modificada). Cunha e Pando (2013). .....	55
Figura 29 - Efeito do comprimento das estacas na porcentagem de carga resistida pelas estacas, para variados valores de coeficiente de poisson. (modificada). Cunha e Pando (2013).....	56
Figura 30 - Efeito do comprimento das estacas na distribuição dos esforços para as estacas com variação da rigidez relativa $K_{ps}$ . (modificada). Cunha e Pando (2013). .....	57
Figura 31 - Efeito do comprimento das estacas na distribuição dos esforços para as estacas com variação da rigidez relativa $K_{rs}$ . (modificada). Cunha e Pando (2013). .....	57

Figura 32 - Efeito do comprimento das estacas e rigidez relativa estaca-solo nos deslocamentos verticais. (modificada). Elwakil e Azzam (2015). .....	58
Figura 33 - Efeito do comprimento das estacas e rigidez relativa estaca-solo na transferência dos esforços. (modificada). Elwakil e Azzam (2015). .....	59
Figura 34 - Efeito do comprimento das estacas na redução do recalque no centro do radier. Wulandari e Tjandra (2015). .....	59
Figura 35 – Efeito do comprimento das estacas em solo arenoso no valor de $\alpha_{pr}$ . (modificada). Alshenawy <i>et al.</i> (2016). .....	60
Figura 36 – Efeito do comprimento das estacas em areia densa no valor de $\alpha_{pr}$ para diferentes espaçamentos entre estacas. (modificada). Alshenawy <i>et al.</i> (2016). .....	60
Figura 37 – Influência do comprimento das estacas no desempenho do sistema de fundação. (modificada). Sinha e Hanna (2017). .....	61
Figura 38 - Comportamento de fundações em radier estaqueado com variados diâmetros de estacas. (modificada). Balakumar (2008). .....	62
Figura 39 - Variação do valor de $\alpha_{pr}$ para diferentes diâmetros de estacas na fundação em radier estaqueado (modificada). Balakumar (2008). .....	63
Figura 40 - Variação de SR para diversos diâmetros de estacas. (modificada). Balakumar e Ilamparuthi (2008) .....	63
Figura 41 – Efeito do diâmetro das estacas na distribuição dos esforços para as estacas com S/D:4. (modificada). Alnuiam <i>et al.</i> (2013). .....	64
Figura 42 - Efeito do diâmetro das estacas no coeficiente $\alpha_{pr}$ para radier estaqueado com radier circular e retangular. (modificada). Balakumar e Ilamparuthi (2006). .....	65
Figura 43 – Efeito do número de estacas para estacas com 8 metros. (modificada). Bourgeois <i>et al.</i> (2013). .....	65
Figura 44 – Efeito do número de estacas para estacas com 12 metros. (modificada). Bourgeois <i>et al.</i> (2013). .....	66
Figura 45 – Efeito do número de estacas para estacas com 16 metros. (modificada). Bourgeois <i>et al.</i> (2013). .....	66
Figura 46 – Influência do número de estacas na distribuição dos esforços entre radier e estacas para estacas com 8 metros. (modificada). Bourgeois <i>et al.</i> (2013). .....	67
Figura 47 – Curva carga x recalque para diversas configurações de fundação. (modificada). (Garhy <i>et al.</i> 2013). .....	68
Figura 48 - Efeito do número de estacas na redução do recalque da fundação. (modificada). Wulandari e Tjandra (2015). .....	69

Figura 49 – Efeito da espessura do radier na distribuição dos esforços para as estacas com S/D:4. (modificada). Alnuiam <i>et al.</i> (2013). .....	70
Figura 50 – Efeito da espessura do radier na distribuição dos esforços para as estacas com S/D:10. (modificada). Alnuiam <i>et al.</i> (2013). .....	71
Figura 51 - Efeito da espessura do radier na redução do recalque da fundação. (modificada). Wulandari e Tjandra (2015). .....	72
Figura 52 – Efeito da espessura do radier no valor de $\alpha_{pr}$ . (modificada). Alshenawy <i>et al.</i> (2016). .....	72
Figura 53 – Efeito do comprimento do radier na distribuição dos esforços para as estacas. (modificada). Alnuiam <i>et al.</i> (2013). .....	73
Figura 54 - Efeito da densidade de solo arenoso no comportamento mecânico da fundação em radier estaqueado. Modificada. Balakumar (2006). .....	74
Figura 55 – Efeito da granulometria da areia no valor de $\alpha_{pr}$ da fundação em radier estaqueado. (modificada). Alshenawy <i>et al.</i> (2016). .....	74
Figura 56 – Geometria de blocos tipo do sistema de fundação do Instituto do Cérebro. ....	78
Figura 57 – Local da obra do Instituto do Cérebro. (Google Maps).....	79
Figura 58 – Resultados das 13 sondagens realizadas. ....	81
Figura 59 – Desvio padrão da resistência a penetração dos 13 SPTs ao longo da profundidade. ....	82
Figura 60 – Resultado da sondagem número quarto. ....	83
Figura 61 – Data logger para leitura dos esforços aplicados. ....	84
Figura 62 – Posicionamento dos quatro relógios comparadores sobre o bloco. ....	84
Figura 63 – Prova de carga montada. ....	85
Figura 64 – Resultados das três provas de carga realizadas na área de estudo. ....	86
Figura 65 – a) topo de uma estaca preparada. b) execução do ensaio PIT. ....	89
Figura 66 – Resultado do ensaio de integridade da estaca possivelmente defeituosa a 5,5m de profundidade. ....	90
Figura 67 – Resultado do ensaio de integridade da estaca possivelmente íntegra... ..	90
Figura 68 – Caso de estaca isolada. Souza (2010). .....	92
Figura 69 – Constante de recalque versus rigidez relativa obtidos com PLAXIS para estaca isolada com 20 metros de comprimento e H/L igual a 4,0. ....	93
Figura 70 – Constante de recalque versus rigidez relativa obtidos com PLAXIS para estaca isolada com 20 metros de comprimento e H/L igual a 1,5. ....	93

Figura 71 – Constante de recalque versus rigidez relativa obtidos com PLAXIS para estaca isolada com 40 metros de comprimento e H/L igual a 1,5. ....	94
Figura 72 – Caso proposto por Poulos <i>et al.</i> (1997).....	95
Figura 73 – Recalque médio ocorrido no radier com 15 estacas no caso A. ....	96
Figura 74 – Recalque médio ocorrido no radier com 15 estacas no caso B. ....	96
Figura 75 – Recalque médio ocorrido no radier com 9 estacas no caso C. ....	97
Figura 76 – Resultados para radier sobre 9 estacas com S/D = 3. ....	98
Figura 77 – Resultados para radier sobre 9 estacas com S/D = 5. ....	99
Figura 78 – Resultados para radier sobre 9 estacas com S/D = 10. ....	99
Figura 79 – Radier sobre 16 estacas proposto pelo TC – 18. ....	100
Figura 80 – Curvas carga-recalque para radier isolado. Macedo (2017) .....	103
Figura 81 – Curvas carga-recalque para radier com uma estaca. Macedo (2017)..	103
Figura 82 – Curvas carga-recalque para radier com duas estacas. Macedo (2017) .....	104
Figura 83 – Curvas carga-recalque para radier com quatro estacas. Macedo (2017) .....	104
Figura 84 – Curvas carga-recalque para bloco sobre uma estaca. Macedo (2017) .....	105
Figura 85 – Curvas carga-recalque para bloco sobre duas estacas. Macedo (2017) .....	106
Figura 86 – Curvas carga-recalque para bloco sobre quatro estacas. Macedo (2017) .....	106
Figura 87 – Extrapolação da curva carga-recalque para radier estaqueado com uma estaca para obtenção da carga admissível. Macedo (2017) .....	107
Figura 88 – Obtenção da carga admissível através do recalque admissível para radiers estaqueados e radier isolado. Macedo (2017) .....	108
Figura 89 – Obtenção da carga admissível através do recalque admissível para grupo de estacas. Macedo (2017) .....	108
Figura 90 – Comparação de curvas carga recalque entre grupo de 1 estaca e radier estaqueado com 1 estaca. ....	109
Figura 91 – Comparação de curvas carga recalque entre grupo de 2 estacas e radier estaqueado com 2 estacas.....	109
Figura 92 – Comparação de curvas carga recalque entre grupo de 4 estacas e radier estaqueado com 4 estacas.....	109

Figura 93 – Fatores de segurança obtidos a partir da razão entre a carga máxima obtida experimentalmente e a carga admissível obtida numericamente. Macedo (2017) .....	111
Figura 94 – Parâmetros utilizados nas retroanálises das provas de carga. ....	117
Figura 95 – geometria para modelagem de estaca. Pezo (2013).....	117
Figura 96 – geometria para modelagem de radier. Pezo (2013).....	118
Figura 97 – geometria para modelagem de radier estaqueado. Pezo (2013) .....	118
Figura 98 - Retroanálise 1 com prova de carga 1. ....	119
Figura 99 - Retroanálise 2 com prova de carga 2. ....	120
Figura 100 - Retroanálise 3 com prova de carga 3. ....	120
Figura 101 – Comparação dos resultados experimentais e numéricos na retroanálise dos parâmetros geotécnicos. ....	122
Figura 102 - Curvas carga recalque para bloco e radier sobre uma estaca de Ø25cm e L15m e bloco isolado. ....	125
Figura 103 - Cargas de ruptura pelo método de Décourt (1993) para estaca de $\varphi$ 25cm e L15m. ....	125
Figura 104 - Cargas de ruptura pelo método sugerido pela NBR 6122/10 para estaca de $\varphi$ 25cm e L15m. ....	126
Figura 105 - Cargas de ruptura pelo método de Davisson (1972) para estaca de $\varphi$ 25cm e L15m.....	127
Figura 106 - Cargas de ruptura pelo método da rigidez (Décourt, 1996) para estaca de $\varphi$ 25cm e L15m. ....	127
Figura 107 - Distribuição dos esforços entre bloco e estaca de 25cm de diâmetro e 15m de comprimento ao longo da aplicação da carga. ....	128
Figura 108 - Corte e coordenadas para resultados de recalques diferenciais para bloco de 55x55x60cm de dimensões.....	129
Figura 109 - Recalques diferenciais ao longo do bloco de 55x55x60cm de dimensões sobre uma estaca de $\varphi$ 25cm.....	129
Figura 110 - Curvas carga recalque para bloco e radier sobre uma estaca de $\varphi$ 40cm e L15m e bloco isolado. ....	130
Figura 111 - Cargas de ruptura pelo método de Décourt (1993) para estaca de $\varphi$ 40cm e L15m. ....	131
Figura 112 - Cargas de ruptura pelo método sugerido pela NBR 6122/10 para estaca de $\varphi$ 40 cm e L15m. ....	131

Figura 113 - Cargas de ruptura pelo método de Davisson (1972) para estaca de $\varphi$ 40cm e L15m.....	132
Figura 114 - Cargas de ruptura pelo método da rigidez (Décourt, 1996) para estaca de $\varphi$ 40cm e L15m. ....	132
Figura 115 - Distribuição dos esforços entre bloco e estaca de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento ao longo da aplicação da carga. ....	133
Figura 116 - Corte e coordenadas para resultados de recalques diferenciais para bloco de 70x70x60cm de dimensões.....	134
Figura 117 - Recalques diferenciais ao longo do bloco de 70x70x60cm de dimensões sobre uma estaca de $\varphi$ 40cm.....	134
Figura 118 - Curvas carga recalque para bloco e radier sobre duas estacas de $\varphi$ 40cm e L15m e bloco isolado. ....	135
Figura 119 - Cargas de ruptura pelo método de Décourt (1993) para sistemas com duas estacas de $\varphi$ 40cm e L15m. ....	136
Figura 120 - Método da rigidez (Décourt, 1996) sistemas com duas estacas de $\varphi$ 40cm e L15m. ....	137
Figura 121 - Distribuição dos esforços entre bloco e duas estacas de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento ao longo da aplicação da carga. ....	137
Figura 122 - Corte e coordenadas para resultados de recalques diferenciais para bloco de 170x70x60cm de dimensões.....	138
Figura 123 - Recalques diferenciais ao longo do bloco de 170x70x60cm de dimensões sobre duas estacas de $\varphi$ 40cm. ....	138
Figura 124 - Curvas carga recalque para bloco e radier sobre quatro estacas de $\varphi$ 40cm e L15m e bloco isolado.....	139
Figura 125 - Cargas de ruptura pelo método de Décourt (1993) para sistemas com quatro estacas de $\varphi$ 40cm e L15m.....	140
Figura 126 - Método da rigidez (Décourt, 1996) sistemas com quatro estacas de $\varphi$ 40cm e L15m.....	141
Figura 127 - Distribuição dos esforços entre bloco e quatro estacas de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento ao longo da aplicação da carga. ....	141
Figura 128 - Corte e coordenadas para resultados de recalques diferenciais para bloco de 170x170x80cm de dimensões.....	142

Figura 129 - Recalques diferenciais ao longo do bloco de 170x170x80cm de dimensões sobre quatro estacas de $\varphi$ 40cm. ....	143
Figura 130 - Curvas carga recalque para bloco e radier sobre quatro estacas de $\varphi$ 25cm e L17m e bloco isolado.....	143
Figura 131 - Cargas de ruptura pelo método de Décourt (1993) para sistemas com quatro estacas de $\varphi$ 25cm e L17m.....	144
Figura 132 - Método da rigidez (Décourt, 1996) sistemas com duas estacas de $\varphi$ 25cm e L17m. ....	145
Figura 133 - Distribuição dos esforços entre bloco e quatro estacas de 25cm de diâmetro e 17m de comprimento ao longo da aplicação da carga. ....	145
Figura 134 - Corte e coordenadas para resultados de recalques diferenciais para bloco de 170x170x70cm de dimensões.....	146
Figura 135 - Recalques diferenciais ao longo do bloco de 118x118x70cm de dimensões sobre quatro estacas de $\varphi$ 25cm. ....	146
Figura 136 - Curvas carga recalque para bloco e radier sobre quatro estacas de $\varphi$ 50cm e L20m.....	147
Figura 137 - Cargas de ruptura pelo método de Décourt (1993) para sistemas com quatro estacas de $\varphi$ 50cm e L20m.....	148
Figura 138 - Método da rigidez (Décourt, 1996) sistemas com quatro estacas de $\varphi$ 50cm e L20m.....	149
Figura 139 - Corte e coordenadas para resultados de recalques diferenciais para bloco de 205x205x130cm de dimensões.....	149
Figura 140 - Recalques diferenciais ao longo do bloco de 205x205x100cm de dimensões sobre quatro estacas de $\varphi$ 50cm. ....	150
Figura 141 - Curvas carga recalque para bloco e radier sobre quatro estacas de $\varphi$ 50cm e L20m.....	150
Figura 142 - Cargas de ruptura pelo método de Décourt (1993) para sistemas com cinco estacas de $\varphi$ 50cm e L15m. ....	151
Figura 143 - Método da rigidez (Décourt, 1996) sistemas com quatro estacas de $\varphi$ 50cm e L15m.....	152
Figura 144 - Distribuição dos esforços entre bloco e cinco estacas de 50cm de diâmetro e 15m de comprimento ao longo da aplicação da carga. ....	153

Figura 145 - Corte e coordenadas para resultados de recalques diferenciais para bloco de 280x205x130cm de dimensões.....	154
Figura 146 - Recalques diferenciais ao longo do bloco de 280x205x130cm de dimensões sobre cinco estacas de $\varphi$ 50cm.....	154
Figura 147 - Curvas carga recalque para bloco e radier sobre quatro estacas de $\varphi$ 40cm e L15m.....	155
Figura 148 - Cargas de ruptura pelo método de Décourt (1993) para sistemas com nove estacas de $\varphi$ 40cm e L15m.....	155
Figura 149 - Método da rigidez (Décourt, 1996) sistemas com quatro estacas de $\varphi$ 40cm e L15m.....	156
Figura 150 - Distribuição dos esforços entre bloco e nove estacas de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento ao longo da aplicação da carga.....	157
Figura 151 - Corte e coordenadas para resultados de recalques diferenciais para bloco de 270x270x130cm de dimensões.....	158
Figura 152 - Recalques diferenciais ao longo do bloco de 270x270x130cm de dimensões sobre nove estacas de $\varphi$ 40cm.....	158
Figura 153 - SPT 1.....	173
Figura 154 - SPT 2.....	174
Figura 155 - SPT 3.....	175
Figura 156 - SPT 4.....	176
Figura 157 - SPT 5.....	177
Figura 158 - SPT 6.....	178
Figura 159 - SPT 7.....	179
Figura 160 - SPT 8.....	180
Figura 161 - SPT 9.....	181
Figura 162 - SPT 10.....	182
Figura 163 - SPT 11.....	183
Figura 164 - SPT 12.....	184
Figura 165 - SPT 13.....	185
Figura 166 - Local de execução da Prova de carga 1.....	187
Figura 167 - Local de execução da Prova de carga 2.....	188
Figura 168 - Local de execução da Prova de carga 3.....	189

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros K e $\alpha$ Aoki (Cintra e Aoki, 2010).....	40
Quadro 2 - Fatores de correção F1 e F2 (Cintra e Aoki, 2010). ....	40
Quadro 3 - Coeficientes KDanz, $\alpha$ Lap e $\alpha$ Lap*. ....	41
Quadro 4 - Fatores F1 e F2 propostos por Laprovitera. ....	41
Quadro 5 - Parâmetro K (Décourt, 1978). ....	42
Quadro 6 - Fator $\alpha$ Dec (Décourt, 1996). ....	42
Quadro 7- Fator $\beta$ Dec (Décourt, 1996).....	42
Quadro 8 - Parâmetro $\alpha$ Tex (Teixeira, 1996).....	43
Quadro 9 - Parâmetro $\beta$ Tex (Teixeira, 1996).....	43
Quadro 10– Sistema de Fundação do Instituto Cérebro. ....	77
Quadro 11 - Resultado dos SPTs 13 realizados em campo.....	80
Quadro 12 – Parâmetros utilizados para os casos de estaca isolada (Ottaviani, 1975).....	93
Quadro 13 – Cargas, fatores de segurança e número de estacas nos três casos analisados. ....	95
Quadro 14 – Parâmetros utilizados para os casos de radier sobre 9 e 15 estacas (Poulos <i>et al.</i> 1997). ....	95
Quadro 15 – Resultados dos casos analisados pelo PLAXIS 3D <i>Foundation</i> com radier sobre 9 e 15 estacas. ....	97
Quadro 16 – Parâmetros utilizados para o caso de radier sobre 9 estacas (Kuwabara, 1989). ....	98
Quadro 17 – Parâmetros utilizados no PLAXIS para os casos de radier sobre 16 estacas. (TC – 18).....	100
Quadro 18 – Resultados para programas baseado no MEF. ....	101
Quadro 19 – Todos os resultados constantes na literatura. ....	101
Quadro 20 – Cargas máximas, admissíveis e recalques admissíveis para modelagens numéricas e experimentais obtidos por Soares (2011). Macedo (2017) .....	110
Quadro 21 – Peso específico em solos arenosos. (Godoy, 1972). ....	114
Quadro 22 – Valores de K de acordo com Teixeira e Godoy (1996).....	115
Quadro 23 – Coeficiente de Poisson. (Teixeira & Godoy, 1996).....	115
Quadro 24 – Parâmetros geotécnicos iniciais obtidos por correlações com NSPT.....	116

Quadro 25 - Resumo das modelagens para retroanálise dos parâmetros geotécnicos do solo.....	121
Quadro 26 - Verificação da rigidez do bloco de fundação de acordo com a norma Espanhola (2007).....	123
Quadro 27- Verificação da rigidez do bloco de fundação de acordo com a NBR 6118 (2014).....	124
Quadro 28 - Distribuição dos esforços entre bloco e estaca de 25cm de diâmetro e 15m de comprimento.....	128
Quadro 29 - Distribuição dos esforços entre bloco e estaca de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento.....	133
Quadro 30 - Carga de ruptura pelos métodos NBR 6122/10 E Davisson (1972) para sistemas com duas estacas de $\phi$ 40cm e L15m. ....	136
Quadro 31 - Distribuição dos esforços entre bloco e duas estacas de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento.....	137
Quadro 32 - Carga de ruptura pelos métodos NBR 6122/10 E Davisson (1972) para sistemas com quatro estacas de $\phi$ 40cm e L15m. ....	140
Quadro 33 - Distribuição dos esforços entre bloco quatro estacas de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento.....	141
Quadro 34 - Carga de ruptura pelos métodos NBR 6122/10 E Davisson (1972) para sistemas com quatro estacas de $\phi$ 25cm e L17m.....	144
Quadro 35 - Distribuição dos esforços entre bloco quatro estacas de 25cm de diâmetro e 17m de comprimento.....	145
Quadro 36 - Carga de ruptura pelos métodos NBR 6122/10 E Davisson (1972) para sistemas com quatro estacas de $\phi$ 50cm e L20m.....	148
Quadro 37 - Carga de ruptura pelos métodos NBR 6122/10 E Davisson (1972) para sistemas com quatro estacas de $\phi$ 50cm e L15m. ....	151
Quadro 38 - Distribuição dos esforços entre bloco cinco estacas de 50cm de diâmetro e 15m de comprimento.....	152
Quadro 39 - Carga de ruptura pelos métodos NBR 6122/10 E Davisson (1972) para sistemas com nove estacas de $\phi$ 40cm e L15m. ....	156
Quadro 40 - Distribuição dos esforços entre bloco nove estacas de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento.....	157
Quadro 41 - Resumo capacidades de carga grupo de estacas e radier estaqueado. ....	160

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Métodos de Análise de Radier Estaqueado. (FREITAS NETO, 2013). ...	10
Tabela 2 - Aumento da rigidez inicial do radier estaqueado em relação ao radier isolado. Bourgeois <i>et al.</i> (2013).....	66

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

MEF – Método dos Elementos Finitos;

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte;

SPT – Sondagens de simples reconhecimento;

SPT-T – Sondagens de simples reconhecimento com medição de torque;

NSPT – índice de resistência a penetração;

CPT – Ensaio de cone;

PIT – Ensaio de integridade de estaca;

PCE – Prova de Carga Estática;

MEC – Método dos Elementos de Contorno;

PDR – Métodos Simplificado Poulos- Davis-Randolph;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

NBR – Norma Brasileira;

QML – *Quick Maintained Load*;

ISSMGE – *Internacional Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*;

ASTM – *American Society for Testing and Materials*;

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha_{pr}$  – Coeficiente da fundação;

$a_g$  – Área ocupada pelo grupo de estacas;

$a_r$  – Área ocupada pelo radier;

$B$  – Largura do radier;

$L$  – Comprimento da estaca;

$K_{pr}$  – Rigidez relativa do radier estaqueado;

$K_{pg}$  - Rigidez do grupo de estacas;

$K_r$  – Rigidez do radier;

$\alpha_{rp}$  – Fator de interação;

$r_c$  – Razão entre a área do radier e o número de estacas;

$r_0$  – Raio da estaca;

$E_{sl}$  – Módulo de elasticidade do solo no nível da ponta da estaca;

$E_{sb}$  – Módulo de elasticidade da camada de solo sob a ponta da estaca;

$E_{sav}$  – Módulo de elasticidade do solo ao longo do fuste da estaca;

$E$  – Módulo de elasticidade do solo;

$R_{pg}$  – Fator hiperbólico;

$R_r$  – Fator hiperbólico;

$W_1$  – Recalque no radier, para carga total menos a parcela resistida pelas estacas;

$W_2$  – Recalque adicional devido aos esforços resistidos pelas estacas;

$\xi$  – Taxa de recalque;

$W_{su}$  – Recalque correspondente ao deslocamento que resulte na resistência lateral máxima;

$S_0$  – Recalque total;

$S_a$  – Recalque aceitável;

$P_{su}$  – Resistência por atrito última;

$Q_{pr}$  – Capacidade de carga do sistema de fundação;

$Q_s$  – Capacidade de carga por atrito lateral da estaca isolada;

$Q_B$  – Capacidade de carga da ponta da estaca isolada;

$Q_C$  – Capacidade de carga do radier isolado;

$N$  – Número de estacas;

$N_{1S}$  – Fator de interação estaca-solo-estaca no atrito lateral das estacas;

$N_{4S}$  – Fator de interação radier-solo-estaca no atrito lateral das estacas;

$N_{1B}$  – Fator de interação estaca-solo-estaca na resistência de ponta;

$N_{4B}$  – Fator de interação radier-solo-estaca na resistência de ponta;

$N_6$  – Fator de interação radier-solo-estaca na capacidade de carga do radier;

$Q_{pr}$  – Capacidade de carga do sistema de fundação;

$Q_r$  – Capacidade de carga do radier isolado;

$Q_{pg}$  – Capacidade de carga do grupo de estacas;

$\alpha_r$  – Fator de eficiência na capacidade de carga do radier;

$\alpha_{pg}$  – Fator de eficiência na capacidade de carga do grupo de estacas;

$\varphi$  – Ângulo de atrito do solo;

$N$  – Resistência à penetração;

$n$  – Eficiência de grupo;

$\Delta_r$  – recalque de ruptura convencional;

$P$  – Carga de ruptura convencional;

$L$  – Comprimento da estaca;

$A$  – Área da seção transversal da estaca;

$E$  – Módulo de elasticidade da estaca;

$D$  – Diâmetro da estaca;

$r_p$  – Tensão limite normal no nível da ponta da estaca;

$r_l$  – Tensão limite de cisalhamento ao longo do fuste da estaca;

$\alpha_{Aoki}$  – Razão de atrito;

$K$  – Coeficiente do solo;

$N_p$  – Índice de resistência à penetração na cota de apoio da ponta da estaca;

$N_l$  – Índice médio de resistência à penetração na camada de solo de espessura  $\Delta_l$ ;

$F_1$  – Fator de correção;

$F_2$  – Fator de correção;

$P$  – Perímetro da estaca;

$\Delta_l$  – Comprimento de um segmento de estaca;

$N_p$  – Índice de penetração médio da ponta da estaca, obtido pela média entre o nível da ponta, imediatamente anterior e posterior;

$N_l$  – Índice médio de resistência à penetração ao longo do fuste;

$\alpha_{Dec}$  – Fator de parcela de ponta, conforme tipo de solo e estaca;

$\beta_{Dec}$  – Fator de parcela de atrito lateral, conforme tipo de solo e estaca;

$m$  – Coeficiente de ponta;

$n$  – Coeficiente do fuste;

$N_p$  – N do SPT, na cota da ponta da estaca;

$N_l$  – Média dos valores de N, do SPT, ao longo do fuste;

$\alpha_{Tex}$  – Parâmetro em função do tipo de solo e estaca;

$\beta_{Tex}$  – Parâmetro em função do tipo da estaca;

$E_f$  – Módulo de elasticidade do radier;

$E_s$  – Média do módulo de elasticidade do solo;

$t$  – Espessura do radier;

$s$  – Espaçamento entre estacas;

$L_{m\acute{a}x}$  – Distância da face do pilar até o eixo da estaca mais distante;

$\alpha$  – Dimensão do bloco em um eixo;

$\alpha_p$  – Dimensão de pilar no mesmo eixo;

$h$  – Altura do bloco;

$c$  – Velocidade da onda;

$\rho$  – Massa específica do material da estaca;

$Z$  – Impedância;

$D$  – Lado da seção da estaca;

$A_p$  – Área da seção transversal da estaca;

$B$  – Domínio horizontal;

$E_p$  – Módulo de elasticidade do concreto;

$E_s$  – Módulo de elasticidade do solo;

$\sigma$  – Tensão Aplicada no topo da estaca;

$\nu_s$  – Coeficiente de Poisson do solo;

$v_c$  – Coeficiente de Poisson do concreto;

$\gamma_s$  – peso específico do solo;

$\gamma_e$  – peso específico da estaca;

$c_u$  – Resistência não drenada;

$P_{ad}$  – Carga admissível;

$\rho_{adm}$  – Recalque admissível;

$P_{m\acute{a}x}$  – Carga máxima;

$Q_p^i$  – Carga no topo da estaca  $i$ ;

$\sigma_v$  – Tensão no topo da estaca  $i$ ;

$Q_r$  – Carga suportada pelo radier;

$Q_t$  – Carga total aplicada na fundação;

$Q_p$  – Carga total suportada pelas estacas;

$N_{SPT}$  – Valor de resistência a penetração;

$q_c$  – Resistência de ponta;

$\psi$  – Dilatância;

$S_r$  = recalque no radier;

$S_{pr}$  = recalque no radier estaqueado para a mesma carga aplicada.

## CAPÍTULO 1

# INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem se observado uma ocupação intensa no espaço urbano nos grandes centros do Brasil. Tal conjuntura resultou na mudança estrutural das edificações nas regiões metropolitanas, como consequência, os edifícios se tornaram mais esbeltos e verticais, impondo assim maiores carregamentos para a fundação num pequeno espaço construtivo.

Resultado disso, é a necessidade de criação de técnicas de projeto e execução de fundações capazes de suportar carregamentos de elevada magnitude num pequeno espaço de ocupação. Além disso, há a preocupação em atenuar recalques totais e diferenciais para que os mesmos estejam de acordo com os padrões admissíveis.

Em vista desta necessidade, diversos estudos vêm sendo realizados a fim de averiguar o possível benefício que o contato do bloco ou radier com a massa de solo pode conferir para o sistema de fundação no que tange capacidade de carga e rigidez da infraestrutura.

Ao considerar que as construções atuais impõem carregamentos cada vez mais elevados, a quantidade de estacas necessária para se adequar aos critérios de projeto para capacidade de carga e recalques torna-se elevada. Fato este que pode acarretar na elevação dos custos para o empreendimento.

Nesse âmbito, um sistema que pode ser solução geotécnica é a fundação em radier estaqueado. Esta técnica leva em consideração a contribuição do bloco de coroamento na otimização do comportamento mecânico da fundação. Sales *et al.* (2000) mencionam que diversos padrões nacionais e códigos locais relatam que a fundação em radier estaqueado pode conferir numa solução econômica para o sistema.

Esta possível economia se dá pelo fato de que no sistema em radier estaqueado, tende a obter maior capacidade de carga em comparação com o sistema tradicional de grupo de estacas. Assim, o número de estacas para a fundação ou o comprimento do estaqueamento pode ser reduzido.

As estacas são bons elementos redutores de recalques, e, ao considerar a contribuição que o bloco ou radier oferece quanto à capacidade de carga, a estruturação da fundação em radier estaqueado resulta num sistema que confere não apenas resultados positivos quanto ao desempenho, mas também, possivelmente economia (BASILE, 2015). Isto se dá, visto que este tipo de infraestrutura pode racionalizar o sistema de fundação, como demonstrado por Rabiei e Choobbasti (2016).

Como a fundação em radier estaqueado é resultante da junção de dois tipos de fundação (profunda e superficial), sua análise torna-se complexa. Contudo, com o desenvolvimento de softwares capazes de simular o comportamento desta fundação, aliado às análises experimentais de campo, diversos estudos e pesquisas voltadas para a avaliação do seu desempenho estrutural vêm sendo desenvolvidas.

Apesar de tais estudos terem sido realizados nas mais diversas regiões do mundo, as quais possuem as mais variadas estratificações de solo; no Brasil, alguns estados, como Rio Grande do Norte, ainda são carentes de análises do comportamento da fundação em radier estaqueado.

Nessa perspectiva, a presente pesquisa está voltada para a análise do comportamento de uma fundação em radier estaqueado na cidade de Natal, estado do Rio Grande do Norte, em sedimentos arenosos eólicos

## **1.1 Justificativa**

Diversas regiões do nordeste do Brasil são encontradas situações potencialmente favoráveis à concepção da fundação em radier estaqueado, conforme a literatura. Contudo, é observada uma escassez na literatura técnica no que diz respeito à análise da real viabilidade do uso desta técnica para tais regiões, como na cidade de Natal.

Nessa perspectiva que se insere o presente trabalho. Visto que, mesmo que possua condição para uma possível solução de fundação, a infraestrutura em radier estaqueado ainda é pouco empregada no nordeste brasileiro.

É crescente o uso de ferramentas computacionais com capacidade de prever com eficácia as interações entre os elementos estruturais e a massa de solo. Estas ferramentas, aliadas aos ensaios de campo, dariam maior suporte para o engenheiro analisar o comportamento do sistema em radier estaqueado e obter, desta forma, maior acurácia na previsão do comportamento mecânico da infraestrutura.

Entre os métodos mais comuns, destaca-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), ferramenta bastante útil para a análise do comportamento de radiers estaqueados. Diversos trabalhos foram desenvolvidos nessa temática, aliados às análises experimentais, dentre os quais: Poulos (2001), Mandolini (2003), Mandolini, Russo e Viggiani (2005), Balakumar (2008), Balakumar *et al.* (2013), Basile (2015) e Alshenawy *et al.* (2016). Desde o final da década de 90, surgiram no Brasil os trabalhos desenvolvidos por Sales (2000), Bezerra (2003), Passos (2005), Janda *et al.* (2009), Sousa (2010), Freitas Neto (2013), Pezo (2013), Castillo (2013), Soares *et al.* (2014), Garcia (2015), Rincon (2016), Alva (2017) Cordeiro (2017), entre outros.

Nesse âmbito, a proposta desse trabalho está na avaliação numérica para analisar o comportamento de fundações estaqueadas assentes em solos típicos da região de Natal, a luz da técnica radier estaqueado.

Visa verificar a contribuição que o bloco confere, tanto no aumento da capacidade de carga, quanto na redução de recalques, subsidiadas por resultados de ensaios de campo cedidos por empresas parceiras.

## **1.2 Objetivos da pesquisa**

### **1.2.1 Objetivos geral**

O objetivo desta dissertação é avaliar o comportamento de uma fundação estaqueada assente em solo arenoso típico da região de Natal/RN. Foi analisada a contribuição que o bloco de fundação oferece à capacidade de carga e rigidez para o sistema de fundação.

Visa ainda comparar os resultados obtidos nas análises à luz da técnica de radier estaqueado com a metodologia convencional (grupo de estacas), visto que, nos métodos tradicionais de dimensionamento de fundações profundas a parcela de contribuição que o bloco venha a oferecer não é considerada em projeto.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Analisar um sistema de fundação concebido em grupo de estacas de uma obra realizada na UFRN a partir de resultados de ensaios campo como sondagens de simples reconhecimento (SPT), provas de carga estática em estacas (PCE) e integridade de estacas (PIT);

- Definir os parâmetros geotécnicos do solo da região estudada para dar suporte ao software adotado nas análises numéricas;
- Aplicar métodos de previsão da capacidade de carga da fundação estaqueada da obra estudada, na perspectiva das metodologias de grupo de estacas e de radier estaqueado, para posterior comparação entre tais metodologias;

## CAPÍTULO 2

# REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Introdução

O uso de estacas em fundações é uma metodologia construtiva utilizada em situações que se necessite elevada capacidade de suporte e para casos em que o dimensionamento da infraestrutura em radier ou sapata ocasione recalques excessivos.

Para combater tais deslocamentos, são instaladas estacas sob o elemento superficial. Na configuração tradicional de grupo de estacas, é assumido que o elemento de fundação estaca isolada ou grupo de estacas receberá todo o carregamento imposto pela estrutura.

Contudo, infere-se que tal metodologia é incoerente ao pressupor que apenas as estacas trabalhem para distribuir os esforços para a massa de solo, sem considerar a interação do radier com o solo e sua contribuição que possa oferecer quanto à capacidade de carga para o sistema de fundação (POULOS e DAVIS, 1980); (LONG, 1993).

Conforme Poulos (2001), é comum inicialmente configurar uma infraestrutura formada por fundação superficial, como exemplo radier. Caso este tipo de fundação não se adeque aos critérios de segurança, é adotada fundação por estacas como solução para atender aos critérios de projeto.

Nas últimas décadas, é observada a instalação de estacas sob o radier com foco na redução de recalques totais e diferenciais no radier e aumento da capacidade de carga. Nesse sistema de fundação, conceituado como radier estaqueado, é considerada a contribuição que o radier oferece à capacidade de carga e combate a recalques.

Kuwabara (1989) cita que na metodologia tradicional de fundações em estacas, a instalação de estacas sob o radier tem como foco a redução dos recalques diferenciais, levando em conta que toda a carga aplicada será suportada pelo estaqueamento, ignorando desta forma a capacidade de carga que o radier possa fornecer. Por outro lado, ao considerar a contribuição do radier na capacidade de carga da fundação, o sistema passa a ser conceituado como radier estaqueado.

Wulandari e Tjandra (2015) citam que a fundação em radier estaqueado resulta na redução dos recalques no radier, contudo, para obter um *design* econômico, se faz necessário analisar o número ótimo de estacas para o recalque admissível em projeto, visto que, após certo número de estacas, o aumento do número de estacas no sistema não resultaria na minimização dos recalques.

Novak *et al.* (2005) relatam que um dos maiores desafios da análise de interação solo estrutura está no sistema de fundação em radier estaqueado. Em vista deste contexto, diversos programas numéricos baseados no MEF com capacidade de analisar as interações existentes entre radier-estaca-solo vêm sendo utilizados.

Tal complexidade de análise de radier estaqueado é citada por Alshenawy, Alrefeai & Alsanabani (2016), em que para prever recalques, por exemplo, demanda da necessidade do uso de programas numéricos para obtenção de maior acurácia devido à complexidade de interação entre os elementos estruturais e o solo.

Balakumar (2013) cita a dificuldade na obtenção dos parâmetros geotécnicos do solo, destacando o módulo de elasticidade do solo, parâmetro que pode afetar diretamente a acurácia nos resultados numéricos nas previsões do comportamento da fundação em radier estaqueado.

## 2.2 Concepção da fundação em radier estaqueado

Para a escolha do tipo de fundação, Mandolini (2003) propôs o coeficiente “ $\alpha_{pr}$ ”, que relaciona a carga total aplicada na fundação e a parcela de carregamento que é transmitida para o solo entre estacas e radier. A Equação 1, demonstra como calcular este coeficiente.

$$\alpha_{pr} = \sum_{i=1}^n Q_{pile} / Q_{pr} \quad \text{Eq.1}$$

Em que  $Q_{pr}$  é a carga total aplicada na fundação, enquanto que  $Q_{pile}$  é a parcela de carga resistida por uma estaca individual. Deste modo,  $\alpha_{pr} = 1$  é representado por uma fundação em grupo de estacas,  $\alpha_{pr} = 0$  resulta numa fundação superficial e  $0 < \alpha_{pr} < 1$  se faz necessário um sistema em radier estaqueado, visto que parcela da carga será resistida pelo radier e outra pelas estacas.

Desta forma, o coeficiente  $\alpha_{pr}$  nos dá uma noção de quanto será a contribuição do radier na distribuição dos esforços para a massa de solo. Mandolini (2003), através da Figura 1, apresenta os valores deste coeficiente e qual o sistema de fundação para cada faixa de valores do mesmo.

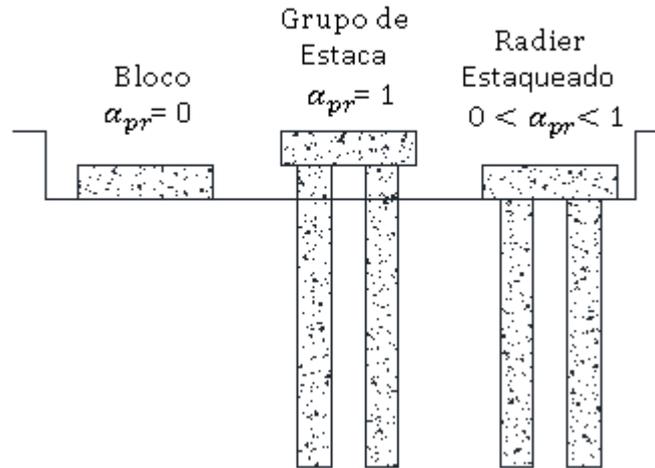


Figura 1 - Tipos de fundação de acordo com o valor do coeficiente proposto por Mandolini (modificada). (Mandolini *et al.* 2003)

Mandolini, Di Laora e Mascarucci (2013), demonstraram, a partir da Figura 2, que a porcentagem de carga que o radier recebe da estrutura varia a depender de diversos fatores, sendo eles: distância entre estacas ( $s$ ), diâmetros das estacas ( $d$ ), área ocupada pelo grupo de estacas ( $a_g$ ) e área do radier ( $a_r$ ).

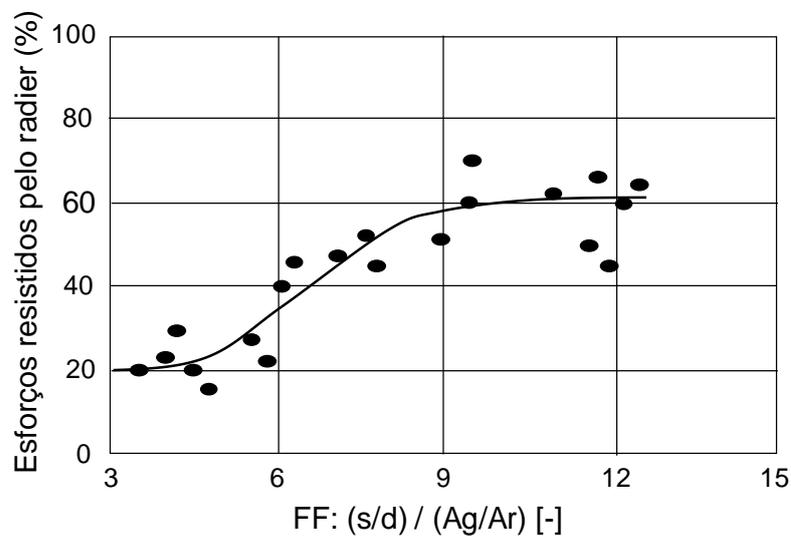


Figura 2 - Porcentagem de carga resistida pelo radier (modificada) Mandolini *et al.* (2013). Dados coletados por Mandolini *et al.* (2005).

A partir da análise da Figura 2, a porcentagem de esforços suportados pelo radier não é inferior a aproximadamente 15%, e, sua contribuição pode ser superior às estacas, resistindo até 70% da carga total aplicada na fundação.

### 2.3 Metodologias de projeto de radier estaqueado

Randolph (1994), citado por Poulos (2001) e Freitas Neto (2013), sistematizou três metodologias de concepção de fundações em radier estaqueado, sendo elas:

- i. Método Convencional ou "*Conventional Approach*": fundação em que grande parte dos esforços são resistidos pelas estacas. Considera-se que parte do carregamento será suportado pelo radier ou bloco de estaca. A carga de trabalho por sua vez é bem inferior a carga de trabalho.
- ii. "*Creep Piling*": teoria em que as estacas trabalhem próxima a carga de ruptura. As estacas são instaladas sob o radier de modo que a tensão transferida pelo mesmo para o solo seja inferior à tensão de pré-adensamento da massa de solo.
- iii. Controle de Recalques Diferenciais ou "*Differential settlement Control*": filosofia em que as estacas são instaladas de maneira estratégicas a fim de minimizar os recalques diferenciais da estrutura.

Poulos (2001) relata também que, além das metodologias mencionadas acima, há uma última filosofia, versão extrema do "*creep piling*". Esta metodologia considera que as estacas trabalhem em 100% de suas capacidades de carga.

Através da Figura 3, Poulos (2001) demonstra graficamente as metodologias, com Curva 0: radier isolado, apresentando recalques excessivos. Curva 1: radier com estacas estruturadas com fator de segurança convencional. Curva dois (2): estacas com fator de segurança reduzido, caso típico de "*creep piling*". Por fim, curva três 3: estacas como elementos redutores de recalque trabalhando na capacidade de carga última.

Ainda conforme Poulos (2001), a curva 3 pode não ser linear, e, mesmo as estacas trabalhando na capacidade de carga última, o sistema de fundação possui uma margem de segurança, com nível de recalques satisfatórios. Logo, esta metodologia de projeto pode ser considerada a mais econômica em comparação às metodologias representadas pelas curvas 1 e 2.

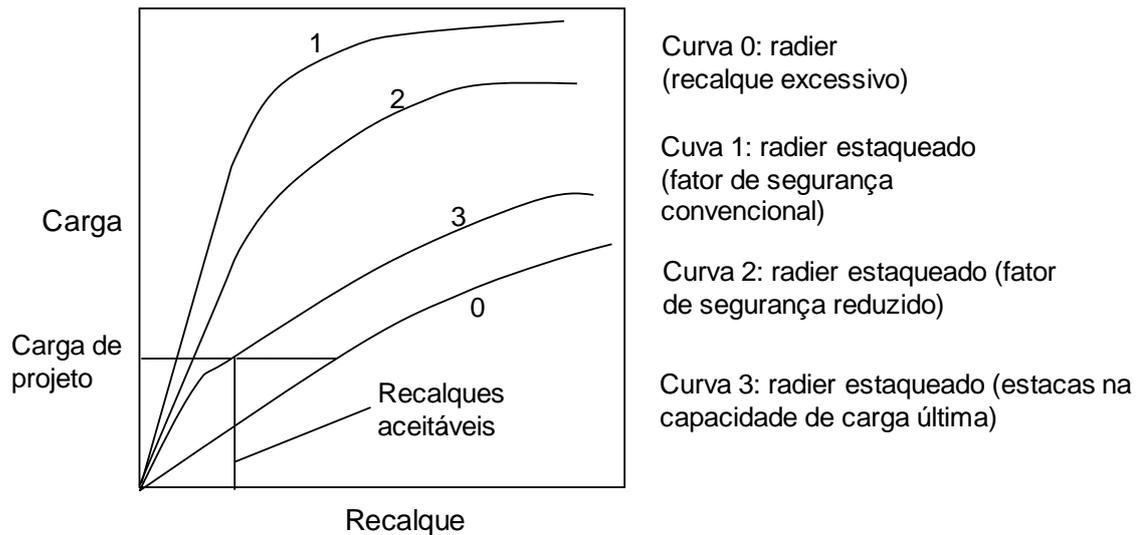


Figura 3 - Filosofias de projeto para radier estacado (modificada). Poulos (2001).

Inúmeras pesquisas para análise de radier foram e estão sendo realizadas, e algumas classes se difundiram mais, dessa forma, são as mais empregadas. Segundo Poulos *et al.* (1997), citado por Poulos (2001), as classes são as seguintes:

- i. Método “*strip on springs*” ou tira sobre molas: nesta aproximação as estacas são consideradas molas e o radier a tira. Um dos focos dessa metodologia é a análise da rigidez (POULOS, 1991);
- ii. Método “*plate on springs*” ou placa sobre molas: aproximação em que o radier é considerado a placa e as estacas a mola. (CLANCY e RANDOLPH, 1993), (POULOS, 1994a) (VIGGIANI, 1998) (YAMASHITA, *et al.* 1998);
- iii. Métodos mais Rigorosos por Métodos Computadorizados: Para esta modelagem são considerados:
  - a. Método dos Elementos de Contorno: utiliza a teoria da elasticidade para análise do radier e grupo de estacas, estudado por Kuwabara (1989), Sinha (1997) e Basile (2015);
  - b. Método dos Elementos Finitos: Método que envolve um sistema de fundação com deformação Plana (DESAI, 1974).
  - c. Método Híbrido: Método dos Elementos de Contorno para as Estacas, combinado com o Método dos Elementos Finitos (MEF) para o radier, estudado por Franke, Lutz e El-Mossalamy (1994) e Ta e Small (1996).

Para ilustrar de forma sistemática, Freitas Neto (2013) apresenta na Tabela 1 os métodos de cálculo para radier estacado e alguns pesquisadores dos respectivos métodos:

Tabela 1 – Métodos de Análise de Radier Estaqueado. (FREITAS NETO, 2013).

Métodos Simplificados	Correlações Empíricas	Kishida & Meyerhof (1965); Skempton (1953); Meyerhof (1959); Vesic (1969).
	Ábacos de Cálculo	Poulos & Davis (1980).
	Método das Fundações Equivalentes	Terzaghi (1943); Poulos & Davis (1980).
	Métodos Baseados na Teoria da Elasticidade	Poulos & Davis (1980); Randolph & Worth (1978); Randolph (1994); Sales (2000).
Métodos Computacionais Aproximados	O radier é representado por uma placa e as estacas por molas	Clancy & Randolph (1993); Poulos (1994); Russo (1998) – NAPRA.
Métodos Computacionais Rigorosos	Método dos Elementos de Contorno (MEC)	Kuwabara (1989); El Mossalamy & Franke (1997); Sinha (1997); Basile (2014).
	Método dos Elementos Finitos (MEF)	Katzenbach <i>et al.</i> (1998); Rabiei & Choobbasti (2015); Sinha & Hanna (2017);
	Métodos Híbridos	Poulos (1994) – GARP; Russo (1998) – NAPRA.

Russo e Vigiani (1998), citam que a concepção de fundações em radier estaqueado é dividida em duas categorias. A primeira, denominada pequenos raders estaqueados ou “*Small Pile Rafts*”. Nesta, o radier não possui capacidade de carga o suficiente para atender aos critérios de projeto. Assim, são instaladas estacas sob o radier com o objetivo de obter fator de segurança satisfatório quanto a capacidade de suporte. A relação entre a largura do radier (B) e comprimento da estaca (L) geralmente é  $B/L < 1$ .

Na segunda categoria, denominada grandes radier estaqueados ou “*Large Piled Rafts*”, o radier por sua vez possui capacidade de carga suficiente para resistir aos carregamentos impostos. Logo, as estacas são instaladas sob o radier a fim de reduzir os recalques do elemento superficial. De maneira geral, a razão entre a largura do radier (B) e o comprimento da estaca (L) é dada pela equação  $B / L > 1$ .

Poulos (2001) sugere a delimitação de três etapas de projeto:

- i. Etapa preliminar, a qual verifica a viabilidade da concepção da infraestrutura em radier estaqueado, e o número de estacas exigidas para satisfazer os critérios de projeto;
- ii. Etapa intermediária, que determina o posicionamento das estacas sob o radier, além das características gerais das mesmas;
- iii. Etapa de detalhamento, que obtêm a configuração ótima de estacas quanto ao número e localização e, por meio de um simulador numérico, calcula os

recalques, momentos e esforços cortantes no radier, além de cargas e momentos nas estacas.

Na etapa preliminar, é verificado o comportamento do radier sem a presença das estacas e, através de técnicas convencionais, estima capacidade de carga e recalques totais e diferenciais. Caso o radier isolado possuir pequena porcentagem de contribuição para a capacidade de suporte requerida, é adotada a filosofia convencional (grupo de estacas) como sistema de fundação.

Contudo, caso o radier isolado oferecer adequada capacidade de carga ou próximo disso, mas não satisfaz os critérios de recalques, é adequada a utilização das estacas como elementos redutores de recalques.

Na segunda etapa, é realizada uma análise dos requisitos de estaqueamento, verificando os pontos que as estacas são necessárias. Assim, são instaladas estacas sob o radier em regiões com grande concentração de carga. Para a etapa preliminar é assumido que os esforços são aplicados de forma uniforme ao longo da área do radier. Contudo, tal consideração não é estendida na análise detalhada do estaqueamento.

Enquanto que as etapas preliminares indicam se o sistema de fundação em radier estaqueado é ou não adequado para o projeto, na última etapa é realizada uma avaliação mais detalhada. Por meio de análise computadorizada, são verificadas as localizações ótimas para as estacas e melhor geometria e número, além de análise da distribuição dos recalques no elemento horizontal.

Poulos (2001), por meio de programa matemático, demonstra a relação entre fator de segurança e a média de recalque da fundação em função do número de estacas. Por meio dessa análise, é verificado se a filosofia *creep piling* ou com as estacas operando na capacidade última é mais viável para o sistema de fundação.

Por meio da Figura 4, é demonstrado um conjunto de resultados de tais relações.

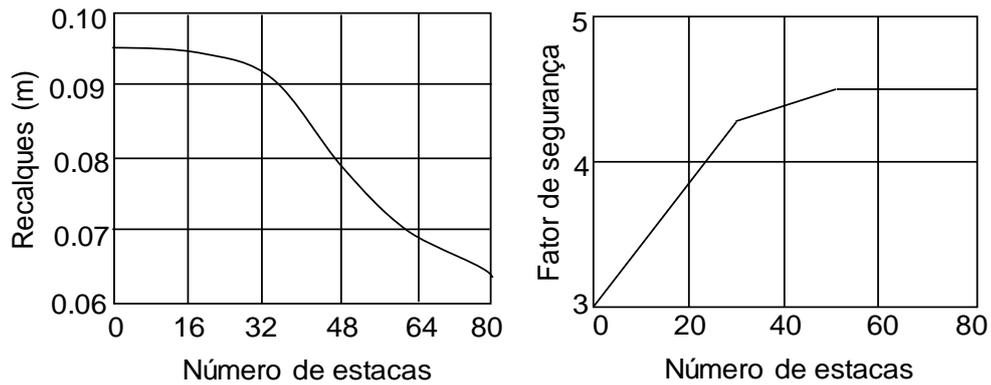


Figura 4 - Filosofias de projeto para radier estaqueado (modificada). Poulos (2001).

### 2.3.1 Método simplificado Poulos – Davis – Randolph (PDR)

O comportamento da fundação em radier estaqueado pode ser analisado por meio do método PDR, inicialmente proposto por Poulos e Davis (1980), que considerava a capacidade de carga do sistema como a soma das resistências isoladas dos elementos estacas e radier, não levando em consideração o efeito das interações entre tais elementos e o solo.

Posteriormente, Randolph (1994), citado por Soares, Coutinho e Cunha (2014), propôs considerar tal cálculo, apresentando o coeficiente " $K_{pr}$ ", representando a interação entre radier e estaca, passando a dimensionar o radier estaqueado como um sistema único. Os autores consideram a curva carga *versus* recalque como um modelo trilinear, como ilustrado na Figura 5.

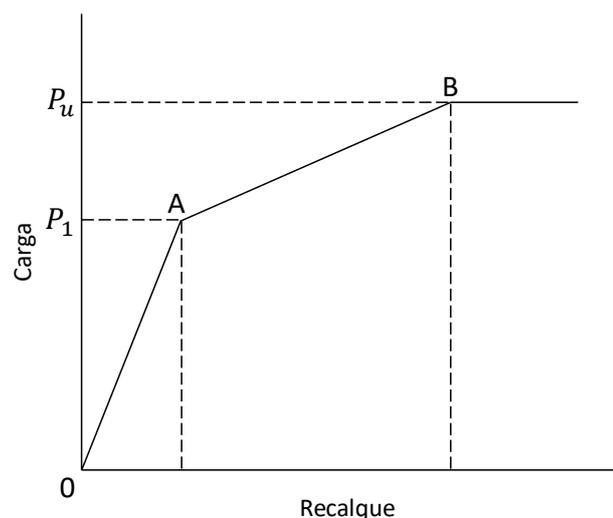


Figura 5 - Curva carga *versus* recalque trilinear do método PDR. (modificada). Poulos & Davis. (1980).

O ponto A representa a carga que mobiliza a resistência total do grupo de estaca. Deste ponto até o ponto B, o esforço aplicado pela estrutura é dividido entre o radier e as estacas. Após o ponto B, instante que já foi mobilizada a capacidade de carga última do radier estaqueado, o recalque aumenta de forma incessante sem o aumento de esforço.

O recalque  $\rho_1$ , correspondente à carga  $P_1$ , é obtido pela razão entre  $P_1$  e a rigidez relativa do radier estaqueado  $K_{pr}$ , proposto por Randolph (1994), citado em Soares, Coutinho e Cunha (2014), representada pela Equação 2 a seguir:

$$\rho_1 = \frac{P_1}{K_{pr}} \quad \text{Eq. 2}$$

Além do ponto A, o recalque resultante da carga adicional é dado pela Equação 3 a seguir:

$$\rho = \frac{P_1}{K_{pr}} + \frac{P - P_a}{K_r} \quad \text{Eq. 3}$$

A rigidez relativa por sua vez é obtida por meio da Equação 4, sugerida por Randolph (1994), citado por Soares, Coutinho e Cunha (2014):

$$K_{pr} = \frac{K_{pg} + (1 - 2\alpha_{rp})K_r}{1 - \alpha_{rp}^2 \left(\frac{K_r}{K_{pg}}\right)} \quad \text{Eq. 4}$$

Sendo que  $K_{pg}$  e  $K_r$  são a rigidez do grupo de estacas e radier isolado, respectivamente. O primeiro pode ser obtido diretamente da curva carga recalque ou através da Equação 5, citada por Soares, Coutinho e Cunha (2014), proposta por Fleming *et al.* (1992), que utiliza a rigidez da estaca isolada.

$$K_{pg} = K_p(n)^{1-e} \quad \text{Eq. 5}$$

Em que  $n$  é o número de estacas e o expoente está compreendido na faixa de 0,3 a 0,5 para estacas de atrito e maior ou igual a 0,6 para estacas de ponta. Já a rigidez do radier retangular isolado por ser obtida por meio da Equação 6, citada por Soares, Coutinho e Cunha (2014), proposta por Poulos e Davis (1974):

$$K_r = \sqrt{BL} \left( \frac{2G_{sr}}{I(1-\nu_s)} \right) \quad \text{Eq. 6}$$

O valor do fator de interação  $\alpha_{rp}$  por sua vez, é obtido por meio da Equação 7:

$$\alpha_{rp} = 1 - \frac{\ln(r_c/r_0)}{\zeta} \quad \text{Eq. 7}$$

Sendo que  $r_c$  corresponde à razão entre a área do radier e o número de estacas,  $r_0$  o raio da estaca,  $\zeta = \ln(r_m/r_0)$ , enquanto que  $r_m$  e  $\xi$  são obtidos por meio das seguintes Equações 8 e 9:

$$r_m = (0,25 + \xi (2,5 \rho(1 - \nu)) - 0,25)L \quad \text{Eq. 8}$$

$$\xi = E_{sl}/E_{sb} \quad \text{Eq. 9}$$

Em que  $E_{sl}$  corresponde ao módulo de elasticidade do solo no nível da ponta da estaca e  $E_{sb}$  o módulo de elasticidade da camada de solo sob a ponta da estaca. Quanto ao  $\rho$ , calcula-se por meio da razão entre o módulo de elasticidade do solo ao longo do fuste da estaca  $E_{sav}$  e  $E_{sl}$ , como ilustrado na Equação 10:

$$\rho = E_{sav}/E_{sl} \quad \text{Eq. 10}$$

Tais módulos podem ser obtidos por aproximações com resultados de testes de laboratório ou correlações com SPT, como a proposta por Hachich *et al.* (1998), citada por Soares, Coutinho e Cunha (2014), ilustrada pela Equação 11 a seguir:

$$E = \alpha KN \quad \text{Eq.11}$$

Por sua vez,  $\alpha$  e  $K$  dependem do tipo de solo, especificados respectivamente por Trofimenkof (1974) e Teixeira (1993), citados por Soares, Coutinho e Cunha (2014). Por fim,  $N$  representa a resistência a penetração obtida no ensaio SPT.

Mandolini (2003), referenciado por Soares, Coutinho e Cunha (2014), afirma que o método simplificado PDR permite a obtenção de uma curva carga recalque para radier estaqueado realista, propondo como rigidez do radier estaqueado a Equação 12:

$$K_{pr} = XK_{pg} \quad \text{Eq. 12}$$

O fator  $X$ , por sua vez, é obtido por meio da Equação 13:

$$X = \frac{1 - 0,6 \left( \frac{K_r}{K_{pg}} \right)}{1 - 0,64 \left( \frac{K_r}{K_{pg}} \right)} \quad \text{Eq. 13}$$

A Rigidez secante do grupo de estacas e radier são calculados através das Equações 14 e 15:

$$K_{pg} = K_{pg,i} \left(1 - R_{pg} \frac{P_{pg}}{P_{pg,ult}}\right) \quad \text{Eq. 14}$$

$$K_r = K_{r,i} \left(1 - R_r \frac{P_r}{P_{r,ult}}\right) \quad \text{Eq. 15}$$

Os parâmetros  $K_{pg,i}$  e  $K_{r,i}$  são valores de tangente inicial do grupo de estaca e radier, respectivamente. O primeiro pode ser obtido por meio da curva carga recalque ou através da equação proposta por Fleming *et al.* (1992).

Para os fatores hiperbólicos  $R_{pg}$  e  $R_r$ , Poulos (2000), citado por Soares, Coutinho e Cunha (2014) adota  $R_{pg} = 0.5$  e  $R_r = 0.75$ . Por fim,  $P_{pg}$  e  $P_r$  são as cargas resistidas pelo grupo de estaca e radier, respectivamente; enquanto que  $P_{pg,ult}$  e  $P_{r,ult}$  suas cargas últimas correspondentes.

Até o ponto A, referente à curva trilinear, a carga  $P_1$  aplicada que atinge a capacidade de carga total resistida pelo grupo de estacas  $P_1$ , correspondente ao recalque  $\rho_1$ , é dada pela Equação 16.

$$P_1 = P_{pg,ult} / (1 - X) \quad \text{Eq. 16}$$

Sendo a parcela de carga resistida pelo radier  $P_r$  e pelo grupo de estacas  $P_g$ , dada pela Equação 17.

$$\frac{P_r}{P_r + P_g} = \frac{K_r(1 - \alpha_{rp})}{K_p + K_r(1 - \alpha_{rp})} \quad \text{Eq. 17}$$

Por fim, a parcela de esforços suportados pelo grupo de estacas em relação a carga total é dada pela Equação 18.

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{0,2}{1 - 0,8 + (K_r/K_{pg})} K_r / K_{pg} \quad \text{Eq. 18}$$

### 2.3.2 Método PDR modificado (Mandolini *et al.* 2017)

Mandolini *et al.* (2017), na 3ª Conferência Internacional Boliviana de Fundações Profundas, propuseram uma modificação do método PDR original, de forma que a nova proposta explica a não linearidade do comportamento da massa de solo, mesmo sendo um método simplificado.

Diferente do método PDR original, em que o radier e as estacas possuem comportamento linear elástico até a ruptura, a nova metodologia assume que as curvas carga recalque são baseadas na forma de uma matriz, representada pela Equação 19.

$$\begin{bmatrix} 1/K_p & \alpha_{rp}/K_{r,0} \\ \alpha_{rp}/K_{p,0} & 1/K_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dQ_p \\ dQ_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dw_p \\ dw_r \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 19}$$

onde:

$K_p$  = rigidez tangente do grupo de estaca ( $K_{p,0}$  seu valor inicial);

$K_r$  = rigidez tangente do radier ( $K_{r,0}$  seu valor inicial).

O ajustamento das atuais rigidezes para o grupo de estaca e radier para representar o aumento da rigidez com a carga irão gerar novos valores, são estimados a partir das Equações 20 e 21.

$$K_{p,i} = K_{p,0} \left(1 - \frac{Q_{p,i}}{Q_{p,u}}\right)^{n_p} \quad \text{Eq. 20}$$

$$K_{r,i} = K_{r,0} \left(1 - \frac{Q_{r,i}}{Q_{r,u}}\right)^{n_r} \quad \text{Eq. 21}$$

onde:

$K_{p,u}$  e  $K_{r,u}$  = cargas últimas;

$n_p$  e  $n_r$  = números positivos que ajustam a forma das curvas.

### 2.3.3 Método simplificado proposto por Randolph (1983)

Randolph (1983), citado por Long (1993), sugere a análise de radier estaqueado através da combinação da rigidez do radier e grupo de estacas. Tal aproximação se baseia no fator de interação entre estacas e radier  $\alpha_{rp}$ , já citado anteriormente e as equações referentes à rigidez relativa  $K_{pr}$ , carga resistida pelo radier e estaca  $P_r$  e  $P_g$ . O recalque no radier estaqueado é calculado através da Equação 22 a seguir:

$$W_f = W_1 + W_2 \quad \text{Eq. 22}$$

onde:

$W_1$  = recalque no radier, para carga total menos a parcela resistida pelas estacas;

$W_2$  = recalque adicional devido aos esforços resistidos pelas estacas.

O recalque  $W_2$  pode ser estimado por meio da Equação 23:

$$W_2 = \alpha_{rp} \cdot \xi \cdot W_{su} \quad \text{Eq. 23}$$

Onde  $\xi$  é a taxa de recalque e  $W_{su}$  o recalque correspondente ao deslocamento que resulte na resistência lateral máxima. Por fim,  $\alpha_{rp}$  pode ser obtido pela Equação 7.

#### 2.3.4 Método simplificado proposto por Burland (1995)

Burland (1995), citado por Deka (2014), desenvolveu um método simplificado para fundações estruturadas em radier estaqueado. Na sua proposta, as estacas são instaladas com foco na redução de recalques, além de prover maior capacidade de carga para o sistema de fundação.

Em sua formulação, é sistematizado os seguintes procedimentos, com auxílio da Figura 6:

- Estimar a curva carga recalque para o radier isolado, com uma carga  $P_0$ , que resulte num recalque total  $S_0$ , como representada na Figura 6;
- Verificar o valor de recalque aceitável  $S_a$ , o qual inclui uma margem de segurança;
- Mensurar a carga  $P_1$ , que é resistida pelo radier, correspondendo ao recalque  $S_a$ ;
- O excesso de carga  $P_0 - P_1$  é assumida como a carga resistida pelas estacas redutoras de recalque. A resistência lateral de tais estacas será completamente mobilizada, desta forma, não se aplica fator de segurança. Contudo, Burland (1995) sugere um fator de mobilização de cerca de 0,9 a ser aplicado como uma “estimativa conservadora” da resistência por atrito última  $P_{su}$ ;
- Caso as estacas estiverem localizadas sob vigas, as quais incidem esforços superiores a  $P_{su}$ , como ilustrado na Figura 7, o radier estaqueado pode ser analisado como radier. Neste caso, a carga do pilar  $Q$  é reduzida para  $Q_r$ , calculada através da Equação 24:

$$Q_r = Q - 0,9P_{su} \quad \text{Eq. 24}$$

- Momentos fletores causados no radier podem ser obtidos realizando análise do radier estaqueado como radier sujeito à carga  $Q_r$ .

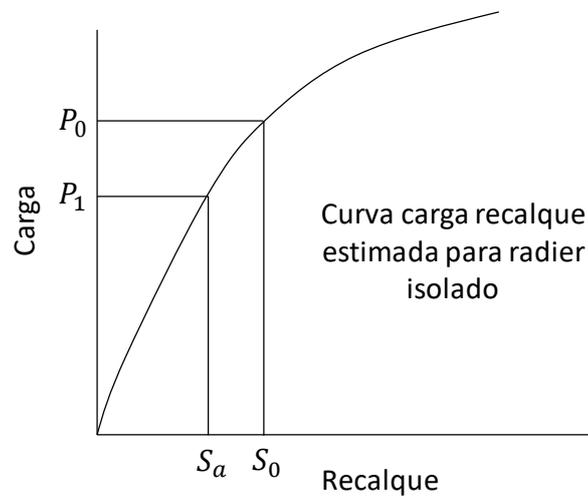


Figura 6 – Método simplificado proposto por Burland (1995). (modificada). Deka (2014).

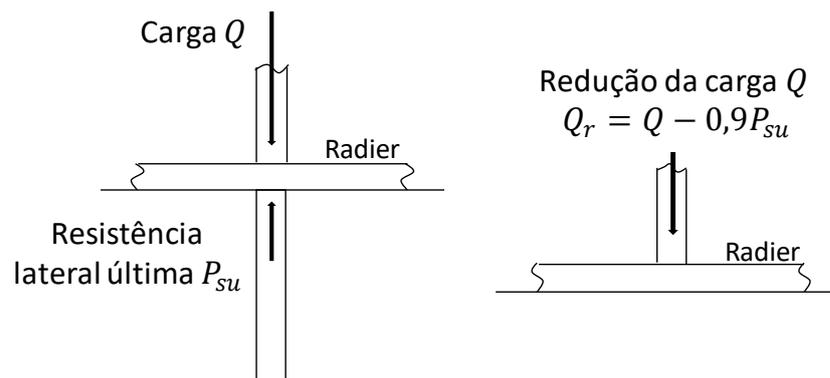


Figura 7 – Redução da carga do pilar pelo método simplificado de Burland (1995). (modificada). Deka (2014).

O método de Burland (1995) não estima os recalques ocorridos no sistema de radier estaqueado, contudo, podem ser mensurados por meio da aproximação proposta por Randolph (1994), através da Equação 25:

$$S_{pr} = \frac{S_r K_r}{K_{pr}} \quad \text{Eq. 25}$$

A rigidez relativa do radier estaqueado  $K_{pr}$  pode ser obtida pela Equação 12, constante no método PDR.

### 2.3.5 Método simplificado baseado em análises experimentais

Além dos métodos simplificados Poulos – Davis – Randolph (PDR), Randolph (1983) e Burland (1995), existem aqueles que são baseados em estudos experimentais, os quais têm a vantagem de possuir uma resposta *in loco* para a aplicação do método proposto, o que permite concluir com maior acurácia se o método proposto se adequa ou não para o caso de estudo.

Long (2015) propôs um método simplificado a partir de resultados experimentais obtidos em campo em solo arenoso (LONG, 1993). Tal formulação pode ser utilizada, se possível, em combinação com análises por meio do método dos elementos finitos. Sua concepção é baseada na proposta de estacas como elementos redutores de recalques.

Em seu estudo experimental, foram realizadas três séries de ensaios de prova de carga. Cada série possuía provas de carga em radier isolado, estaca isolada, grupo de estaca com radier sem contato com o solo e radier estaqueado (bloco interagindo com o solo), variando a distância entre estacas em cada uma delas, mas com iguais fatores geométricos para evitar influência dos mesmos nos resultados. Todos os ensaios em grupos de estacas e radier estaqueado eram constituídos por radiers quadrados, com a fundação composta por 5 estacas.

Para todas séries foi observada mesma tendência, com a carga recebida pelo radier isolado (RI) bem próxima daquela recebida pelo elemento superficial na concepção de radier estaqueado (RE1), como ilustrada na Figura 8.

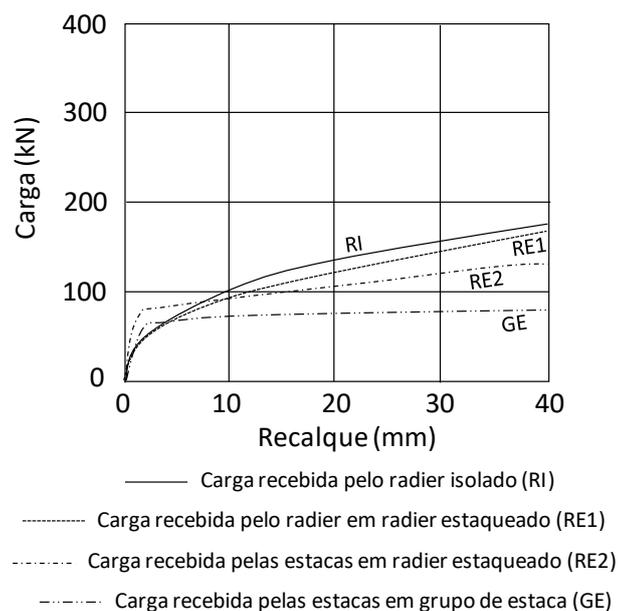


Figura 8 – Distribuição dos esforços entre radier e estacas. (modificada). Long (2015).

A partir de tais resultados, Long (2015) propôs um método simplificado para radier estaqueado em solo arenoso, seguindo os procedimentos a seguir:

1. Estimar a carga recebida pelo radier isolado para recalque limite previsto, dada por  $P_{radier}$ , obtida por meio da curva carga recalque em ensaio experimental ou por meio de análise numérica;
2. Estimar a carga transferida para as estacas  $P_{estacas}$ , por meio da Equação 26 ( $P_{total}$  = carga total aplicada na fundação):

$$P_{estacas} = P_{total} - P_{radier} \quad \text{Eq. 26}$$

3. Estimar o número de estacas  $n$  por meio da Equação 27 ( $P_S$  = capacidade de carga última da estaca isolada):

$$n = \frac{P_{estacas}}{P_S} \quad \text{Eq. 27}$$

4. A carga que superar os esforços transferidos para o radier será suportada pelas estacas.

O autor cita que mesmo o número de estacas sendo calculado a partir da carga última da estaca isolada ou próximo deste valor (*creep*), a configuração ainda oferece segurança devido o contato do radier com o solo, aumentando consideravelmente a capacidade de carga do sistema de fundação.

Como forma de verificação da aplicabilidade deste método, Long (2015) analisou o sistema de fundação da edificação “Datum Jelatek”, localizada na Malásia, com sistema de fundação configurada como grupo de estacas. A partir da aplicação do método proposto, o número de estacas pôde ser reduzido consideravelmente, mantendo o mesmo valor limite de recalque imposto em projeto.

### 2.3.6 Método dos Elementos Finitos (MEF)

O Método dos Elementos Finitos é uma ferramenta de grande importância para análise de fundações em radier estaqueado, visto que tem a capacidade de verificar as interações radier-estaca-solo de forma conjunta.

Inúmeros estudiosos utilizam esta ferramenta devido sua boa acurácia em analisar de forma tridimensional o desempenho das fundações, como Ottaviani (1975), Balakumar (2008) Sales, Small e Poulos (2010), Pezo (2013), Cunha e Pando (2013), Long (2015), Garcia (2015), Sinha e Hanna (2017), entre outros.

Aliadas aos ensaios de campo, como SPT, CPT e PCE, as modelagens numéricas baseadas no MEF vêm sendo muito útil para previsões dos comportamentos de fundações, tanto para pequenas como grandes estruturas, em escala real; visto a dificuldade de realização de ensaios de campo para previsão do comportamento de radier estaqueados compostos por radiers de grandes dimensões e elevado número de estacas.

Além disso, as modelagens numéricas nos dão a possibilidade de aferir de forma mais ágil o efeito dos parâmetros geométricos e de resistência e deformabilidade do solo no comportamento mecânico do sistema de fundação por meio de análises paramétricas. Esta perspectiva, inclusive, é foco de inúmeras pesquisas mais recentes e servem como base para a busca da otimização da infraestrutura.

Na presente dissertação ademais, foi realizada uma a verificação do programa numérico *PLAXIS 3D Foundation* através de previsões que incluíam análises paramétricas, dentre as quais: comprimento do estaqueamento, número de estacas, módulo de elasticidade do solo, dentre outras.

Pioneiro em estudar este tipo de análise, Ottaviani (1975) verificou o comportamento de grupo de estacas contendo 9 e 15 estacas, tanto para o bloco de coroamento em contato com o solo e sem interação com o solo.

Em sua pesquisa, foi concluído que para configurações com o bloco estando em contato com a massa de solo, o elemento superficial não só passou a contribuir na distribuição dos esforços advindos da estrutura para o solo, como também modificou o mecanismo de transferência de carga das estacas para o solo.

Ao longo desta pesquisa serão citados resultados de trabalhos que utilizaram como ferramenta de análise de fundação o MEF, além da fundação foco de estudo nesta pesquisa.

### **2.3.7 Considerações acerca dos métodos de análise**

Conforme abordado nos itens anteriores, inúmeros são os métodos de análise de fundação em radier estaqueado, englobando tanto métodos simplificados, como aqueles baseados em ensaios de campo e previsões obtidas por meio de análises numéricas.

Após a análise de cada método, suas vantagens e limitações, pode-se inferir que, antes da aplicação de alguma metodologia, faz-se necessária a verificação do que o engenheiro geotécnico dispõe, no que tange quantidade de ensaios de campo e quais, pois, os mesmos servirão como subsídios para obtenção dos parâmetros iniciais do solo local.

Além disso, se faz necessário verificar quais parâmetros podem ser obtidos com os resultados dos ensaios de campo, visto que, irá nortear o engenheiro sobre qual metodologia poderá ser aplicada diante dos dados disponíveis e qual software melhor se enquadra para o caso.

O programa numérico que requer grande número de dados de entrada pode apresentar maior acurácia que aquele menos robusto, todavia, não é necessariamente o software mais recomendado se não for inserido todos os parâmetros requeridos para obter uma simulação eficiente e, uma previsão com acurácia do comportamento da fundação.

#### **2.4 Vantagens e limitações da fundação em radier estaqueado**

Gandhi e Maharaj (1995) citam que em situações que a fundação estruturada em radier resulte em elevados recalques, o sistema em radier estaqueado pode ser um método econômico, visto que a metodologia tradicional de grupo de estaca para esta situação poderia resultar em elevados custos para a infraestrutura pelo elevado número de estacas para adequação aos critérios de projeto.

Poulos (1991), citado por Poulos (2001), relata os perfis de solos favoráveis para a adoção deste tipo de fundação, aqueles que possuem argila média ou rija ou solos arenosos com compacidade densa nas camadas superficiais. Estas situações se configuram como positivas pelo fato do radier interagir com uma camada de solo superficial de grande resistência.

As situações desfavoráveis, por sua vez, são em solos que em suas camadas mais superficiais possuem argila mole ou areia fofa. Nestes casos, o radier ou bloco teria pouca participação na contribuição de capacidade de carga e rigidez para o sistema de fundação.

Segundo Poulos (2001), circunstâncias desfavoráveis também são observadas em movimentos de consolidação do solo, o que acarreta na perda de contato do radier com o solo, assim, todo carregamento passaria a ser suportado pelas estacas.

Nesta situação, inclusive, pode ser citada a pesquisa experimental de Rincon (2016) em modelo de escala reduzida, em que o autor cita o possível colapso do sistema caso as estacas forem projetadas próximo à carga última.

Por fim, movimentos de expansão do solo, devido fatores externos, também se configuram como contexto negativo. Tal situação resultaria no aumento dos momentos fletores no radier, visto que as estacas tenderiam a impedir seu movimento de ascensão.

Conforme Rabiei (2010), a fundação em radier estaqueado pode ser uma técnica econômica de fundação. Segundo o autor, esta metodologia é eficiente na redução tanto dos recalques totais quanto diferenciais da edificação.

Balakumar *et al.* (2013) demonstram, por meio de um estudo em escala reduzida 1g, que a fundação em radier estaqueado incrementa de forma significativa a capacidade de carga da fundação, em comparação com o sistema tradicional de grupo de estacas.

A Figura 9 apresenta as curvas carga recalque para os sistemas de grupo de estacas e radier estaqueado, demonstrando este ganho de capacidade de carga devido a interação do radier com o solo.

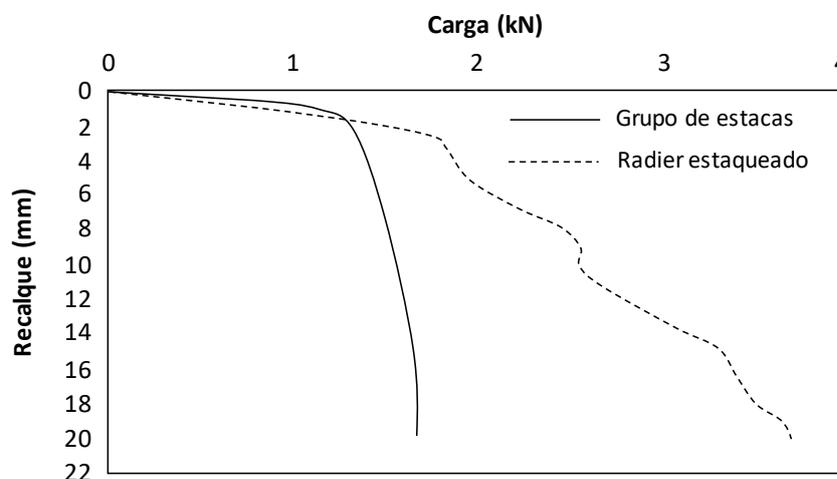


Figura 9 - Comparação da curva carga recalque entre o sistema de fundação em grupo de estaca e radier estaqueado. (modificada). Balakumar *et al.* (2013).

Pesquisas acerca do comportamento da fundação em radier estaqueado, em solos arenosos compacto ou argilosos rijo, demonstram possuir bom cenário para tal sistema, como observado na literatura. Visto que, a participação do radier no combate à recalques e incremento na capacidade de carga do sistema é substancial. Contudo, é observada uma escassez na literatura sobre análises de como os esforços são distribuídos entre o radier e estaca ao longo do tempo.

Nessa perspectiva, Tang *et al.* (2014). analisaram o comportamento de três fundações em radier estaqueado assentes em solo argiloso mole na cidade de Xangai, China. Foi observado como é realizada a distribuição dos esforços entre os elementos estruturais para solo ao longo dos anos, verificando se este tipo de solo se caracterizava como uma situação favorável para fundação em radier estaqueado.

Uma das construções teve comportamento monitorado entre os anos de 1999 e 2011, enquanto as outras duas entre 1991 e 1995. Após análises das medições de campo, foi observado que durante o estágio de construção, os esforços eram igualmente transmitidos entre elemento superficial e estacas.

Após o estágio de construção, os esforços foram sendo transferidos para as estacas, até se estabilizarem, devido à dissipação do excesso de poro pressão ao longo do tempo. Após estabilização, cerca de 90% dos esforços foram suportados pelas estacas, para as três fundações analisadas.

Desta forma, os autores concluíram que, mesmo para uma condição de solo mole, a fundação em radier estaqueado se apresentou como positiva para o sistema de fundação. Pelos resultados apresentados pelas edificações estudadas, fatores de segurança menos convencionais podem ser obtidos, adquirindo assim, infraestruturas mais racionais.

Soares *et al.* (2014) realizaram um estudo experimental para verificar o benefício que o contato do radier com o solo proporciona para um sistema de fundação na cidade de João Pessoa. Na pesquisa, foram comparados dois sistemas de fundações, convencional (grupo de estaca) e radier estaqueado. Em ambos sistemas, foram analisados os comportamentos contendo 1, 2 e 4 estacas, todos com bloco de fundação com mesmas dimensões.

Na análise comparativa dos sistemas em grupo de estaca e radier estaqueado, observou-se que a interação do bloco com o solo resultou no aumento de capacidade de carga expressivo da fundação e redução dos recalques para todos os casos estudados.

A partir das provas de carga para o sistema de fundação em radier estaqueado, foi observado que nos últimos estágios de carregamento nos ensaios, o radier recebeu cerca de 80% dos esforços aplicados para sistema em radier com 1 estaca, enquanto que para radier com 2 e 4 estacas, o elemento superficial transmitiu cerca de 70% e 50% da carga aplicada para o solo, respectivamente. Tais resultados são demonstrados na Figura 10.

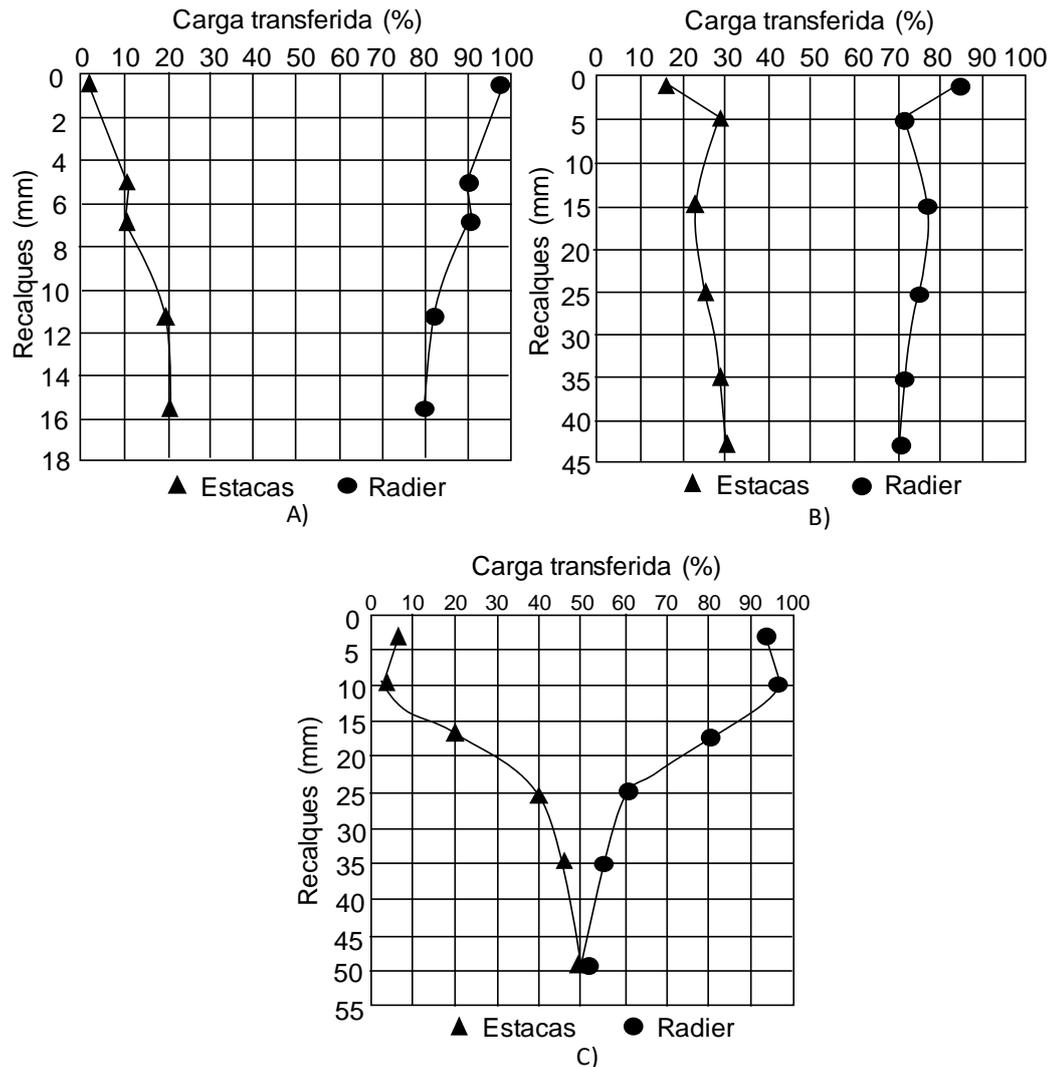


Figura 10 – Distribuição dos esforços do radier estaqueado com: A) 1 estaca. B) 2 estacas. C) 4 estacas. (modificada). Soares *et al.* (2014).

Essa performance do radier em termos de transmissão de esforços pode ser explicada pelas características geotécnicas local (areia moderadamente compacta nas regiões superficiais do solo e a razão entre as áreas do grupo de estaca e radier). Tais condições corroboram, respectivamente, com estudos realizados por Poulos (2001) e Mandolini *et al.* (2013).

Nas Figuras 11, 12 e 13 são demonstradas as curvas cargas recalque dos dois sistemas estudados, ilustrando que para as três análises comparativas, a metodologia de fundação em radier estaqueado conferiu maior rigidez em comparação com o critério tradicional de fundação (grupo de estacas).

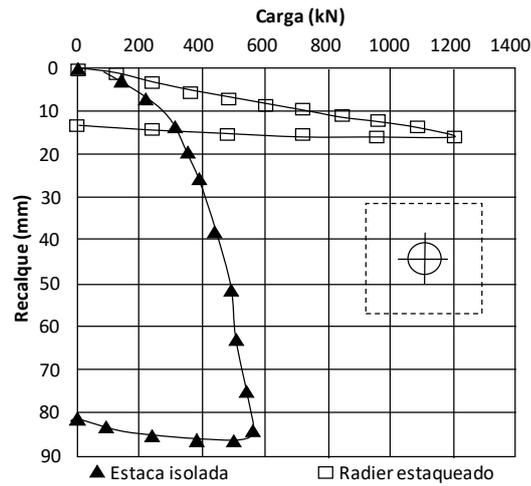


Figura 11 - Curvas carga recalque para estaca isolada e radier estaqueado. Soares *et al.* (2014).

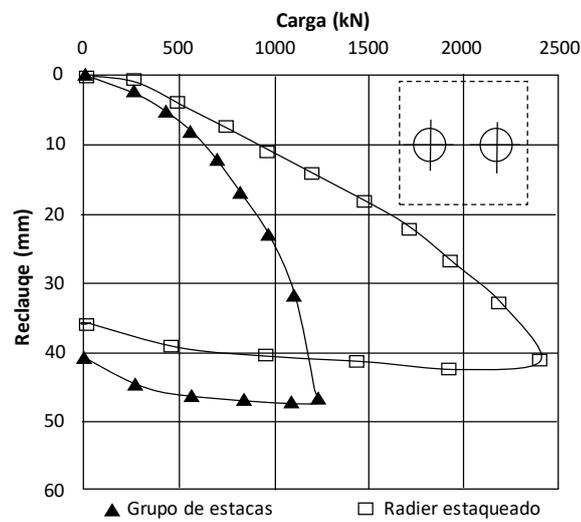


Figura 12 - Curvas carga recalque para grupo de 2 estacas e radier estaqueado. Soares *et al.* (2014).

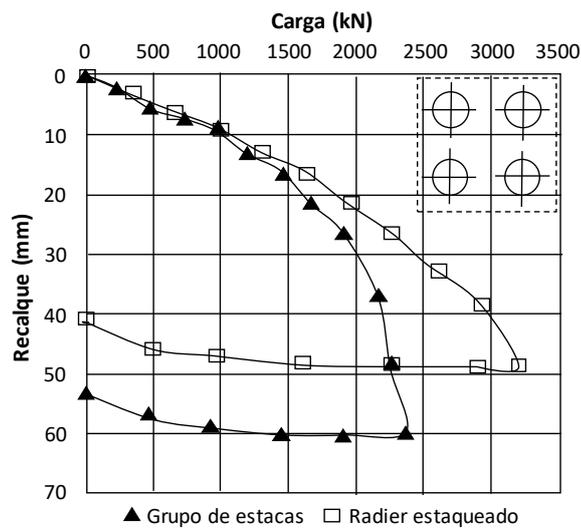


Figura 13 - Curvas carga recalque para grupo de 4 estacas e radier estaqueado. Soares *et al.* (2014).

Basile (2015) realizou um estudo da viabilidade do uso da fundação em radier estaqueado em obras de pequeno porte, visto que, de maneira geral, é observada na literatura a utilização de radier estaqueado como sistema de fundação voltado para estruturas de grande porte.

Na pesquisa, foram consideradas estruturas de pequeno porte, aquelas com sistema de fundação em "*small pile raft*", como conceituado por Russo & Viggiani (1998). Após realização das simulações numéricas e posterior análises, foi observado que a fundação em radier estaqueado reduziu significativamente o número e comprimento de estacas em comparação com a metodologia tradicional de grupo de estacas, para os mesmos critérios de projeto quanto à capacidade de carga e recalques amissíveis.

Ainda no contexto de estruturas de pequeno porte, Sousa (2003) realizou um estudo experimental acerca do comportamento da fundação mista sapata estaqueada. Tal sistema tem comportamento análogo ao radier estaqueado, com capacidade de carga total da fundação dada pela soma da resistência advinda do elemento superficial (sapata) com a resistência do elemento profundo (estacas).

Este estudo, realizado em solo argiloso tropical de Brasília -DF, utilizou estacas de compactação compostas por solo-cimento como melhoramento do solo. A partir dos resultados, obtidos em diversos ensaios de prova de carga em sapata isolada e sapata estaqueada, concluiu-se que a fundação mista incrementou de forma significativa a capacidade de carga do sistema de fundação.

No entanto, na análise das estacas como elementos redutores de recalque, Sousa (2003) concluiu que as estacas não tiveram comportamento satisfatório; visto que, não foi observada uma redução significativa nos deslocamentos.

Com esta análise, Sousa (2003) concluiu que o sistema de fundação concebido em sapata estaqueada na cidade de Brasília pode ser uma solução geotécnica viável para obras de pequeno e médio porte. Destaca-se, além disso, a relevância deste estudo no que tange comportamento de fundações mistas instaladas em solo argiloso colapsível sob efeito de inundação do solo.

Garcia (2015) realizou um estudo experimental e numérico de radiers estaqueados na região de Campinas, São Paulo, para verificar a contribuição que radier atribuída para o sistema de fundação. O solo local, caracterizado por meio de ensaio CPT, era composto por uma argila muito mole até a profundidade de 2 metros, seguido por uma camada de 6 metros de areia siltosa.

A partir da profundidade de 8 metros, é constituído de silte areno-argiloso até 12 metros de profundidade, onde alcança o impenetrável. As estacas eram do tipo escavadas mecanicamente a trado, possuindo 5m de comprimento e 25cm de diâmetro. 4 sistemas foram executados, radier estaqueado com uma, duas, três e quatro estacas, espaçadas de 5D.

Através dos ensaios realizados em campo, foi demonstrado que o radier contribuiu com 21% na transferência dos esforços para o solo ( $\alpha_{pr} = 0.79$ ), demonstrando que a região estudada se enquadra como condição favorável para fundação em radier estaqueado.

Garcia (2015) também concluiu que, para radiers estaqueados executados na região de Campinas por meio de estacas escavadas, a parcela de resistência advinda da ponta das estacas deve ser desprezada.

Quanto às análises numéricas, os resultados demonstraram uma participação em 36% do radier na capacidade de carga no sistema de fundação, representando razoável acurácia com os testes experimentais.

Um ponto destacado pelo autor foi a influência da relação entre a área de contato do radier com o solo em relação à área de contato total do radier estaqueado. Foi verificado que a capacidade de suporte dos radiers estaqueados aumentou conforme tal relação era incrementada, corroborando com estudos de Mandolini *et al.* (2013).

Rabiei e Choobbasti (2016) realizaram um estudo de otimização da configuração de radier estaqueado para uma fundação localizada no Irã através de análises numéricas pelo programa ELPLA, com diferentes comprimentos e número de estacas.

Os carregamentos impostos pela edificação se davam de forma não uniforme ao longo do radier, com maiores esforços aplicados na região central. A característica geotécnica na região superficial era constituída por solo arenoso fofo, variando em profundidade de 4 a 15 metros. Conforme Poulos (2001), tal contexto reflete numa situação desfavorável para sistema de fundação concebido em radier estaqueado.

Como configuração da fundação, foram variados os números de estacas entre 16 e 64 e comprimento entre 3 e 20m, todas com radier possuindo 1 metro de espessura, totalizando 9 diferentes configurações.

Após análises numéricas, os autores concluíram que um arranjo mais racional pode ser obtido em comparação com fundação com estacas uniformes, gerando um sistema de fundação mais econômico. Assim, foi verificado que recalques totais, diferenciais e momentos gerados no radier podem ser reduzidos.

Rincon (2016) realizou um estudo experimental em modelos em escala reduzida a partir da centrífuga geotécnica a fim de estudar o comportamento de sistema de fundação em radier estaqueado assente em argila mole em processo de adensamento.

Após análise dos resultados, o autor concluiu que fundações compostas por estacas com maiores espaçamentos possuem maior controle de recalques. Adicionalmente, foi observado que os recalques são superiores em situações de abatimento da pressão neutra, em comparação com os recalques apresentados em situações de pressão neutra constante.

Quanto a distribuição dos esforços entre estacas e radier, observou-se que, conforme ocorre o abatimento da pressão neutra no solo, o radier tende a resistir menos carregamento. Isto se dá visto a perda de contato do radier com a massa de solo, gerando uma transferência dos esforços deste elemento para as estacas.

Diante desta análise, é necessário ter atenção especial em situações onde as estacas são projetadas para trabalhar próximo ao estado limite num contexto de eventual consolidação do solo pela dissipação do excesso de poro pressão.

## 2.5 Capacidade de carga de radier estaqueado

Hemsley (2000) cita que a capacidade de carga da fundação em radier estaqueado  $Q_{pr}$  é dada pela somatória da resistência do radier isolado  $Q_r$  com as resistências individuais da estaca  $Q_{p,i}$ , de forma que tal soma seja igual ou superior aos esforços aplicado pela estrutura, como representado na Equação 28.

$$Q_{pr} = Q_r + \sum_{i=1}^n Q_{p,i} \geq S_{tot} \quad \text{Eq. 28}$$

Contudo, pode-se afirmar que tal formulação não leva em consideração fatores de interação entre os elementos estruturais e a massa de solo. Mesmo que a área do radier seja apenas aquela em contato com o solo, a interação do elemento superficial com o grupo de estacas e o solo altera o comportamento do sistema quanto à distribuição dos esforços para o solo e recalques, quando comparado com radier isolado e grupo de estacas.

De Sanctis e Mandolini (2006), citam que a fundação em radier estaqueado não pode ser analisada pela sobreposição do comportamento dos elementos isolados radier e grupo de estacas, visto que, por exemplo, o fator de segurança do radier estaqueado pode ser levemente inferior a soma dos fatores de segurança do radier isolados e grupo de estacas.

Ottaviani (1975), referenciado por Long (1993), afirma que quando o radier está em contato com o solo, o mesmo atua como um elemento redutor da carga por atrito da estaca, resultando na redução da tensão gerada na porção superior da estaca. Isto ocasiona no aumento da parcela de carga emitida para a ponta da estaca. Assim, a resistência individual da estaca na concepção radier estaqueado é afetada.

Algumas fórmulas empíricas, que servem para uma análise preliminar da verificação da capacidade de suporte e dimensões dos elementos estruturais, como a formulação de Long (1993), é ilustrada pela Equação 29:

$$Q_{pr} = N(N_{1S}N_{4S}Q_S + N_{1B}N_{4B}Q_B) + N_6Q_C \quad \text{Eq. 29}$$

onde:

$Q_{pr}$  = capacidade de carga do sistema de fundação;

$Q_S$  = capacidade de carga por atrito lateral da estaca isolada;

$Q_B$  = capacidade de carga da ponta da estaca isolada;

$Q_C$  = capacidade de carga do radier isolado;

$N$  = número de estacas;

$N_{1S}$  = fator de interação estaca-solo-estaca no atrito lateral das estacas;

$N_{4S}$  = fator de interação radier-solo-estaca no atrito lateral das estacas;

$N_{1B}$  = fator de interação estaca-solo-estaca na resistência de ponta;

$N_{4B}$  = fator de interação radier-solo-estaca na resistência de ponta;

$N_6$  = fator de interação radier-solo-estaca na capacidade de carga do radier.

Para esta formulação, são utilizados ábacos para obtenção dos fatores " $N$ ", baseados em ensaios realizados por cada autor. Assim, tais fórmulas devem ser usadas com prudência, sempre verificando sua aplicabilidade para determinada massa de solo presente na região de aplicação.

Conforme Akinmusuru (1980), citado por Long (1993), a capacidade de carga da fundação em radier estaqueado estruturado em solo não coesivo não se resume apenas na soma algébrica das resistências do grupo de estacas e radier. O mesmo cita que a capacidade de suporte do sistema misto pode até superar a soma das resistências da fundação profunda e superficial.

Este incremento de capacidade se dá, segundo o autor, pelo efeito de interação entre os elementos estruturais, podendo obter eficiências superiores a uma unidade, em que a capacidade de carga pode ser obtida através da Equação 30:

$$Q_{pr} = \alpha_r Q_r + \alpha_{pg} Q_{pg} \quad \text{Eq. 30}$$

onde:

$Q_{pr}$  = capacidade de carga do sistema de fundação;

$Q_r$  = capacidade de carga do radier isolado;

$Q_{pg}$  = capacidade de carga do grupo de estacas;

$\alpha_r$  = fator de eficiência na capacidade de carga do radier;

$\alpha_{pg}$  = fator de eficiência na capacidade de carga do grupo de estacas.

Akinmusuru (1980), cita que a contribuição do radier na capacidade de carga do sistema depende tanto do comprimento do estaqueamento quanto das dimensões do elemento superficial. Além disto, o efeito de interação  $\alpha_{pg}$  é maior e mais variável que  $\alpha_r$  em análises variando o comprimento relativo do estaqueamento, como ilustrado na Figura 14.

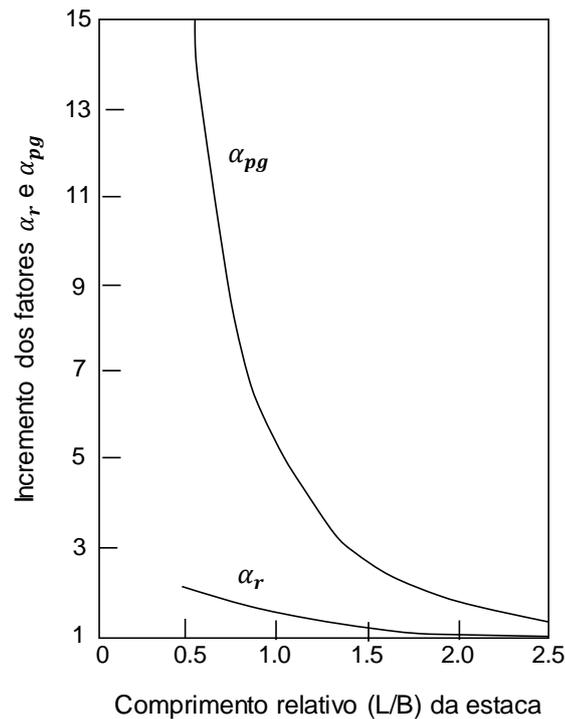


Figura 14 – Variação dos fatores  $\alpha_r$  e  $\alpha_{pg}$  devido a interação estaca-radier. Akinmusuru (1980) (modificada). Long (1993).

### 2.5.1 Efeito de grupo de estacas na capacidade de carga

É de conhecimento comum que a capacidade de carga de grupo de estacas normalmente difere da soma das resistências individuais das estacas. Desta forma, é importante que se tenha conhecimento dos fatores geométricos e condições de campo que influenciam no comportamento do grupo de estacas.

Poulos e Davis (1980) citam que a eficiência do grupo de estacas pode ser medida a partir da razão entre a carga última do grupo e a soma das resistências individuais das estacas, denotado como fator  $n$ , apresentado na Equação 31.

$$n = \frac{\text{capacidade de carga última do grupo}}{\text{soma das resistências individuais das estacas}} \quad \text{Eq. 31}$$

Conforme a NBR6122:2010, efeito de grupo de estacas é dado pelo processo de interação que ocorre entre as estacas ao transmitirem os esforços para o maciço de solo. Esta interação acarreta na superposição de tensões provocada pelas estacas do grupo, de forma que o recalque em grupo de estacas, para uma mesma carga por estaca, é diferente, em geral, do recalque da estaca isolada.

Velloso e Lopes (2002) relatam que a análise do efeito de grupo de estacas pode ser realizada tanto em termos de capacidade de carga, como verificado por Soares *et al.* (2014), como também para variações de recalques.

Além disto, são citados por Long (1993) e Velloso e Lopes (2002) alguns métodos para estimativa de recalque em grupo, como o “artifício do radier fictício”, proposto por Terzaghi e Peck (1948) e métodos empíricos como o de Skempton (1953), para grupo de estacas em areia e o método de Meyerhof (1959), com formulação baseada no espaçamento entre as estacas.

Poulos e Davis (1980) mencionam que estacas cravadas em areia fofa resulta na compactação do solo ao seu redor devido ao processo de cravação, e, caso a distância entre as estacas for pequena (menor que 6 diâmetros), a capacidade de carga do grupo de estacas pode ser maior que a somatória da resistência individual da estaca isolada.

Todavia, caso a cravação da estaca seja realizada em areia compacta, o efeito é contrário, ocasionando assim na diminuição da resistência do solo e consequente redução da capacidade de suporte do grupo de estacas e eficiência menor que 1,0.

Long (1993) cita que a eficiência de grupo de estacas cravadas em solo arenoso muito denso tende a ser menor que uma unidade. Isto se dá pelo fato da cravação diminuir a densidade relativa do solo devido ao efeito de dilatação na areia, corroborando com análises de Poulos e Davis (1980).

Cintra e Aoki (2010) apontam os fatores que influenciam a eficiência do grupo de estacas, sendo eles: forma e tamanho do grupo de estacas, espaçamento entre estacas, além do tipo do solo e estaca. Outro ponto é a forma de distribuição dos esforços, que no grupo de estaca pode não ser uniforme. Em areias, as estacas centrais tendem a receber mais carregamento, enquanto que para solos argilosos, essas são menos solicitadas.

Para a técnica de radier estaqueado, pode ser citada a influência do radier na forma de distribuição dos esforços, em que estacas centrais tendem a receber mais carga para radiers flexíveis, enquanto que em radiers rígidos, maiores carregamentos são transferidos para as estacas da periferia.

Cintra e Aoki (2010) citam também as condições em que a eficiência é em torno de uma unidade, para casos de estacas de qualquer tipo instalada em solo argiloso e para estacas escavadas em qualquer tipo de solo. Para situações de estacas cravadas, observam-se maiores eficiências, especialmente em areias fofas, corroborando com afirmação de Poulos e Davis (1980).

Para verificar este aumento de resistência à penetração do solo, Poulos e Davis (1980) relatam pesquisas realizadas por Philcox (1962), o qual realizou diversos ensaios SPT próximos a região de estaqueamento, antes e depois do estaqueamento. Foi observado, ao comparar  $N_{SPT}$  antes e depois da cravação de grupo de 4 e 9 estacas, que os valores de  $N_{SPT}$  na região central eram superiores àqueles  $N_{SPT}$  obtidos antes do estaqueamento, como ilustrados na Figura 15.

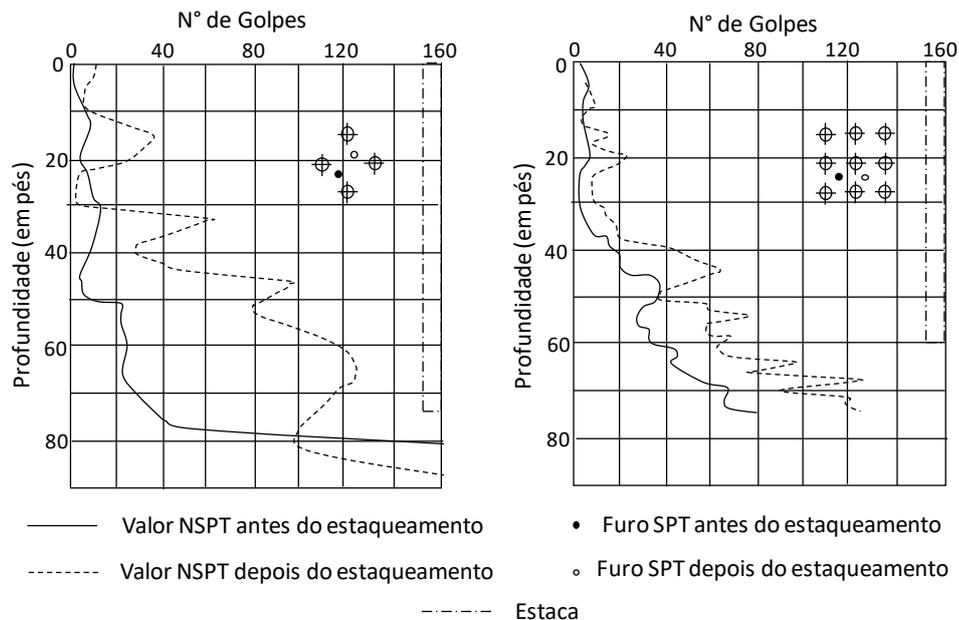


Figura 15 – Análise de resultado de  $N_{SPT}$  antes e depois do estaqueamento. Philcox (1962). (modificada) Poulos e Davis (1980).

A fim de estimar este efeito de compactação em areia fofa, Kishida (1967), citado por Poulos e Davis (1980), propôs uma equação para calcular o novo ângulo de atrito  $\varphi'$  do solo a partir do valor de da resistência à penetração  $N$  obtido no ensaio SPT, representada na Equação 32 a seguir.

$$\varphi' = \sqrt{20N} + 15^\circ \quad \text{Eq. 32}$$

Ainda segundo Poulos e Davis (1980), para grupo de estacas de atrito ou flutuante, em argilas, a eficiência tende a diminuir com a redução do espaçamento entre as estacas.

Tais autores citam diversas fórmulas empíricas para mensurar a eficiência  $n$  de grupo, como a Equação 33, pelo método *Converse-Labarre*, influenciada pelo espaçamento entre estacas:

$$n = 1 - \xi \left( \frac{(n-1)m + (m-1)n}{mn} \right) / 90 \quad \text{Eq. 33}$$

Onde  $m$ : número de fileiras de estacas,  $n$ : número de estacas na fileira,  $\xi$ : arcotangente de  $s/d$ , em graus,  $d$ : diâmetro da estaca e  $s$ : espaçamento eixo a eixo entre estaca.

Conforme a regra de Feld, não se faz necessário considerar o espaçamento entre as estacas, calculando a capacidade de carga de cada estaca do grupo a partir da redução da resistência em 1/16 de cada estaca adjacente, na diagonal ou mesma fileira.

Passos (2005) a fim de analisar o comportamento de solo arenoso melhorado com uso de estacas de areia e brita, fez um estudo experimental em modelo reduzido, o qual foi preenchido por areia fofa. Para tanto, 9 estacas foram executadas para provocar a densificação do material arenoso.

Foi observado, a partir de correlações semi-empíricas, que os parâmetros de resistência e deformabilidade do solo resultaram no aumento da capacidade de carga do solo melhorado.

Ainda segundo Passos (2005), as estacas compostas por areia e brita são bastantes usuais em fundações na região nordeste, com foco na compactação do solo arenoso, promovendo assim, o melhoramento dos parâmetros de resistência da massa de solo.

Tavares (2012) cita que O *Canadian Foundation Engineering Manual* CGE (1992) sugere que este efeito de grupo pode ser desconsiderado caso o espaçamento entre as estacas for maior que 8 vezes o diâmetro da estaca, corroborando com afirmação de Poulos e Davis (1980).

Soares *et al.* (2014) demonstram, por meio de ensaios experimentais, que a capacidade de carga de grupo em solo arenoso é maior que a soma da resistência individual de uma estaca, para análises entre estaca isolada e grupo com 2 e 4 estacas.

## **2.6 Capacidade de carga de fundação profunda e superficial**

Inúmeros são os critérios para determinar a capacidade de carga. A variabilidade das estimativas dos diversos métodos de previsão normalmente é alta, o que torna difícil recomendar qual proposta é a mais adequada. Assim, a escolha depende muito da experiência do engenheiro com o solo da região.

### 2.6.1 Capacidade de carga a partir de PCE

De maneira geral, as provas de carga estática em estaca não resultam na ruptura em campo, sendo utilizadas como um método para avaliação de desempenho do estaqueamento, como realizado na fundação de estudo na dissertação. Por outro lado, para obras de grande porte, se faz o uso de estacas pilotos, com as provas de carga tendo a finalidade de estimar a capacidade de carga das estacas.

Um método bastante utilizado no Brasil é o critério proposto por Décourt (1993) e Norma Inglesa (BS 8004:1986), que indicam como a capacidade de carga para estacas escavadas e de deslocamento aquela que resulte num recalque correspondente a 10% do diâmetro nominal da estaca.

Segundo a NBR 6122/2010, a capacidade de carga da estaca ou tubulão é considerada como aquela que resulte na ruptura nítida, isto é, ocorrência de deformações incessantes sem acréscimo de carregamento.

Mas, no ensaio de prova de carga pode ocorrer da estaca não apresentar ruptura nítida. Neste caso, duas situações podem ocorrer, uma em que a capacidade de carga do elemento de fundação estaca for superior à carga aplicada no ensaio. A outra se refere ao caso em que a estaca ou tubulão apresente elevados deslocamentos, mas sem configurar a ruptura nítida supracitada.

Nessas duas situações, pode ser realizada a extrapolação da curva carga recalque para mensurar a carga de ruptura. A Figura 16 e Equação 34 ilustram como pode ser calculada a carga de ruptura convencional, de forma que, onde a reta obtida por esta equação interceptar a curva carga recalque, será a carga de ruptura adotada.

$$\Delta_r = \frac{PxL}{AxE} + \frac{D}{30} \quad \text{Eq. 34}$$

Onde:

$\Delta_r$  = recalque de ruptura convencional;

$P$  = carga de ruptura convencional;

$L$  = comprimento da estaca;

$A$  = área da seção transversal da estaca;

$E$  = módulo de elasticidade da estaca;

$D$  = diâmetro da estaca.

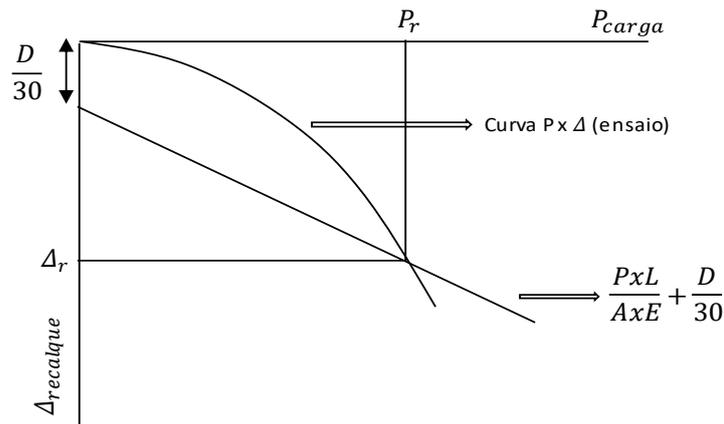


Figura 16 – Carga de ruptura convencional (NBR 6122/10).

Além do método baseado no deslocamento em 10% o diâmetro da estaca, Bessa *et al.* (2015) citam o método de Décourt (1996), que propõe a previsão da carga de ruptura por meio da rigidez K da fundação, uma relação entre carga e recalque (Q/r).

O autor parte do princípio de que conforme os esforços aplicados na estaca aumentam gradualmente, a rigidez tenderia a zero, podendo assim obter a capacidade de carga da estaca.

A partir dessa relação entre carga e recalque, pode ser elaborado um gráfico com a ordenada representada pela rigidez K e a abscissa a carga aplicada na fundação. Conforme Décourt (1996), este gráfico permitiria a visualização clara e precisa da carga de ruptura, como sendo o ponto correspondente a rigidez nula.

Outro método bem conhecido é o proposto por Van der Veen (1953), que propõe uma extrapolação da curva carga recalque. Tal método sugere que a relação entre a carga e o recalque na cabeça da estaca possui uma forma exponencial, satisfazendo por meio da Equação 35 abaixo:

$$Q = Q_{ult} \cdot (1 - e^{-\alpha \rho}) \quad \text{Eq. 35}$$

Onde:

$Q$  = carga aplicada na cabeça da estaca;

$Q_{ult}$  = carga de ruptura;

$\alpha$ : coeficiente que define a forma da curva;

$\rho$ : recalque correspondente à carga aplicada.

Reescrevendo a Equação 35 é obtida a equação de uma reta, representada pela Equação 36:

$$\alpha \cdot p + \ln(1 - Q/Q_{ult}) = 0 \quad \text{Eq. 36}$$

Os valores de  $\alpha$  e  $Q_{ult}$  são constantes obtidas por um processo de tentativas, elaborando gráficos de  $\ln(1 - Q/Q_{ult})$  versus  $p$ . A partir dessas tentativas, o gráfico que mais se aproximar da forma de uma reta indicará o valor de  $Q_{ult}$ , além do coeficiente angular  $\alpha$  da reta.

Davisson (1972), referenciado por Bessa *et al.* (2015), propõe um método de previsão da carga de ruptura da estaca. Neste critério, a carga de ruptura é dependente do diâmetro da estaca e de uma compressão elástica que exceda 4 mm, além do diâmetro dividido por 120, conforme ilustrado na Equação 37 e Figura 17.

$$\rho = \left(4 + \frac{D}{120}\right) + \frac{Q \cdot L}{A \cdot E} \quad \text{Eq. 37}$$

Onde:

$\rho$  = recalque para uma determinada carga;

$D$  = diâmetro da estaca;

$L$  = comprimento da estaca;

$Q$  = carga aplicada;

$E$  = módulo de elasticidade da estaca;

$A$  = área da seção transversal da estaca.

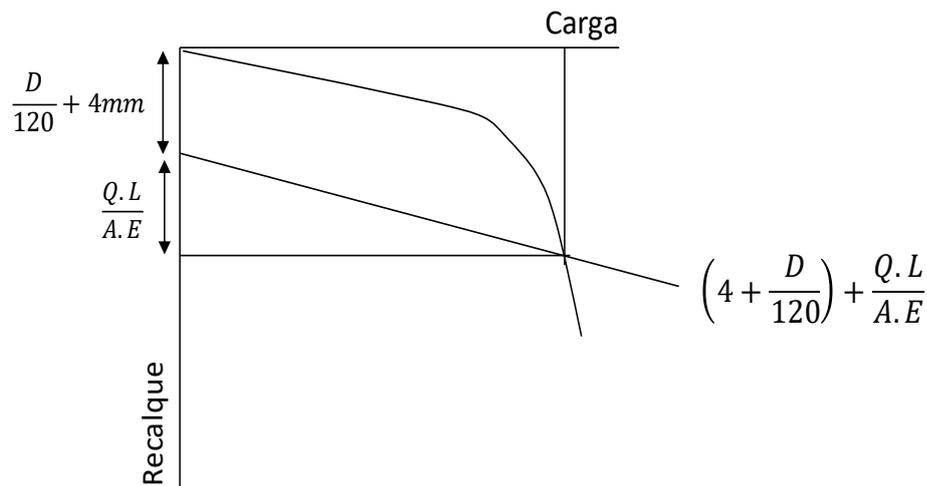


Figura 17 - Método de extrapolação proposto por Davisson (1972).

## 2.6.2 Capacidade de carga de estacas a partir dos métodos semi-empíricos e sapatas

No Brasil, os principais métodos semi-empíricos utilizados para previsão da carga de ruptura são: Aoki e Velloso (1975) e Décourt e Quaresma (1978). Além destes, outros métodos também são utilizados para o mesmo fim, sendo eles: Aoki e Velloso modificado por Laprovitera (1988), Meyerhof (1976) e Teixeira (1996), todos citados por Schulze (2013).

O método de Aoki e Velloso (1975) foi inicialmente desenvolvido a partir de resultados do ensaio de penetração de cone (CPT). Devido ao ensaio de SPT ser amplamente utilizado no Brasil e de baixo custo, o método foi adaptado para este ensaio. A carga de ruptura é obtida por meio da equação 34:

$$R = R_p + R_l = r_p A_p + r_l A_l \quad \text{Eq. 38}$$

Reescrevendo esta Equação, resulta na Equação 35:

$$R = \frac{KN_p}{F_1} + A_p + \frac{P}{F_2} \sum_1 n (\alpha_{Aoki} KN_l \Delta_l) \quad \text{Eq. 38}$$

Onde:

$r_p$  = tensão limite normal no nível da ponta da estaca;

$r_l$  = tensão limite de cisalhamento ao longo do fuste da estaca;

$\alpha_{Aoki}$  = razão de atrito;

$K$  = coeficiente do solo;

$N_p$  = índice de resistência à penetração na cota de apoio da ponta da estaca;

$N_l$  = índice médio de resistência à penetração na camada de espessura  $\Delta_l$ ;

$F_1$  e  $F_2$  = fatores de correção, ajustados a partir de 63 PCE realizadas em diversas regiões do Brasil;

$P$  = perímetro da estaca;

$\Delta_l$  = comprimento de um segmento de estaca.

Nos Quadros 1 e 2 são apresentados os valores de  $K$ ,  $\alpha_{Aoki}$ ,  $F_1$  e  $F_2$ .

Quadro 1 - Parâmetros K e  $\alpha_{Aoki}$  (Cintra e Aoki, 2010).

Tipo de Solo	K (MPa)	$\alpha_{Aoki}$ (%)
Areia	1	1,4
Areia siltosa	0,8	2,0
Areia siltoargilosa	0,7	2,4
Areia argilosa	0,6	3,0
Areia argilossiltosa	0,5	2,8
Silte	0,4	3,0
Silte arenoso	0,55	2,2
Silte arenoargiloso	0,45	2,8
Silte argiloso	0,23	3,4
Silte argiloarenoso	0,25	3,0
Argila	0,2	6,0
Argila arenossiltosa	0,35	2,4
Argila arenossiltosa	0,3	2,8
Argila siltosa	0,22	4,0
Argila siltoarenosa	0,33	3,0

Quadro 2 - Fatores de correção F1 e F2 (Cintra e Aoki, 2010).

Tipo de estaca	F1	F2
Franki	2,5	2F1
Metálica	1,75	2F1
Pré-moldada	$1+(D/0,80)$	2F1
Escavada	3	2F1
Raiz, Hélice Contínua e Ômega	2	2F1

Laprovitera (1988) propôs uma correção nos valores de  $\alpha$  em virtude da confiabilidade da sondagem. Além disto, o autor recomenda outros valores para F1 e F2. Para K, é sugerida a utilização dos valores propostos por Danziger (1982). Os novos valores para o método Aoki e Velloso (1975) são ilustrados nos Quadros 3 e 4.

Quadro 3 - Coeficientes  $K_{Danz}$ ,  $\alpha_{Lap}$  e  $\alpha_{Lap}^*$ .

Tipo de solo	$K_{Danz}$ [MPa]	$\alpha_{Lap}$ [%]	$\alpha_{Lap}^*$ [%]
Areia	0,6	1,4	1,4
Areia siltosa	0,53	1,9	1,9
Areia siltoargilosa	0,53	2,4	2,4
Areia argilossiltosa	0,53	2,8	2,8
Areia argilosa	0,53	3,0	3,0
Silte arenoso	0,48	3,0	3,0
Silte arenoargilos	0,38	3,0	3,0
Silte	0,48	3,0	3,0
Silteargiloarenoso	0,38	3,0	3,0
Silteargiloso	0,3	3,4	3,4
Argila arenosa	0,48	4,0	2,6
Argila arenossiltosa	0,38	4,5	3,0
Argila siltoarenosa	0,38	5,0	3,3
Argila siltosa	0,25	5,5	3,6
Argila	0,25	6,0	4,0

\*valores para situações de sondagem não confiável.

Quadro 4 - Fatores F1 e F2 propostos por Laprovitera.

Tipo de estaca	F1	F2
Franki	2,5	3
Metálica	2,4	3,4
Pré-moldada	2	3,5
Escavada	4,5	4,5

Décourt e Quaresma (1978) criaram um método que utiliza valores dos ensaios SPT ou SPT-T. Tal método foi inicialmente desenvolvido para estacas de deslocamento, contudo, pode ser utilizado para outros tipos de estacas (Décourt, 1998). A equação 39 representa este método:

$$R = A_p \alpha_{Dec} K N_p + (\beta_{Dec} \times 10^{\left(\frac{N_l}{3} + 1\right)} \times P \times L) \quad \text{Eq. 39}$$

Onde:

$K$  = coeficiente característico do solo;

$N_p$  = índice de penetração médio da ponta da estaca, obtido pela média entre o nível da ponta, imediatamente anterior e posterior;

$N_l$  = índice médio de resistência à penetração ao longo do fuste;

$\alpha_{Dec}$  = fator de parcela de ponta, conforme tipo de solo e estaca;

$\beta_{Dec}$  = fator de parcela de atrito lateral, conforme tipo de solo e estaca.

Quadro 5 - Parâmetro K (Décourt, 1978).

Tipo de solo	K (kPa) ao tipo de estaca	
	Deslocamento	Escavada
Argila	120	100
Silte argiloso	200	120
Silte arenoso	250	140
Areia	400	300

Quadro 6 - Fator  $\alpha_{Dec}$  (Décourt, 1996).

Tipo de solo	Tipo de estaca - $\alpha_{Dec}$				
	Escavada em geral	Escavada (bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetada sob altas pressões
Argila	0,85	0,85	0,3	0,85	1
Solo intermediário	0,6	0,6	0,3	0,6	1
Areia	0,5	0,5	0,3	0,5	1

Quadro 7- Fator  $\beta_{Dec}$  (Décourt, 1996).

Tipo de solo	Tipo de estaca - $\beta_{Dec}$				
	Escavada em geral	Escavada (bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetada sob altas pressões
Argila	0,85	0,9	1	1,5	3
Solo intermediário	0,6	0,75	1	1,5	3
Areia	0,5	0,6	1	1,5	3

Devido a frequência no uso dos resultados do ensaio SPT na previsão da carga de ruptura da estaca, Meyerhof (1976), propôs um método a partir do N do SPT. A equação 38 representa o tal método:

$$R = R_p + R_l = mN_p A_p + nN_l A_l L \quad \text{Eq. 38}$$

onde:

$m$  = coeficiente de ponta;

$n$  = coeficiente do fuste;

$N_p$  = N do SPT, na cota da ponta da estaca;

$N_l$  = média dos valores de N, do SPT, ao longo do fuste;

$L$  = comprimento de embutimento da estaca.

Os valores de  $m$  e  $n$  para estacas escavadas são propostos por Fellenius (2006) são 120 kN/m<sup>2</sup> e 1 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Teixeira (1996) criou um método baseado nos estudos de Aoki e Velloso (1975) e Décourt e Quaresma (1978). O autor criou uma equação unificada a partir dos

parâmetros  $\alpha_{Tex}$  e  $\beta_{Tex}$ , ilustrados nos Quadros 8 e 9, para previsão da carga de ruptura, representada pela Equação 39:

$$R = R_p + R_l = \alpha_{Tex} N_p A_p + \beta_{Tex} N_l P L \quad \text{Eq. 39}$$

onde:

$N_p$  = Índice médio de resistência a penetração no intervalo de 4 diâmetros acima da cota de ponta da estaca e até 1 diâmetro abaixo;

$N_l$  = média de resistência à penetração ao longo do fuste;

$\alpha_{Tex}$  = parâmetro em função do tipo de solo e estaca;

$\beta_{Tex}$  = parâmetro em função do tipo da estaca;

$P$  = perímetro do fuste;

$L$  = comprimento da estaca.

Quadro 8 - Parâmetro  $\alpha_{Tex}$  (Teixeira, 1996).

Tipo de solo	Tipo de estaca - $\alpha_{Tex}$ (kPa)			
	Pré-moldada e metálica	Franki	Escavada a céu aberto	Raiz
Argila siltosa	110	100	100	100
Silte argiloso	160	120	110	110
Argila arenosa	210	160	130	140
Silte arenoso	260	210	160	160
Areia argilosa	300	240	200	190
Areia siltosa	360	300	240	220
Areia	400	340	270	260
Areia com pedregulhos	440	380	310	290

Quadro 9 - Parâmetro  $\beta_{Tex}$  (Teixeira, 1996).

Tipo de estaca	$\beta_{Tex}$ (kPa)
Pré-moldada e metálica	4
Franki	5
Escavada a céu aberto	4
Raiz	6

Existem inúmeros métodos para previsão da capacidade de carga da fundação superficial, mas como na pesquisa este fator não se enquadra entre os principais objetos de estudo, será abordado e utilizado apenas o modelo proposto por Skempton e MacDonald (1956), citado por Pezo (2013).

Este critério determina a carga de ruptura por meio de recalque limite, em que para solos arenosos é limitado para 40mm em fundações em sapatas isoladas e no intervalo de 40 a 65mm para radiers.

## 2.7 Fatores que influenciam no comportamento de radier estaqueado

Balakumar (2008) num extenso estudo sobre o comportamento da fundação em radier estaqueado, realizou uma série de ensaios em modelo reduzido 1g em sistemas contendo radier estaqueado. Em sua pesquisa, diversas análises paramétricas foram realizadas a fim de analisar o efeito destas no comportamento mecânico da fundação no que tange rigidez, capacidade de carga e distribuição dos esforços entre radier e estacas.

Balakumar e Ilamparuthi (2008) realizaram um estudo do comportamento da fundação em radier estaqueado em escala reduzida 1g. A pesquisa buscou verificar o efeito do comprimento e diâmetro das estacas, nos recalques da fundação e no coeficiente " $\alpha_{pr}$ ".

Pezo (2013) a fim de analisar o efeito que o número, diâmetro e comprimento de estacas, além da espessura do radier, realizou uma análise paramétrica por meio de análises numéricas.

A calibração do programa numérico utilizado por Pezo (2013) foi realizada por meio de comparação com resultados de provas de carga realizadas por Soares (2011), com parâmetros geotécnicos obtidos por meio de correlação com resultados de SPT.

Para realização da análise paramétrica, Pezo (2013) adotou número de estacas de 4, 9, 16 e 25, para o diâmetro foram adotados 0,3 e 0,5m, para comprimento iguais a 5, 10 e 12m e espessura do radier em 0,5 e 1m.

Como resultados, foi observado que com o aumento do número, diâmetro, comprimento das estacas e espessura do radier, os recalques máximos e diferenciais foram reduzidos. Além disso, quanto maior o comprimento das estacas, menor será a contribuição do radier na distribuição dos esforços, contudo, em grande parte das análises, o elemento superficial suportou mais que 50% do esforço total aplicado na fundação.

Alnuiam *et al.* (2013) citam que devido à complexidade de interação solo-estrutura (estaca-solo, radier-solo, estaca-radier) presente em fundações estruturadas em radier estaqueado, análises numéricas em modelos tridimensionais se fazem necessárias, a fim de obter maior acurácia na análise do comportamento de fundações mistas.

Diante do supracitado, os mesmos realizaram um estudo numérico através do programa PLAXIS 3D *Foundation*, para investigar o efeito que os fatores geométricos espessura e comprimento do radier, além do diâmetro das estacas e seu espaçamento causavam no mecanismo de distribuição dos esforços entre radier e estacas em solo arenoso (*Toyoura sand*).

Para calibração das modelagens numéricas, resultados de testes em centrífuga foram comparados com simulações numéricas, em que os dados de entrada foram sendo ajustados até obtenção de um comportamento carga recalque compatível com resultado de ensaio na centrífuga.

Bourgeois *et al.* (2013) relatam que fundação em radier estaqueado é uma solução na engenharia geotécnica para redução dos recalques da estrutura e/ou aumento da capacidade de carga da fundação em solo mole.

Devido à complexidade de interações existentes entre os elementos de fundação radier e estacas com o solo, os mesmos citam a necessidade de uma análise tridimensional para obter maior exatidão na previsão do comportamento deste tipo de fundação.

Assim, radier isolado e estaqueados com configurações de 3x3, 4x4 e 5x5, com estacas distribuídas uniformemente, mantidas as dimensões do radier, foram simulados numericamente em solo coesivo.

A partir dessas modelagens foi verificada a influência que o número de estacas e seus comprimentos causavam no comportamento mecânico da fundação em radier estaqueado e no valor do coeficiente " $\alpha_{pr}$ " da fundação, proposto por Mandolini (2003).

Cunha e Pando (2013), por meio de análises numéricas no programa APRAFR, realizaram diversas análises paramétricas a fim de verificar o comportamento de sistemas de fundações em radier estaqueado e grupo de estacas. Foi analisada a influência dos parâmetros comprimento, coeficiente de poisson, distribuição dos esforços entre radier e estacas e rigidezes relativa solo-estaca e solo-radier.

Nguyen *et al.* (2014) realizaram um estudo numérico de fundação em radier estaqueado, por meio do PLAXIS 3D, com foco na análise do efeito que o comprimento e número de estacas, além da espessura do radier, ocasionavam no comportamento do sistema de fundação.

A pesquisa buscou verificar se, a instalação de um maior número de estacas sob vigas seria mais econômica que o *design* com instalação de estacas de maneira uniforme. A verificação do programa numérico foi feita através de resultados de ensaios em modelo reduzido em centrífuga, os quais foram realizados pelos próprios autores.

Elwakil e Azzam (2015) verificaram, por meio de análises numéricas no programa PLAXIS 2D, os efeitos que o espaçamento entre as estacas e seus comprimentos causavam no comportamento da fundação em radier estaqueado no que tange distribuição de esforços entre os elementos de fundação (radier e estacas), além dos recalques.

Para verificação do software, foram realizados ensaios em laboratório em escala reduzida. Baseado na comparação entre o resultado dos ensaios experimental e simulações numéricas, os dados de entrada do software foram calibrados para encontrar valores ótimos, a fim de obtenção de curvas carga recalque similares às encontradas nos ensaios de laboratório.

Wulandari e Tjandra (2015) também realizaram simulações numéricas pelo software PLAXIS 2D a fim de verificar o efeito que o comprimento e número de estacas, além da espessura causavam na fundação em radier estaqueado assente em solo argiloso mole.

Alshenawy *et al.* (2016) realizaram uma análise numérica do coeficiente " $\alpha_{pr}$ " do radier estaqueado, assente em solo arenoso, em relação à diversos fatores. Foi verificado o efeito que a alteração do espaçamento entre estacas, granulometria do solo, comprimento das estacas, além da espessura do radier, causavam no referido coeficiente.

Sinha e Hanna (2017) desenvolveram um modelo numérico, baseado no método dos elementos finitos, com objetivo de verificar o desempenho de fundações em radier estaqueado variando diversos parâmetros geométricos do sistema de fundação.

Após verificação do modelo numérico com resultados constantes na literatura, inúmeras simulações numéricas foram realizadas, com objetivo de analisar a influência do espaçamento, comprimento e espessura do radier na performance da fundação em radier estaqueado.

### 2.7.1 Efeito do espaçamento entre estacas

O estudo do efeito do espaçamento entre estacas foi realizado por Balakumar (2008) por meio de ensaios em modelo reduzido 1g. Os ensaios foram realizados em areia medianamente compacta, em que o radier possuía 8mm de espessura, e as estacas 160mm de comprimento.

Foram feitos 4 ensaios, um em radier isolado e outros três em radier estaqueado, com espaçamento entre estacas de 4,0D (25 estacas), 6,0D (9 estacas) e 7,5D (9 estacas), para posteriormente comparar o comportamento mecânico destes sistemas a partir das curvas carga recalque. A Figura 18 apresenta os resultados destes ensaios.

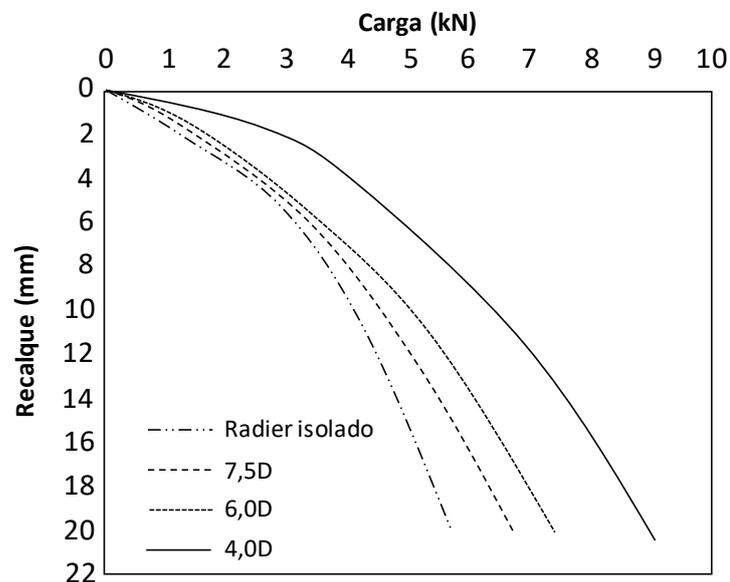


Figura 18 - Efeito do espaçamento entre estacas no comportamento da fundação em radier estaqueado. (modificada). Balakumar (2008).

A partir da Figura 18 pode-se concluir que, embora o número de estacas seja o mesmo para espaçamento de 6,0D e 7,5D; para deslocamentos superiores a 6mm a carga resistida para radier estaqueado com 6,0D é superior ao sistema com espaçamento 7,5D.

Tal comportamento indica que conforme o espaçamento é incrementado, a interação das estacas com o solo é reduzida. Além disso, pode-se concluir que para maiores recalques, o número de estacas não tem grande influência. Esta conclusão pode ser creditada a redução da interação estaca-solo após a mobilização máxima da resistência por atrito, conforme destacado por Balakumar (2008).

Balakumar (2008) também verificou a influência do espaçamento entre estacas na distribuição dos esforços entre radier e estacas a partir do coeficiente " $\alpha_{pr}$ ". Para tal, realizou ensaios com radier contendo espessura de 8mm e 10mm, com relação  $s/d$  variando de 4,0 a 7,5.

O solo por sua vez era constituído por areia medianamente compacta, com as estacas possuindo 160mm de comprimento. Os resultados de tais ensaios são apresentados nas Figuras 19 e 20, ambas para nível de deslocamentos de 2mm e 20mm.

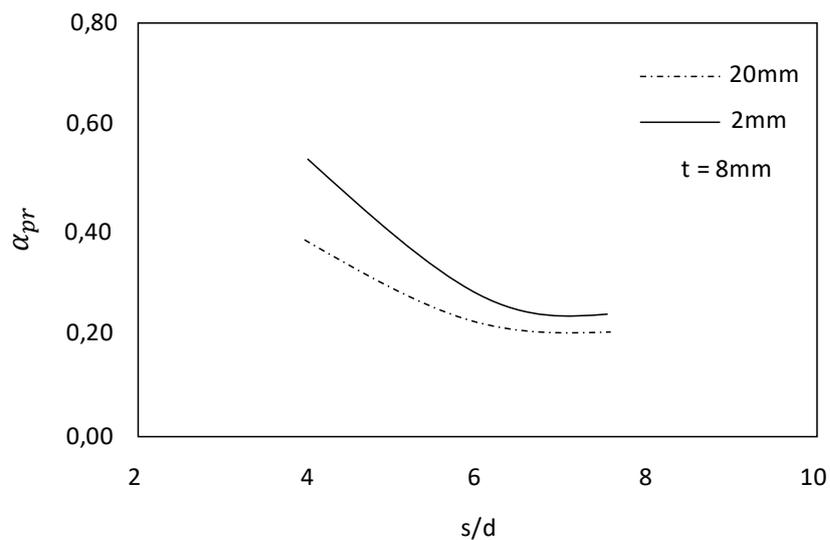


Figura 19 - Efeito do espaçamento entre estacas na distribuição dos esforços entre radier e estacas para espessura de radier de 10mm. (modificada). Balakumar (2008).

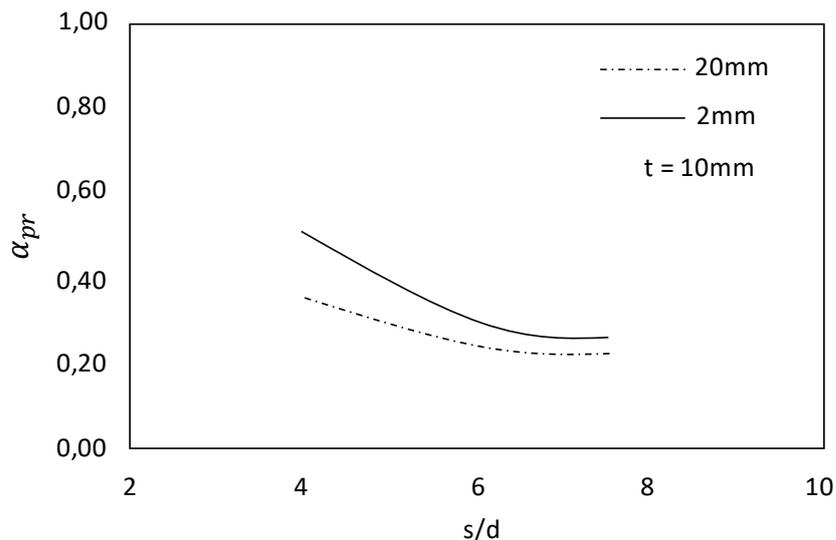


Figura 20 - Efeito do espaçamento entre estacas na distribuição dos esforços entre radier e estacas para espessura de radier de 10mm. (modificada). Balakumar (2008).

Na análise dos resultados apresentados nas Figuras 19 e 20 pode-se inferir que, para a relação  $s/d$  entre 6,0 e 7,5, a variação nos valores do coeficiente " $\alpha_{pr}$ " são menores que para  $s/d$  entre 4,0 e 6,0, tanto para radier com espessura de 8mm como para 10mm.

Além disso, conclui-se que para espaçamentos maiores que 6,0, a interação do radier com a massa de solo tende a se manter constante, de forma que espaçamentos que resultem em maior contribuição do elemento superficial em receber os esforços se enquadram em espaçamentos limite de 6,0.

Através do software PLAXIS 2D, Elwakil e Azzam (2015) verificaram que o aumento do espaçamento entre as estacas reduz significativamente os esforços transferidos para as estacas, como demonstrado na Figura 21.

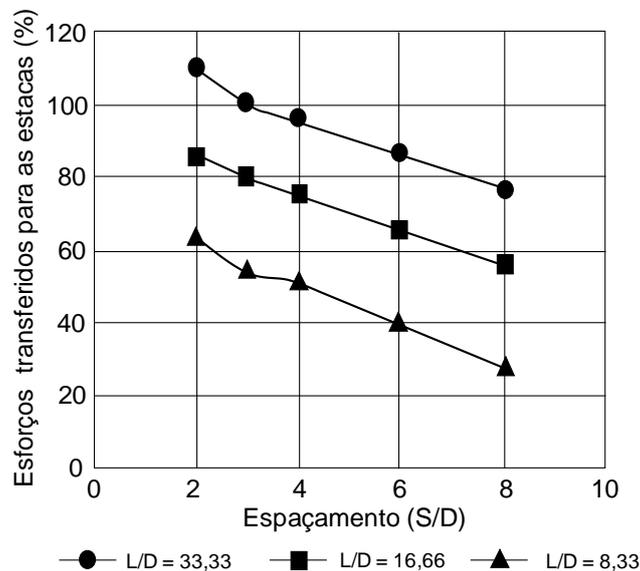


Figura 21 - Efeito do espaçamento entre as estacas no recebimento dos esforços pelas estacas. (modificada). Elwakil e Azzam (2015).

Este comportamento pode ser creditado ao aumento a área de contato do radier com o solo, gerando, conseqüentemente, maior interação radier-solo. Este contexto tende a incrementar os esforços transmitidos para o elemento superficial.

Alshenawy *et al.* (2016) obtiveram resultados similares à Elwakil e Azzam (2015), em que o aumento do espaçamento entre as estacas reduz o valor coeficiente " $\alpha_{pr}$ ", ocasionando assim, maior recebimento de carga por parte do radier, como ilustrado na Figura 22.

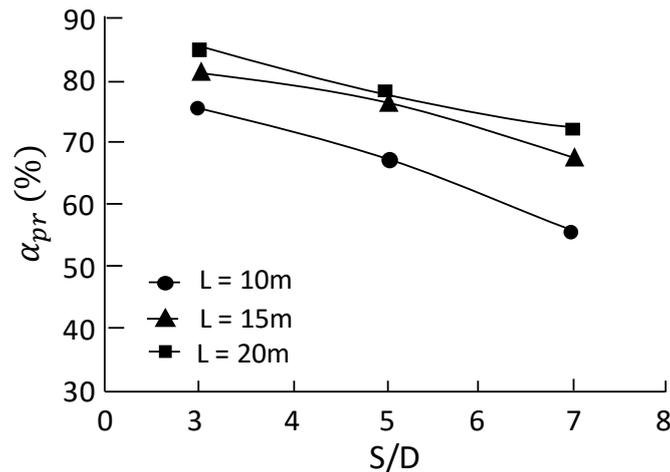


Figura 22 - Efeito do espaçamento entre as estacas no valor de  $\alpha_{pr}$ . (modificada).  
Alshenawy *et al.* (2016)

Poulos (2001) e Mandolini *et al.* (2013), observaram o mesmo comportamento para radiers estaqueados, em que conforme o espaçamento entre estacas aumentava, a carga transferida para o elemento superficial era incrementada.

Balakumar *et al.* (2017) realizaram um estudo do efeito do espaçamento entre estacas nos recalques de uma fundação em radier estaqueado, através de um estudo paramétrico por meio do PLAXIS. O solo de estudo é referente à área “Gold Coast Area”, localizada no litoral da Austrália, composto por camadas de areia compacta a muito compacta até 25m de profundidade, seguido por um material argiloso rijo.

Na análise do efeito do espaçamento entre as estacas, foi modelada uma fundação com radier de 80cm de espessura e estacas de 70cm de diâmetro, com comprimentos de 16m. O espaçamento por sua vez foi variado de 3D a 7D.

Após verificação dos resultados das simulações, foi concluído que para espaçamento 3D a fundação praticamente não sofreu recalques diferenciais. Para espaçamentos de 4D e 5D pequenos recalques diferenciais são observados, com maiores deslocamentos na região central. Por fim, para espaçamentos de 6D e 7D os recalques diferenciais são substanciais.

Assim, Balakumar *et al.* (2017) concluíram que um *design* de fundação em radier estaqueado econômico e com nível de recalques diferenciais aceitáveis se enquadra em espaçamentos de estacas entre 4D e 6D.

### 2.7.2 Efeito do comprimento das estacas

Balakumar (2008) verificou o efeito da variação do comprimento das estacas na distribuição dos esforços entre radier e estaca em termos de " $\alpha_{pr}$ ". Para tanto, foram realizados ensaios em areia fofa e compacta, variando a relação L/B entre 0,6 e 0,8, com a espessura do radier e espaçamento entre estacas fixados em 8mm e 6D, respectivamente. Os resultados, apresentados nas Figuras 23 e 24, são ilustrados para valores de deslocamentos de 2mm e 20mm.

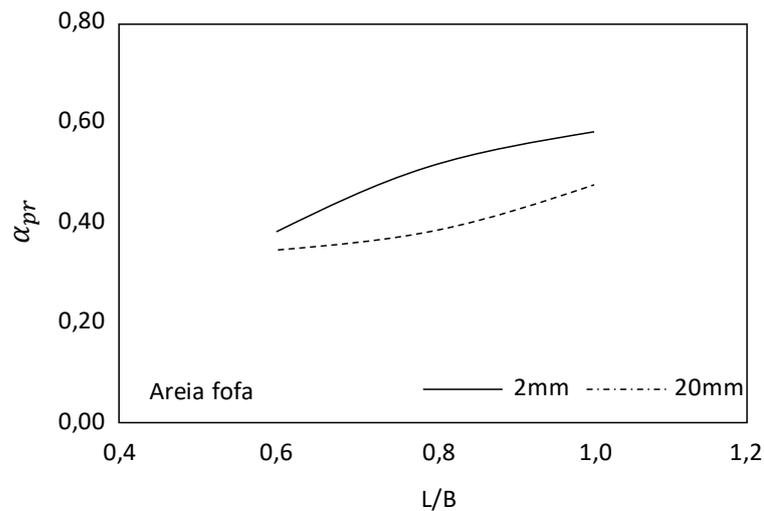


Figura 23 - Efeito da variação do comprimento das estacas no valor de  $\alpha_{pr}$  em areia fofa. (modificada). Balakumar (2008).

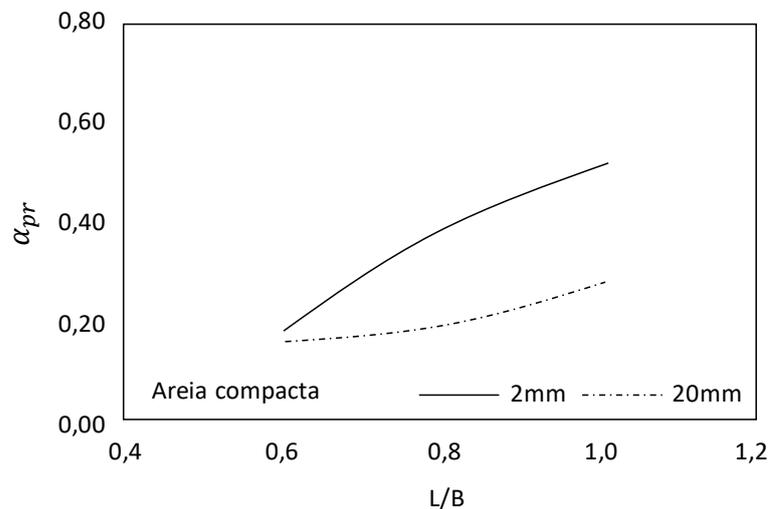


Figura 24 - Efeito da variação do comprimento das estacas no valor de  $\alpha_{pr}$  em areia compacta. (modificada). Balakumar (2008).

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 23 e 24, infere-se que, independentemente da densidade do solo arenoso, os comprimentos das estacas são diretamente proporcionais a " $\alpha_{pr}$ ".

Assim, quanto maior for o comprimento do estaqueamento, maior a proporção de carga resistida pelos elementos profundos da fundação, para qualquer nível de recalque. Contudo, o aumento de " $\alpha_{pr}$ " com o incremento do comprimento das estacas não possuem taxa de aumento proporcional, como destacado por Balakumar (2008).

Balakumar e Ilamparuthi (2008) por meio de um estudo em escala reduzida 1g verificaram a redução dos recalques da fundação com o aumento do comprimento das estacas, através da taxa de redução de recalque  $S_R$ , definida pela Equação 40 a seguir.

$$S_R = (S_r - S_{pr})/S_r \quad \text{Eq. 40}$$

onde:

$S_r$ = recalque no radier;

$S_{pr}$ = recalque no radier estaqueado para a mesma carga aplicada.

A Figura 25 apresenta a variação de os resultados de  $S_R$  para diversos comprimentos, demonstrando que, conforme os comprimentos das estacas aumentam, o valor de  $S_R$  também cresce. Observa-se também uma tendência de linearidade no incremento de  $S_R$  para diferentes níveis de recalques.

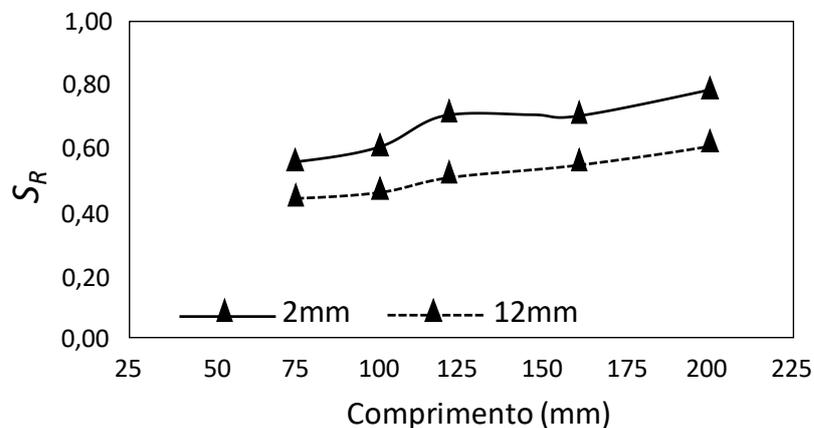


Figura 25 - Variação de  $S_R$  para diferentes comprimentos de estaca. (modificada). Balakumar e Ilamparuthi (2008)

Balakumar e Ilamparuthi (2008) também analisaram o efeito da variação do comprimento das estacas no valor do coeficiente " $\alpha_{pr}$ " da fundação para diferentes níveis de deslocamento. A figura 26 apresenta a distribuição dos esforços entre radier e estacas em termos de " $\alpha_{pr}$ " para os comprimentos de estacas em 100mm, 120mm e 160mm.

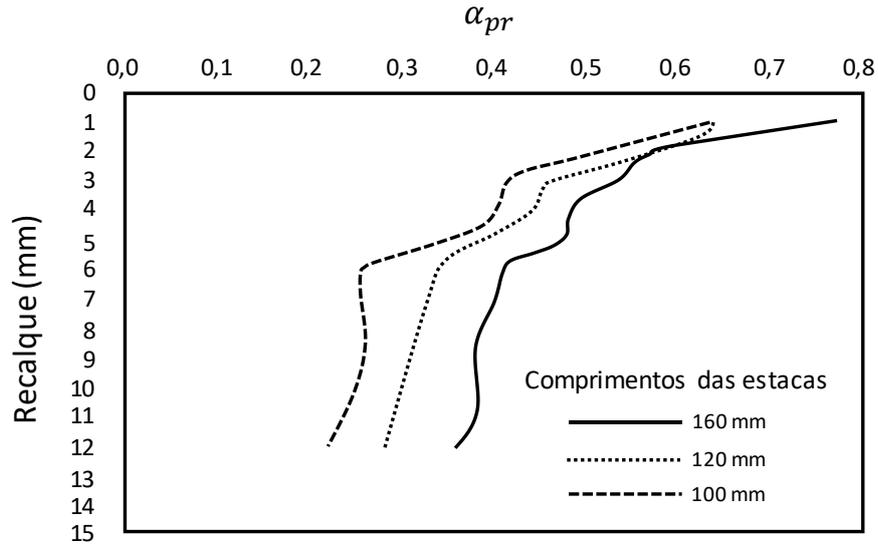


Figura 26 - Variação de  $\alpha_{pr}$  para diversos comprimentos de estacas para diferentes níveis de recalque. (modificada). Balakumar e Ilamparuthi (2008).

A partir da análise da Figura 26 conclui-se que, para baixos níveis de recalque, as estacas suportam maior parte dos carregamentos. Conforme os deslocamentos vão aumentando, os esforços resistidos pelo radier são incrementados.

Além disso, observa-se que quanto maior o comprimento das estacas, maior será os esforços a serem resistidos pelas estacas, e, conseqüentemente, menor participação do radier no recebimento das cargas.

Bourgeois *et al.* (2013) a fim de verificar a influência do comprimento das estacas no valor do coeficiente " $\alpha_{pr}$ ", realizaram simulações numéricas mantendo constante as dimensões do radier e o número de estacas, alterando o comprimento das mesmas entre 8 e 16 metros, com resultados ilustrados na Figura 27.

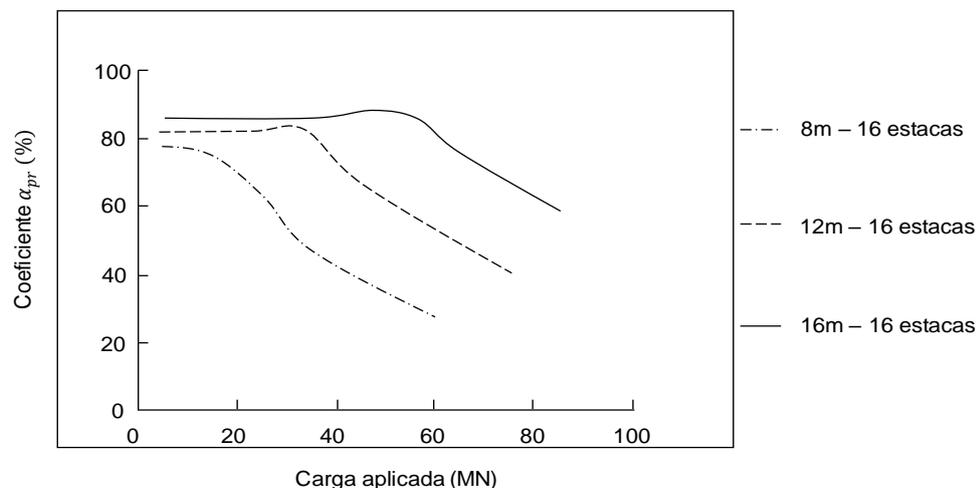


Figura 27 – Efeito do comprimento das estacas no valor do coeficiente  $\alpha_{pr}$ . (modificada). Bourgeois *et al.* (2013).

Na análise da Figura 27, infere-se que quanto maior o comprimento do estaqueamento, maior será a carga a ser aplicada para que o coeficiente " $\alpha_{pr}$ " da fundação reduza, e o radier passa a ter, conseqüentemente, maior interação com o solo.

Para radier estaqueado possuindo estaqueamento com 8 metros de comprimento, o radier começa a ter maior participação no recebimento dos carregamentos com aproximadamente 20MN de carga aplicada. Por outro lado, com radier estaqueado possuindo estacas com 16 metros, o elemento superficial passa a ser mais solicitado somente a partir da aplicação de 60MN de esforço.

Desta forma, o aumento do comprimento das estacas na fundação interfere na distribuição dos esforços entre radier e estacas, em que, conforme o comprimento das estacas aumenta, a magnitude da carga a ser aplicada para incrementar a incidência dos esforços para o radier cresce.

Balakumar *et al.* (2013) num estudo em escala reduzida 1g, verificaram que para qualquer nível de recalque, a carga resistida por sistemas em radier estaqueado com variados comprimentos de estaca é superior ao radier isolado. Além disso, concluiu-se que conforme os comprimentos das estacas são incrementados, a capacidade de carga do sistema de fundação aumenta.

De acordo com a pesquisa realizada por Nguyen *et al.* (2014), o incremento no comprimento das estacas resulta na minimização dos recalques totais e diferenciais, contudo, não há redução nos momentos gerados no radier. Além disto, existe um valor limite para que, maiores comprimentos que este, resulte num benefício pouco substancial na redução dos recalques.

Segundo os autores, o incremento do comprimento no estaqueamento seria uma alternativa coerente apenas para regiões que ocasionem elevados recalques, visto que, o aumento do comprimento de todas as estacas pode ser economicamente inviável, solução esta denominada "*Differential settlement Control*", conforme Randolph (1994).

Cunha e Panda (2013) analisaram o efeito do comprimento em termos da relação  $L/d$ , no valor de recalque normalizado  $I_\alpha$ , representado pela Equação 41. Esta influência foi estudada tanto para fundação em radier estaqueado e na metodologia tradicional de grupo de estacas.

$$I_{\alpha} = \frac{E_s d u_{\alpha}}{q_{\alpha} B^2} \quad \text{Eq. 41}$$

onde:

$I_{\alpha}$  = recalque normalizado na direção vertical ( $I_v$ ) ou horizontal ( $I_H$ );

$u_{\alpha}$  = recalque no centro do radier;

$q_{\alpha}$  = tensão distribuída no radier.

A Figura 28 apresenta os resultados das simulações numéricas para variações do coeficiente de poisson entre 0,1 e 0,5.

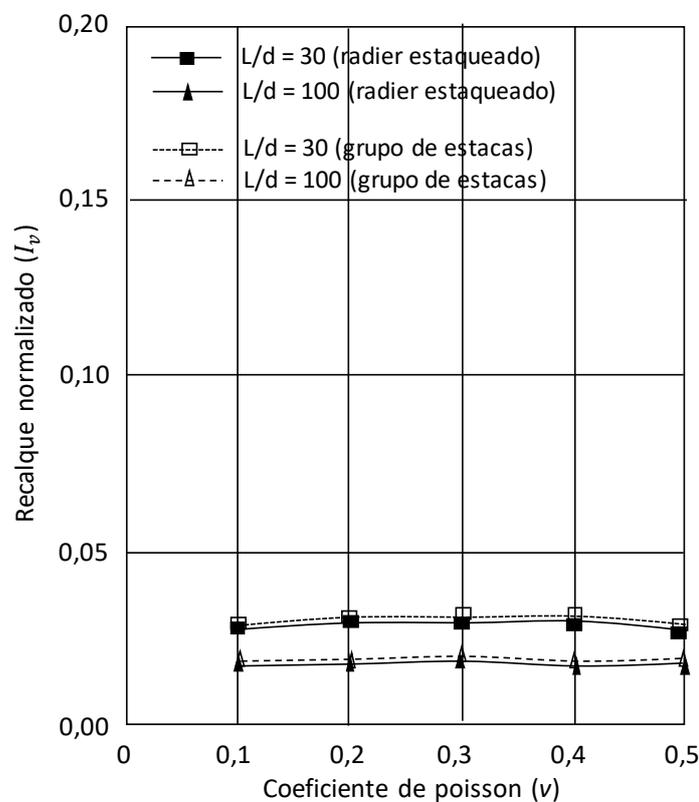


Figura 28 - Efeito do comprimento das estacas no recalque normalizado  $I_v$ , em termos de coeficiente de poisson para radier estaqueado e grupo de estacas. (modificada). Cunha e Pando (2013).

Observa-se, a partir da análise dos resultados apresentados na Figura 28, que a fundação em radier estaqueado não apresenta vantagens em comparação ao sistema em grupo de estacas em termos de redução de recalque vertical normalizado. Além disso, conclui-se que o coeficiente de poisson possui pouca influência no comportamento mecânico para ambos os sistemas de fundações.

Cunha e Pando (2013) também verificaram a influência do comprimento das estacas no comportamento da fundação em radier estaqueado, em termos de carga resistida pelas estacas, para diversos valores de coeficiente de poisson. Os resultados desta verificação são apresentados na Figura 22.

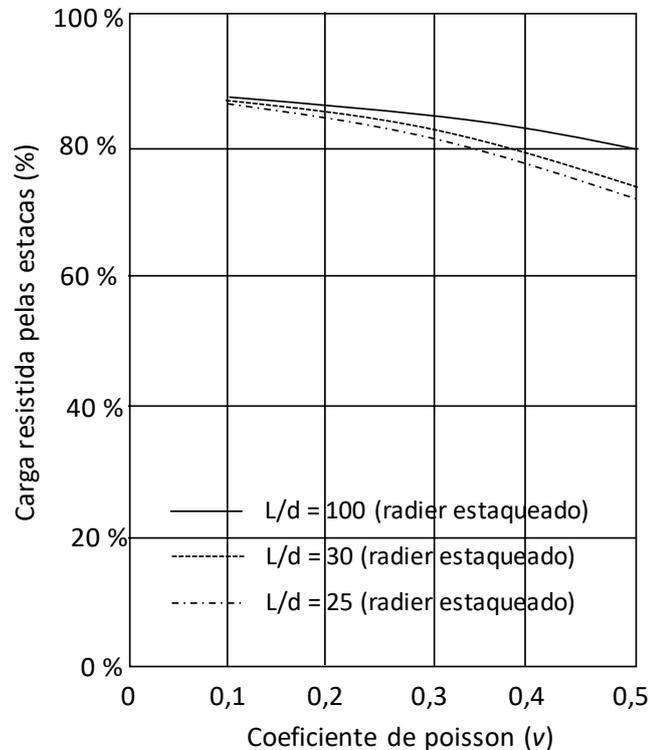


Figura 29 - Efeito do comprimento das estacas na porcentagem de carga resistida pelas estacas, para variados valores de coeficiente de poisson. (modificada). Cunha e Pando (2013).

Conclui-se, a partir da análise dos resultados da Figura 29, que para diversos comprimentos de estacas, a variação do coeficiente de poisson possui pouca influência na porcentagem de carga resistida pelas estacas na fundação em radier estaqueado. Observa-se também que para elevados valores de  $L/d$ , a porcentagem de carga resistida pelas estacas é maior.

Cunha e Pando (2013) também analisaram o efeito da variação do comprimento em termos de  $L/d$ , para diversas faixas de valores de rigidezes relativas  $K_{ps}$  (rigidez relativa estaca-solo) e  $K_{rs}$  (rigidez relativa radier-solo), para sistemas em radier estaqueado. Nas Figuras 30 e 31 são apresentados os resultados das simulações numéricas para estas verificações.

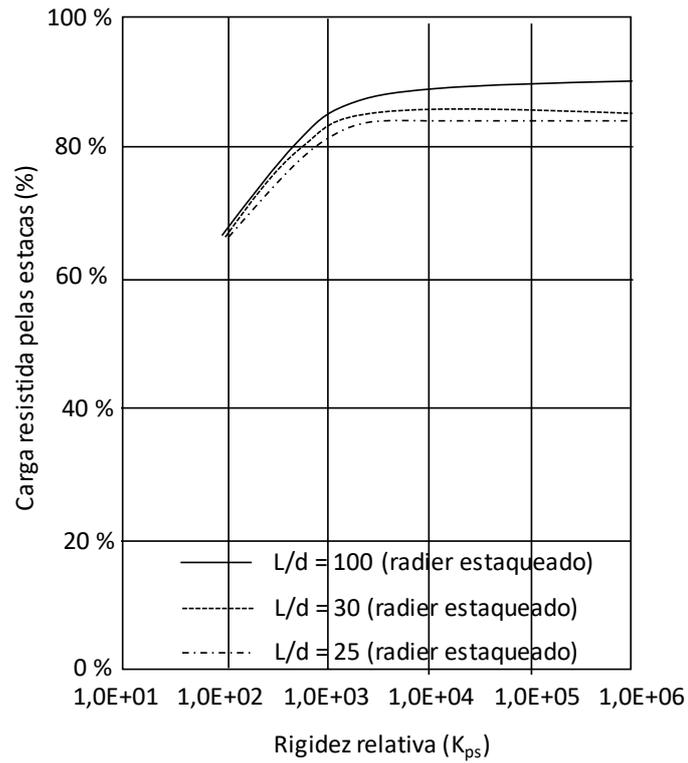


Figura 30 - Efeito do comprimento das estacas na distribuição dos esforços para as estacas com variação da rigidez relativa  $K_{ps}$ . (modificada). Cunha e Pando (2013).

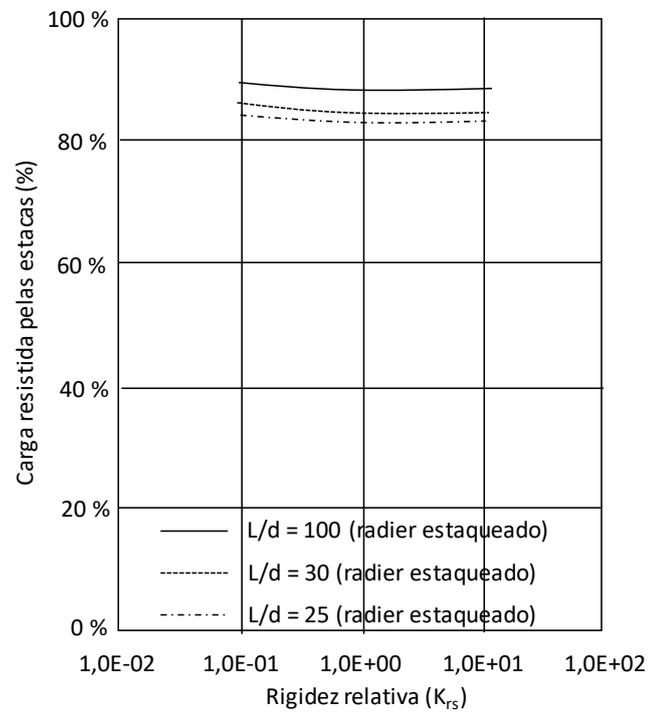


Figura 31 - Efeito do comprimento das estacas na distribuição dos esforços para as estacas com variação da rigidez relativa  $K_{rs}$ . (modificada). Cunha e Pando (2013).

A partir da análise das Figuras 30 e 31 pode-se notar que a rigidez relativa estaca-solo ( $K_{ps}$ ) possui maior influência que a rigidez radier-solo ( $K_{rs}$ ) na distribuição dos esforços para as estacas, conforme a relação  $L/d$  é incrementada. Além disso, observa-se que mesmo com o aumento da relação  $L/d$  e rigidez radier-solo ( $K_{rs}$ ), a carga resistida pelas estacas tende a se manter constante.

Quanto ao efeito do comprimento das estacas nos recalques da fundação estruturada em radier estaqueado, Elwakil e Azzam (2015) observaram, após análises de simulações numéricas, que seu incremento ocasiona na redução dos deslocamentos verticais com o aumento da rigidez relativa estaca-solo, como ilustrado na Figura 32.

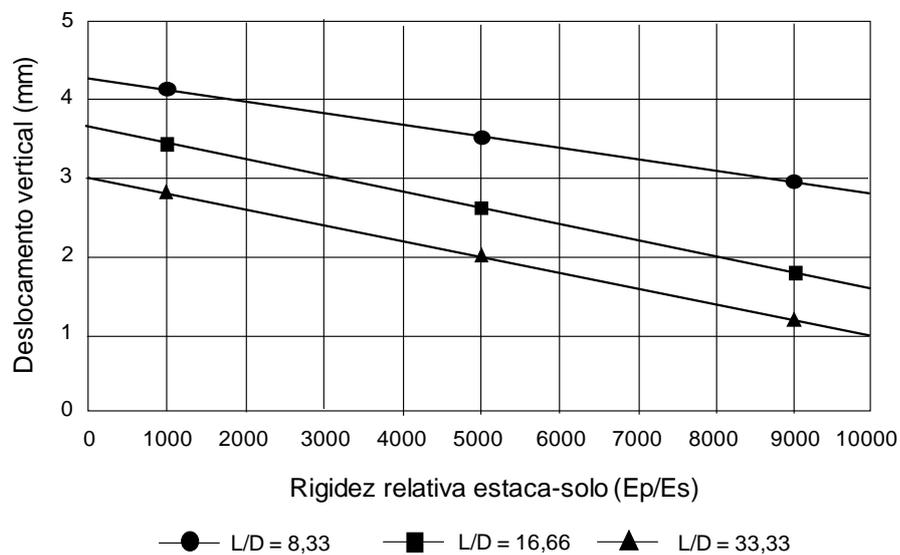


Figura 32 - Efeito do comprimento das estacas e rigidez relativa estaca-solo nos deslocamentos verticais. (modificada). Elwakil e Azzam (2015).

Ainda segundo os mesmos autores, conforme o comprimento das estacas é incrementado em conjunto com a rigidez relativa estaca-solo ( $E_p/E_s$ ), a porcentagem de esforços transferidos da estrutura para as estacas aumenta, como demonstrado na Figura 33.

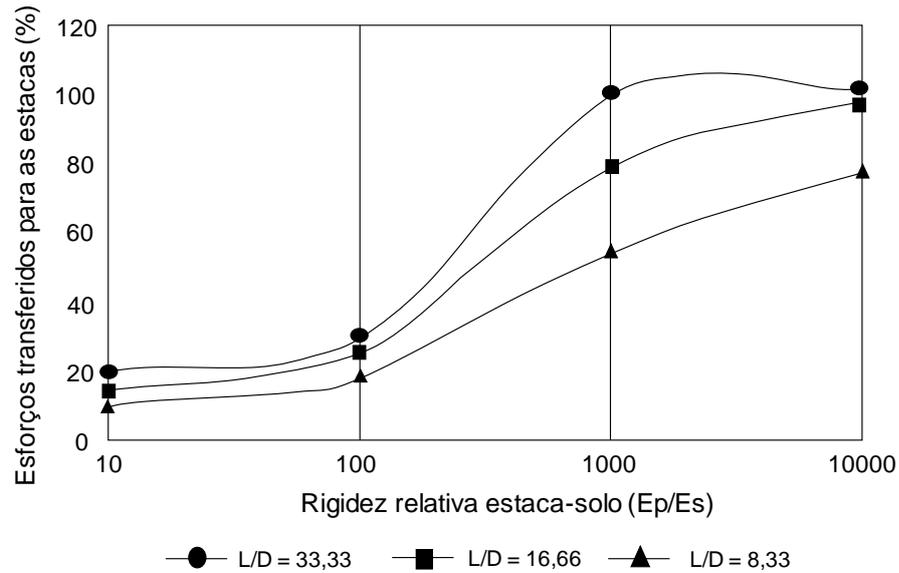


Figura 33 - Efeito do comprimento das estacas e rigidez relativa estaca-solo na transferência dos esforços. (modificada). Elwakil e Azzam (2015).

Wulandari e Tjandra (2015) verificaram que o aumento do comprimento das estacas resulta na redução dos recalques no radier. Contudo, existe um limite de comprimento de estaca que resulte na redução dos recalques e que, comprimentos além deste limite não ocasiona reduções significativas nos deslocamentos da fundação, como ilustrado na Figura 34.

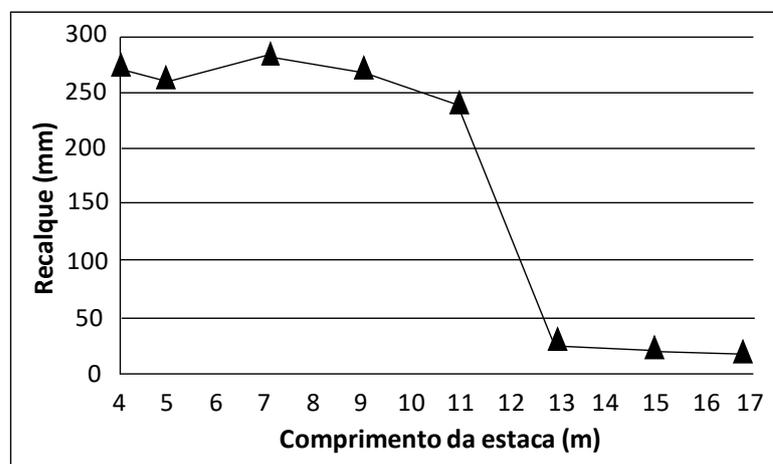


Figura 34 - Efeito do comprimento das estacas na redução do recalque no centro do radier. Wulandari e Tjandra (2015).

Alshenawy *et al.* (2016) observaram uma relação diretamente proporcional do incremento do comprimento das estacas com o valor de " $\alpha_{pr}$ ", ratificando os resultados de Balakumar (2008), como ilustrado na Figura 35.

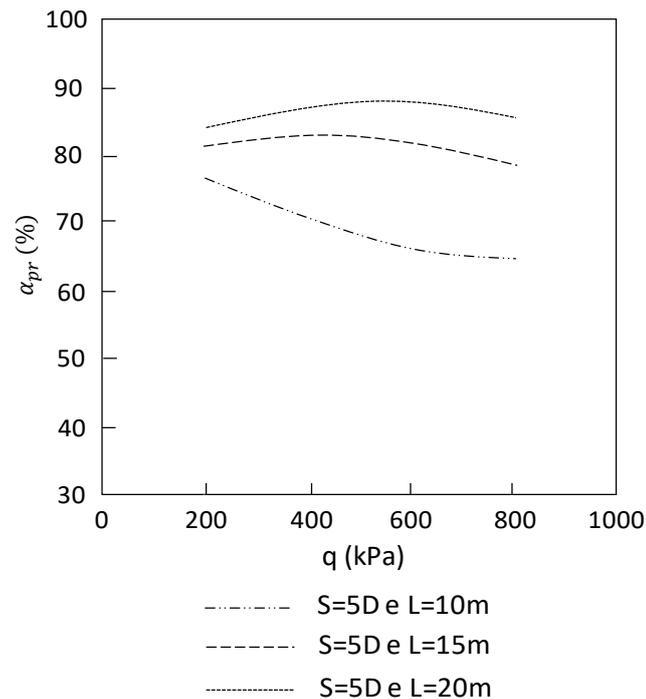


Figura 35 – Efeito do comprimento das estacas em solo arenoso no valor de  $\alpha_{pr}$ . (modificada). Alshenawy *et al.* (2016).

Para análises em areia densa, observa-se o mesmo comportamento. Contudo, a taxa de aumento do coeficiente " $\alpha_{pr}$ " não é linear para variações no espaçamento relativo das estacas, como ilustrado na Figura 36.

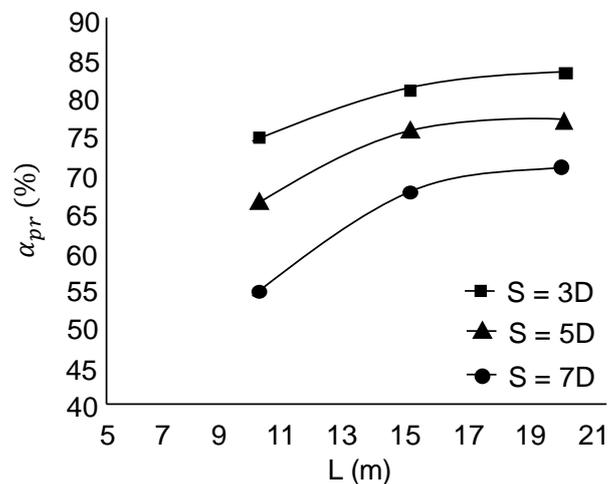


Figura 36 – Efeito do comprimento das estacas em areia densa no valor de  $\alpha_{pr}$  para diferentes espaçamentos entre estacas. (modificada). Alshenawy *et al.* (2016).

Estes resultados de Alshenawy *et al.* (2016), corroboram com análises paramétricas de Balakumar e Ilamparuthi (2006) e Balakumar (2008), em que quanto maior o comprimento das estacas, maior será o valor de " $\alpha_{pr}$ ", e, conseqüentemente, maior parcela dos esforços serão resistidos pelas estacas.

Após a realização de simulações numéricas com estacas possuindo comprimentos de 5, 10 e 15m, Sinha e Hanna (2017) verificaram que o incremento desta geometria aumentou da capacidade de carga da fundação em radier estaqueado, como demonstrado na Figura 37.

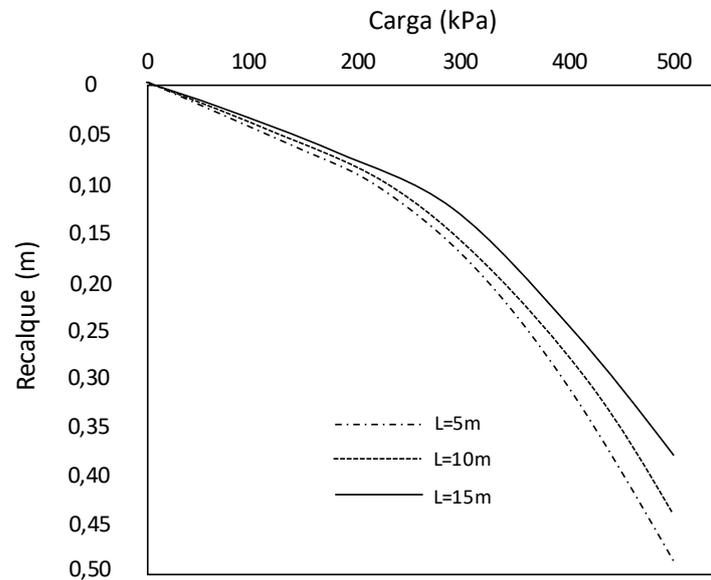


Figura 37 – Influência do comprimento das estacas no desempenho do sistema de fundação. (modificada). Sinha e Hanna (2017).

### 2.7.3 Efeito do diâmetro das estacas

Um dos fatores de grande influência no comportamento mecânico de fundações é o diâmetro das estacas. Balakumar (2008) estudou este efeito em fundações em radier estaqueado em modelo reduzido 1g, com modelagens realizadas em solo arenoso.

Em seus ensaios, o radier possuía 8mm de espessura, com a fundação possuindo 21 estacas com 160mm de comprimento. Os diâmetros por sua vez, variaram de 6mm até 10mm. Na Figura 38 são apresentadas as curvas carga recalque destas configurações de fundações.

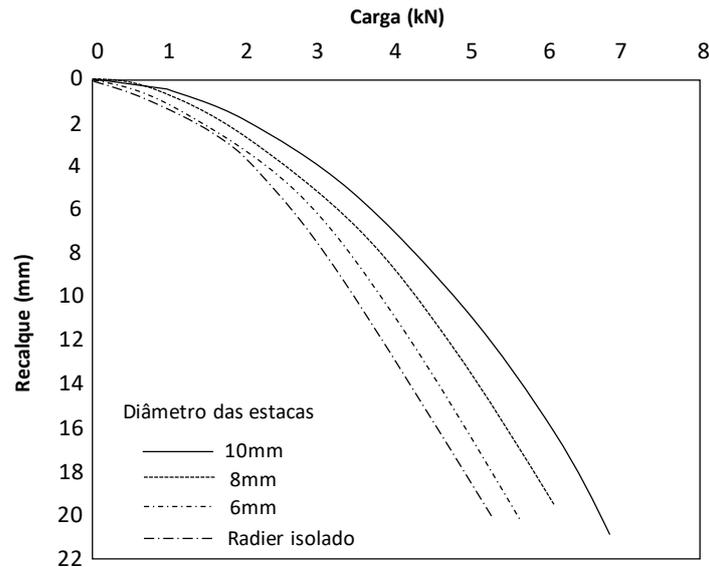


Figura 38 - Comportamento de fundações em radier estaqueado com variados diâmetros de estacas. (modificada). Balakumar (2008).

A partir da análise da Figura 38 conclui-se que, quanto maior diâmetro das estacas maior será a capacidade de carga do sistema de fundação. Além disso, é observado que para pequenos diâmetros das estacas na configuração de radier estaqueado, o sistema se comporta de forma similar à fundação em radier isolado. Isto indica que radiers estaqueados com estacas de pequenos diâmetros perdem sua rigidez de forma mais acelerada que para maiores diâmetros.

Balakumar (2008) também verificou a influência do diâmetro das estacas no comportamento da fundação em radier estaqueado em termos de " $\alpha_{pr}$ " em solo arenoso medianamente compacto.

Nesta análise, foram variados os diâmetros das estacas entre 6mm e 100m, com comprimentos fixados em 160mm em todos os ensaios. O radier por sua vez, possuía espessura de 8mm. A partir desta verificação foi concluído que para pequenos níveis de deslocamentos as estacas tendem a resistir mais esforços. Contudo, conforme os recalques aumentam, a porcentagem de carga resistida pelo radier aumenta. Tais resultados são ilustrados na Figura 39.

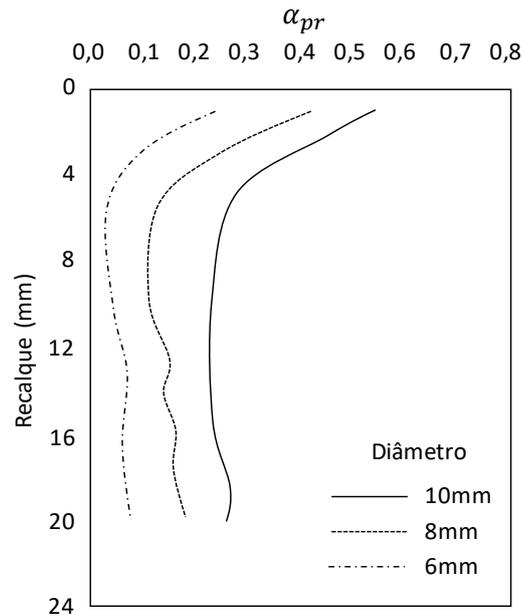


Figura 39 - Variação do valor de  $\alpha_{pr}$  para diferentes diâmetros de estacas na fundação em radier estaqueado (modificada). Balakumar (2008).

Balakumar e Ilamparuthi (2008) verificaram, a partir de escala reduzida 1g, o efeito deste parâmetro nos recalques da fundação em termos de taxa de redução de recalque  $S_R$ . Para tanto, foi analisada a variação de  $S_R$  para os valores de recalques de 2mm e 12mm, com estacas compostas por diâmetros de 6mm, 8mm e 10mm. Os resultados destas configurações são apresentados na Figura 40.

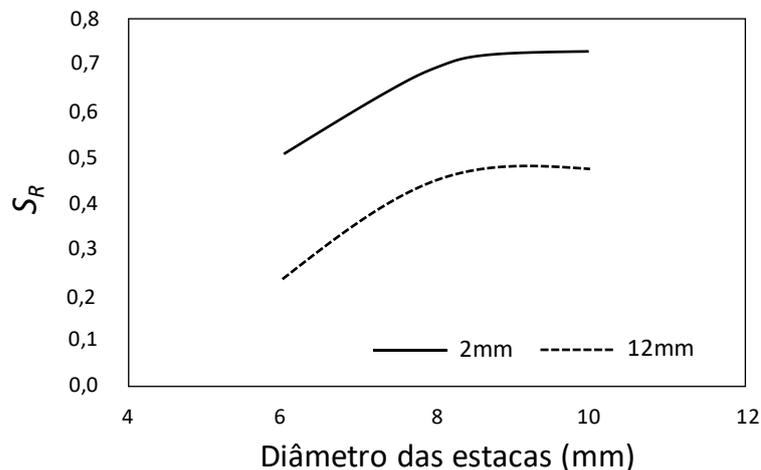


Figura 40 - Variação de  $S_R$  para diversos diâmetros de estacas. (modificada). Balakumar e Ilamparuthi (2008)

Ao analisar os resultados apresentados na Figura 40, é notada uma relação diretamente proporcional entre o diâmetro das estacas e o valor de  $S_R$  para diferentes níveis de recalque.

Para verificar o efeito do diâmetro das estacas na fundação em radier estaqueado, Alnuiam *et al.* (2013) realizaram simulações numéricas em fundações com radiers contendo 7.2m de comprimento e estacas com espaçamento S/D:4, variando os diâmetros das estacas entre 30cm e 90cm.

Os resultados das simulações, ilustrados na Figura 41, demonstram que a porcentagem de carga transferida para as estacas aumenta de 18% para 33% conforme o diâmetro das mesmas aumenta de 30cm para 90cm. Além disto, após ocorrência de aproximadamente 30% dos recalques totais da estrutura, a variação na distribuição dos esforços tende a estabilizar.

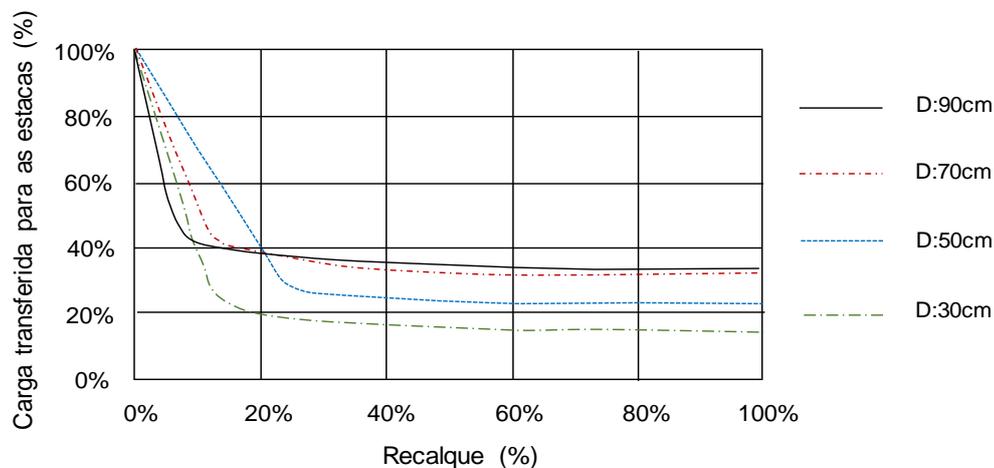


Figura 41 – Efeito do diâmetro das estacas na distribuição dos esforços para as estacas com S/D:4. (modificada). Alnuiam *et al.* (2013).

A partir desta análise infere-se que o aumento do diâmetro das estacas aumenta a rigidez do sistema por conta da maior resistência das estacas, reduzindo desta forma a distribuição dos esforços para o radier. Tal comportamento corrobora com resultados de Balakumar (2008), anteriormente apresentados.

Esta tendência de maior transferência de esforços para as estacas conforme seus diâmetros são incrementados também ratifica os resultados de análises paramétricas realizadas por Balakumar e Ilamparuthi (2006), os quais são apresentados na Figura 42.

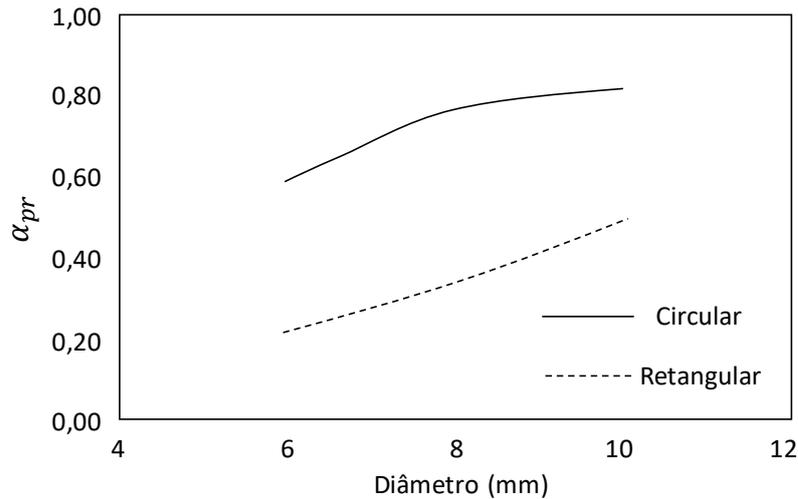


Figura 42 - Efeito do diâmetro das estacas no coeficiente  $\alpha_{pr}$  para radier estaqueado com radier circular e retangular. (modificada). Balakumar e Ilamparuthi (2006).

A partir da análise da Figura 42 observa-se que tanto para radier circular quanto para retangular, ao passo que o se incrementa o diâmetro das estacas, maior o valor de “ $\alpha_{pr}$ ”. Assim, menor será a contribuição do radier em resistir os esforços aplicados na fundação.

#### 2.7.4 Efeito do número de estacas

Bourgeois *et al.* (2013) demonstram que o aumento do número de estacas resulta na redução dos recalques e aumento da capacidade de carga do sistema de fundação em radier estaqueado, como ilustrado nas Figura 43, 44 e 45.

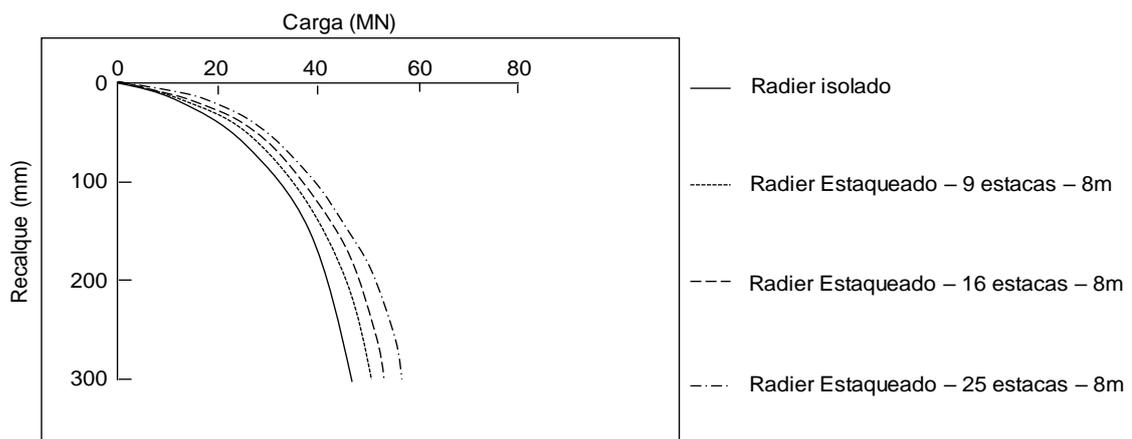


Figura 43 – Efeito do número de estacas para estacas com 8 metros. (modificada). Bourgeois *et al.* (2013).

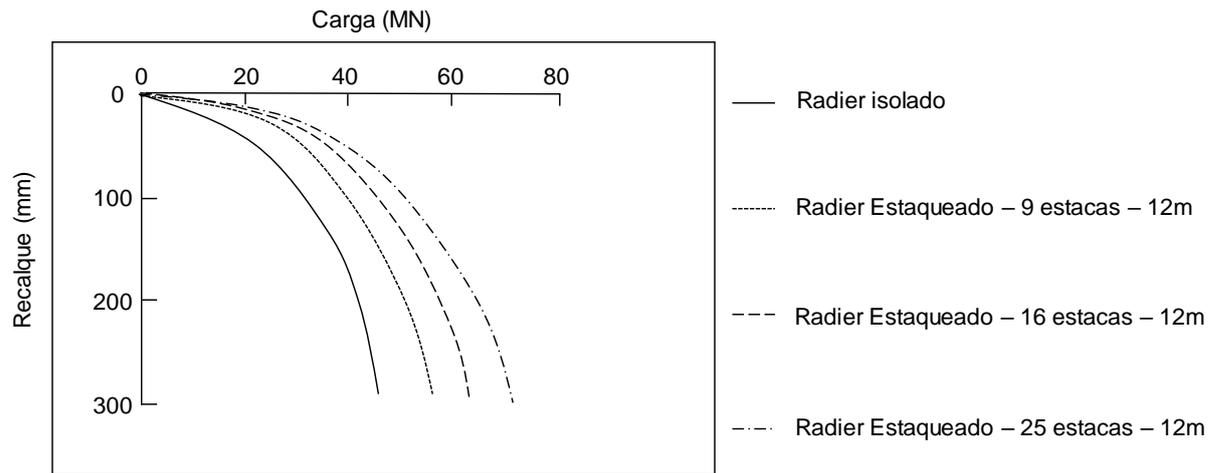


Figura 44 – Efeito do número de estacas para estacas com 12 metros. (modificada).  
Bourgeois *et al.* (2013).

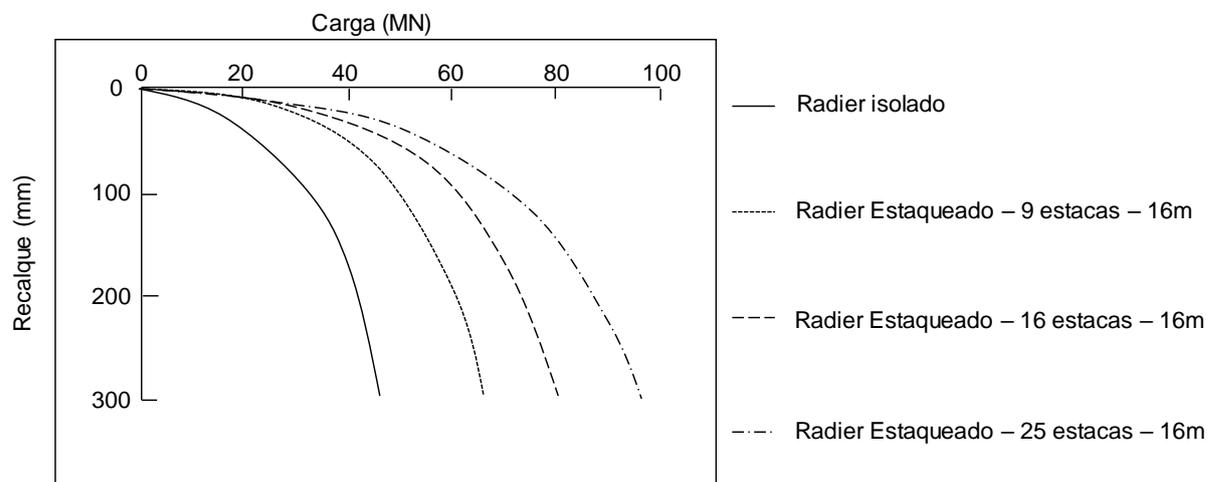


Figura 45 – Efeito do número de estacas para estacas com 16 metros. (modificada).  
Bourgeois *et al.* (2013).

Outro fator observado a partir destas figuras foi que, o aumento da rigidez inicial do radier estaqueado em relação ao radier isolado é maior para estacas com maiores comprimentos, com valores apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Aumento da rigidez inicial do radier estaqueado em relação ao radier isolado.  
Bourgeois *et al.* (2013)

	9 estacas	16 estacas	25 estacas
8m	46%	56%	62%
12m	88%	105%	116%
16m	141%	176%	205%

Contudo, este incremento de rigidez não é linear em função do número de estacas, o que demonstra existir um limite o qual o aumento de número de estacas resultaria em baixa eficiência para reduzir recalques, tornando uma alternativa economicamente inviável.

Além disto, é observado maiores incrementos de capacidade de suporte com aumento do número de estacas para estaqueamentos contendo maiores comprimentos.

Bourgeois *et al.* (2013) também verificaram a influência do número de estacas na distribuição dos esforços entre radier e estacas. Para isto, realizaram simulações numéricas alterando entre 9 e 25 o número de estacas na fundação, mantendo fixo o comprimento do estaqueamento e dimensões do radier, com resultados ilustrados na Figura 46.

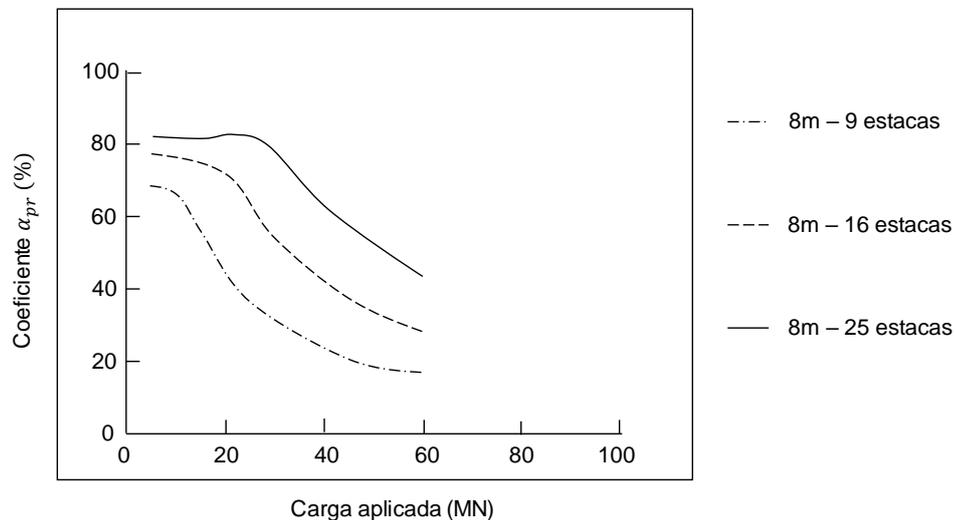


Figura 46 – Influência do número de estacas na distribuição dos esforços entre radier e estacas para estacas com 8 metros. (modificada). Bourgeois *et al.* (2013).

Como conclusão, pode se constatar que o aumento do número de estacas resulta numa menor participação do radier no recebimento dos esforços para um mesmo nível de carga aplicada.

Desta forma, faz-se necessária a verificação da magnitude de esforços a serem aplicados no sistema de fundação em função do número de estacas, posto que, caso o *design* do radier estaqueado seja voltado para grande participação do radier no recebimento dos esforços, o elevado número de estacas reduziria a interação do radier com a massa de solo, não satisfazendo o critério de projeto proposto.

Garhy *et al.* (2013) realizaram um estudo experimental em modelo reduzido de fundação em radier estaqueado. Na pesquisa foi concluído que para diversas configurações de fundação, o incremento de estacas sob o radier aumentava a capacidade de carga do sistema, além de reduzir os recalques. A Figura 47 ilustra um dos resultados típicos obtidos pelos autores.

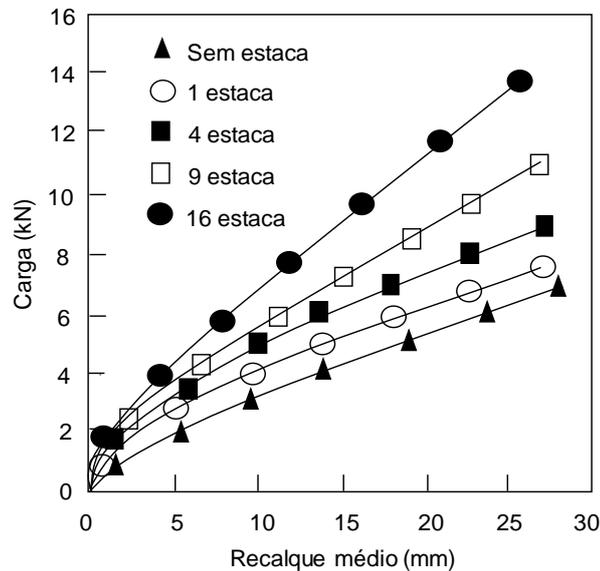


Figura 47 – Curva carga x recalque para diversas configurações de fundação. (modificada). (Garhy *et al.* 2013).

Nguyen *et al.* (2014) citam ser uma prática comum aumentar o número de estacas visando a redução dos recalques totais e diferenciais. Assim, para analisar o efeito do número de estacas no comportamento do sistema de fundação, seis simulações numéricas foram realizadas, sendo 3 delas com estacas arranjadas de forma uniforme, com 16, 25 e 36 estacas. As três restantes possuíam o mesmo número de estacas, mas, com arranjo com estacas concentradas sob regiões que contêm pilares.

Os resultados das simulações demonstraram uma tendência de redução dos recalques conforme incrementa o número de estacas, como esperado. Contudo, a eficiência na redução dos recalques com o aumento do número de estacas é relativamente baixa, como observado por Bourgeois *et al.* (2013).

Os resultados demonstraram que, para um aumento no número de estacas de 16 para 36, a redução dos recalques é de aproximadamente 30% para o sistema com arranjo de estacas uniformes; e, 10% para o arranjo com estacas concentradas sob os pilares.

Desta forma, mesmo sendo uma opção positiva no que tange redução de recalques, a alternativa de aumentar o número de estacas pode não ser viável em termos econômicos. Medidas como aumentar o espaçamento das estacas, comprimento das mesmas ou espessura do radier podem ser mais adequadas.

Wulandari e Tjandra (2015) observaram, através de análises numéricas, que o aumento do número de estacas é vantajoso visto que as estacas servem como elementos redutores de recalque. Todavia, o aumento do número de estacas é eficiente em minimizar os deslocamentos até certo ponto, em que, ao adicionar estacas além deste limite não proporcionaria reduções significantes nos recalques da fundação, como demonstrado na Figura 48.

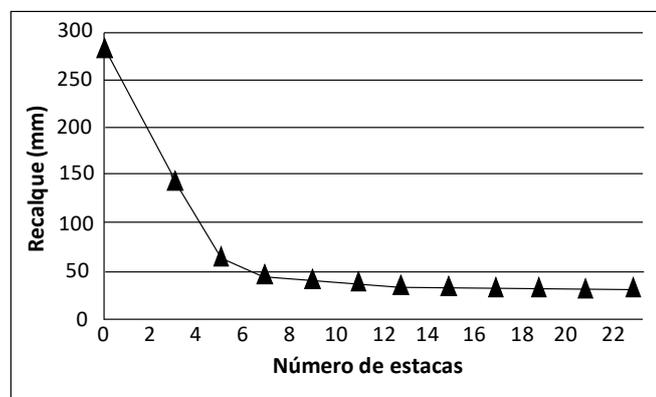


Figura 48 - Efeito do número de estacas na redução do recalque da fundação. (modificada). Wulandari e Tjandra (2015).

### 2.7.5 Efeito da espessura do radier

Para averiguar a influência da espessura do radier no comportamento da fundação em radier estaqueado, Balakumar (2008) realizou duas verificações com diâmetros diferentes das estacas. Foram utilizados os diâmetros de 6mm e 10mm para as estacas, possuindo comprimento de 160mm em ambas as análises.

A partir da análise das curvas carga recalque com radiers possuindo espessura de 6mm, 8mm e 10mm, observou-se que tanto para sistemas possuindo estacas de 6mm como para 10mm, a influência da espessura do elemento superficial é pouco substancial.

Contudo, como destacado por Balakumar (2008), ensaios com mais variações da espessura do radier são recomendadas, para desta forma verificar de forma mais precisa o efeito desta geometria no comportamento da fundação em radier estaqueado.

Alnuiam *et al.* (2013) relatam que radiers flexíveis tendem a deformar mais que radiers rígidos, e que a maior deformação verificada nos radiers flexíveis resultam no incremento de esforços transmitidos para o elemento superficial. Como forma de verificar a flexibilidade do radier, Brown (1969), citado por Alnuiam *et al.* (2013), propôs a Equação 42, em termos de espessura do radier e espaçamento entre estacas.

$$K_f = \left(\frac{E_f}{E_s}\right)\left(\frac{2t}{s}\right)^3 \quad \text{Eq. 42}$$

Sendo  $E_f$ = módulo de elasticidade do radier,  $E_s$ = média do módulo de elasticidade do solo,  $t$ = espessura do radier e  $s$ = espaçamento entre estacas. As condições de flexibilidade do radier possuem os seguintes critérios:

- i. Perfeitamente rígido se  $K_f > 10$ ;
- ii. Flexibilidade intermediária se  $0.01 < K_f < 10$ ;
- iii. Perfeitamente flexível se  $K_f < 0.01$ .

Como forma de verificar a influência da espessura do radier na distribuição dos esforços entre estacas e radier, fundações com dois diferentes espaçamentos entre estacas foram simuladas, variando a espessura do radier em ambos os casos, como demonstrados nas Figuras 49 e 50.

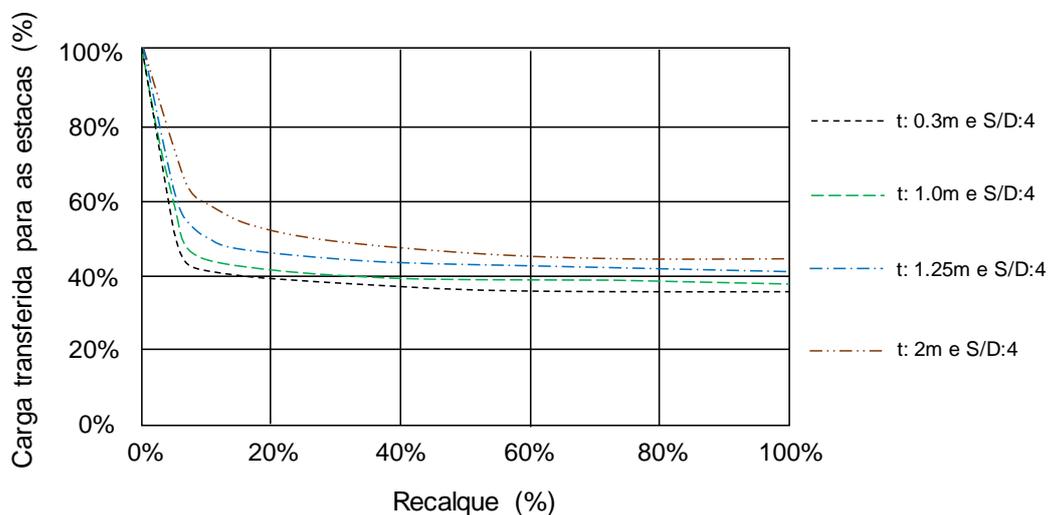


Figura 49 – Efeito da espessura do radier na distribuição dos esforços para as estacas com S/D:4. (modificada). Alnuiam *et al.* (2013).

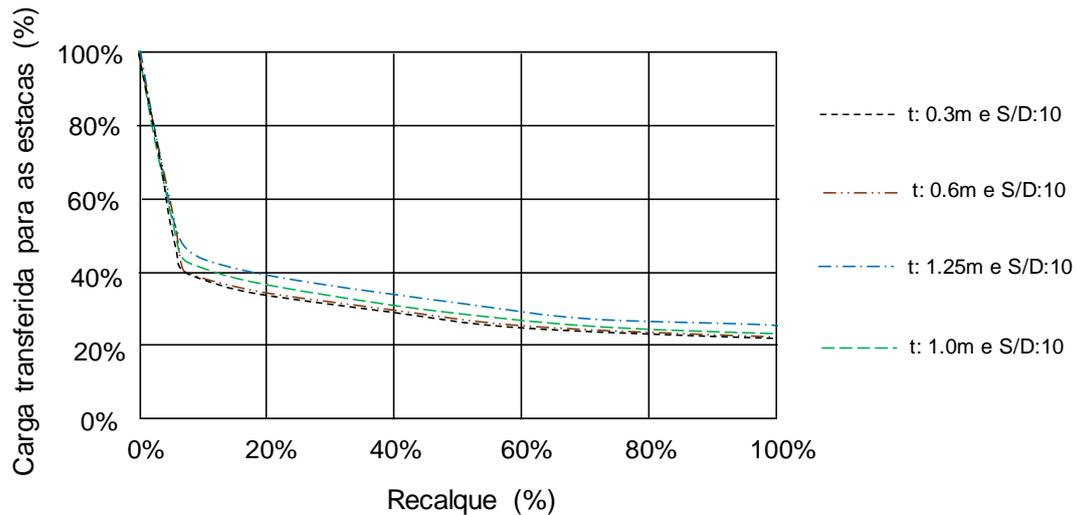


Figura 50 – Efeito da espessura do radier na distribuição dos esforços para as estacas com S/D:10. (modificada). Alnuiam *et al.* (2013).

Observa-se que para uma faixa inicial com pequenos descolamentos, em ambos os espaçamentos, as estacas absorvem a maior parte dos esforços. Contudo, conforme os recalques vão aumentando, a proporção de carga transferida para as estacas reduz significativamente até a ocorrência de aproximadamente 7% do recalque total da estrutura, tendendo a estabilizar após tal ponto.

Outro ponto notável é que a variação da distribuição dos esforços entre estacas é mais evidente para espaçamento entre estacas com S/D:4, variando entre 35% e 45% com radiers contendo espessura de 0.3m e 2m, e flexibilidade de  $K_f:0.2$  e  $K_f:8.73$ , respectivamente.

Para maior espaçamento entre estacas (S/D:10), o radier tende a ser mais flexível, o que resultou no aumento da interação do mesmo com solo e maior participação no recebimento dos esforços aplicados na fundação (aproximadamente 25% das cargas transferidas para as estacas).

Conforme análises numéricas realizadas por Nguyen *et al.* (2014), o aumento da espessura do radier reduz consideravelmente recalques totais e diferenciais no sistema de fundação. Contudo, tal incremento na espessura aumenta os momentos gerados no elemento superficial, visto que, ele passa a se comportar como elemento rígido.

Desta forma, o aumento da espessura do radier pode ser uma opção na busca de reduzir os recalques para valores aceitáveis, mas, tal acréscimo pode se apresentar inviável economicamente, a depender das dimensões do radier.

Wulandari e Tjandra (2015) concluíram que o aumento da espessura do radier confere maior rigidez para a fundação, resultando na redução dos recalques. Todavia, existe uma faixa de espessura do radier na qual espessuras maiores que esta, não acarretaria na minimização dos recalques, tornando-os constantes com o incremento da espessura do elemento superficial, como ilustrado na Figura 51.

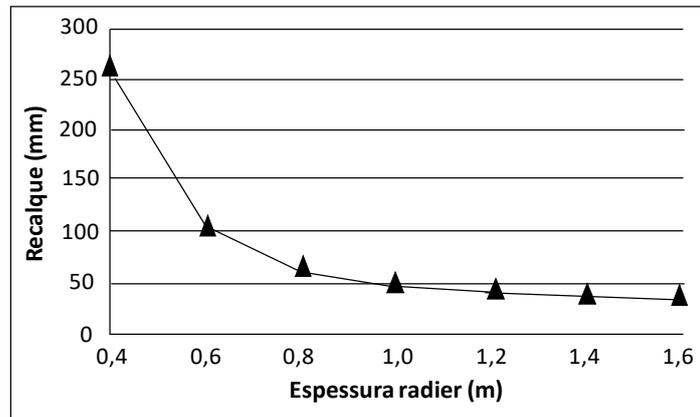


Figura 51 - Efeito da espessura do radier na redução do recalque da fundação. (modificada). Wulandari e Tjandra (2015).

Alshenawy *et al.* (2016) verificaram que a espessura do radier pouco influenciava no valor do coeficiente " $\alpha_{pr}$ ", corroborando com estudos de Balakumar (2008). Nas análises variando a espessura do elemento superficial entre 1m e 2m, com estacas de 15m e espaçamento 5D, a variação de " $\alpha_{pr}$ " foi pouco substancial, como apresentado na Figura 52.

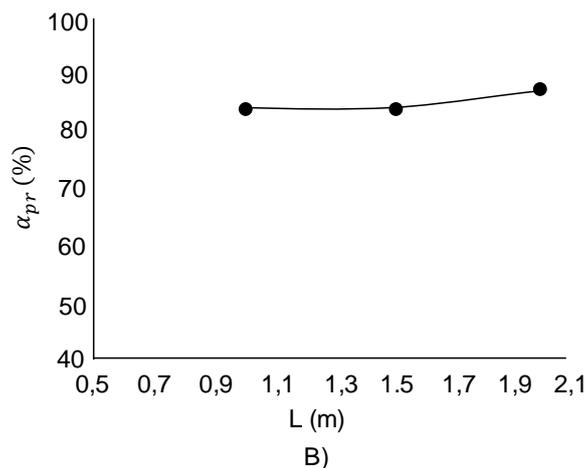


Figura 52 – Efeito da espessura do radier no valor de  $\alpha_{pr}$ . (modificada). Alshenawy *et al.* (2016).

Para verificar o efeito da espessura do radier no desempenho do sistema de fundação em radier estaqueado, Sinha e Hanna (2017) realizaram simulações variando tal geometria entre 0.5 e 2.5m.

Nas análises, foi observado que radiers estaqueados que possuem radier com espessura entre 1.5 e 2.5m, a fundação possuía melhor desempenho. Esses comportamentos podem ser justificados pela diminuição da rigidez do elemento superficial para radiers com menores espessuras, ocasionando, desta forma, maiores recalques.

### 2.7.6 Efeito do comprimento do radier

A fim de verificar a influência do comprimento do radier no comportamento mecânico de fundação em radier estaqueado, Alnuiam *et al.* (2013) realizaram simulações numéricas variando tal geometria entre 4m e 7m, para estacas com mesmo diâmetro (50cm), espaçamento (4D) e espessura (1.25m).

Após análises dos resultados, foi observado que conforme o comprimento do radier é incrementado, a porcentagem de carga transferida para as estacas reduz, como ilustrado na Figura 53. Contudo, vale ressaltar a importância em verificar o nível dos recalques totais, devido ao aumento de tensão aplicada sob o radier.

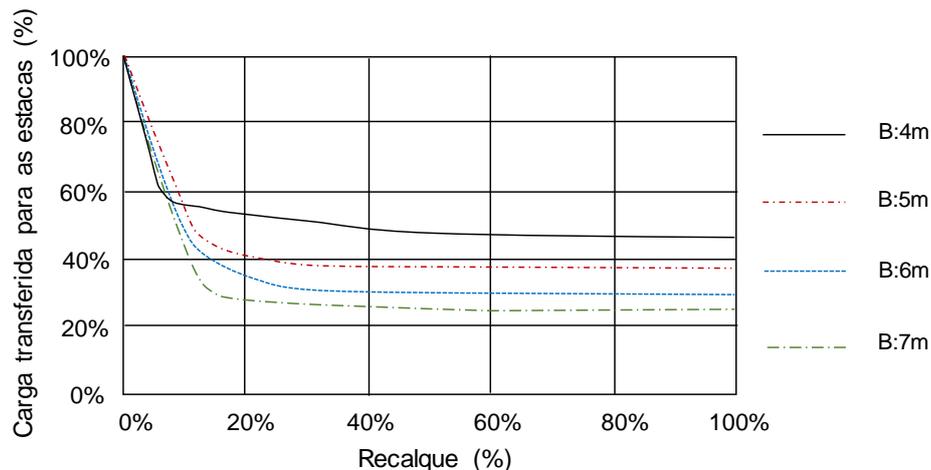


Figura 53 – Efeito do comprimento do radier na distribuição dos esforços para as estacas. (modificada). Alnuiam *et al.* (2013).

### 2.7.7 Efeito da densidade do solo

Balakumar (2006) verificou o efeito da densidade da areia no comportamento de fundação em radier estaqueado para radier circular, estrutura usual em tanques e fundações de usinas eólicas. O radier nestes ensaios possuía 200m de diâmetro e 8mm de espessura. Os resultados desta análise são apresentados na Figura 53.

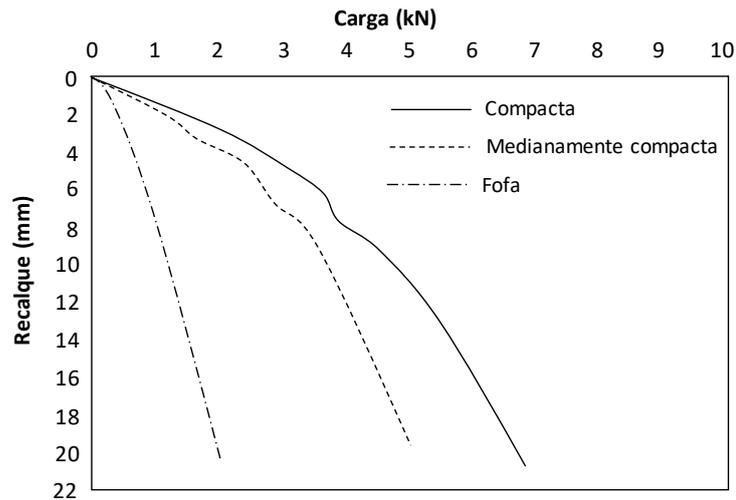


Figura 54 - Efeito da densidade de solo arenoso no comportamento mecânico da fundação em radier estaqueado. Modificada. Balakumar (2006).

A partir da análise da Figura 54 é observado maior incremento de capacidade de carga em porcentagem de radier estaqueado em solo arenoso fofo para medianamente compacto que deste para compacto.

Conforme estudos realizados por Alshenawy *et al.* (2016), pôde ser observado que o sistema de fundação em radier estaqueado apresenta maior rigidez em areia grossa, reduzindo o valor coeficiente " $\alpha_{pr}$ ", e, conseqüentemente, há maior interação do radier com a massa de solo. Tais resultados são ilustrados na Figura 55.

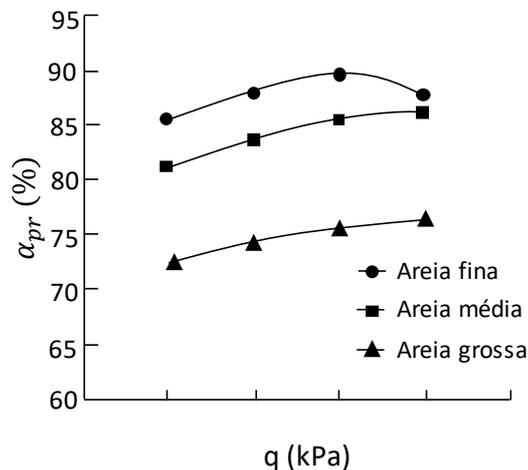


Figura 55 – Efeito da granulometria da areia no valor de  $\alpha_{pr}$  da fundação em radier estaqueado. (modificada). Alshenawy *et al.* (2016).

Estes resultados corroboram com uma das situações favoráveis a estruturação da infraestrutura em radier estaqueado citada por Poulos (2001). Obtém-se, desta forma, maior participação do elemento superficial no recebimento dos esforços da estrutura e maior capacidade de carga para o sistema de fundação.

### 2.7.8 Efeito da rigidez do bloco de fundação

A princípio, a função do bloco de fundação é a transferência das cargas da estrutura para o grupo de estacas advindas dos pilares. Contudo, na metodologia de fundação em radier estaqueado acrescenta-se a sua contribuição mecânica juntamente com as estacas em fornecer capacidade de carga e redução de recalques para o sistema, tanto totais quanto diferenciais.

Munhoz (2004) após realização de análises numéricas, concluiu que a rigidez dos blocos de fundação tem grande influência na distribuição de tensão nas estacas, demonstrando que a altura do bloco tem efeito significativo no comportamento mecânico do sistema de fundação.

Ramos (2007) cita que Delalibera & Giongo (2004 - b) realizaram um estudo numérico de bloco sobre três estacas e, após inúmeras simulações concluíram que a rigidez do bloco de fundação tem grande influência na forma de distribuição de força na cabeça das estacas.

Além disso, Ramos (2007) cita que quanto maior a altura do bloco, e, conseqüente maior rigidez do elemento, mais uniforme será a distribuição dos esforços para as estacas da fundação.

Em vista dessa influência da rigidez do bloco na distribuição dos esforços para as estacas, na presente dissertação foram feitas duas verificações de rigidez dos blocos estudados, com análises demonstradas no capítulo 4.

Uma delas se baseiou na norma espanhola “Instrucción de Hormigón Estructural” (2007), citada por Medeiros (2016), que considera a posição do estaqueamento na análise de rigidez do elemento superficial, conforme ilustra a Equação 43.

$$h = 0,5 * L_{m\acute{a}x} \quad \text{Eq. 43}$$

Sendo  $L_{m\acute{a}x}$  corresponde a distância da face do pilar até o eixo da estaca mais distante. Caso essa equação resultar num valor menor que a altura real do bloco analisado, este será considerado como elemento rígido.

A outra verificação levou em consideração a classificação constante na NBR 6118 (ABNT 2014), que elenca o bloco de fundação como rígido quando satisfaz a Equação 44, nas duas direções.

$$h \geq (\alpha - \alpha_p)/3$$

Eq. 44

Onde:

$\alpha$  = dimensão do bloco em um eixo;

$\alpha_p$  = dimensão de pilar no mesmo eixo;

$h$  = altura do bloco.

## CAPÍTULO 3

# MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de alcançar os objetivos da pesquisa, foram sistematizadas as informações a respeito da temática fundações estaqueadas, em especial tipo radier estaqueado. Para tanto, artigos, relatórios, livros, e qualquer outro tipo de material que apresente o estado da arte da metodologia de fundação em radier estaqueado foram utilizados.

Foram realizadas verificações do software numérico PLAXIS 3D *Foundation* por meio da comparação de análises obtidas pelo mesmo de casos consagrados com resultados constantes na literatura alcançados por outros pesquisadores. Esta etapa se fez importante visto que serviu como uma forma de averiguar se o programa numérico foi manuseado de maneira eficiente.

Além disso, os parâmetros de resistência e deformabilidade do solo foram obtidos por meio de correlações semi-empíricas e análise paramétrica, subsidiadas por dos ensaios de campo realizados na área de estudo. Estes parâmetros serviram como dados de entrada para a realização das análises numéricas da fundação de estudo.

Por fim, após verificação do software PLAXIS 3D *Foundation* e obtenção dos parâmetros do solo, foram efetuadas simulações numéricas a fim de prever o comportamento da fundação à luz da técnica tradicional de grupo de estacas, radier estaqueado e bloco isolado. Estas modelagens serviram para verificar o possível benefício da interação do bloco com o solo no aumento da capacidade de carga e aumento de rigidez do sistema de fundação.

### 3.1 Características e local da fundação da obra analisada

O sistema da fundação do Instituto do Cérebro possui 253 estacas, com comprimentos que variam de 15 a 20 metros. O número de estacas, seus respectivos diâmetros e carga de trabalho estão especificados no Quadro 10.

Quadro 10– Sistema de Fundação do Instituto Cérebro.

Sistema de Fundação			
Nº de estacas	57	169	27
Diâmetro (cm)	25	40	50
Carga de Trabalho (kN)	200	600	950

Os elementos de fundação são compostos por grupos de 1, 2, 4, 5 e 9 estacas. O espaçamento mínimo é de 62,5cm para estacas de  $\phi$  de 25cm, 100cm para estacas de  $\phi$  de 40cm e 125cm para estacas de  $\phi$  de 50cm. Tais espaçamentos estão de acordo com recomendações constantes em Alonso (1983), que sugere espaçamento mínimo entre estacas de  $2,5 \phi$ .

A fim de atender os espaçamentos mínimos entre as estacas ( $2,5 \phi$ ) e a distância entre centro da estaca e face externa do bloco ( $\phi / 2 + 15\text{cm}$ ), os blocos de coroamento compostos por uma estaca de  $\phi$  de 25cm possuem dimensões de 55x55x60cm, enquanto que para uma estaca de  $\phi$  de 40cm, possuem dimensões de 70x70x60cm. Blocos com 2 estacas e  $\phi$  de 40cm medem 170x70x60cm.

Blocos compostos por 4 estacas que contêm estacas de  $\phi$  de 25cm, possuem geometria de 118x118x70cm. Aqueles constituídos por estacas com  $\phi$  de 40, apresentam geometria de 170x170x80cm. Por fim, aqueles com estacas de  $\phi$  de 50cm, contêm geometria de 205x205x100cm.

O sistema de fundação contém apenas dois blocos com 5 estacas, as quais possuem  $\phi$  de 50cm e geometria dos blocos de 280x205x130cm. O projeto contém somente 1 bloco de 9 estacas, com  $\phi$  de 40cm e elemento superficial medindo 270x270x130cm.

A Figura 56 ilustra os blocos tipo da fundação definidos para obra, os quais foram concebidos pela metodologia tradicional de grupo de estacas, contudo, foram analisados nessa pesquisa na perspectiva de radiers estaqueados.

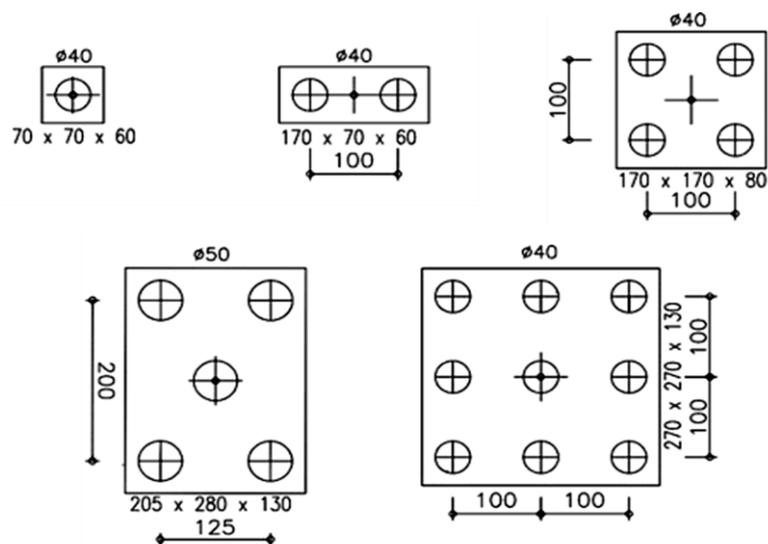


Figura 56 – Geometria de blocos tipo do sistema de fundação do Instituto do Cérebro.

O número de estacas para cada bloco de fundação, calculado pelo projetista, foi obtido pela razão entre a carga do pilar e a carga de projeto da estaca. A carga de projeto, por sua vez, foi obtida pelo produto entre a tensão de 5MPa, aplicada na estaca, e a área transversal da mesma.

O local da obra de estudo é localizado no campus central da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), cidade de Natal-RN, ilustrado na Figura 57 a seguir.



Figura 57 – Local da obra do Instituto do Cérebro. (Google Maps).

## 3.2 Caracteriza o geotécnica

### 3.2.1 Sondagem de Simples Reconhecimento (SPT)

Para caracteriza o geotécnica e posterior obten o dos parâmetros de resistência e deformabilidade do solo, foram realizadas 13 sondagens de simples reconhecimento (SPT), com resultados ilustrados no Quadro 11.

Quadro 11 - Resultado dos SPTs 13 realizados em campo.

Resultados dos valores de SPT obtidos nas sondagens de simples reconhecimento														
Prof.(m)	SPT1	SPT2	SPT3	SPT4	SPT5	SPT6	SPT7	SPT8	SPT9	SPT10	SPT11	SPT12	SPT13	MÉDIA
1	2	3	4	5	2	6	5	3	4	4	3	6	4	4
2	3	4	4	6	3	7	6	4	4	4	1	6	5	4
3	6	8	7	7	5	8	8	3	7	6	1	7	7	7
4	6	7	10	11	7	9	11	4	9	9	6	8	8	8
5	7	10	13	20	11	8	13	4	9	9	7	11	12	10
6	9	14	14	17	12	11	16	4	12	11	11	13	12	12
7	12	12	9	16	14	12	20	12	14	14	16	15	14	14
8	14	14	10	18	18	18	18	11	17	18	21	18	24	18
9	17	14	13	20	23	23	16	14	28	24	26	40	31	23
10	21	17	18	22	28	30	18	14	31	31	31	43	38	28
11	34	18	18	21	35	33	23	27	34	31	39	46	40	33
12	28	19	20	23	38	35	29	29	36	28	37	46	43	29
13	20	30	25	22	36	40	24	22	30	11	44	50	45	30
14	29	31	51	24	35	44	20	26	31	12	30	46	30	30
15	33	45	41	26	25	29	25	25	31	24	30		30	29,5
16	32	47	31	52	26	33	30	41	30	31	32		32	32
17	32	34	34	54	30	31	33	44	29	33	27		32	32,5
18	34	34	32	44	33	13	53	33	32	26	31		35	33
19	40	48	32	45	37	14	46	32	32	28	13		20	32
20	37	52	43	46	38	28	44	35	31	31	16		17	36
21	39	50	30	51	46	32	46	30	34	36	23		36	36
22	38	50			41	34	47	33	41	42	31		50	41
23	39	49			38	37	51	35	44	41	32		46	40
24					38	39		47	41	44	37		46	41
25					40	39		48	44	48	40		48	44
26					42	50		51	47	53	43		51	50
27					46	47		51			49			48
28						45		36			53			45

Em geral, o solo local possui camadas superficiais de 3 a 5 metros de profundidade de areia fina e média, fofa a pouco compacta. Nas camadas intermediárias, compreendidas entre a profundidade de 5 a 21 metros, é observada a presença de areia fina e média, pouco siltosa, pouco compacta a muito compacta.

Em maiores profundidades, são encontradas camadas de areia fina e média, argilosa, de compacta a muito compacta. Tais camadas tornam inviável o avanço do amostrador padrão, sendo alcançadas entre as profundidades de 22 e 28 metros, exceto para o furo de sondagem 12, atingido a 15 metros.

Resultados de 5 sondagens realizadas estão ilustrados graficamente na Figura 58 a fim de ilustrar a tendência de aumento da resistência a penetração ao longo da profundidade.

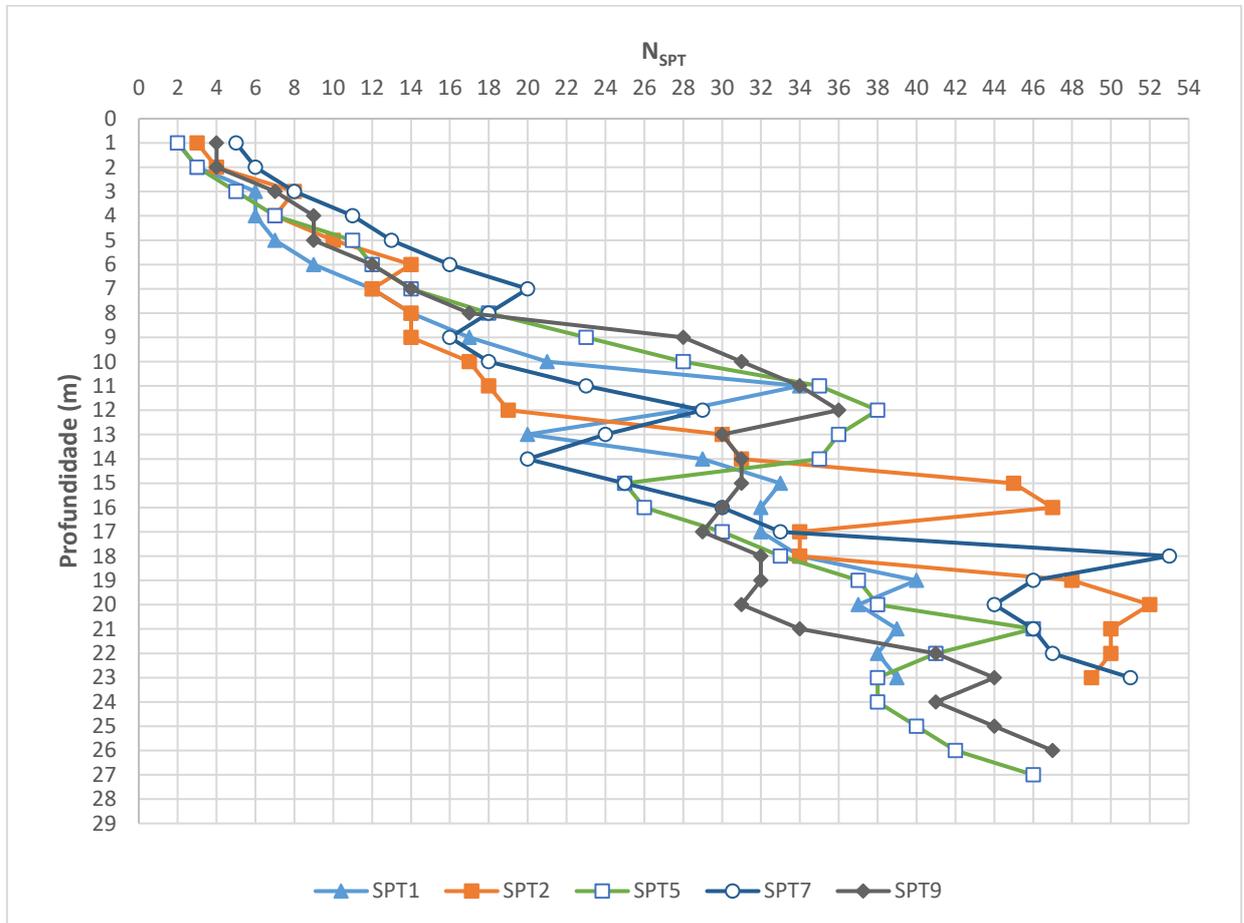


Figura 58 – Resultados das 13 sondagens realizadas.

Na Figura 59 é apresentado o desvio padrão de resistência à penetração a cada metro de profundidade dos 13 resultados de sondagem, demonstrando uma tendência de valores abaixo de 9,0 até a cota 28m.

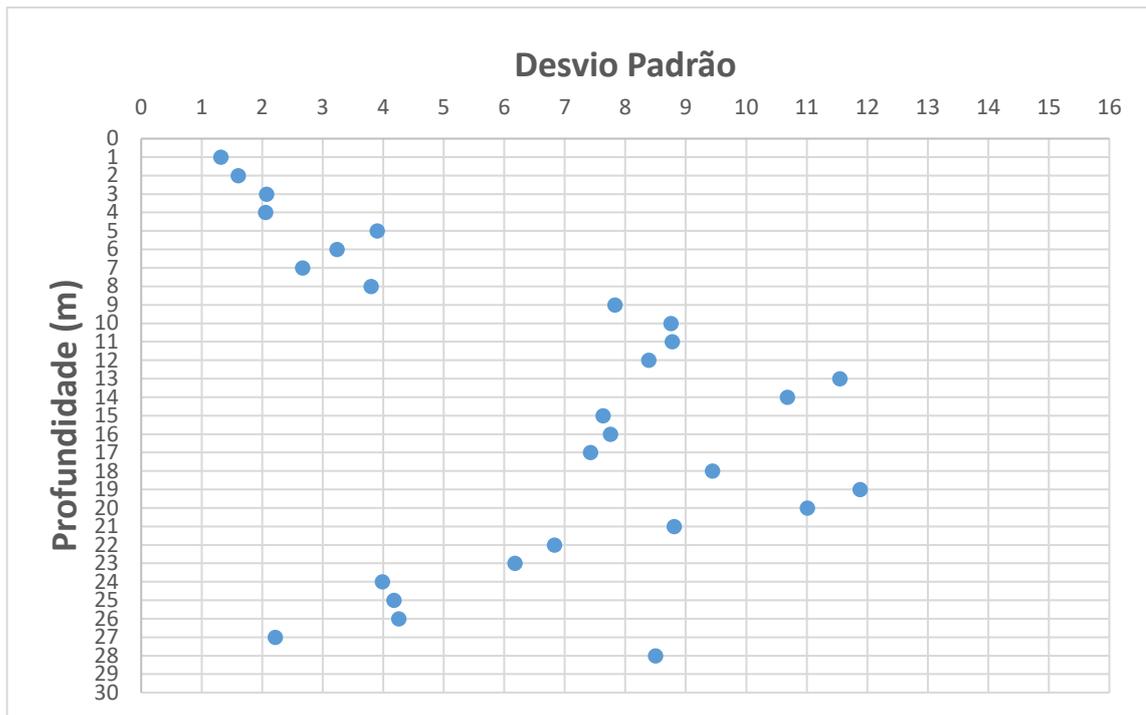


Figura 59 – Desvio padrão da resistência a penetração dos 13 SPTs ao longo da profundidade.

A determinação dos parâmetros de deformabilidade e resistência do solo, sendo eles: módulo de elasticidade e coeficiente de poisson, ângulo de atrito, coesão, dilatância e peso específico foi realizada por meio de correlações empíricas com SPT constantes na literatura.

Para demonstrar um resultado típico das sondagens realizadas, a Figura 60 ilustra os índices de penetração a cada metro e o respectivo tipo de solo, com o impenetrável alcançado na profundidade de 21 metros e  $N_{SPT}$  correspondente de 51 golpes.

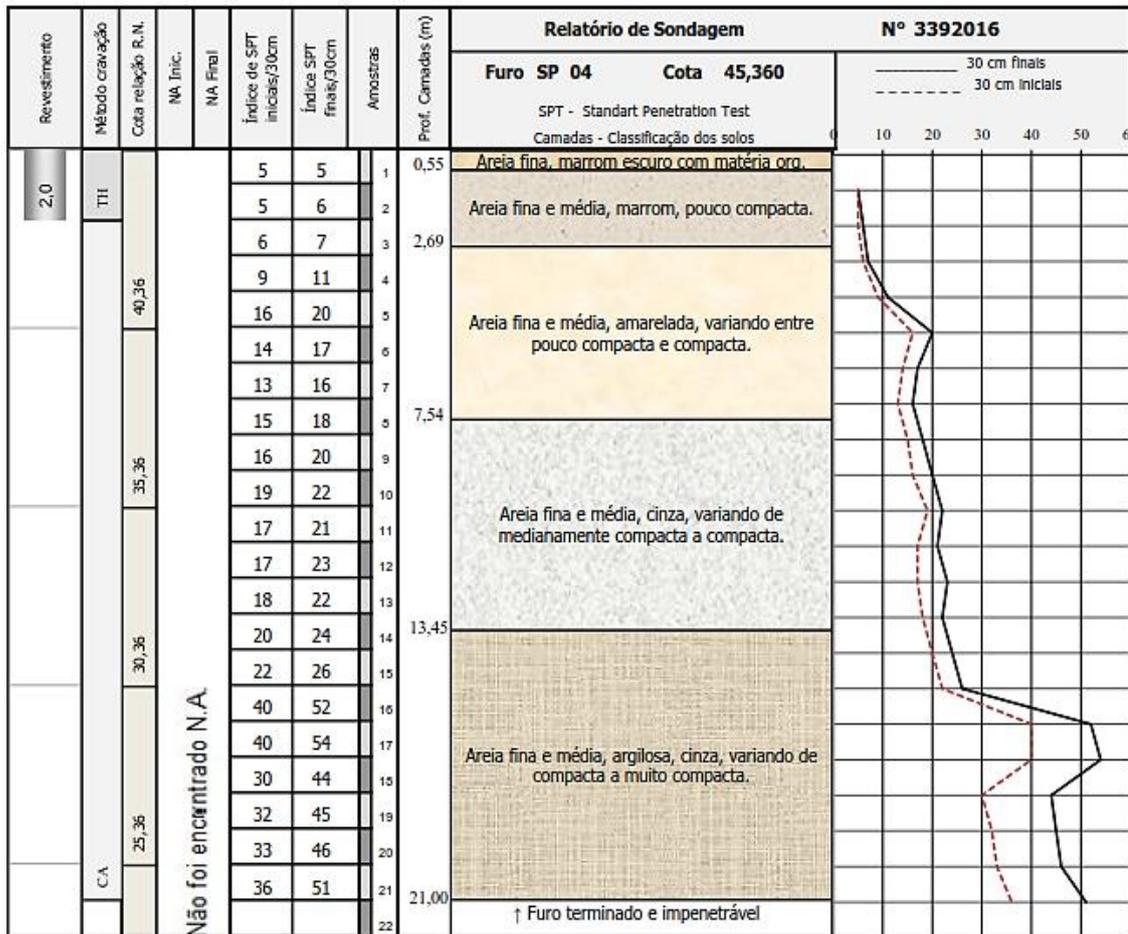


Figura 60 – Resultado da sondagem número quarto.

### 3.3 Prova de Carga Estática (PCE)

Na área de estudo foram realizadas três provas de carga estática em estaca, conforme recomendações previstas na NBR 12131/2006, as quais serviram como subsídio para calibração dos parâmetros geotécnicos. As cargas foram aplicadas através de um cilindro hidráulico com capacidade de 4000kN, o qual era alimentado por meio de uma bomba manual.

Os ensaios foram realizados em estacas de diâmetro de 40cm e 50cm e a carga máxima aplicada no ensaio foi o dobro da carga de serviço prevista, como preconiza a NBR12131/2006.

Células de carga com capacidade de efetuar leituras de até 2000kN foram utilizadas para medir os esforços aplicados. Tais leituras eram obtidas mediante um *data logger*, ilustrado na Figura 61.



Figura 61 – Data logger para leitura dos esforços aplicados.

Para aplicação dos carregamentos de forma uniforme na estaca, foi executado um bloco com dimensões de 70x70x70cm sobre a estaca ensaiada. Para reação aos esforços impostos no ensaio, foram utilizadas quatro estacas preparadas por meio de tirantes, para trabalharem à tração.

Os recalques da estaca foram medidos por meio de quatro relógios comparadores mecânicos com resolução de 0,01mm e curso de 50mm, fixados diametralmente opostos sobre o bloco, conforme ilustrados na Figura 62.

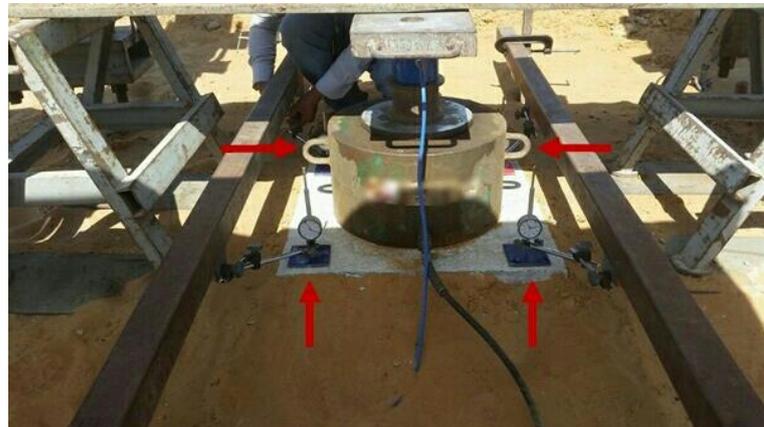


Figura 62 – Posicionamento dos quatro relógios comparadores sobre o bloco.

O sistema de reação aos esforços era composto por dois perfis metálicos do tipo “I” e um central duplo “I” de 6m de comprimento cada, em que os perfis laterais possuíam dimensões de 600x324mm e o central 600x426cm.

Os perfis laterais foram fixados nas estacas de reação através de barras rosqueadas com 32mm de diâmetro. O perfil central, por sua vez, foi posicionado abaixo dos dois perfis laterais, para receber os esforços aplicados pelo cilindro hidráulico.

A prova de carga foi executada do tipo rápido QML (*Quick Maintained Load*), em virtude de o solo ser arenoso, com carga aplicada de 20% a carga de trabalho em cada estágio, como recomendado na NBR12131/2006.

Cada estágio, tanto de carregamento como descarregamento, tinha duração de 15 minutos e as leituras foram feitas com 0, 1, 2, 4, 8 e 15 minutos, conforme Fellenius (1975) recomenda. A Figura 63 ilustra uma prova de carga montada.



Figura 63 – Prova de carga montada.

Conforme preconiza a NBR 6122/2010, que versa sobre Projeto e Execução de Fundações, para obras em que o estaqueamento será efetuado com estaca do tipo hélice contínua, a quantidade de prova de carga a ser realizada é de no mínimo 1% do total de estacas da edificação, caso seja previsto mais de 100 estacas. Visto que o projeto de fundações contém 253 estacas, foram realizadas 3 provas de carga estática.

Das 3 provas de carga executadas, duas foram realizadas em estacas com diâmetro de 40cm e carga de trabalho de 600kN, uma composta por estaca de 15m e outra 17m. A última foi executada em estaca de diâmetro de 50cm, com comprimento de 15m e carga de trabalho de 950kN.

Vale destacar que as provas de carga foram executadas durante o estaqueamento, desta forma, os resultados dos ensaios não serviram como subsídio para obtenção de carga admissível e recalques limites da fundação. O foco foi apenas em verificar o desempenho do sistema de fundação.

A primeira prova de carga, realizada no dia 19 de setembro de 2016, foi executada numa estaca com diâmetro de 40 cm e 15 metros de comprimento. Como já citado, foi aplicado um carregamento duas vezes o valor da carga de trabalho da estaca ensaiada (1200kN). Ao fim da fase de carregamento, foi observado recalque de 7,72mm, e na fase de descarregamento verificou-se uma recuperação elástica de 2,45mm.

A segunda prova de carga estática, foi executada no dia 7 de outubro de 2016, numa estaca com diâmetro de 40cm, mas com 17 metros de comprimento. Ao final da fase de carregamento observou-se um deslocamento de 6,45mm, e uma recuperação elástica de 2,95mm na fase de descarregamento.

Por fim, a última PCE foi realizada no dia 3 de fevereiro de 2017, executada numa estaca com diâmetro de 50cm e 15 metros de comprimento. Para este ensaio foi observado, após fase de carregamento, um deslocamento de 9,70mm e uma recuperação elástica de 1,98mm. Os resultados das 3 PCEs executadas em campo estão apresentados na Figura 64.

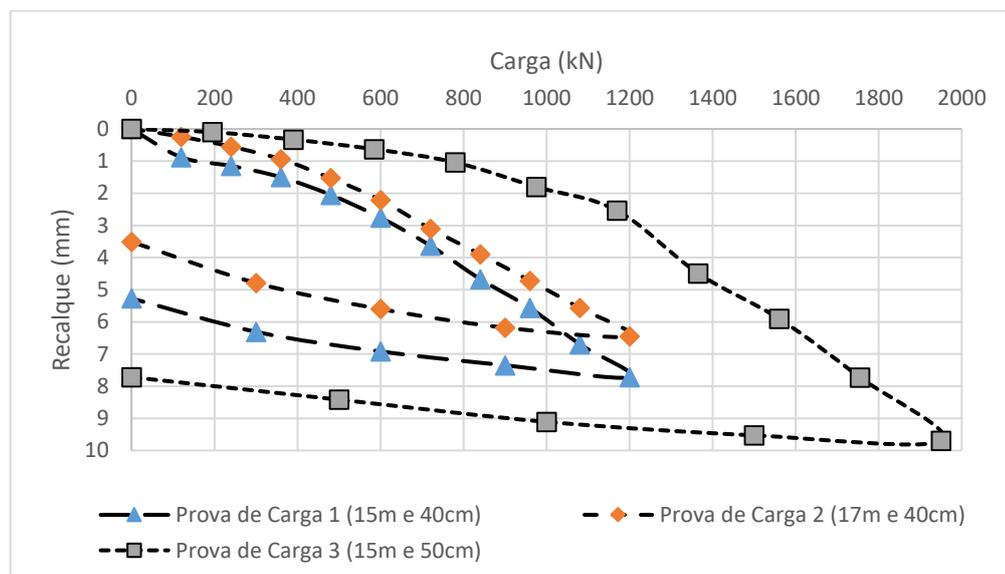


Figura 64 – Resultados das três provas de carga realizadas na área de estudo.

Existem 3 modos de ruptura geotécnica em PCE em estacas, ruptura nítida, física e convencional. A primeira se caracteriza pela verticalização da curva carga *versus* recalque antes do 10º estágio de carregamento.

Neste caso, os recalques são incessantes sem incremento de carga, o que impossibilita a continuidade do ensaio. Desta forma, a capacidade de mobilização de resistência do sistema estaca-solo é esgotada e o valor de capacidade de carga é a carga correspondente ao trecho verticalizado.

Na ruptura física, é observada na curva carga *versus* recalque, como na ruptura nítida, a ocorrência de elevados recalques, mas sem a completa verticalização da curva, necessitando desta forma do descarregamento. Para este caso, o valor da capacidade de carga é dado como a assíntota vertical, e, próximo a este valor, os recalques são excessivos, tendendo ao infinito.

Por fim, destaca-se a ruptura convencional, caracterizada pela transformação da curva num segmento linear nos últimos carregamentos. Nesta situação, a carga poderia ser incrementada, com aumento dos recalques, mas sem indício de ruptura nítida ou física ou limite da mobilização de resistência do sistema estaca-solo.

Para as 3 PCEs executadas, foi observado o modo de ruptura convencional, com a curva carga *versus* recalque tornando-se linear nos últimos estágios de carregamento em todos os ensaios. Como as 3 PCEs foram realizadas a título de verificação de desempenho, as 3 estacas ensaiadas tiveram performance satisfatória pelo critério de ruptura de Terzaghi (1942), que considera a capacidade de carga como a carga correspondente a um recalque de 10% o diâmetro da estaca.

A partir deste critério, estacas de diâmetro de 40cm (com recalque limite de 10%  $\phi$ ), foram obtidos experimentalmente recalques de 7,72mm e 6,45mm; e 9,70mm para estaca de 50cm de diâmetro.

### 3.4 Ensaio de Integridade em Estaca (PIT)

O ensaio PIT é um método de controle do estaqueamento de uma fundação, tendo como objetivo analisar a integridade do fuste da estaca, de modo a verificar eventual falha na sua concretagem. Por ser um ensaio não destrutivo, tem a vantagem de poder ser feito em todas as estacas da obra, além de execução rápida e equipamento leve e portátil. Na fundação da presente pesquisa, o ensaio de integridade foi realizado em todas as 253 estacas da obra.

O ensaio se baseia na teoria de propagação de onda num meio. Para uma estaca com comprimento maior que seu diâmetro, as ondas viajam ao longo do fuste com uma velocidade “c”, representada pela Equação 45.

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad \text{Eq. 45}$$

Onde “E” é o módulo de elasticidade e “ $\rho$ ” massa específica do material da estaca. A impedância “Z”, por sua vez, pode ser representada como uma resistência da estaca à mudança da velocidade, sendo definida pela Equação 46:

$$Z = E \cdot A / C \quad \text{Eq. 46}$$

Sendo “A” a área da seção transversal da estaca. Assim, variações no fuste, que podem comprometer seu desempenho, são verificadas a partir de alterações na impedância do meio. A análise dos resultados foi baseada nos critérios descritos por Cunha *et al.* (2002), que estão descritos a seguir:

- i. Critério A: defeitos significativos não são encontrados na estaca, sendo considerada como íntegra fisicamente;
- ii. Critério B: defeitos significativos não são encontrados na estaca, contudo, a reflexão da onda não foi resultante da ponta da mesma. Desta forma, a estaca foi parcialmente testada, com integridade confirmada nos metros iniciais, mas não se garante para todo o fuste da estaca.
- iii. Critério C1: grande variação de impedância é observada no fuste da estaca, havendo também onda refletida na ponta da mesma. Neste caso, o fuste pode ser considerado como íntegro, provavelmente em todo seu comprimento, ainda que não se pode garantir em definitivo através dos dados obtidos.
- iv. Critério C2: certa variação de impedância é notada no fuste da estaca, tendo também reflexão de onda na ponta da mesma. Todavia, por ser variação de pouca significância, a estaca pode ser considerada como aparentemente íntegra em grande parte de seu fuste, não necessitando escavação para verificação da seção transversal.
- v. Critério C3: baixa variação na impedância no fuste da estaca é indicada. Tendo também reflexão de onda na ponta da mesma. Além disso, reflexões secundárias são notadas no fuste do elemento, com sinais positivos. Nesta situação, é indicado nitidamente a ocorrência do estreitamento do fuste da estaca, o que pode comprometer o desempenho estrutural da estaca. Assim, escavação ao redor da mesma na região da reflexão secundária se faz necessária.
- vi. Critério D: grandes variações na impedância são encontradas, não existindo reflexão da onda na ponta da estaca. Neste caso, o fuste é considerado duvidoso quanto à integridade. Em casos extremos, a condenação da estaca pode ser a solução mais adequada, carecendo de substituição ou reforço.

Vale ressaltar que o ensaio PIT pode não produzir resultados com 100% de certeza. Fustes com grandes variações torna a análise complexa, ocasionando resultados inconclusivos. Diante disto, o processo de preparação da estaca deve ser realizado de maneira adequada a fim de evitar interferência da preparação e execução do ensaio nos resultados obtidos.

Para a fundação analisada, o ensaio seguiu procedimentos conforme recomendações constantes na norma ASTM D5882. Assim, antes da realização do ensaio, a parte superior da estaca era arrasada, seguida da obtenção de uma superfície lisa mediante o uso de lixadeira elétrica contendo disco de desbaste.

Em seguida, instalou-se um acelerômetro de alta sensibilidade no topo da estaca, o qual foi fixado por meio de uma cera de petróleo. Por fim, diversos golpes com martelo de mão foram aplicados no topo da estaca. A Figura 65 ilustra uma estaca com o topo preparado e o ensaio sendo realizado pelo operador, com acelerômetro instalado.



Figura 65 – a) topo de uma estaca preparada. b) execução do ensaio PIT.

De todas as 253 estacas ensaiadas, apenas uma delas apresentou grande variação em sua impedância, na profundidade de 5,5m. A mesma ficou classificada como “C3”, segundo Cunha *et al.* (2002). Desta forma, é possível a ocorrência do estreitamento do fuste, o que pode comprometer o comportamento estrutural.

Visto que seria extensa a demonstração de todos os resultados de integridade em estaca, procurou-se demonstrar apenas o resultado de uma estaca com possível dano estrutural e outra considerada íntegra, ilustradas nas Figuras 66 e 67.

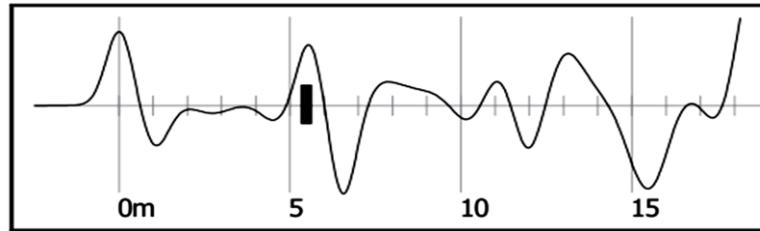


Figura 66 – Resultado do ensaio de integridade da estaca possivelmente defeituosa a 5,5m de profundidade.

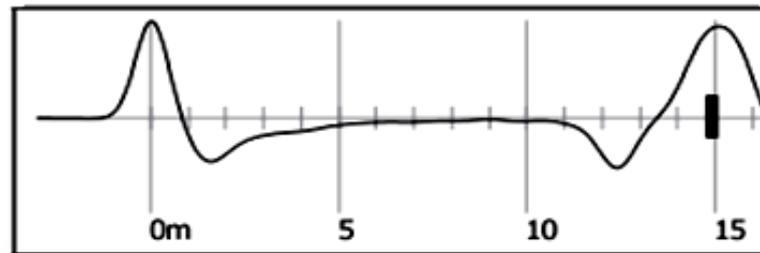


Figura 67 – Resultado do ensaio de integridade da estaca possivelmente íntegra.

### 3.5 Análises Numéricas

Na presente dissertação, foram realizadas simulações numéricas com uso do programa numérico *PLAXIS 3D Foundation*, baseado no método dos elementos finitos. Na etapa de verificação, foram analisados casos constantes na literatura, e posterior comparação com resultados obtidos pelo *PLAXIS 3D Foundation* com aqueles alcançados por outros pesquisadores.

Os parâmetros iniciais de resistência e deformabilidade do solo foram obtidos por correlações semi-empíricas baseadas no SPT. Em seguida, tais parâmetros foram utilizados nas simulações numéricas para buscar reproduzir com boa concordância o comportamento carga *versus* recalque obtido em campo por meio dos resultados de prova de carga estática realizadas em estacas na área de estudo, já apresentados no item 3.3.

A retroanálise dos parâmetros do solo foi realizada após simulações numéricas iniciais da primeira prova de carga. Esta etapa serviu para calibrar os parâmetros geotécnicos necessários para alcançar a melhor concordância entre os resultados numéricos e experimentais.

Após a retroanálise, foram realizadas análises numéricas da fundação estudada, a qual possui geometria de estaca, bloco e esforços variados, para a metodologia grupo de estacas, radier estaqueado e bloco isolado.

Assim, no âmbito das análises numéricas, foram sistematizados os seguintes procedimentos:

- i. Verificação do programa numérico por meio de análises de casos constantes na literatura;
- ii. Obtenção dos parâmetros de resistência e deformabilidade do solo por correlações semi-empíricas com SPT e simulação numérica da PCE;
- iii. Retroanálise dos parâmetros do solo, através de comparação com resultados experimentais obtidos em campo para obtenção da melhor concordância entre as modelagens numéricas e experimentais;
- iv. Realização de simulações numéricas, considerando a técnica convencional de fundações profundas (grupo de estacas), radier estaqueado e bloco isolado;
- v. Comparação dos resultados obtidos nas simulações numéricas através da metodologia tradicional de grupo de estacas e radier estaqueado, de forma a estimar a contribuição que o radier confere para o sistema de fundação;
- vi. Verificação de como é realizada a distribuição dos esforços advindos da estrutura para o solo através dos elementos estruturais radier e estaca(s);
- vii. Análise da influência do radier na fundação tanto em capacidade de carga quanto rigidez do sistema.

### **3.5.1 Verificação do Programa PLAXIS 3D *Foundation***

Para verificação do programa numérico utilizado na pesquisa, análises numéricas de casos constantes na literatura, apresentadas por Freitas Neto (2013), foram realizadas pelo PLAXIS 3D *Foundation* para verificar a concordância entre as previsões obtidas com aquelas alcançadas por outros autores e; se o software foi manuseado de maneira eficiente.

A seguir são apresentados os casos analisados, desde o mais simples, como estaca isolada inserida em solo homogêneo, até os mais complexos, em que foi considerado o solo heterogêneo com a inserção de um número maior de estacas sob radier.

As análises foram comparadas com resultados obtidos pelo programa PLAXIS 3D *Foundation* com aqueles alcançados por Ottaviani (1975), Poulos & Davis (1980), Randolph (1983), Kuwabara (1989), Poulos (1991), Poulos (1994), Ta & Small (1996), Sinha (1997), Horikoshi & Randolph (1998), Matsumoto (1998), Yamashita (1998), Small & Zhang (1999), Sales (2000), Bittencourt e Lima (2009), Souza (2010), Soares (2011) e Freitas Neto (2013).

### 3.5.1.1 Estaca isolada (Ottaviani, 1975)

Neste caso, analisado por Ottaviani (1975) e estudada posteriormente por outros pesquisadores, diversas simplificações são aplicadas. Dentre as quais, destaca-se a consideração da massa de solo homogênea e com comportamento elástico-linear, além de geometria quadrada da seção transversal da estaca.

Mesmo que a pesquisa se refere a análises de radiers estaqueados, o estudo do comportamento de estaca isolada se faz importante, visto que é de conhecimento comum que o comportamento de estaca isolada serve como subsidio para análises de grupo de estacas.

Para este caso, foram consideradas três situações. Na primeira, o comprimento da estaca era de 20m e domínio vertical de 80m (H/L:4). Para a segunda, manteve o comprimento da estaca em 20m e alterou-se o domínio vertical para 30m (H/L:1,5). Por fim, na terceira situações, o comprimento da estaca foi alterado para 40m e domínio vertical para 60m (H/L:1,5). A Figura 68 ilustra, em termos de geometria, o problema analisado.

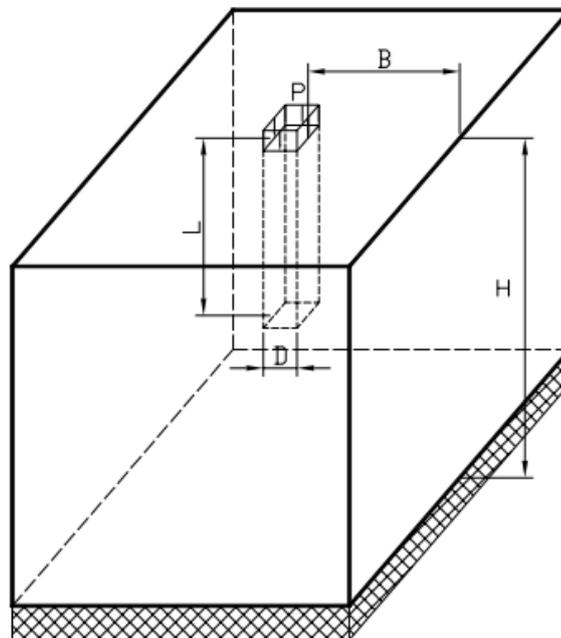


Figura 68 – Caso de estaca isolada. Souza (2010).

No Quadro 12 são apresentados os parâmetros utilizados nas análises de estaca isolada e nas Figuras 69, 70 e 71 os resultados das análises em termos de rigidez relativa  $K (E_p/E_s)$  versus fator adimensional de recalque  $(E_p \cdot D \cdot W/P)$ , em que  $W$  é dado pelo recalque no topo da estaca e  $P$  a carga aplicada. Tal metodologia de análise foi proposta por Ottaviani (1975).

Quadro 12 – Parâmetros utilizados para os casos de estaca isolada (Ottaviani, 1975).

D(m)	A <sub>p</sub> (m <sup>2</sup> )	B(m)	L(m)
1	1	3L	20 e 40
H/L	E <sub>p</sub> (GPa)	E <sub>s</sub> (MPa)	σ (kPa)
1,5 e 4	20	10 a 80	250 a 2000
v <sub>s</sub>	v <sub>c</sub>	γ <sub>s</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	γ <sub>c</sub> (kN/m <sup>3</sup> )
0,45	0,25	21	24

D – Lado da seção da estaca; A<sub>p</sub> – Área da seção transversal da estaca; B – Domínio horizontal; L – Comprimento da estaca; H/L – Domínio Vertical; E<sub>p</sub> – Módulo de elasticidade do concreto; E<sub>s</sub> – Módulo de elasticidade do solo; σ – Tensão Aplicada no topo da estaca; v<sub>s</sub> – Coeficiente de Poisson do solo; v<sub>c</sub> – Coeficiente de Poisson do concreto; γ<sub>s</sub> – peso específico do solo; γ<sub>c</sub> – peso específico da estaca.

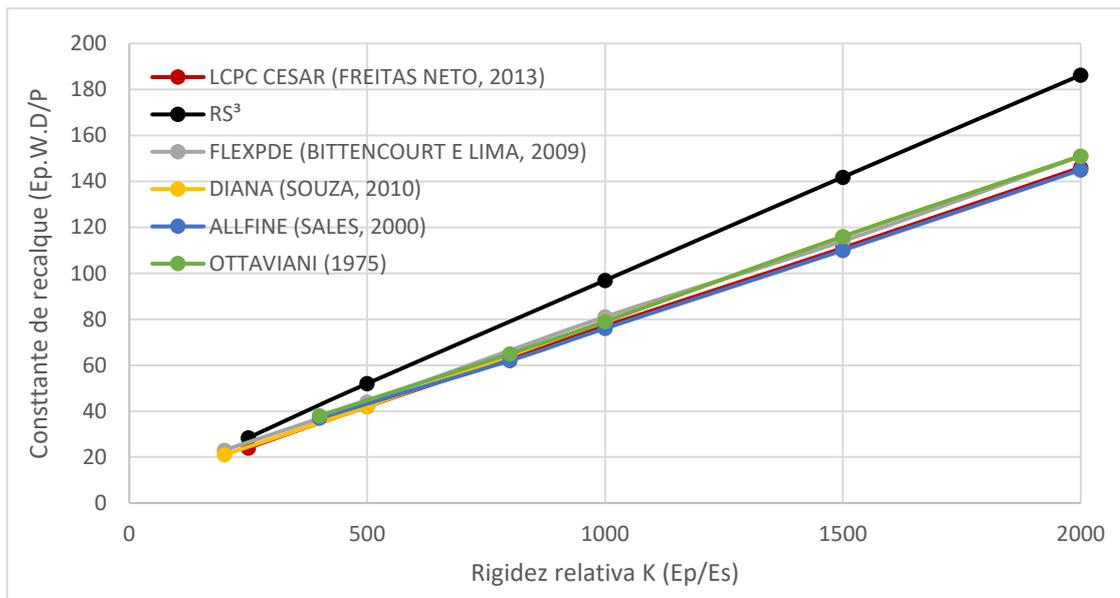


Figura 69 – Constante de recalque versus rigidez relativa obtidos com PLAXIS para estaca isolada com 20 metros de comprimento e H/L igual a 4,0.

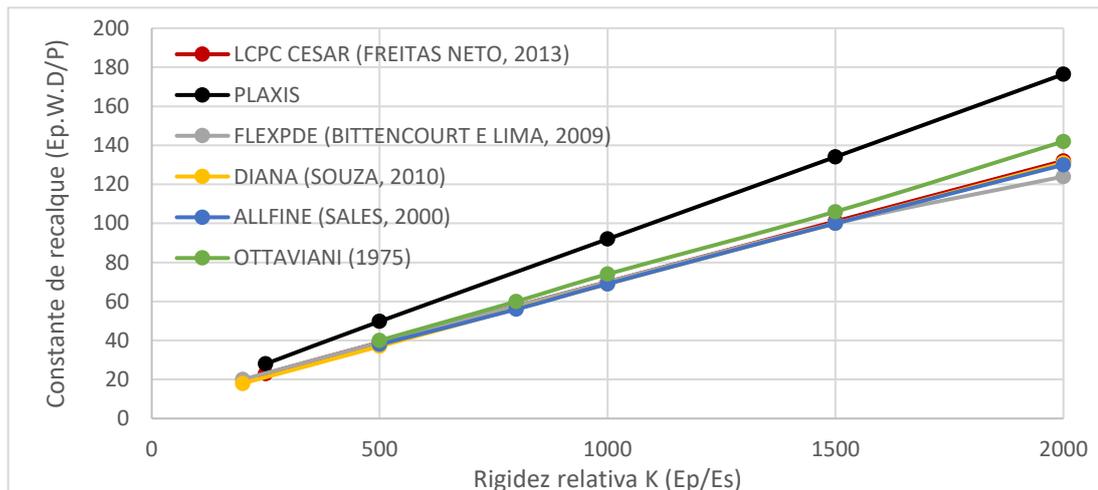


Figura 70 – Constante de recalque versus rigidez relativa obtidos com PLAXIS para estaca isolada com 20 metros de comprimento e H/L igual a 1,5.

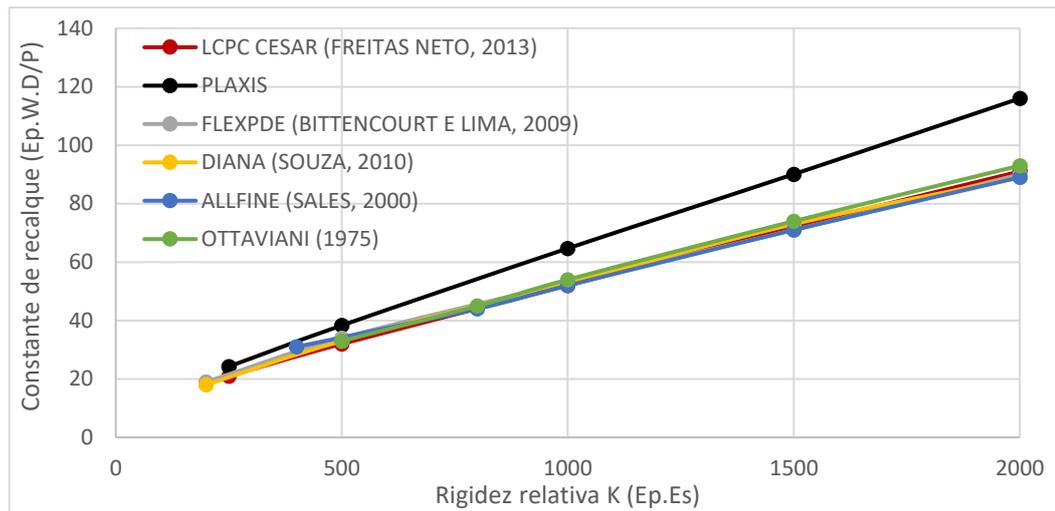


Figura 71 – Constante de recalque versus rigidez relativa obtidos com PLAXIS para estaca isolada com 40 metros de comprimento e H/L igual a 1,5.

A análise deste caso realizada através do PLAXIS 3D *Foundation* pode ser considerada satisfatória. Tendo em vista que, os valores de constante de recalque são bastantes sensíveis a pequenas variações de recalque e mesmo possuindo leve discrepância para análises do PLAXIS 3D *Foundation* em comparação com resultados de outros autores, a maior diferença, constante no primeiro caso, foi 25% superior, o que corresponde a uma diferença inferior a 4mm de recalque.

### 3.5.1.2 Radier sobre 9 e 15 estacas (Poulos *et al.* 1997)

Este caso foi inicialmente proposto por Poulos *et al.* (1997), que se trata de análises de um radier sobre 9 e 15 estacas, o qual é carregado por 9 pilares, em que seis deles são carregados por uma carga P1 e os três restantes por uma carga P2, que corresponde ao dobro da carga P1. Três diferentes casos foram analisados, variando a carga aplicada pelos pilares e no número de estacas do sistema de fundação.

A Figura 72 demonstra o caso proposto por Poulos *et al.* (1997) e os Quadros 13 e 14 os casos e os parâmetros utilizados nas análises pelo programa numérico PLAXIS 3D, respectivamente.

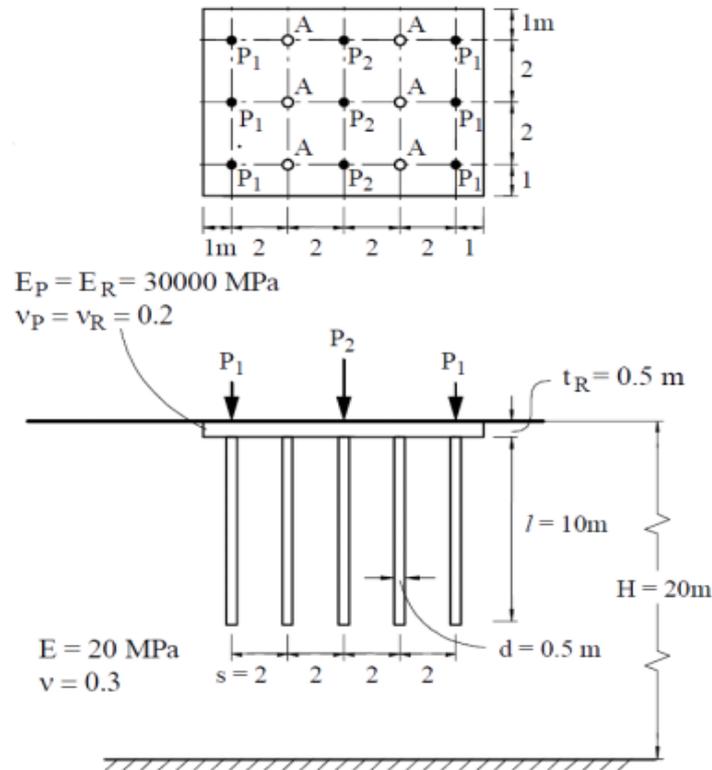


Figura 72 – Caso proposto por Poulos *et al.* (1997).

Quadro 13 – Cargas, fatores de segurança e número de estacas nos três casos analisados.

CASOS	Nº de estacas	FS	Carga nos Pilares P1 (kN)	Carga nos Pilares P2 (kN)	Carga total aplicada (kN)
A	15	2,6	1000	2000	12000
B	15	2,07	1250	2500	15000
C	9*	2,15	1000	2000	12000

\*As estacas destacadas com “A”, na Figura 58, são retiradas da fundação.

Quadro 14 – Parâmetros utilizados para os casos de radier sobre 9 e 15 estacas (Poulos *et al.* 1997).

D(m)	A <sub>p</sub> (m <sup>2</sup> )	B(m)	L(m)
0,5	0,196	3L	10
H/L	E <sub>p</sub> (GPa)	E <sub>s</sub> (MPa)	Carga (kN)
2	30	20	1000 a 2500
ν <sub>s</sub>	ν <sub>c</sub>	γ <sub>s</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	γ <sub>c</sub> (kN/m <sup>3</sup> )
0,3	0,2	18	25

D – Lado da seção da estaca; A<sub>p</sub> – Área da seção transversal da estaca; B – Domínio horizontal; L – Comprimento da estaca; H/L – Domínio Vertical; E<sub>p</sub> – Módulo de elasticidade do concreto; E<sub>s</sub> – Módulo de elasticidade do solo; ν<sub>s</sub> – Coeficiente de Poisson do solo; ν<sub>c</sub> – Coeficiente de Poisson do concreto; γ<sub>s</sub> – peso específico do solo; γ<sub>c</sub> – peso específico do concreto.

Após a realização das simulações e verificação dos recalques médios ocorridos no radier para os três casos, os resultados foram comparados com os valores obtidos por outros pesquisadores: Freitas Neto (2013), Poulos & Davis (1980), Randolph (1983), Poulos (1991, 1994), Ta & Small (1996), Souza (2010) e Sinha (1997).

Na Figura 73 são demonstrados os recalques médios ocorridos no radier no Caso A, para radier sobre 15 estacas e pilares com cargas de 1 MPa e 2 MPa. O recalque médio obtido pelo PLAXIS 3D *Foundation* foi de 25mm, na ordem de apenas 0,5% menor que a média dos valores constantes na literatura.

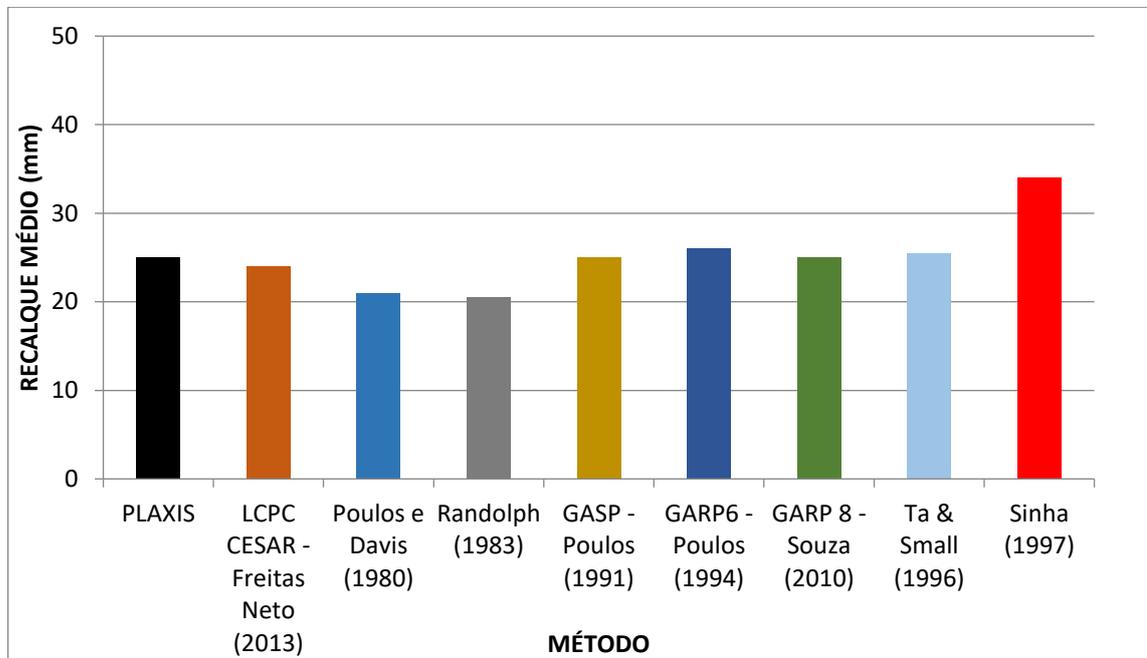


Figura 73 – Recalque médio ocorrido no radier com 15 estacas no caso A.

Na Figura 74, representada pelo caso B, com radier sobre 15 estacas e pilares com cargas de 1,25 Mpa e 2,5 MPa, o recalque médio ocorrido no radier foi na ordem de 31mm, apenas 5,7% inferior à média dos valores de recalque constantes na literatura.

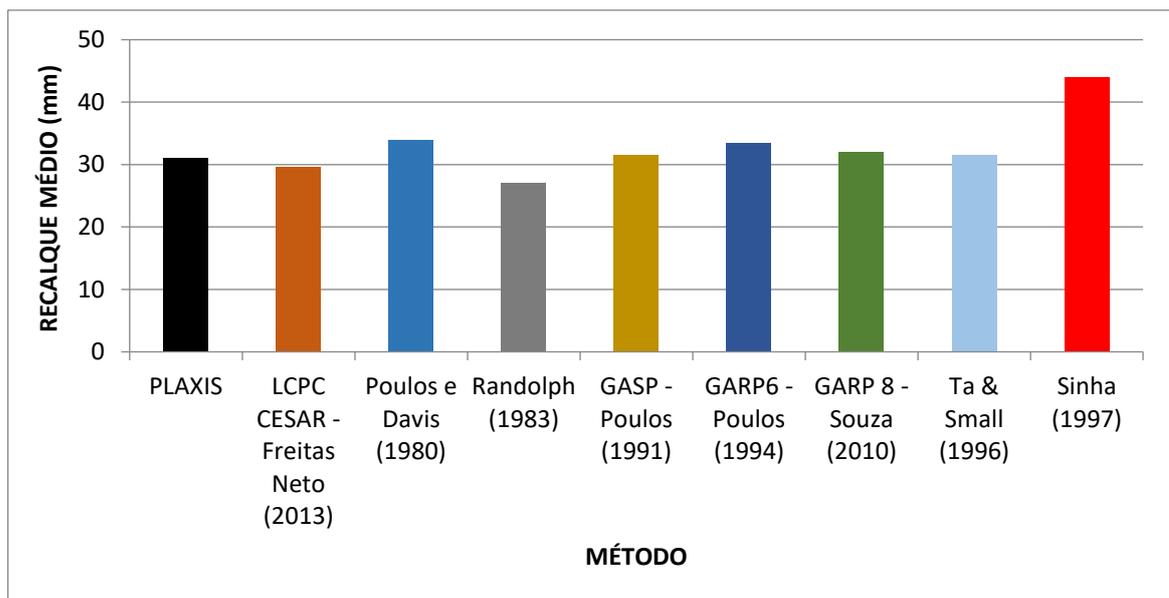


Figura 74 – Recalque médio ocorrido no radier com 15 estacas no caso B.

No caso C, com resultados ilustrados na Figura 75, foi observada a ocorrência de recalques na ordem de 27mm em análise realizada pelo PLAXIS 3D *Foundation*, o que representa valores recalques 8,7% inferior à média obtida por outros pesquisadores.

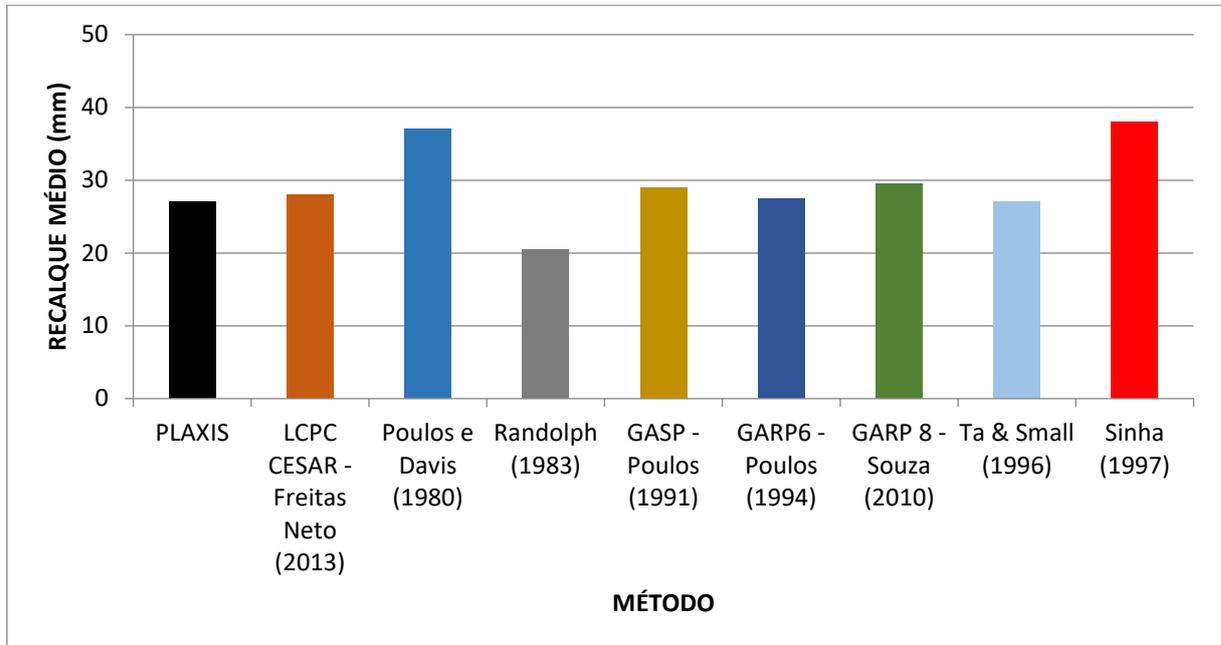


Figura 75 – Recalque médio ocorrido no radier com 9 estacas no caso C.

Através do estudo deste problema, proposto por Poulos *et al.* (1997), pôde-se concluir que o programa numérico PLAXIS 3D *Foundation* respondeu de forma positiva à análise de sistema de fundação em radier estaqueado, visto que o mesmo apresentou boa concordância com resultados constantes na literatura.

Além disso, através da comparação dos recalques obtidos pelo PLAXIS 3D *Foundation* para os três casos, infere-se que a redução do número de estacas de 15 para 9, do caso A para o C, mantendo o mesmo nível de carregamento, apresentou pouca influência no aumento de recalques, de 25mm para 31mm, como demonstrado no Quadro 15. Por fim, o aumento dos esforços aplicados na fundação em 3000kN, do caso A para o B, resultou no aumento de apenas 6mm nos recalques no radier.

Quadro 15 – Resultados dos casos analisados pelo PLAXIS 3D *Foundation* com radier sobre 9 e 15 estacas.

CASO	Nº de estacas	Carga total aplicada (MN)	Recalque médio (mm)
A	15	12MN	25
B	15	15MN	31
C	9	12MN	27

### 3.5.1.3 Radier sobre 9 Estacas (Kuwabara, 1989)

Este caso se trata de um radier sobre 9 estacas inseridas em solo homogêneo, proposto por Kuwabara (1989). O solo foi considerado elástico, com carga aplicada uniformemente sobre a superfície do radier.

A distância da borda do bloco até o eixo central das estacas periféricas corresponde ao diâmetro da estaca. A carga e o diâmetro foram mantidos constantes, variando as relações L/D e S/D entre 25 a 200 e 3 a 10, respectivamente. O Quadro 16 apresenta os parâmetros utilizados neste caso pelo programa numérico PLAXIS 3D *Foundation*.

Quadro 16 – Parâmetros utilizados para o caso de radier sobre 9 estacas (Kuwabara, 1989).

D(m)	$A_p$ (m <sup>2</sup> )	L(m)		S/D
1	0.785	25.50.100.150.200		3.5.10
H/L	t (m)	$E_p$ (GPa)	$E_s$ (MPa)	$K_{ps}$
2	2	20	20	1000
Carga (kN)	$\nu_s$	$\nu_c$	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_c$ (kN/m <sup>3</sup> )
1000	0.49	0.2	18	25

D – Lado da seção da estaca;  $A_p$  – Área da seção transversal da estaca; L – Comprimento da estaca; S/D – Espaçamento relativo entre as estacas; H/L – Domínio Vertical; t – espessura do radier;  $E_p$  – Módulo de elasticidade da estaca Concreto;  $E_s$  – Módulo de elasticidade do solo;  $K_{ps}$  – coeficiente de rigidez entre estaca e solo;  $\nu_s$  – Coeficiente de Poisson do solo;  $\nu_c$  – Coeficiente de Poisson do concreto;  $\gamma_s$  – peso específico do solo;  $\gamma_c$  – peso específico do concreto.

As Figuras 76, 77 e 78 demonstram os resultados obtidos pelas análises no PLAXIS 3D *Foundation* para as condições de S/D 3, 5 e 10, respectivamente, em conjunto daqueles resultados constantes na literatura.

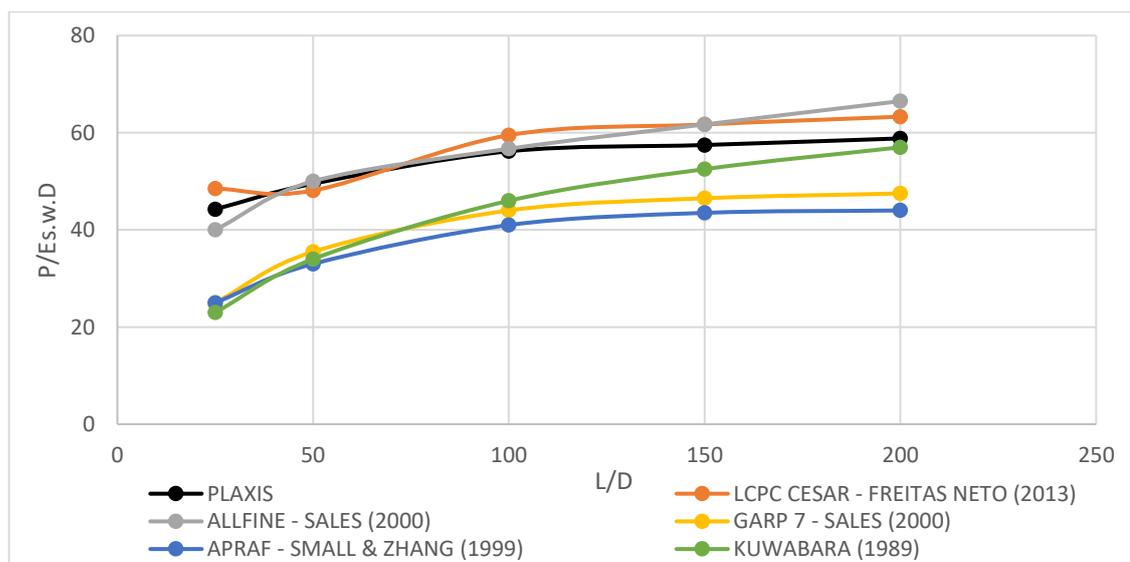


Figura 76 – Resultados para radier sobre 9 estacas com S/D = 3.

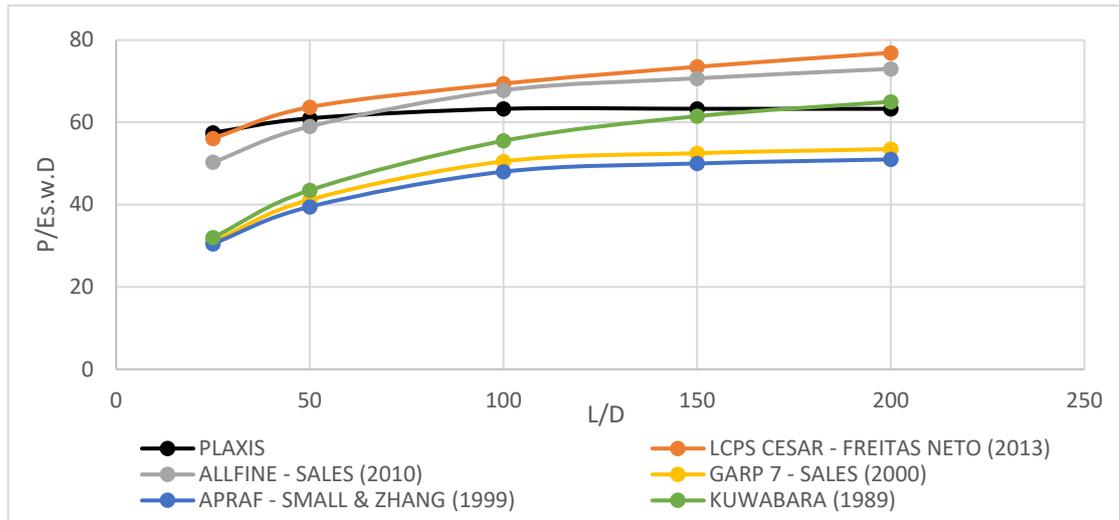


Figura 77 – Resultados para radier sobre 9 estacas com S/D = 5.

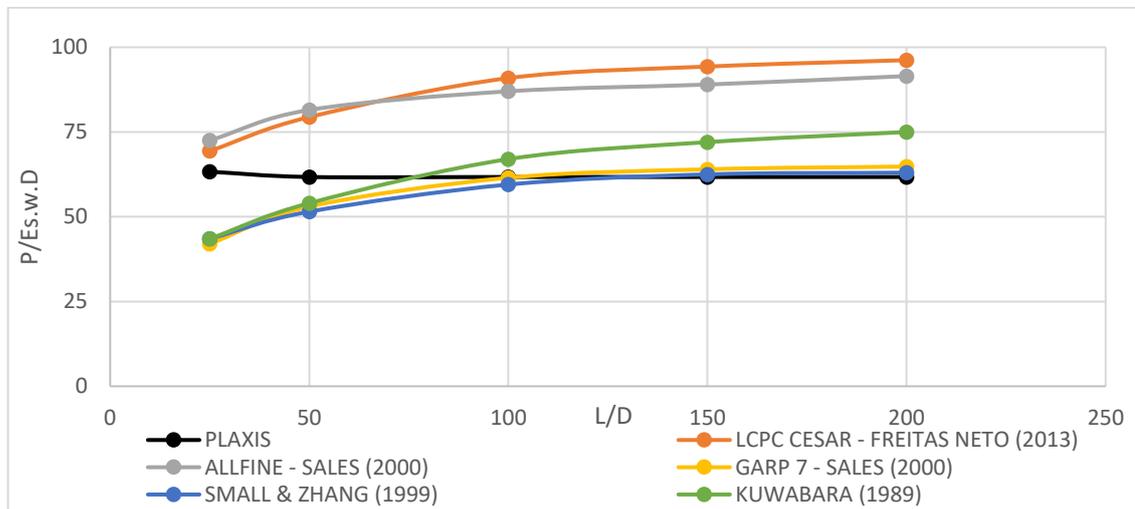


Figura 78 – Resultados para radier sobre 9 estacas com S/D = 10.

Através dos gráficos é observado que os resultados obtidos pelo PLAXIS 3D *Foundation* em todos os espaçamentos analisados houve uma tendência de estabilização dos recalques com aumento do comprimento das estacas, igualmente visto nos resultados obtidos pelos outros pesquisadores.

Como a sensibilidade da constante de recalque é elevada perante pequenas variações de recalque, em que 1mm implica em grandes alterações nas curvas, o PLAXIS 3D *Foundation* apresentou eficácia na análise deste caso, já que apresentou concordância com os resultados obtidos por outros pesquisadores, em especial para a primeira análise, com relação de  $L/D = 3$ .

### 3.5.1.4 Radier sobre 16 estacas (Proposto pelo Comitê TC-18)

Este caso foi proposto pelo comitê técnico TC-18 da ISSMGE (*Internacional Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*), sendo posteriormente analisado por diversos pesquisadores. Esta análise é considerada mais complexa que as anteriores, visto que o módulo de elasticidade do solo e resistência não drenada crescem linearmente com a profundidade, obedecendo as equações apresentadas pelas Equações 45 e 46 a seguir, respectivamente.

$$E_s = 2,45z + 7,0 \text{ (MPa)} \quad \text{Eq. 47}$$

$$c_u = 3,93z + 110 \text{ (kPa)} \quad \text{Eq. 48}$$

Neste problema, a massa de solo foi constituída de apenas uma camada de solo, já que o programa PLAXIS 3D *Foundation* possui uma ferramenta de inserir valores de módulo de elasticidade e coesão não drenada com incrementos a cada metro de profundidade. A Figura 79 apresenta o problema estudado e o Quadro 17 os parâmetros utilizados na análise no PLAXIS 3D *Foundation*.

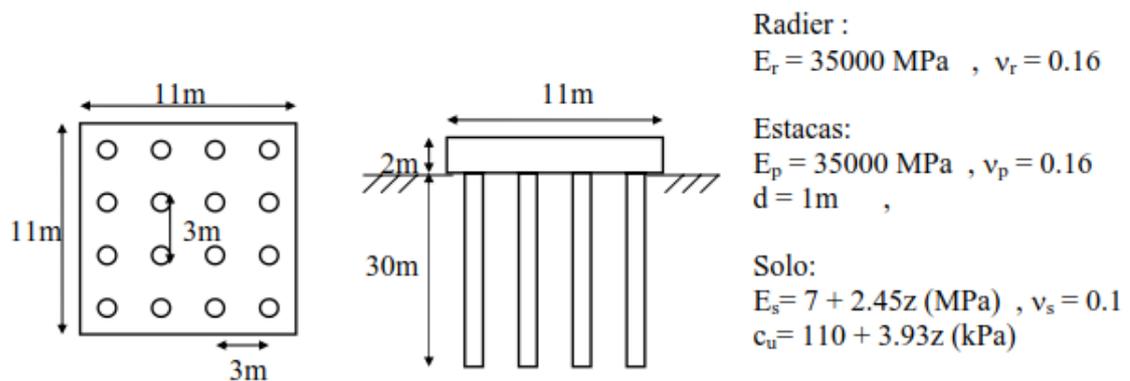


Figura 79 – Radier sobre 16 estacas proposto pelo TC – 18.

Quadro 17 – Parâmetros utilizados no PLAXIS para os casos de radier sobre 16 estacas. (TC – 18).

D(m)	$A_p$ (m <sup>2</sup> )	B(m)	L(m)
1	0.785	3L	30
t (m)	H/L	S/D	$E_c$ (GPa)
2	2	3	35
$E_s$ (MPa)	$C_u$ (kPa)	$\phi$	Carga (MN)
$2,45z + 7,0$	$3,93z + 110$	30	80
$v_s$	$v_c$	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_c$ (kN/m <sup>3</sup> )
0,1	0,16	18	25

D – Lado da seção da estaca;  $A_p$  – Área da seção transversal da estaca; B – Domínio horizontal; L – Comprimento da estaca; t – Espessura do radier; H/L – Domínio Vertical; S/D – Espaçamento relativo entre estacas;  $E_c$  – Módulo de Elasticidade do concreto;  $E_s$  – Módulo de Elasticidade do solo;  $C_u$  – Resistência não drenada;  $\phi$  – ângulo de atrito do solo;  $v_s$  – Coeficiente de Poisson do solo;  $v_c$  – Coeficiente de Poisson do concreto;  $\gamma_s$  – peso específico do solo;  $\gamma_c$  – peso específico do concreto.

Em vista do solo ser bastante resistente, somada às dimensões das estacas e espaçamento S/D igual a 3, o grupo de estaca se torna bem mais rígido que o radier. Isto resulta numa participação pouco relevante do radier no comportamento da fundação, sistema que pode ser conceituado como grupo de estacas.

O Quadro 18 demonstra os resultados obtidos pelo programa numérico PLAXIS 3D *Foundation* e aqueles obtidos por outros pesquisadores, com modelagem baseada no Método dos Elementos Finitos (MEF). Enquanto o Quadro 19 apresenta todos os resultados constantes na literatura para o problema estudado.

Quadro 18 – Resultados para programas baseado no MEF.

AUTOR / PROGRAMA / MÉTODO	RECALQUE (mm)
Yamashita (1998) / MEF	29
Sales (2000) / ALLFINE / MEF	27
Souza (2010) / DIANA / MEF	31
Freitas Neto (2013) / LCPC - CESAR / MEF	28,8
PLAXIS 3D <i>Foundation</i>	30

Quadro 19 – Todos os resultados constantes na literatura.

AUTOR / PROGRAMA / MÉTODO	RECALQUE (mm)	Carga nas Estacas (%)
Yamashita (1998) / MEF	29	98
Horikoshi & Randolph (1998) / Tubulão Equivalente	31	x
Horikoshi & Randolph (1998) / HyPR	41/43	100
Matsumoto (1998) / KURP	42	96
GARP / Método Aproximado	42	98
Sales (2000) / ALLFINE / MEF	27	95
Souza (2010) / DIANA / MEF	31	X
Freitas Neto (2013) / LCPC - CESAR / MEF	28,8	94
PLAXIS 3D <i>Foundation</i>	30	92

Observa-se, após comparação com os resultados disponibilizados na literatura, em especial aqueles obtidos por meio do MEF, boa concordância nos recalques obtidos pelo PLAXIS 3D *Foundation* e aqueles por outros programas. A diferença observada nos valores de recalque pode ser justificada pela densidade de malha utilizada na análise, que pode ocasionar variações nos resultados.

A pequena participação dos radier no recebimento dos esforços, inferior a 10% em todos os resultados se deu devido a elevada a rigidez ocasionada pelo grupo de estacas.

### **3.5.1.5 Radier isolado e blocos e radiers sobre 1, 2 e 4 estacas (Soares, 2011)**

Este caso se trata de uma análise experimental realizada por Soares (2011) a fim de verificar o comportamento de fundações estruturadas pela metodologia grupo de estacas e em radier estaqueado, para posterior comparação dos sistemas e averiguar se o contato do radier com a massa de solo conferia maior capacidade de carga para a fundação, além de redução dos recalques.

Soares (2011) realizou 7 provas de carga estática (PCE) para três diferentes sistemas de fundações, com a execução de 14 estacas do tipo *Hollow Auger*, todas com 30cm de diâmetro e 4,5m de comprimento, além de um bloco rígido com dimensões de 1,55x1,55x0,85m, o qual foi utilizado para as provas de carga. Para os radiers e grupos de 2 e 4 estacas o espaçamento entre eixos foi de 1,05m, correspondendo a 3,5 vezes o diâmetro da estaca.

Para a concepção de grupo de estacas, o bloco ficou apoiado sobre as estacas sem qualquer contato com o solo, possuindo um espaçamento entre a base do bloco e o solo de 5cm. Para a consideração de fundação em radier estaqueado, a base do bloco possuía contato com o solo, havendo assim, interação deste com a massa de solo.

Para cada uma das provas de carga realizadas por Soares (2011), Macedo (2017) realizou a sua respectiva simulação numérica com o uso do PLAXIS 3D *Foundation*, cujos resultados estão apresentados a seguir. Com os resultados obtidos por Macedo (2011), foi possível ratificar o desempenho satisfatório da ferramenta numérica na previsão do comportamento de radiers estaqueados, trazendo maior confiança no uso da respectiva ferramenta numérica.

#### **3.5.1.5.1 Radier isolado**

Nesta análise, a modelagem numérica realizada por Macedo (2017) apresentou comportamento similar ao resultado experimental obtido por Soares (2011) até aproximadamente 500kN, equivalente à primeira metade do ensaio.

Para maiores esforços, foram observadas previsões desiguais, com o modelo experimental apresentando maior rigidez que o numérico. Ao fim da análise, o recalque máximo observado no PLAXIS 3D *Foundation* foi de 26,1mm, o que corresponde a valor 61% superior ao obtido experimentalmente (16,17mm). A Figura 80 ilustra os resultados experimentais e numéricos para o radier isolado.

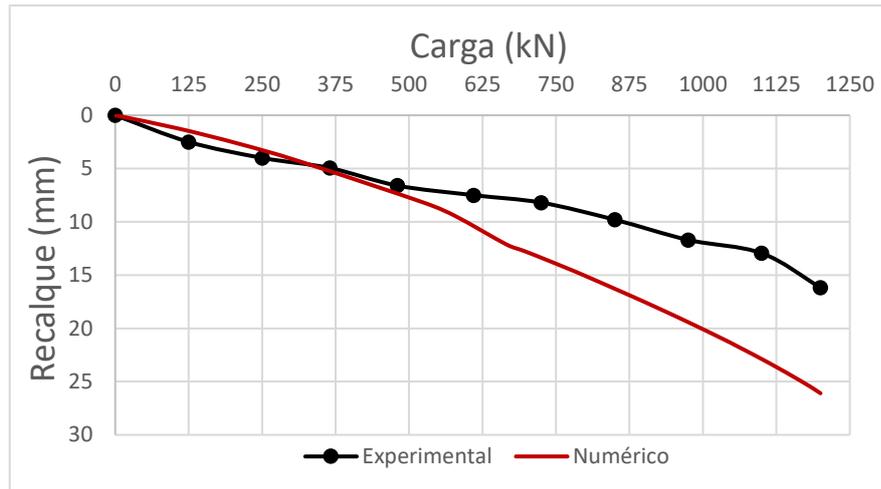


Figura 80 – Curvas carga-recalque para radier isolado. Macedo (2017)

### 3.5.1.5.2 Radier com uma estaca

Na modelagem numérica de radier com uma estaca foi obtida previsão similar ao comportamento apresentado pelo ensaio experimental em todos os níveis de carregamento.

O modelo numérico apresentou rigidez levemente superior ao experimental na primeira metade do ensaio, contudo, ao final do ensaio, ambos modelos convergem para valores próximos. A Figura 81 ilustra tais resultados.

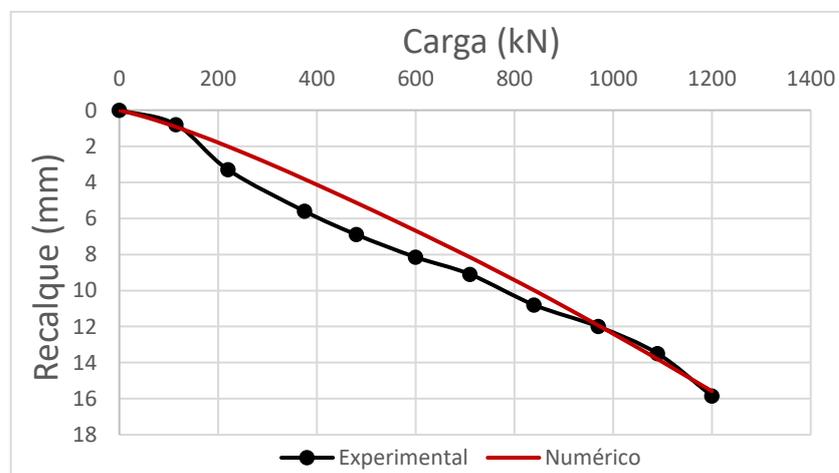


Figura 81 – Curvas carga-recalque para radier com uma estaca. Macedo (2017)

### 3.5.1.5.3 Radier com duas estacas

Nesta análise, a previsão numérica obtida pelo PLAXIS 3D *Foundation* apresentou curva carga *versus* recalque bem similar ao resultado experimental praticamente em todos os estágios de carregamento. Apenas no final do carregamento o modelo experimental reduz sua rigidez, divergindo assim do modelo numérico.

Ao final do ensaio, o recalque máximo do modelo experimental apresentou deslocamentos na ordem de 42,70mm, enquanto o modelo numérico foi de 36,42mm, valor 14,70% inferior ao resultado obtido em campo. A Figura 82 ilustra os resultados destas modelagens.

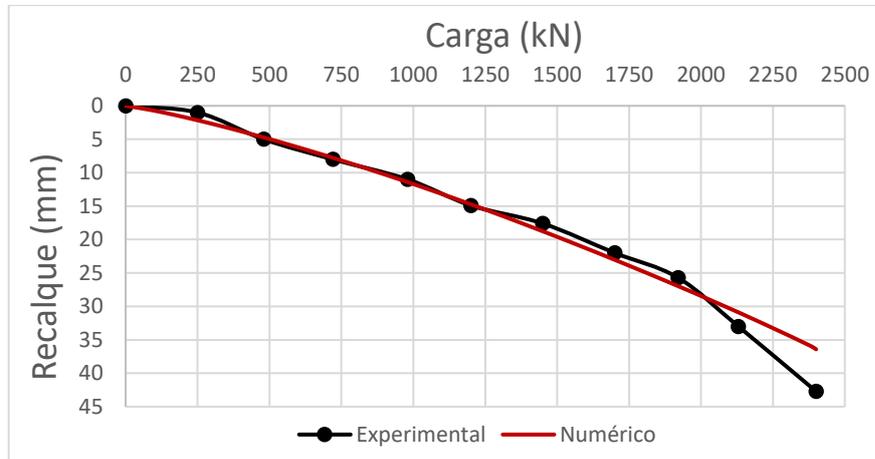


Figura 82 – Curvas carga-recalque para radier com duas estacas. Macedo (2017)

#### 3.5.1.5.4 Radier com quatro estacas

Nesta análise, o modelo numérico demonstrou boa convergência de recalques com o experimental, com exceção do final do ensaio, momento em que o modelo experimental perde um pouco de rigidez, apresentando assim pequena discrepância nos deslocamentos com o modelo numérico ao final do ensaio.

O recalque máximo obtido em campo foi na ordem de 49,20mm, enquanto o numérico chegou a 40,00mm, 18,70% inferior ao experimental. A Figura 65 ilustra estes resultados.

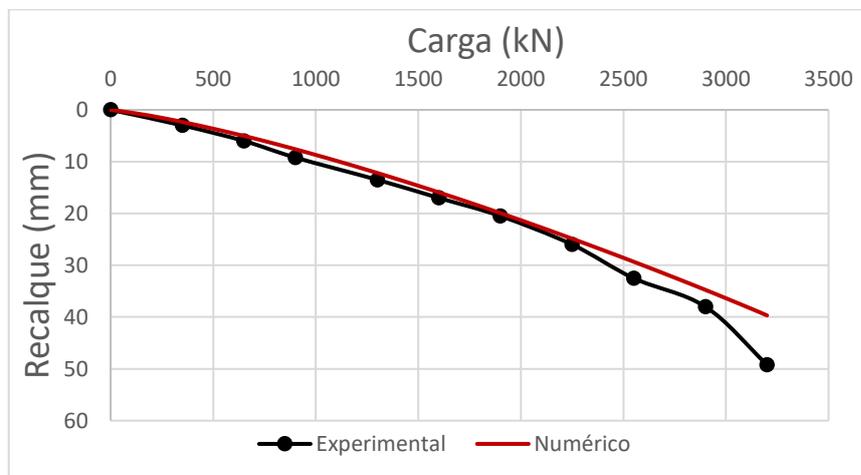


Figura 83 – Curvas carga-recalque para radier com quatro estacas. Macedo (2017)

### 3.5.1.5.5 Bloco sobre uma estaca

Para a modelagem de bloco sobre uma estaca, o resultado numérico apresentou comportamento similar ao experimental até 50% do ensaio. A partir deste ponto é verificada redução brusca da rigidez no modelo experimental, distanciando desta forma da análise numérica. Com isso, o modelo numérico simulou o comportamento do bloco com uma estaca de forma satisfatória para pequenos esforços.

Ao fim do ensaio, o modelo experimental apresentou deslocamentos na ordem de 86,32mm, enquanto que no numérico 25,15mm, como ilustrado na Figura 84, o que corresponde a deslocamento 70,86% inferior ao experimental.

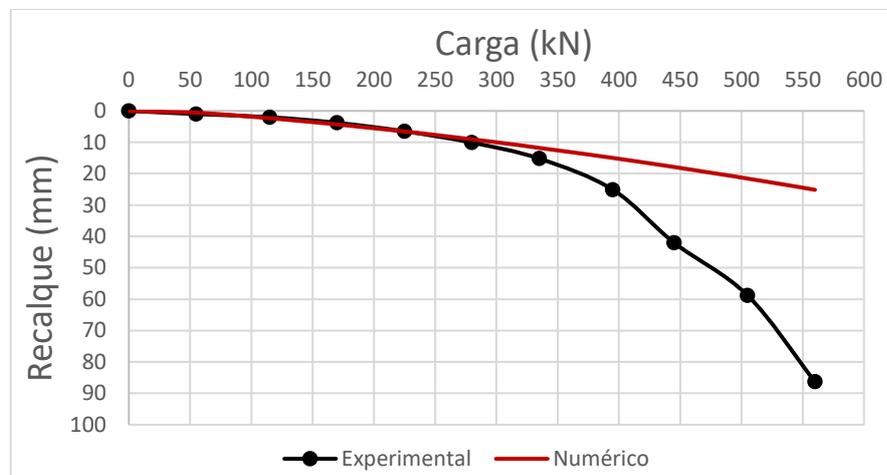


Figura 84 – Curvas carga-recalque para bloco sobre uma estaca. Macedo (2017)

### 3.5.1.5.6 Bloco sobre duas estacas

Nesta análise, o modelo numérico apresentou similaridade com o modelo experimental nos valores de recalques em grande parte do ensaio. Apenas ao final do ensaio, o modelo experimental apresenta menor rigidez que o modelo numérico, havendo assim, certa discrepância nos deslocamentos finais comparado à simulação numérica.

Ao final do ensaio, o modelo experimental apresentou recalques máximos na ordem de 47,35, e o numérico 28,75mm, 39% inferior ao resultado de campo, como demonstrado na Figura 85.

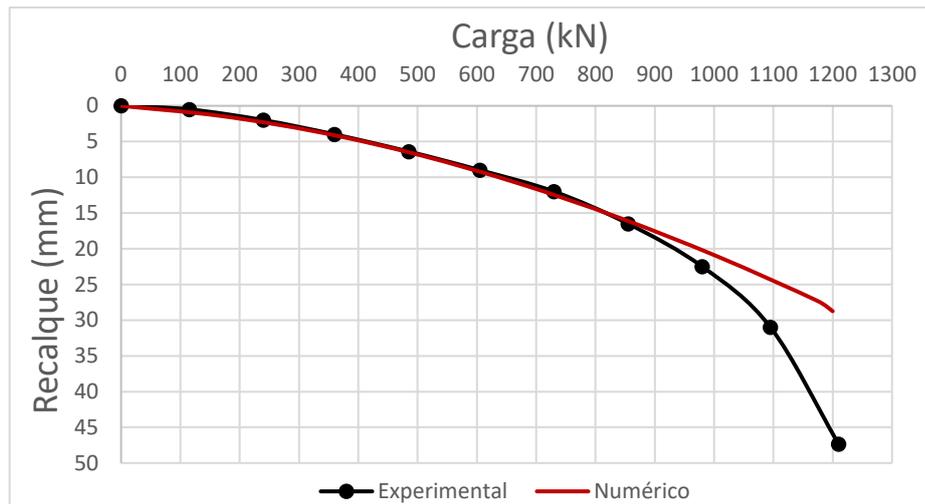


Figura 85 – Curvas carga-recalque para bloco sobre duas estacas. Macedo (2017)

### 3.5.1.5.7 Bloco sobre quatro estacas

Nesta análise, o modelo numérico apresentou boa concordância com o resultado experimental em grande parte do ensaio, como o modelo experimental demonstrando perda de rigidez nos últimos estágios de carregamento, distanciando assim do modelo numérico.

Ao final do ensaio, o modelo numérico apresentou recalques máximos na ordem de 45,1mm, 25,4% inferior ao experimental (60,44mm), como ilustrado na Figura 86.

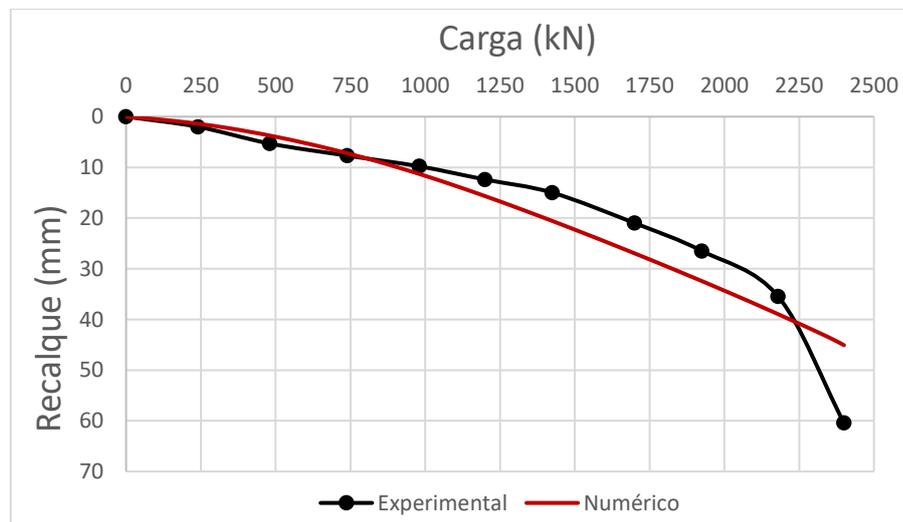


Figura 86 – Curvas carga-recalque para bloco sobre quatro estacas. Macedo (2017)

Após análise das modelagens numéricas realizadas por Macedo (2017), conclui-se que os 7 ensaios realizados por Soares (2011) não apresentaram ruptura física; apresentando, de maneira geral, maior rigidez que as curvas experimentais obtidas por Soares (2011), em especial nos estágios finais de carregamento.

Assim como Soares (2011), a avaliação da capacidade de carga dos sistemas de fundação foi realizada pelo método proposto por Skempton e MacDonald (1956) no que tange solos arenosos, que limitam os deslocamentos de fundações em sapata em 40mm e radier no intervalo de 40 a 65mm. Com isso, a carga admissível  $P_{ad}$  foi adotada para o valor de recalque máximo de 40mm, com aplicação de fator de segurança igual a 1,5.

A fundação em radier estaqueado com quatro estacas apresentou carga de 3200kN para valores de recalque na ordem de 40mm, resultando num recalque admissível  $\rho_{adm}$  de 23,3mm para uma carga admissível de 2133,33kN.

Os demais sistemas em radier estaqueado, além do radier isolado, tiveram  $P_{ad}$  para o correspondente valor de deslocamento de 23,3mm, todos demonstrados na Figura 88.

Ressalta-se a necessidade da extrapolação da curva carga recalque, realizada por Macedo (2017), para o radier estaqueado com uma estaca, em vista de não ter alcançado o recalque admissível, como ilustrado na Figura 87.

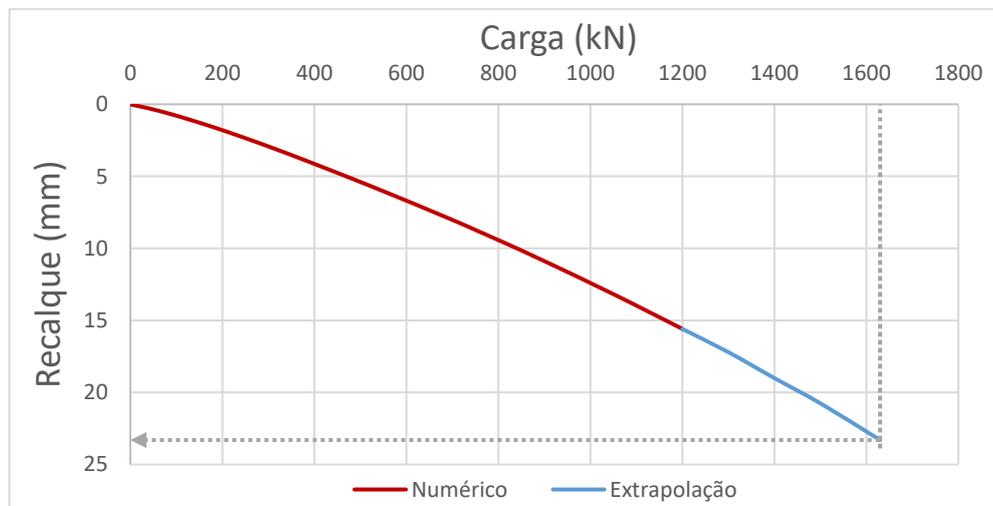


Figura 87 – Extrapolação da curva carga-recalque para radier estaqueado com uma estaca para obtenção da carga admissível. Macedo (2017)

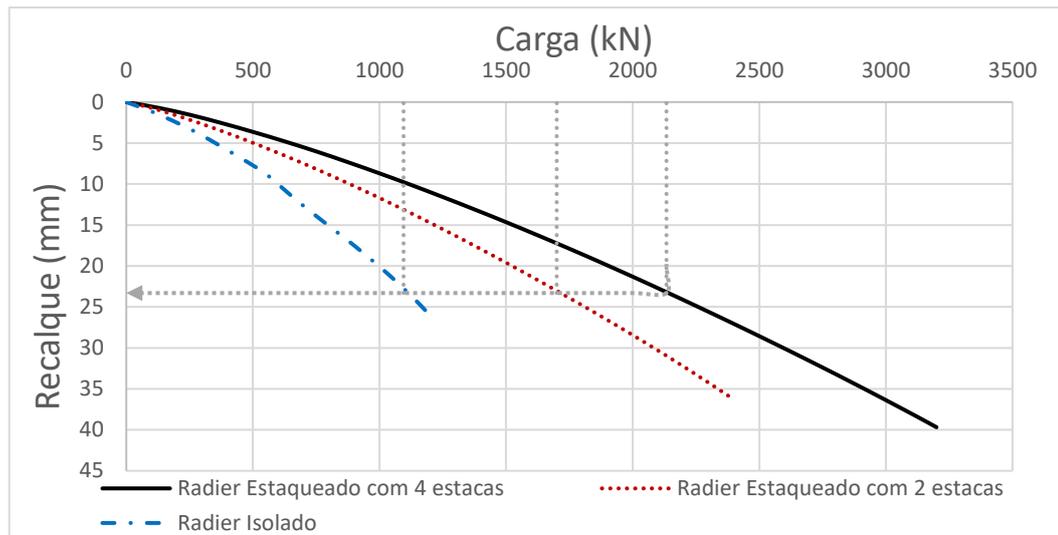


Figura 88 – Obtenção da carga admissível através do recalque admissível para radiers estaqueados e radier isolado. Macedo (2017)

Para os sistemas de fundações em grupo de estacas foi aplicado o mesmo método proposto para radiers estaqueados. Assim, o grupo de 4 estacas apresentou carga de 2186 kN para recalque de 40mm, o que resultou numa carga admissível ( $P_{adm}$ ) de 1457,67 kN e deslocamento admissível ( $\rho_{adm}$ ) de 21,2mm.

Os demais grupos de estacas tiveram  $P_{adm}$  calculados a partir desse nível de recalque, como ilustrado na Figura 89.

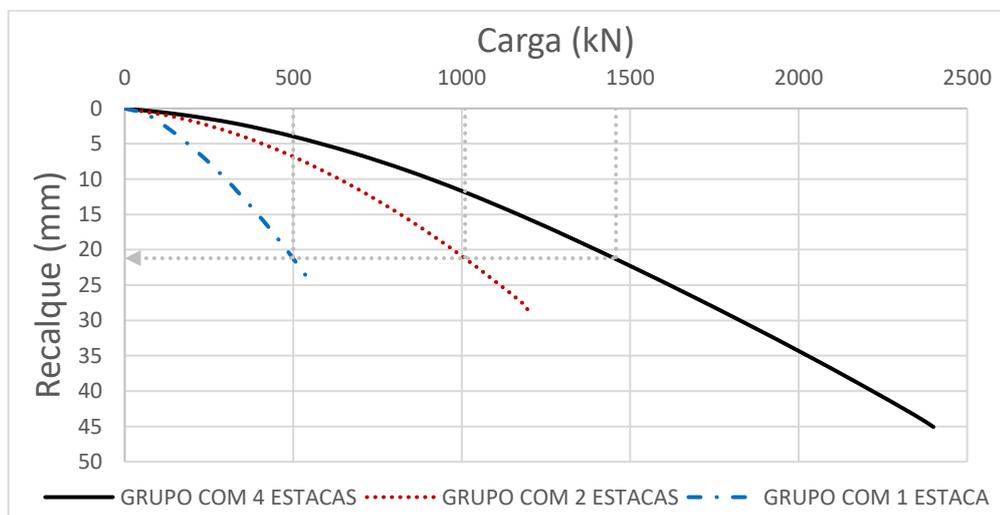


Figura 89 – Obtenção da carga admissível através do recalque admissível para grupo de estacas. Macedo (2017)

A fim de verificar o aumento de desempenho apresentado por parte dos sistemas de fundações em radier estaqueado em virtude da interação do radier com a massa de solo, foram realizadas comparações desta metodologia com grupo de estacas para o mesmo número de estacas, ilustradas nas Figuras 90, 91 e 92.

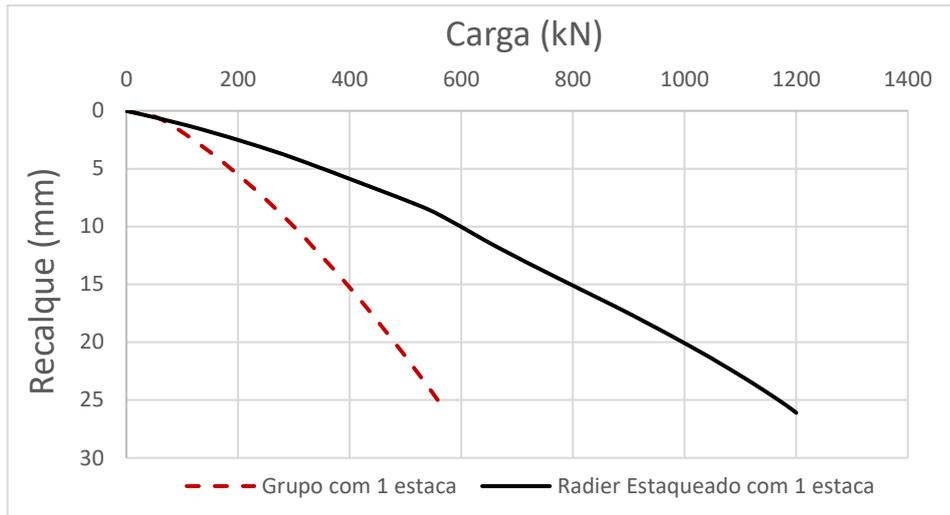


Figura 90 – Comparação de curvas carga recalque entre grupo de 1 estaca e radier estaqueado com 1 estaca.

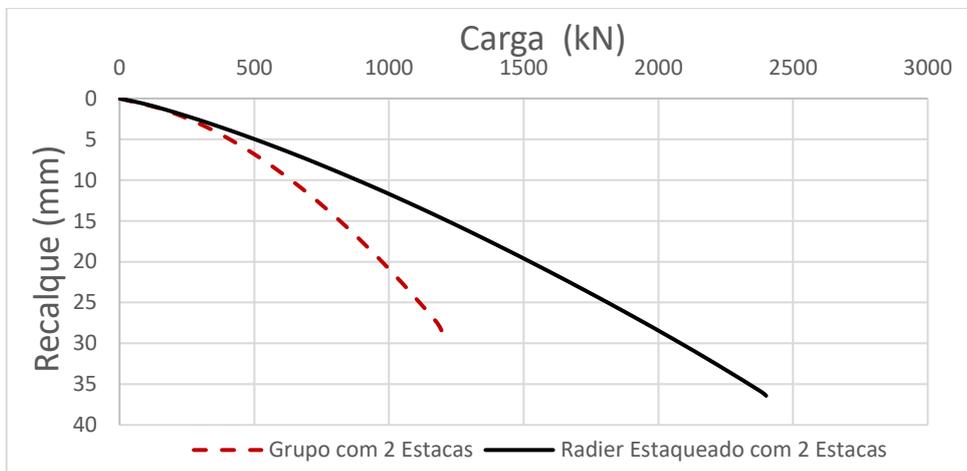


Figura 91 – Comparação de curvas carga recalque entre grupo de 2 estacas e radier estaqueado com 2 estacas.

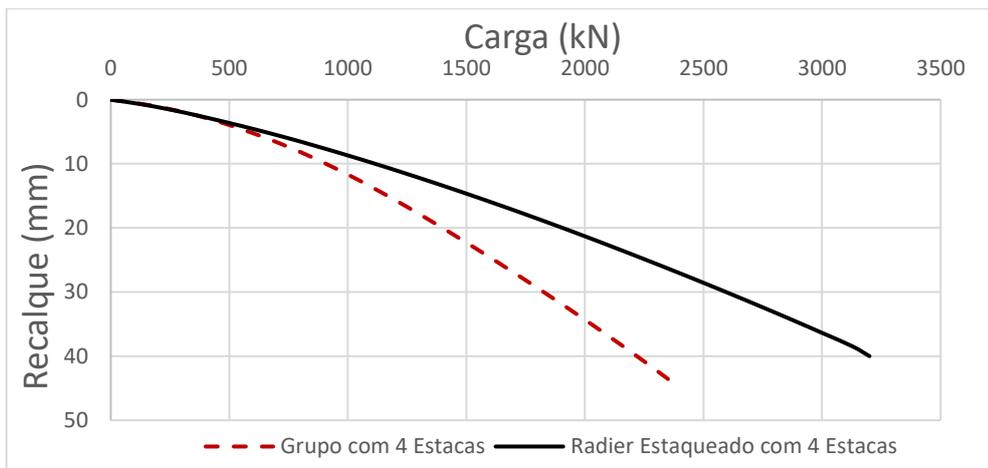


Figura 92 – Comparação de curvas carga recalque entre grupo de 4 estacas e radier estaqueado com 4 estacas.

O Quadro 20 apresenta as cargas admissíveis ( $P_{ad}$ ), recalques admissíveis ( $\rho_{adm}$ ), bem como as cargas máximas ( $P_{m\acute{a}x}$ ) para recalque limite para o modelo numérico e experimental, obtido por Soares (2011), para os 7 casos analisados.

Quadro 20 – Cargas máximas, admissíveis e recalques admissíveis para modelagens numéricas e experimentais obtidos por Soares (2011). Macedo (2017)

Sistema de Fundação	Modelagem Numérica			Modelagem Experimental		
	$P_{m\acute{a}x}$ (kN)	$P_{adm}$ (kN)	$\rho_{adm}$ (mm)	$P_{m\acute{a}x}$ (kN)	$P_{adm}$ (kN)	$\rho_{adm}$ (mm)
Radier isolado	1642,5*	1095,0	23,3	2070,0	1380,0	20,8
Radier com 1 estaca	2445,0*	1630,0	23,3	2130,0*	1420,0	20,8
Radier com 2 estacas	2550,0*	1700,0	23,3	2325,0	1550,0	20,3
Radier com 4 estacas	3200,0	2133,33	23,3	2950,0	1966,7	21,7
Grupo com 1 estaca	750**	500	21,2	445	296,7	12,1
Grupo com 2 estacas	1366,5*	911	21,2	1170	780	14,1
Grupo com 4 estacas	2186,5	1457,7	21,2	2200	1466,7	16,2

\*Carga equivalente ao recalque de 40mm, a carga correspondente ao recalque admissível de 23,3 mm multiplicada por 1,5. \*\*Carga equivalente ao recalque de 40mm, a carga correspondente ao recalque admissível de 21,2 mm multiplicada por 1,5.

Para os sistemas de fundações em radier estaqueado, verificou-se proximidade nos recalques admissíveis ( $\rho_{adm}$ ) entre os modelos numéricos e experimentais. Quanto a capacidade de carga admissível ( $P_{ad}$ ), observou-se valores levemente superiores nas modelagens numéricas, exceto para radier isolado. Para radier com duas estacas, a carga admissível foi aproximadamente 9% superior, enquanto que para radier com 4 estacas foi 14,79% superior.

Nas análises comparativas para grupo de estacas, a capacidade de carga foi praticamente a mesma para o grupo de quatro estacas. Para o grupo de duas estacas, o modelo numérico apresentou carga admissível 17,69% superior ao experimental. Por fim, grupo composto por uma estaca foi o que apresentou maior divergência entre os modelos, com o numérico possuindo carga admissível 68,52% superior.

Foi calculado um fator de segurança a partir da relação entre a carga admissível obtida numericamente e a carga máxima nos modelos experimentais adquiridos por Soares (2011), com valores ilustrados na Figura 93.

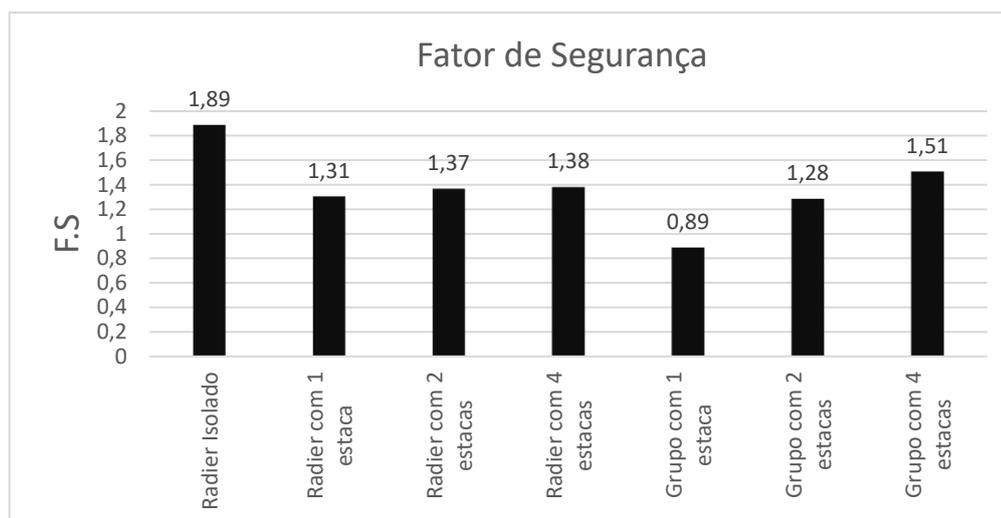


Figura 93 – Fatores de segurança obtidos a partir da razão entre a carga máxima obtida experimentalmente e a carga admissível obtida numericamente. Macedo (2017)

A partir da análise da Figura 93, concluiu-se que, no que tange a carga admissível, o programa PLAXIS 3D *Foundation* poderia ser utilizado para previsão tanto dos sistemas de fundações, tanto para radier estaqueado quanto para grupo de estacas, exceto para grupo de uma estaca, o qual resultou num fator de segurança inferior a 1.

### 3.5.1.5.8 Distribuição dos esforços no radier estaqueado

A metodologia de fundação em radier estaqueado leva em consideração a participação do radier no recebimento dos esforços emitidos pela estrutura e transferência para a massa de solo.

Contudo, quantificar a porcentagem de carregamentos que são suportados pelo elemento superficial é bastante complexo, necessitando do uso de ferramentas computacionais que estimem com maior precisão essa contribuição e analisem a interação entre os elementos radier-estaca-solo de forma conjunta.

A versão do programa PLAXIS 3D *Foundation* utilizada na pesquisa não dispõe, como outras no mercado, de uma ferramenta específica que avalie numericamente raders estaqueado, em especial, análises quantitativas das cargas transferidas para estacas e raders.

Em vista desta limitação, Macedo (2017) realizou análises indiretas entre a tensão média emitida no topo da estaca, isto é, na cota de assentamento do bloco, e sua respectiva seção transversal, a fim de calcular a carga transferida para a cabeça das estacas, procedimento também realizado por Pezo (2013).

Assim, a carga recebida pelo radier pôde ser mensurada a partir da diferença da carga total aplicada pela estrutura e o somatório daquelas que foram transferidas para o topo da(s) estaca(s). Com isso, a carga atuante no topo da estaca foi calculada por meio da Equação 49 a seguir:

$$Q_p^i = \sigma_v \cdot A_p \quad \text{Eq. 49}$$

onde:

$Q_p^i$  = carga no topo da estaca i;

$\sigma_v$  = tensão no topo da estaca i;

$A_p$  = Área da seção transversal da estaca i.

Desta forma, para estimar a carga  $Q_p$  que é suportada pelo grupo de estacas, utiliza-se a Equação 50:

$$Q_p = \sum_{i=1}^n Q_p^i \quad \text{Eq. 50}$$

Assim, a carga suportada pelo radier  $Q_r$  e transmitida para o solo é obtida pela diferença da carga total aplicada na fundação  $Q_t$  e a carga total suportada pelas estacas  $Q_p$ , como demonstrada na Equação 51:

$$Q_r = Q_t - Q_p \quad \text{Eq. 51}$$

Na análise de radier com uma estaca, a tensão aproximada que chega no topo da estaca é de 4500kN/m<sup>2</sup>, o que resulta numa carga de 318kN, equivalente a 26,51% do esforço total aplicado no sistema de fundação. Assim, para radier estaqueado com uma estaca o radier foi responsável por suportar 73,49% da carga.

Para radier estaqueado com duas estacas foi observada uma tensão de aproximadamente 7200kN/m<sup>2</sup> na cota do topo das estacas, o que resulta numa carga de 509kN aplicada em cada estaca. Assim, as estacas foram responsáveis por resistir a 42,42% dos esforços totais aplicados e o radier os 57,58% restantes.

No sistema de radier estaqueado com quatro estacas, a tensão média aproximada que chegou no topo de cada estaca foi de 6700kN/m<sup>2</sup>, resultando em torno de 473,6kN de carga aplicada em cada elemento estrutural, totalizando 1894,4kN de esforços. Assim, para radier estaqueado com quatro estacas, 59,2% da carga total foi suportada pelas estacas e 40,8% pelo radier.

### **3.5.1.6 Considerações finais da verificação do PLAXIS 3D *Foundation***

Nos itens anteriores, diversos casos constantes na literatura foram analisados pelo PLAXIS 3D *Foundation* a fim de verificar a concordância entre os resultados obtidos e se o programa foi manuseado de maneira eficiente em simular o comportamento de diferentes sistemas de fundações.

A partir dos resultados obtidos no PLAXIS 3D *Foundation*, conclui-se que o programa correspondeu de forma satisfatória às análises, tanto para estaca isolada, como também de radier estaqueado com cargas pontuais de pilares ou distribuídas na superfície do radier.

Os casos em que foram realizadas análises paramétricas, com variação do comprimento das estacas e espaçamento relativo, além da metodologia de grupos com diferentes números de estacas, também tiveram previsões obtidas no PLAXIS 3D *Foundation* com boa acurácia.

Infere-se, desta forma, que esta ferramenta numérica foi utilizada de maneira eficiente em analisar o comportamento estrutural de sistemas de fundações tanto pela metodologia tradicional (grupo de estacas) quanto para radiers estaqueado.

### **3.5.2 Retroanálise numérica dos parâmetros geotécnicos do solo**

A retroanálise numérica dos parâmetros geotécnicos do solo é uma importante etapa da pesquisa, garantindo que as simulações a serem realizadas pelo programa numérico sejam efetuadas de forma eficiente, prevendo com boa acurácia o comportamento do sistema de fundação em campo.

Para a retroanálise do programa numérico PLAXIS 3D *Foundation*, foram utilizados os resultados das 3 provas de carga executada na área de estudo, ilustrados no item 3.3. Os parâmetros geotécnicos iniciais foram obtidos por meio de correlações empíricas baseadas nos resultados de SPTs obtidos em campo, apresentados anteriormente no item 3.2.1.

#### **3.5.2.1 Parâmetros geotécnicos iniciais**

Os parâmetros geotécnicos iniciais para realização das modelagens numéricas foram obtidos por meio de correlações semi-empíricas baseadas nos resultados de  $N_{SPT}$ . Antes de realizar as correlações, o solo foi dividido em 3 camadas, com agrupamento tendo como base a aproximação entre os valores de  $N_{SPT}$ .

Ressalta-se a necessidade de desconsiderar os 3 primeiros metros de profundidade, pois o local da obra era utilizado como aterro sanitário (lixão), sendo assim, para projetar a fundação, foi realizado um corte superficial.

Após a divisão das camadas, foi calculado o valor médio da resistência a penetração de cada camada, para obter os parâmetros geotécnicos preliminares para simulação numérica com as PCEs realizadas na obra.

O peso específico do solo para cada uma das três camadas foi adotado por meio do Quadro 21, em função da compactidade da areia.

Quadro 21 – Peso específico em solos arenosos. (Godoy, 1972).

N (Golpes)	Consistência	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )		
		Areia seca	Úmida	Saturada
<5	Fofa (o)	16	18	19
5 a 8	Pouca compacta (o)			
9 a 18	Medianamente compacta	17	19	20
19 a 40	Compacta (o)			
>40	Muito compacta (o)	18	20	21

Existem inúmeras correlações empíricas para obter o ângulo de atrito do solo por meio do SPT, como Dunham (1953), Godoy (1983), Hatanaka e Uchida (1996) e Teixeira (1996). Para a presente pesquisa, utilizou-se a formulação proposta por Teixeira (1996), representada na Equação 52, por ser uma correlação usual no Brasil.

$$\varphi = \sqrt{24 \cdot N_{\text{SPT}}} + 15^\circ \quad \text{Eq. 52}$$

Para a obtenção do módulo de elasticidade E das três camadas de solo, utilizou-se a correlação apresentada por Teixeira e Godoy (1996) para solos arenosos, apresentada na Equação 53.

A correlação é realizada com a resistência de ponta  $q_c$  do ensaio CPT. Contudo,  $q_c$  pode ser obtido de posse dos valores de SPT, através da correlação ilustrada na Equação 54. Os valores de  $K_{\text{SPT}}$  são definidos conforme o Quadro 22.

$$E_s = 3q_c \quad \text{Eq. 53}$$

$$q_c = K_{\text{SPT}} \cdot N_{\text{SPT}} \quad \text{Eq. 54}$$

Quadro 22 – Valores de K de acordo com Teixeira e Godoy (1996).

Valores de K de acordo com Teixeira e Godoy (1996)	
Tipo de solo	$K_{SPT}$
Areia com pedregulhos	1,1
Areia	0,90
Areia siltosa	0,70
Areia argilosa	0,55
Silte arenoso	0,45
Silte	0,35
Argila arenosa	0,30
Silte argiloso	0,25
Argila siltosa	0,20

Para a obtenção do coeficiente de poisson  $\nu$ , foram utilizados os valores constantes no Quadro 23, propostos por Teixeira & Godoy (1996):

Quadro 23 – Coeficiente de Poisson. (Teixeira &amp; Godoy, 1996).

Solo	$\nu$
Areia pouco compacta	0,2
Areia compacta	0,4
Silte	0,3 - 0,5
Argila saturada	0,4 - 0,5
Argila não saturada	0,1 - 0,3

No cálculo da dilatância do solo local foi utilizada a Equação 55, proposta por Bolton (1986), referenciado por Pezo (2013):

$$\psi = \varphi - 30 \text{ se } \varphi > 30; \psi = 0 \text{ se } \varphi < 30 \quad \text{Eq. 55}$$

O Quadro 24 apresenta a divisão do solo em três camadas, contendo os respectivos valores de  $N_{SPT}$  corrigidos e suas médias, além dos parâmetros de resistência e deformabilidade, adquiridos pelas correlações supracitadas.

Quadro 24 – Parâmetros geotécnicos iniciais obtidos por correlações com NSPT.

Solo	Prof.(m)	Média NSPT	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) (Godoy, 1972)	$\varphi^\circ$ (Teixeira, 1996)	c (kPa)	E (MPa) (Teixeira & Godoy, 1996)	$\nu$ (Teixeira & Godoy, 1996)	$\psi^\circ$ (Bolton, 1986)
1	4	14,3	19	33,5	0	38,5	0,4	3,5
	5							
	6							
	7							
	8							
2	9	33,0	19,5	43,2	0	89,2	0,4	13,2
	10							
	11							
	12							
	13							
3	14	41,0	20	46,4	0	110,6	0,4	16,4
	15							
	16							
	17							
	18							
	19							
	20							
	21							
	22							
23								

Ao inserir os parâmetros iniciais obtidos através do SPT no programa PLAXIS 3D *Foundation*, apresentados no Quadro 24, as simulações numéricas apresentaram similaridade no comportamento em comparação com as provas de carga 1, possuindo rigidez levemente inferior ao modelo experimental ao final do carregamento, com recalques na ordem de 1,27mm, 16,45% superior a PCE 1.

Assim, os módulos de elasticidade E de todas as 3 camadas foram retroanalisados a fim de melhorar as previsões numéricas para as 3 PCEs. Desta forma, o E de todas as camadas foi incrementado em 10MPa, obtendo assim, maior aproximação com a rigidez apresentada nos resultados experimentais.

A Figura 94 apresenta de forma ilustrativa as três camadas consideradas nas análises, com os respectivos valores médios de resistência à penetração e parâmetros geotécnicos adotados para cada uma das retroanálises numéricas das provas de carga realizadas no local da obra estudada.

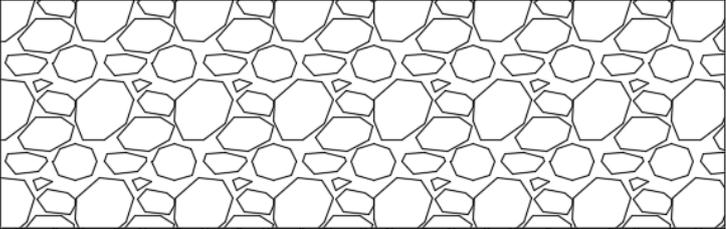
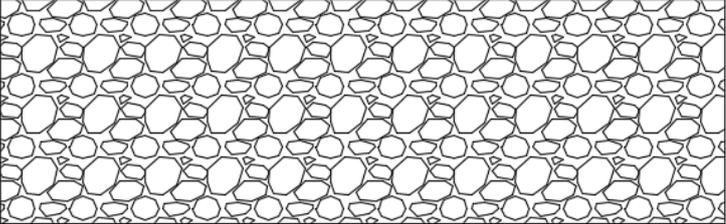
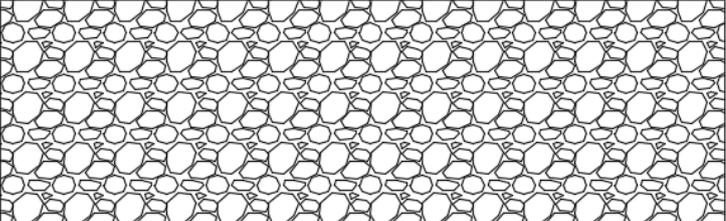
SPT 14,3	$\gamma: 19 \text{ kN/m}^3$ $c: 0$ $v: 0,4$	$\phi^\circ: 33,5$ $E: 48,5 \text{ MPa}$ $\psi^\circ: 3,5$	
SPT 33,0	$\gamma: 19,5 \text{ kN/m}^3$ $c: 0$ $v: 0,4$	$\phi^\circ: 43,2$ $E: 99,2 \text{ MPa}$ $\psi^\circ: 13,2$	
SPT 41,0	$\gamma: 20 \text{ kN/m}^3$ $c: 0$ $v: 0,4$	$\phi^\circ: 46,4$ $E: 120,6 \text{ MPa}$ $\psi^\circ: 16,4$	

Figura 94 – Parâmetros utilizados nas retroanálises das provas de carga.

### 3.5.2.2 Condições de contorno

A modelagem da geometria a ser adotada nas simulações deve ser aquela que simule adequadamente o comportamento do sistema de fundação sem que as condições de contornos influenciem o resultado da análise. Como condições de contorno iniciais para as simulações numéricas, foram utilizadas as recomendações de Ibáñez (2001), abordadas a seguir

Ibáñez (2001), citados por Sosa (2010) e Pezo (2013), fazem as recomendações a seguir para a modelagem da geometria para uma estaca:

- i. Limites horizontais devem ser pelo menos duas vezes o comprimento da estaca, para cada lado;
- ii. Limites verticais devem ser pelo menos pelo menos duas vezes o comprimento da estaca.

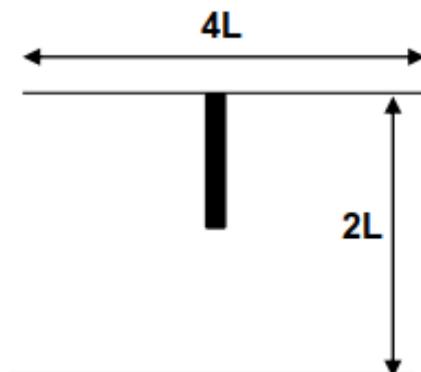


Figura 95 – geometria para modelagem de estaca. Pezo (2013)

Para a modelagem da geometria para radier isolado, Ibáñez (2001) faz as seguintes recomendações:

- i. Limites horizontais devem ser pelo menos três vezes a largura do radier;
- ii. Limites verticais devem ser pelo menos pelo menos duas vezes e meia a largura do radier.

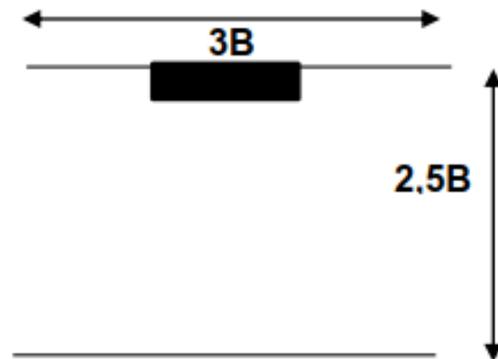


Figura 96 – geometria para modelagem de radier. Pezo (2013)

Por fim, nas modelagens para sistemas de fundação em radier estaqueado, Ibáñez (2001) faz as recomendações a seguir:

- i. Limites horizontais devem ser pelo menos três vezes a largura do radier;
- ii. Limites verticais devem ser pelo menos pelo menos três vezes a largura da estaca.

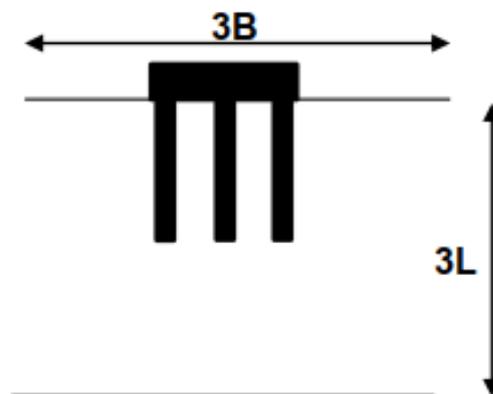


Figura 97 – geometria para modelagem de radier estaqueado. Pezo (2013)

Nesta pesquisa, o domínio horizontal mínimo utilizado inicialmente para calibração foi o recomendado por Ibáñez (2001) para radier estaqueado. Contudo, o domínio horizontal  $3B$  apresentou influência no bulbo de tensões distribuídas no solo, afetando assim o resultado da análise.

Desta forma, o domínio horizontal foi incrementado até o ponto que não apresentasse mais interferência no bulbo de tensões, resultando no valor de 10B. Assim, o domínio horizontal que melhor se adequou às calibrações foi 10B, com o vertical mantido em 3L.

### 3.5.2.3 Retroanálise com prova de carga 1

Nesta retroanálise, com estaca com 40cm de diâmetro, 15 metros de comprimento e carga de trabalho 600kN, o resultado da simulação obtido pelo PLAXIS 3D *Foundation* apresentou boa proximidade com a curva carga *versus* recalque obtida experimentalmente em toda fase de carregamento.

Após ajustes nas condições de contorno da modelagem e retroanálise dos módulos de elasticidade do solo, o resultado da simulação numérica realizada no PLAXIS *Foundation* apresentou boa convergência com o resultado da PCE 1, como ilustrado na Figura 98.

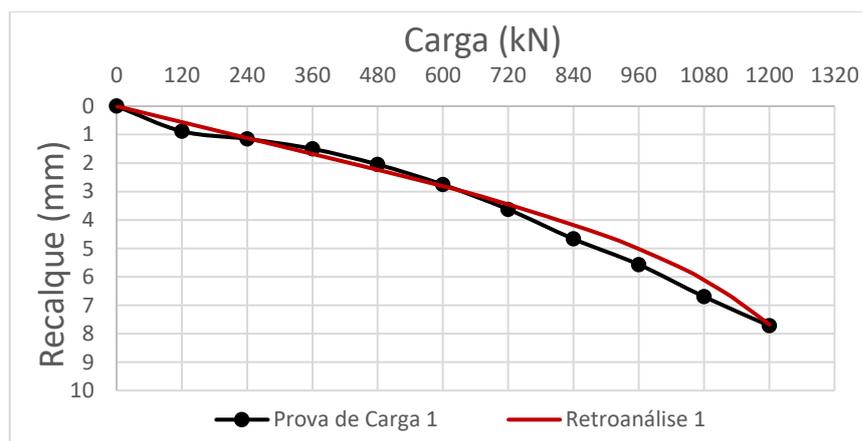


Figura 98 - Retroanálise 1 com prova de carga 1.

O recalque máximo obtido experimentalmente foi de 7,72mm, enquanto que o numérico 7,68mm, apenas 0,52% (0,04mm) inferior à prova de carga. Assim, concluiu-se que a modelagem numérica simulou de maneira eficiente o comportamento estrutural de estaca com 40cm de diâmetro e 15m de comprimento.

### 3.5.2.4 Retroanálise com prova de carga 2

Para esta retroanálise, foi utilizada a prova de carga 2 com estaca de 40cm de diâmetro, 17 metros de comprimento e carga de trabalho 600kN. Nesta análise, a modelagem realizada no PLAXIS 3D *Foundation* apresentou novamente boa convergência com o resultado de prova de carga durante todo o ensaio, como ilustrado na Figura 99.

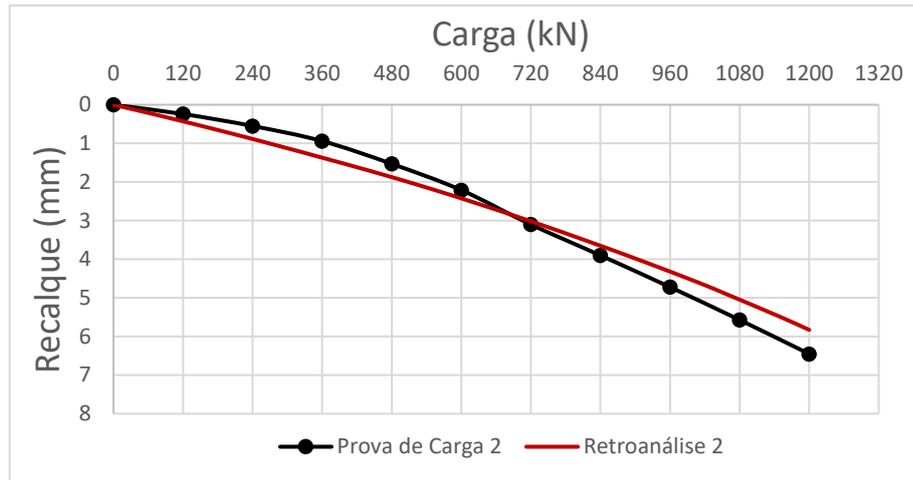


Figura 99 - Retroanálise 2 com prova de carga 2.

O recalque máximo obtido em campo foi na ordem de 6,45mm, enquanto o numérico apresentou deslocamentos de 5,83mm, apenas 9,6% inferior ao modelo experimental (0,62mm).

### 3.5.2.5 Retroanálise com prova de carga 3

Na última retroanálise, foi realizada uma modelagem numérica para estaca com 50cm de diâmetro, 15m de comprimento e carga de trabalho de 950kN. Este modelo foi o que apresentou menor concordância em relação ao experimental, apresentado nos estágios intermediários de carga.

Contudo, ao final do ensaio, o recalque máximo experimental foi de 9,7mm e o numérico na ordem de 10,10mm, apenas 4,1% superior (0,4mm) ao experimental, como ilustrado na Figura 100.

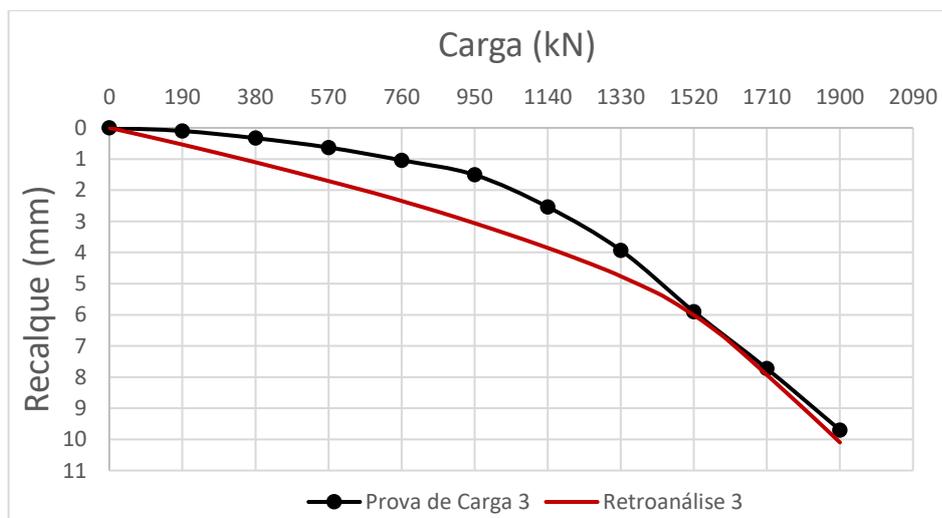


Figura 100 - Retroanálise 3 com prova de carga 3.

### 3.5.2.6 Considerações finais da retroanálise do PLAXIS 3D Foundation

Na presente dissertação, três retroanálises foram realizadas, com estacas de 40 e 50cm de diâmetro com comprimentos de 15 e 17m. A obtenção dos parâmetros geotécnicos iniciais foi realizada através de correlações com resultados de SPTs realizadas no local da obra de estudo.

Inicialmente, foi verificado a partir de qual geometria as condições de contorno não afetassem os resultados das análises, seguida da retroanálise dos módulos de elasticidade das camadas de solo para obter maior aproximação com rigidez apresentada nas 3 PCEs.

Por fim, foi analisada a sensibilidade da densidade da malha inserida nas modelagens, para encontrar uma faixa ótima de número de elementos a qual não haveria diferenças consideráveis nos recalques caso aumentasse o número de elementos nas análises.

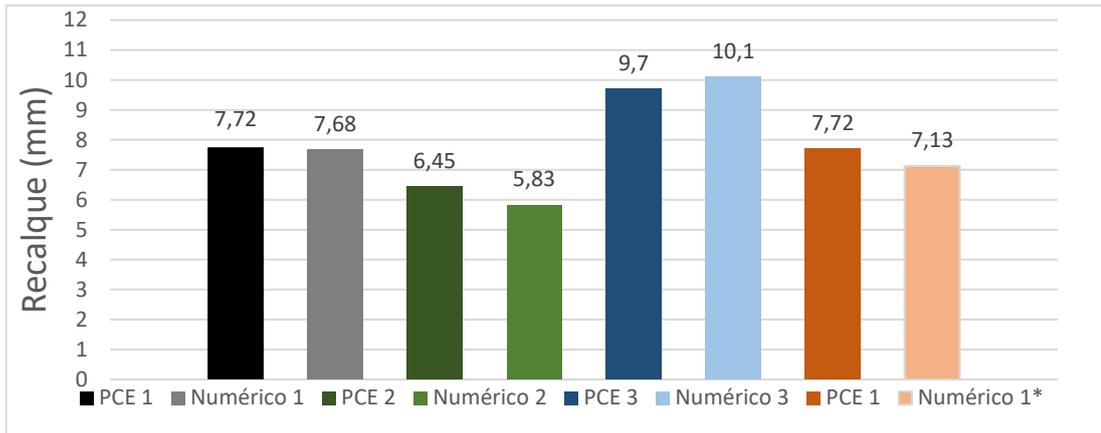
O Quadro 25 seguido da Figura 101, apresentam um resumo das retroanálises executadas nesta pesquisa, demonstrando o recalque máximo obtido experimentalmente e numericamente em cada calibração, suas variações em relação aos deslocamentos mensurados em campo, o número de elementos e nós de cada análise e o tempo de processamento.

Além disso, o resultado de uma análise adicional da primeira retroanálise é ilustrado, mostrando que o aumento expressivo no número de elementos e nós resultou numa diferença mínima nos recalques e um tempo bem superior de processamento.

Quadro 25 - Resumo das modelagens para retroanálise dos parâmetros geotécnicos do solo.

Retroanálise	$\rho_{\text{máx}}$ Exp.(mm)	$\rho_{\text{máx}}$ Num.(mm)	$\Delta\rho_{\text{máx}}$ Experimental (%)	n° Elementos	n° Nós	Tempo Processamento
1	7,72	7,68	0,52	17424	47457	39 min
2	6,45	5,83	9,6	17424	47457	41 min
3	9,7	10,10	4,1	18768	51091	1h 36min
1*	7,72	7,13	7,64	48246	128294	6h 5min

\* Modelagem referente à retroanálise 1 com malha mais densa.



\* Modelagem referente à retroanálise 1 com malha mais densa.

Figura 101 – Comparação dos resultados experimentais e numéricos na retroanálise dos parâmetros geotécnicos.

Em vista das retroanálises apresentarem boa convergência para as curvas carga *versus* recalque das três provas de carga realizadas em campo, os parâmetros utilizados nas modelagens numéricas; isto é, condições de contorno, densidade de malha e parâmetros geotécnicos foram fixados para utilização nas simulações numéricas dos sistemas de fundações do Instituto do Cérebro, citados anteriormente no item 3.1.

## CAPÍTULO 4

# RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos pelo programa PLAXIS 3D *Foundation* das análises numéricas das fundações do Instituto do Cérebro a luz da metodologia tradicional (grupo de estacas), radier estaqueado e radier isolado. Em seguida, apresenta-se uma discussão acerca dos resultados obtidos.

Inicialmente foi realizada a verificação da rigidez dos blocos tipo da fundação, pois, como já citado, é fator relevante no momento de análise de distribuição de esforços na cabeça das estacas.

Os resultados das verificações de rigidez dos blocos de fundação pela norma Espanhola (2007) e NBR 6118 (2014) demonstram que todos os blocos de fundação estão avaliados como rígidos, conforme ilustrado nos Quadros 26 e 27.

Quadro 26 - Verificação da rigidez do bloco de fundação de acordo com a norma Espanhola (2007).

Sistema de fundação	Norma Espanhola (2007)	Verificação rigidez do bloco de fundação
2 estacas (170x70x60cm)	$h = 0,5 * L_{\text{máx}}$	$0,5 * 30 = 15\text{cm} (\leq 60\text{cm})$
3 estacas (217x188x171x46x90cm)	$h = 0,5 * L_{\text{máx}}$	$0,5 * 52,2 = 15\text{cm} (\leq 90\text{cm})$
4 estacas (170x170x80cm)	$h = 0,5 * L_{\text{máx}}$	$0,5 * 30 = 15\text{cm} (\leq 80\text{cm})$
4 estacas (118X118X70cm)	$h = 0,5 * L_{\text{máx}}$	$0,5 * 1,25 = 0,625\text{cm} (\leq 70\text{cm})$
4 estacas (205X205X100cm)	$h = 0,5 * L_{\text{máx}}$	$0,5 * 1,25 = 0,625\text{cm} (\leq 70\text{cm})$
5 estacas (280X205X130cm)	$h = 0,5 * L_{\text{máx}}$	$0,5 * 60 = 30\text{cm} (\leq 130\text{cm})$
9 estacas (270x270x130cm)	$h = 0,5 * L_{\text{máx}}$	$0,5 * 100 = 50\text{cm} (\leq 130\text{cm})$

\*  $L_{\text{máx}}$ : distância do eixo da estaca mais afastada da face do pilar.

Quadro 27- Verificação da rigidez do bloco de fundação de acordo com a NBR 6118 (2014).

Sistema de fundação	ABNT 6118 (2014)	Verificação rigidez do bloco de fundação (eixo x)	Verificação rigidez do bloco de fundação (eixo y)
2 estacas (170x70x60cm)	$h \geq (\alpha - \alpha_p)/3$	$(170-40)/3 = 43,33$ (60 $\geq$ 43,33)	$(70-40)/3 = 10$ (60 $\geq$ 10)
3 estacas (217x188x171x46cm e h:90cm)	$h \geq (\alpha - \alpha_p)/3$	$(217-40)/3 = 59$ (90 $\geq$ 59)	$(188-40)/3 = 49,33$ (90 $\geq$ 49,33)
4 estacas (170x170x80cm)	$h \geq (\alpha - \alpha_p)/3$	$(170-40)/3 = 43,33$ (80 $\geq$ 43,33)	$(170-40)/3 = 43,33$ (80 $\geq$ 43,33)
4 estacas (118x118x70cm)	$h \geq (\alpha - \alpha_p)/3$	$(118-40)/3 = 26$ (70 $\geq$ 26)	$(118-40)/3 = 26$ (70 $\geq$ 26)
4 estacas (205x205x100cm)	$h \geq (\alpha - \alpha_p)/3$	$(205-45)/3 = 53,33$ (100 $\geq$ 53,33)	$(205-40)/3 = 55$ (100 $\geq$ 55)
5 estacas (280x205x130cm)	$h \geq (\alpha - \alpha_p)/3$	$(280-45)/3 = 78,33$ (130 $\geq$ 78,33)	$(205-45)/3 = 53,33$ (130 $\geq$ 53,33)
9 estacas (270x270x130cm)*	$h \geq (\alpha - \alpha_p)/3$	$(270-40)/3 = 76,66$ (130 $\geq$ 76,66)	$(270-40)/3 = 76,66$ (130 $\geq$ 76,66)

\* Consideração para um pilar hipotético de 40x40 para efeito de cálculo.

#### 4.1 Bloco e radier sobre uma estaca de $\phi$ 25cm e L 15m

Nesta primeira análise, foram realizadas três modelagens, a primeira com bloco de 55x55x60cm sobre uma estaca com diâmetro de 25cm com 15m de comprimento, a segunda em radier estaqueado e a última com bloco isolado. Ressalta-se que na configuração grupo de estaca, o bloco não tem contato com o solo, a fim de simular o comportamento do sistema como grupo de estacas.

Na segunda modelagem, o elemento superficial possui contato com a massa de solo, para analisar o comportamento da fundação como radier estaqueado. A carga aplicada em ambas simulações foi bem superior a carga de trabalho da estaca, para ocasionar a verticalização da curva carga recalque.

Contudo, mesmo com a aplicação de um elevado esforço nas fundações profundas, as modelagens em fundações profundas apresentaram elevados recalques sem que a curva verticalizasse, configurando como ruptura convencional. Os resultados das três modelagens estão apresentados na Figura 102.

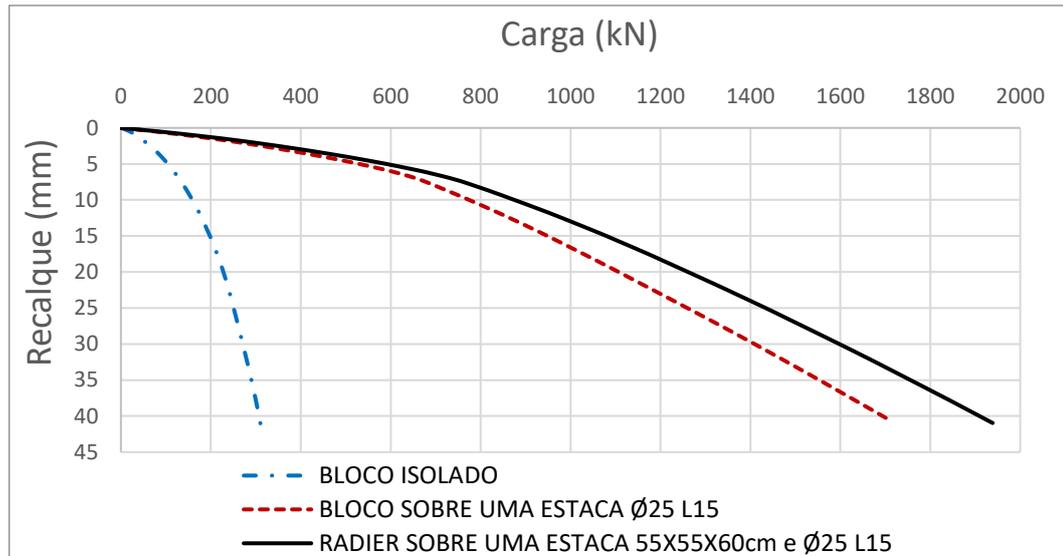


Figura 102 - Curvas carga recalque para bloco e radier sobre uma estaca de Ø25cm e L15m e bloco isolado.

Observa-se, a partir da análise da Figura 102, que no sistema de fundação em radier estaqueado, o radier apresentou pequena parcela de contribuição em capacidade de carga e redução de recalques, como esperado, em vista da pequena área de contato do radier com o solo.

#### 4.1.1 Capacidade de carga a partir da curva carga recalque

Para estas modelagens, com estacas possuindo diâmetro de 25cm, o critério de Décourt (1993) para previsão da carga de ruptura ( $10\% \varphi$ ) mensurou 1260kN para a metodologia grupo de estaca e 1435kN para o sistema de fundação em radier estaqueado. Um aumento de 13,9% na capacidade de carga do sistema, como apresentado na Figura 103, com ambas as curvas carga *versus* recalque.

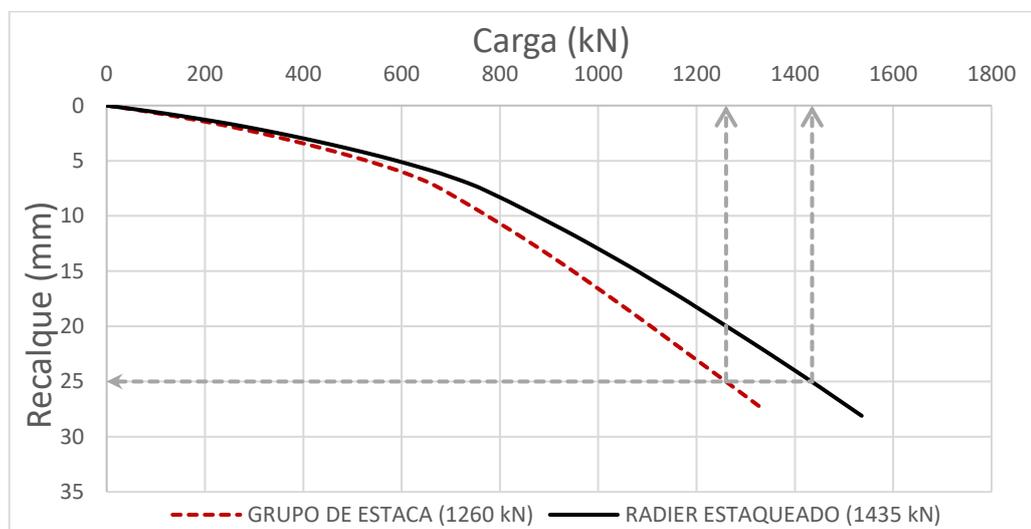


Figura 103 - Cargas de ruptura pelo método de Décourt (1993) para estaca de  $\varphi$  25cm e L15m.

A previsão da carga de ruptura sugerida pela NBR 6122/10 resultou em valores inferiores àqueles previstos pelo método de Décourt (1993), tanto para o sistema de fundação em grupo de estaca quanto para radier estaqueado.

Para fundação com estaca de  $\varnothing$  25cm e comprimento 15m, o método da NBR6122/10 mensurou carga de ruptura de 1075kN para a metodologia tradicional e 1315kN para fundação em radier estaqueado, o que representa um incremento de 22,3% de capacidade de carga para a fundação. A Figura 104 apresenta as curvas carga *versus* recalque das duas metodologias analisadas.

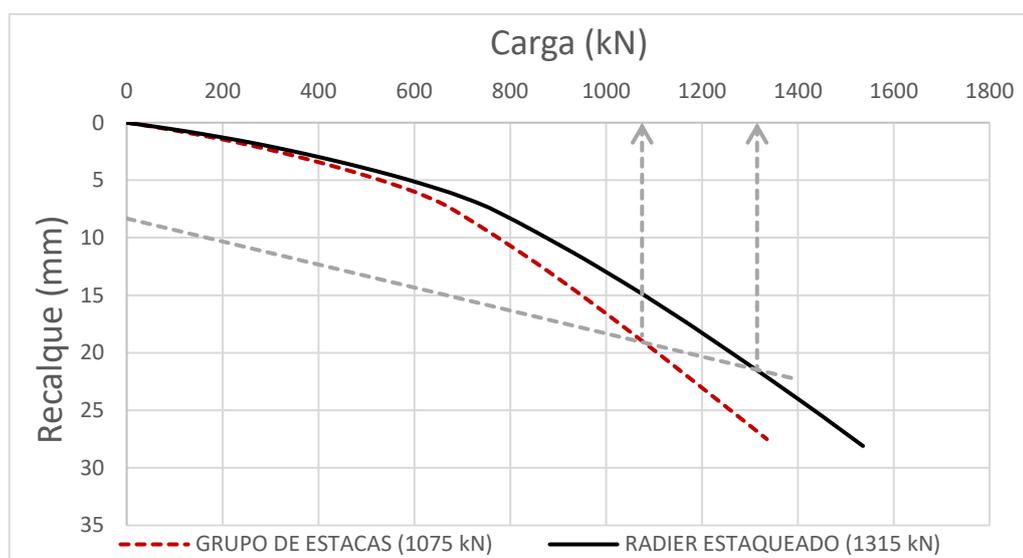


Figura 104 - Cargas de ruptura pelo método sugerido pela NBR 6122/10 para estaca de  $\varnothing$  25cm e L15m.

O método de Davisson (1972) para previsão de carga de ruptura, possui a mesma metodologia que o método da NBR6122/10, resultando numa reta. Para a metodologia grupo de estaca foi previsto uma capacidade de carga de 975kN e 1195kN para radier estaqueado. Nesta previsão, o bloco conferiu um aumento de 22,5% de capacidade de carga. Na Figura 105 são apresentadas as curvas carga *versus* recalque de tais metodologias.

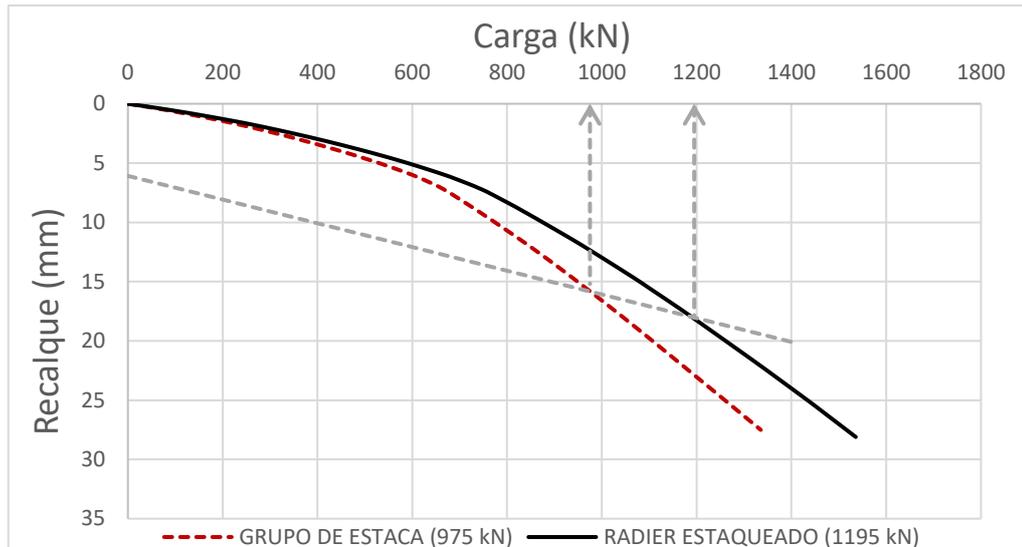


Figura 105 - Cargas de ruptura pelo método de Davisson (1972) para estaca de  $\varnothing$  25cm e L15m.

O método da rigidez, proposto por Décourt (1996) não se adequou para os sistemas de fundação contendo uma estaca. Nesta análise não houve verticalização da curva carga recalque em nenhum dos sistemas analisados (grupo de estaca e radier estaqueado). Este método resultou numa assíntota sub-horizontal, tornando inviável o cálculo da carga de ruptura, como ilustrado na Figura 106.

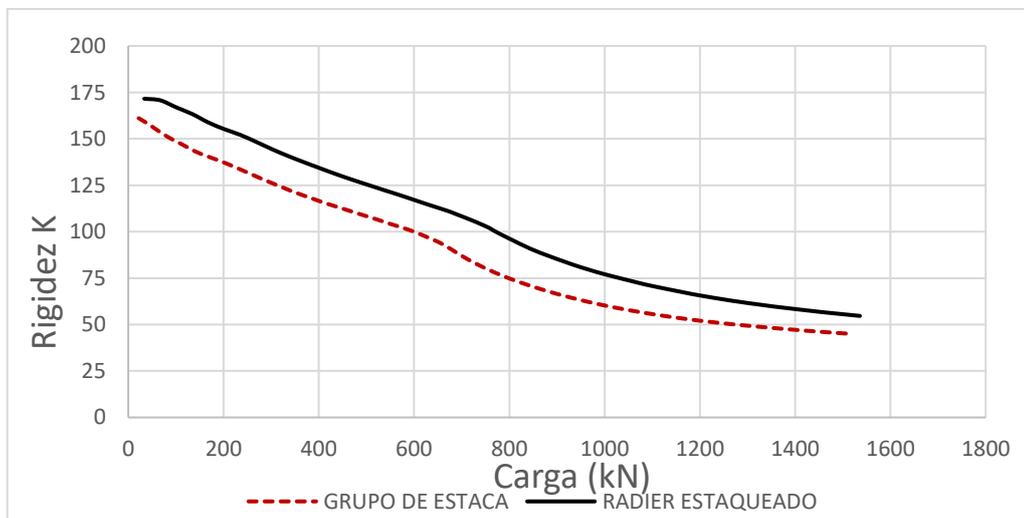


Figura 106 - Cargas de ruptura pelo método da rigidez (Décourt, 1996) para estaca de  $\varnothing$  25cm e L15m.

#### 4.1.2 Distribuição dos esforços no radier estaqueado

É importante que no estudo do sistema em radier estaqueado, seja realizada a análise da distribuição dos esforços entre bloco e estaca. Nesta pesquisa, a verificação das oito fundações foi realizada a partir da análise da aplicação da carga ao longo da simulação até a carga de ruptura prevista pelo método de Décourt (1993).

Através da comparação da curva carga *versus* recalque entre grupo de estacas e radier estaqueado, foi mensurada a carga resistida pelo bloco de fundação, dada como diferença de carga entre tais sistemas para um mesmo nível de recalque.

No Quadro 28 e na Figura 107 são demonstradas as porcentagens de esforços resistidos pelo bloco e estaca até o deslocamento correspondente a 10% do diâmetro da estaca (25mm), por meio da análise das curvas carga *versus* recalque.

Quadro 28 - Distribuição dos esforços entre bloco e estaca de 25cm de diâmetro e 15m de comprimento.

DISTRIBUIÇÃO DOS ESFORÇOS			
RECALQUE	CARGA TOTAL (KN)	CARGA NO RADIER (%)	CARGA NA ESTACA (%)
2,5	350	8,6	91,4
5	600	10,5	89,5
10	870	11,0	89,0
15	1080	11,6	88,4
20	1250	12,0	88,0
25	1435	12,2	87,8

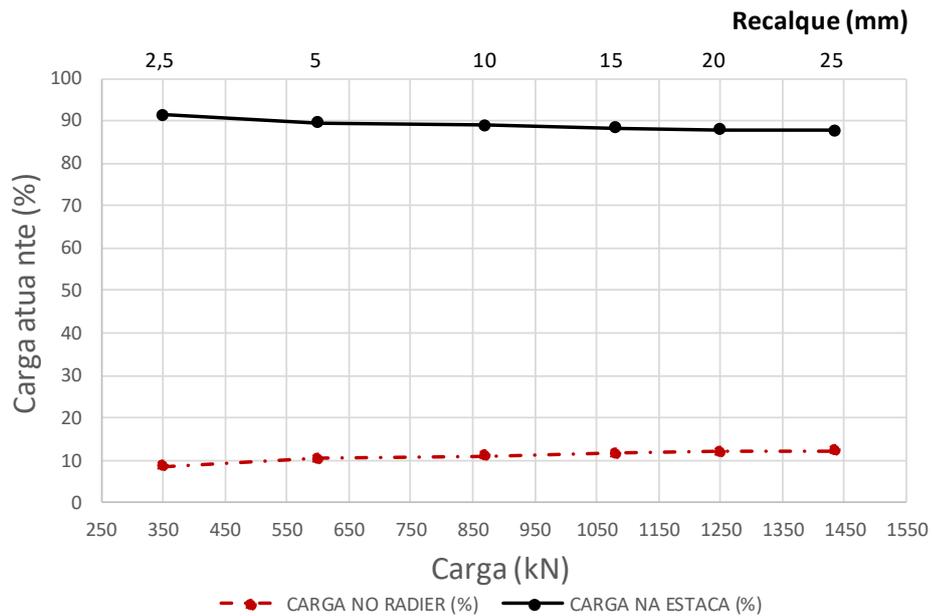


Figura 107 - Distribuição dos esforços entre bloco e estaca de 25cm de diâmetro e 15m de comprimento ao longo da aplicação da carga.

Através desta análise, observou-se que o bloco foi responsável por receber aproximadamente 8% (20kN) dos esforços para a carga de trabalho da estaca (250kN) e 12,2% (175kN) para a carga de ruptura (1435kN).

### 4.1.3 Capacidade de carga do bloco isolado

Para o bloco isolado com dimensões de 55x55x60cm, sua carga de ruptura prevista pelo método de recalque limite por Skempton & MacDonald (1956) foi 310kN. Tal resultado demonstra que a carga de ruptura do radier estaqueado não se restringe a soma das resistências isoladas dos elementos de fundações.

O aumento de resistência no radier estaqueado devido o contato do bloco com o solo foi de 175kN, enquanto que a resistência isolada do elemento superficial foi 250kN.

### 4.1.4 Recalques diferenciais

A Figura 108 ilustra o plano e o corte XX para apresentar os recalques diferenciais para o bloco com dimensões de 55x55x60cm, que são demonstrados na Figura 109.

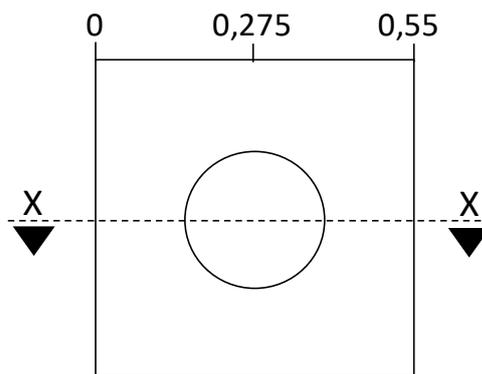


Figura 108 - Corte e coordenadas para resultados de recalques diferenciais para bloco de 55x55x60cm de dimensões.

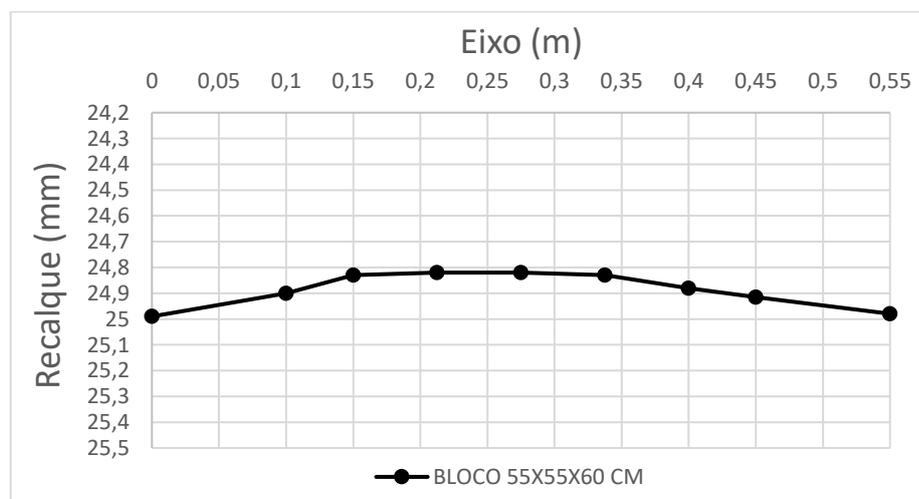


Figura 109 - Recalques diferenciais ao longo do bloco de 55x55x60cm de dimensões sobre uma estaca de  $\varnothing$  25cm.

## 4.2 Bloco e radier sobre uma estaca de $\phi$ 40 e L15

Nesta segunda análise, o sistema também apresenta uma estaca, contudo, possui diâmetro de 40cm e 15m de comprimento. O bloco por sua vez tem 70x70x60cm como dimensões.

A carga aplicada nos sistemas de fundações profundas foi bem superior à carga de trabalho da estaca (600kN). Tal esforço não resultou na verticalização das curvas carga recalque nas fundações profundas, todavia, foram gerados elevados deslocamentos. A Figura 110 ilustra os resultados das três simulações numéricas.

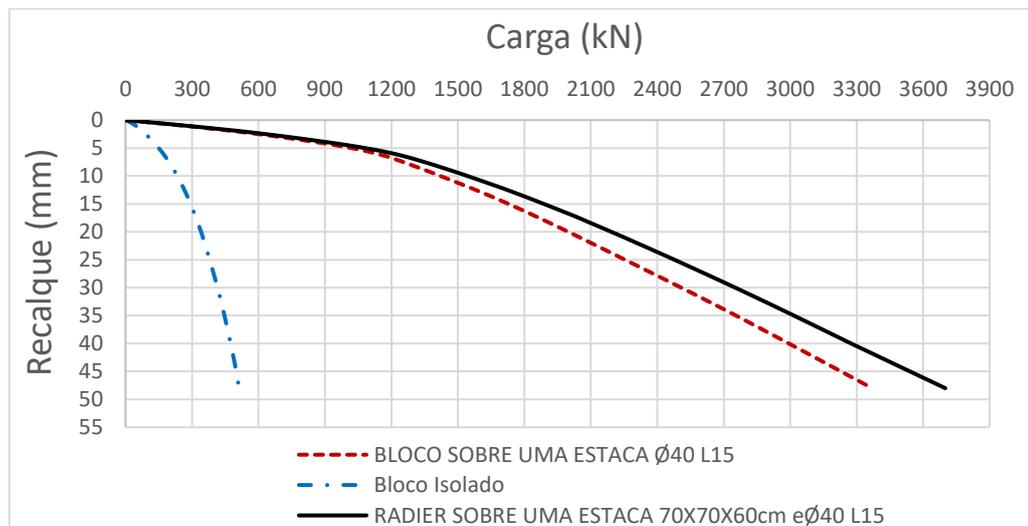


Figura 110 - Curvas carga recalque para bloco e radier sobre uma estaca de  $\phi$  40cm e L15m e bloco isolado.

A partir desta figura, conclui-se que, similar à análise anterior, o contato do bloco com o solo no sistema em radier estaqueado conferiu um leve aumento de capacidade de carga do sistema de fundação e redução de recalques.

### 4.2.1 Capacidade de carga a partir da curva carga recalque

Ao aplicar o método de Décourt (1993), foi previsto uma carga de ruptura de 3000kN para o sistema em grupo de estaca e 3270kN para radier estaqueado, como ilustrado na Figura 111. Desta forma, neste critério de ruptura, o contato do bloco com o solo conferiu um aumento de capacidade de carga em 270kN (9%) para o sistema de fundação.

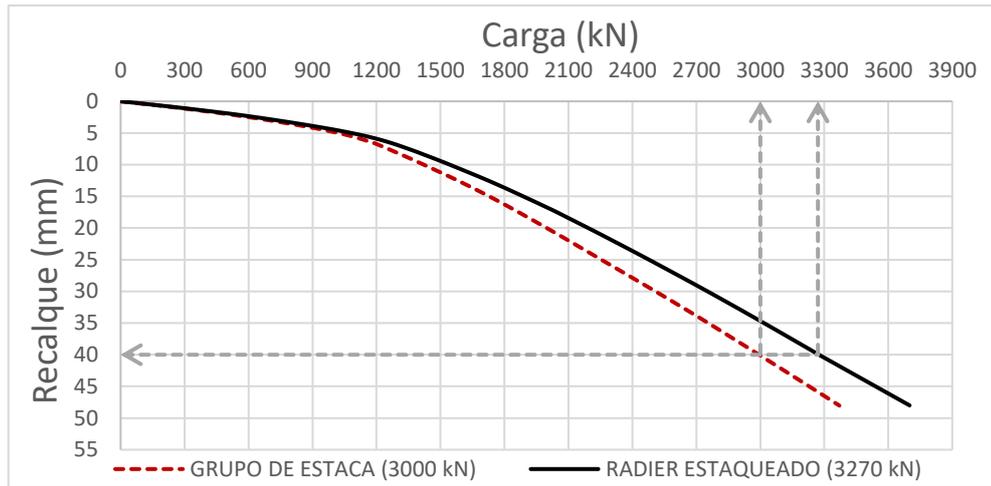


Figura 111 - Cargas de ruptura pelo método de Décourt (1993) para estaca de  $\varnothing$  40cm e L15m.

Assim como na análise anterior, o método proposto pela NBR 6122/10 para previsão da carga de ruptura mediu valores inferiores aos obtidos pelo critério de Décourt (1993) para fundação com estaca de  $\varnothing$  40cm e comprimento 15m.

Para metodologia em grupo de estaca foi previsto carga de ruptura de 2120kN e 2420kN para o sistema em radier estaqueado, o que representa um aumento de 14,15% de capacidade de carga. A Figura 112 apresenta as curvas carga *versus* recalque de ambas metodologias.

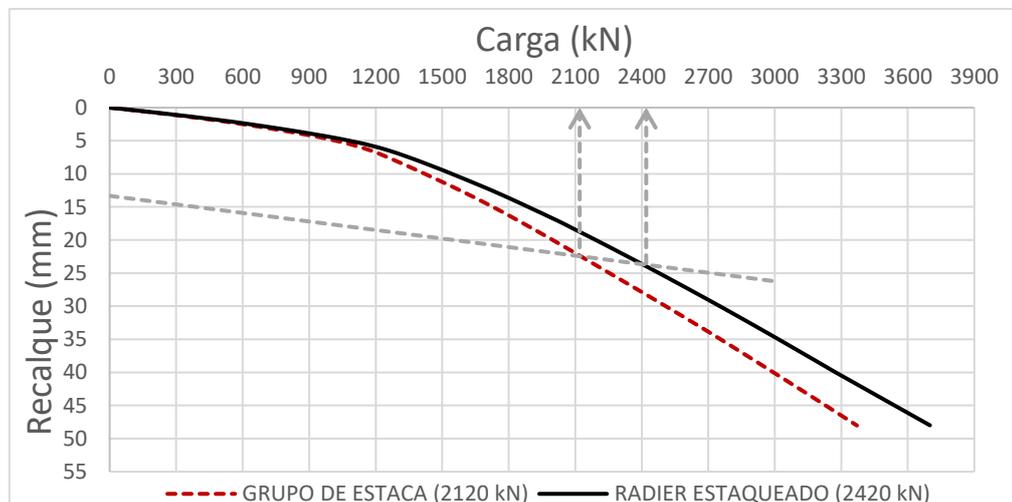


Figura 112 - Cargas de ruptura pelo método sugerido pela NBR 6122/10 para estaca de  $\varnothing$  40 cm e L15m.

No método de Davisson (1972), foram previstas cargas de ruptura de 1725kN e 1935kN para os sistemas de fundações em grupo de estaca e radier estaqueado, respectivamente. Assim, a interação do bloco com o solo conferiu para este sistema um aumento de 12,2% de capacidade de carga. As curvas carga *versus* recalque das duas metodologias para esta fundação são demonstradas na Figura 113.

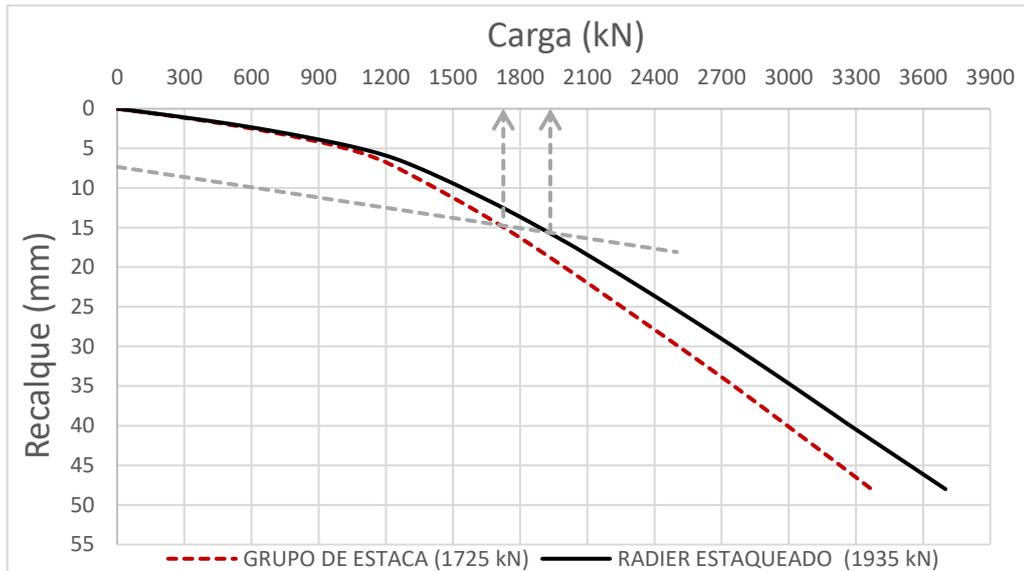


Figura 113 - Cargas de ruptura pelo método de Davisson (1972) para estaca de  $\varnothing$  40cm e L15m.

Como mencionado na análise do item anterior, o método da rigidez de Décourt (1996) não foi viável para sistemas de fundações contendo uma estaca devido a curva apresentar uma assíntota sub-horizontal. A Figura 114 ilustra a aplicação do método para estaca com  $\varnothing$  40cm.

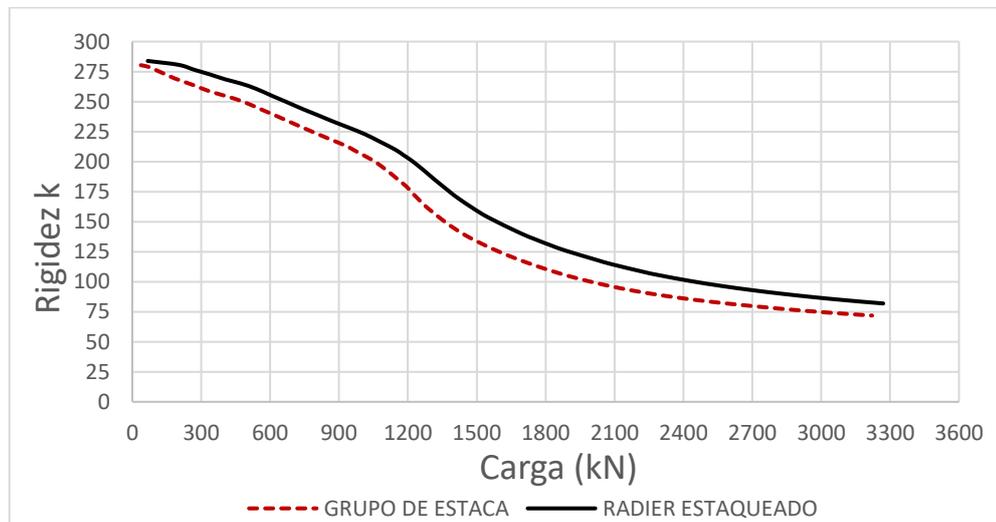


Figura 114 - Cargas de ruptura pelo método da rigidez (Décourt, 1996) para estaca de  $\varnothing$  40cm e L15m.

#### 4.2.2 Distribuição dos esforços no radier estaqueado

No sistema contendo uma estaca de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento, o Quadro 29 e a Figura 115 apresentam a distribuição dos esforços ao longo da aplicação do carregamento na simulação pela análise das curvas carga *versus* recalque.

Quadro 29 - Distribuição dos esforços entre bloco e estaca de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento.

DISTRIBUIÇÃO DOS ESFORÇOS			
RECALQUE (MM)	CARGA TOTAL (KN)	CARGA NO RADIER (%)	CARGA NA ESTACA (%)
2,5	596	0	100,0
5	1078	4,0	96,0
10	1530	5,6	94,4
20	2180	6,4	93,6
30	2735	7,5	92,5
40	3270	8,3	91,7

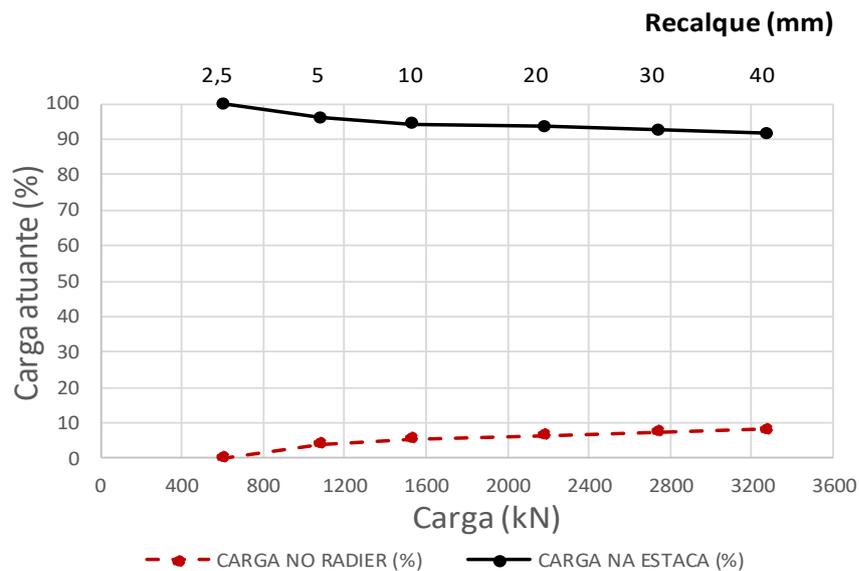


Figura 115 - Distribuição dos esforços entre bloco e estaca de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento ao longo da aplicação da carga.

Nesta análise, foi observado que o bloco não teve contribuição para a carga de trabalho da estaca (600kN), enquanto que para a carga de ruptura sua parcela foi de 8,3% (271kN), com a estaca resistindo a 2999kN.

#### 4.2.3 Capacidade do bloco isolado

O bloco isolado com dimensões de 70x70x60cm, o método de Skempton & MacDonald (1956) previu capacidade de carga de 460kN, carga de ruptura superior ao aumento de resistência no radier estaqueado proporcionado pelo bloco (270kN).

#### 4.2.4 Recalques diferenciais

A Figura 116 apresenta o plano juntamente com o corte XX para ilustrar os recalques diferenciais no bloco com dimensões de 70x70x60cm, representados na Figura 117.

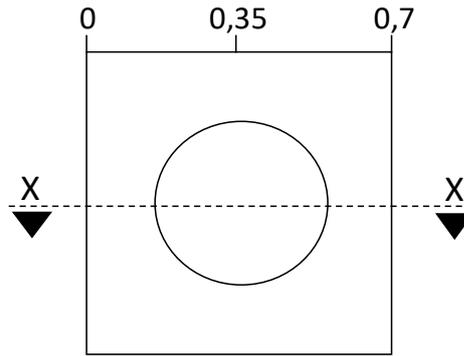


Figura 116 - Corte e coordenadas para resultados de recalques diferenciais para bloco de 70x70x60cm de dimensões.

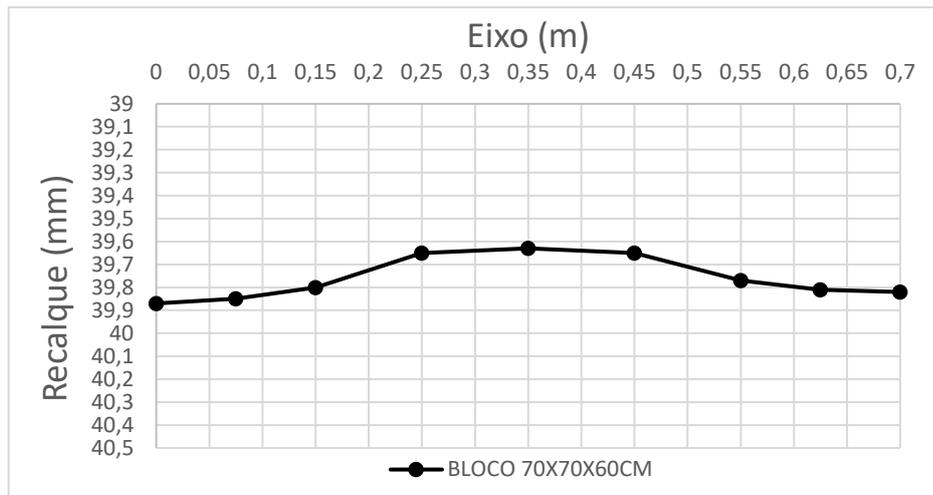


Figura 117 - Recalques diferenciais ao longo do bloco de 70x70x60cm de dimensões sobre uma estaca de  $\varphi$  40cm.

#### 4.3 Bloco e radier sobre duas estacas de $\varphi$ 40 e L15

Na terceira análise, os três sistemas de fundações simulados possuem bloco de 170x70x60cm, com as fundações profundas possuindo bloco sobre duas estacas com diâmetro de 40cm e 15m de comprimento.

A carga aplicada nas modelagens foi aquela que ocasionasse elevados recalques para poder aplicar os métodos de previsão de carga de ruptura para fundação profunda. A Figura 118 apresenta o resultado das três simulações.

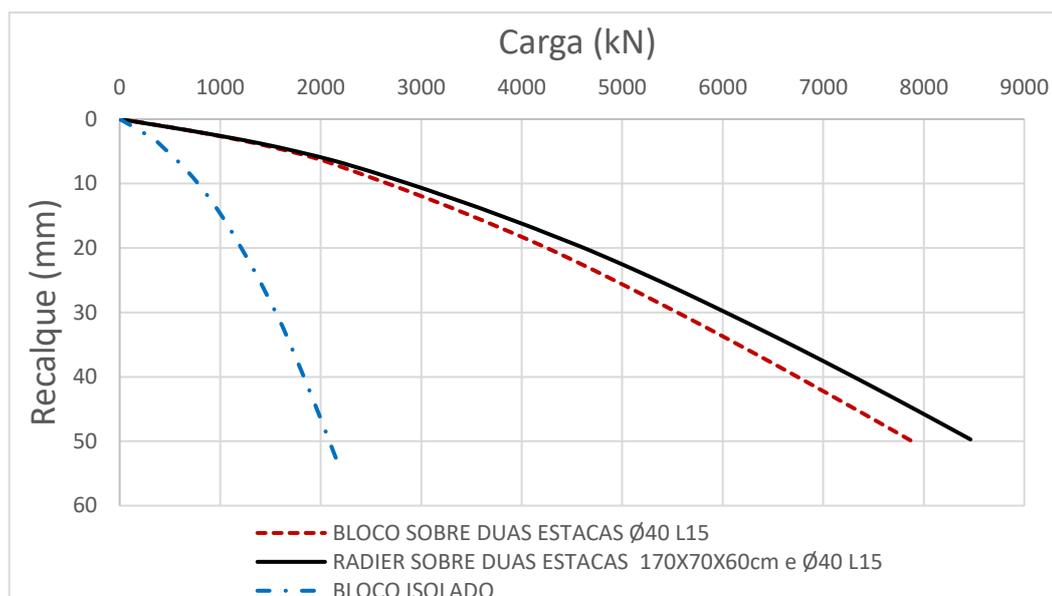


Figura 118 - Curvas carga recalque para bloco e radier sobre duas estacas de  $\varnothing$  40cm e L15m e bloco isolado.

Diferente dos resultados dos blocos e radiers contendo uma estaca, estas duas modelagens para sistemas de fundações possuindo duas estacas, o efeito da interação do elemento superficial com a massa de solo conferiu um aumento mais evidente na rigidez da fundação.

Este incremento da rigidez em comparação com as análises de bloco e radier com uma estaca pode ser atribuído ao aumento da área de contato do elemento horizontal com a massa de solo, corroborando com análises de Mandolini, Di Laora e Mascarucci (2013).

Como no sistema de fundação com duas estacas a região de contato era maior (em %) que com uma estaca, o aumento da capacidade de carga e a redução de recalques foram mais notórios que no caso de fundações com uma estaca.

#### 4.3.1 Capacidade de carga a partir da curva carga recalque

Pelo método de Décourt (1993), foi previsto uma capacidade de carga de 6715kN para a metodologia tradicional de grupo de estaca, enquanto que para o sistema em radier estaqueado foi de 7350kN, um incremento em 635kN (9,4%) na carga de ruptura do sistema, como ilustrado na Figura 119.

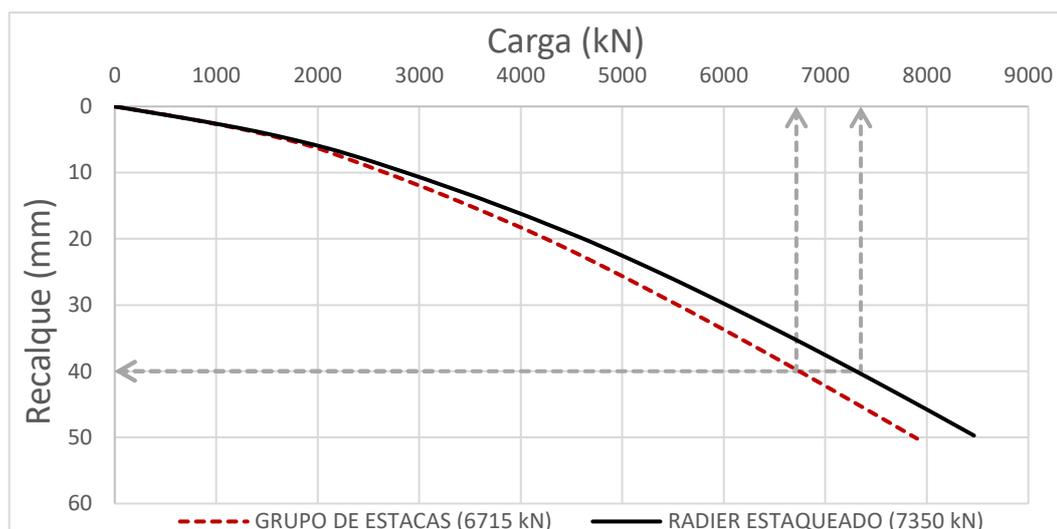


Figura 119 - Cargas de ruptura pelo método de Décourt (1993) para sistemas com duas estacas de  $\varnothing$  40cm e L15m.

A partir de sistemas de fundações contendo mais de uma estaca, os métodos propostos pela NBR 6122/10 e Davisson (1972) para previsão da carga de ruptura foi tomado como base o valor da capacidade de carga de uma estaca e multiplicada pelo número de estacas do sistema.

Como já abordado nesta pesquisa, o efeito de grupo de estacas é um importante fator a ser considerado no cálculo da carga de ruptura em fundações profundas. A fundação de estudo é inserida em solo arenoso com estacas do tipo escavadas. Assim, foi aplicado fator 1,0 para a eficiência de grupo, como proposto por Davis e Poulos (1980) Cintra e Aoki (2010) para fundações profundas inseridas neste contexto.

No Quadro 30 é ilustrado as cargas de rupturas para estes métodos aplicando o fator 1,0 de eficiência para sistemas com duas estacas.

Quadro 30 - Carga de ruptura pelos métodos NBR 6122/10 E Davisson (1972) para sistemas com duas estacas de  $\varnothing$  40cm e L15m.

MÉTODO	ESTACA ( $\varnothing$ / L)	TÉCNICA	CARGA DE RUPTURA CONVENCIONADA INDIVIDUAL (kN)	CARGA DE RUPTURA CONVENCIONADA DE GRUPO (kN)
NBR 6122/10	40 / 15	GRUPO DE ESTACAS	2120	4240
		RADIÉR ESTAQUEADO	2420	4840
DAVISSON (1972)	40 / 15	GRUPO DE ESTACAS	1725	3450
		RADIÉR ESTAQUEADO	1935	3870

Para o método da rigidez de Décourt (1996), o resultando foi similar às análises anteriores, com a curva apresentando um segmento horizontal, impossibilitando a obtenção da carga de ruptura, como ilustrado na Figura 120.

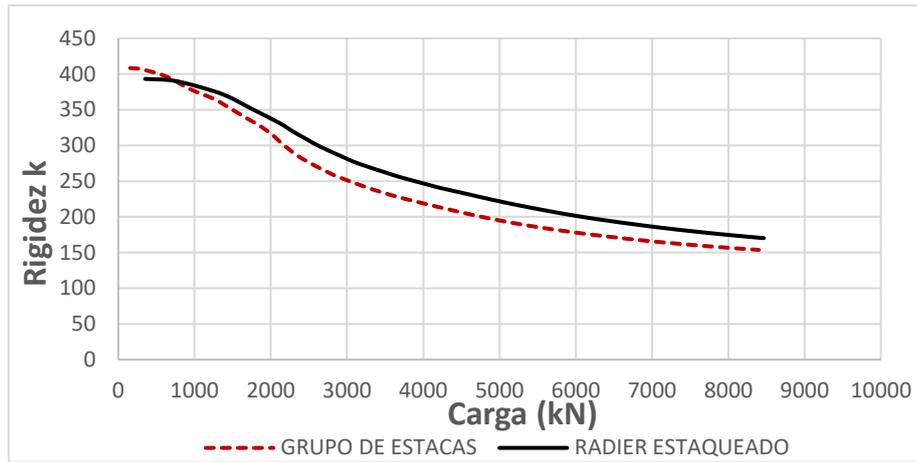


Figura 120 - Método da rigidez (Décourt, 1996) sistemas com duas estacas de  $\varnothing$  40cm e L15m.

### 4.3.2 Distribuição dos esforços no radier estaqueado

Na fundação em radier estaqueado constituída por duas estacas de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento, a distribuição dos esforços ao longo da aplicação do carregamento é apresentada no Quadro 31 e na Figura 121.

Quadro 31 - Distribuição dos esforços entre bloco e duas estacas de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento.

DISTRIBUIÇÃO DOS ESFORÇOS			
RECALQUE (MM)	CARGA TOTAL (KN)	CARGA NO RADIER (%)	CARGA NAS ESTACAS (%)
2,5	1050	0	100
5	1700	0,6	99,4
10	2980	5,4	94,6
20	4590	6,3	93,7
30	6100	7,9	92,1
40	7350	8,6	91,4

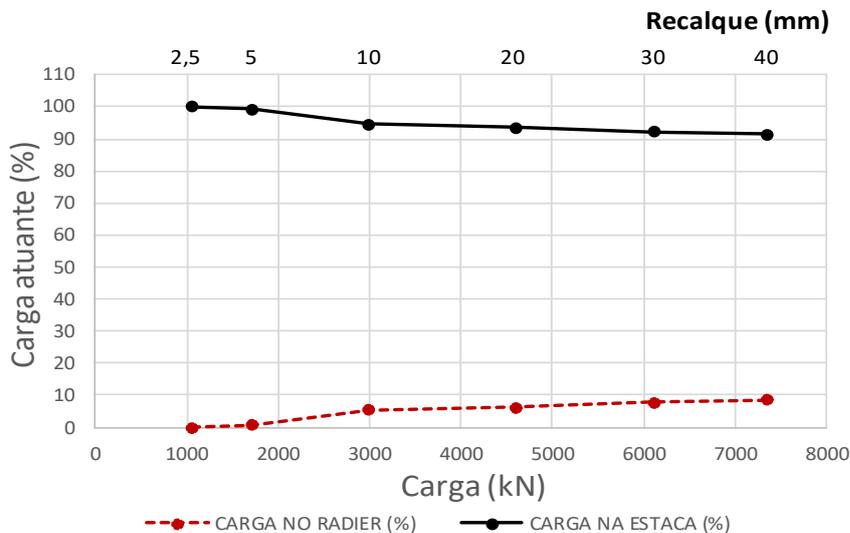


Figura 121 - Distribuição dos esforços entre bloco e duas estacas de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento ao longo da aplicação da carga.

Nesta configuração, o bloco não contribuiu no recebimento de esforços aplicados na fundação para carga de trabalho (600kN). Contudo, para a carga de ruptura pelo método de Décourt (1993), o mesmo teve 8,6% (635kN) de parcela na transferência do carregamento para a massa de solo.

#### 4.3.3 Capacidade de carga do bloco isolado

Na fundação composta por 2 estacas, o bloco isolado com dimensões de 170x70x60cm, o método de Skempton & MacDonald (1956) previu carga de ruptura e 1750kN, carga superior àquela que proporcionou aumento de resistência no radier estaqueado pelo contato do bloco (635kN).

#### 4.3.4 Recalques diferenciais

É apresentado na Figura 122 o plano e o corte XX para ilustrar os recalques diferenciais no bloco com dimensões de 70x70x60cm, mostrados na Figura 123.

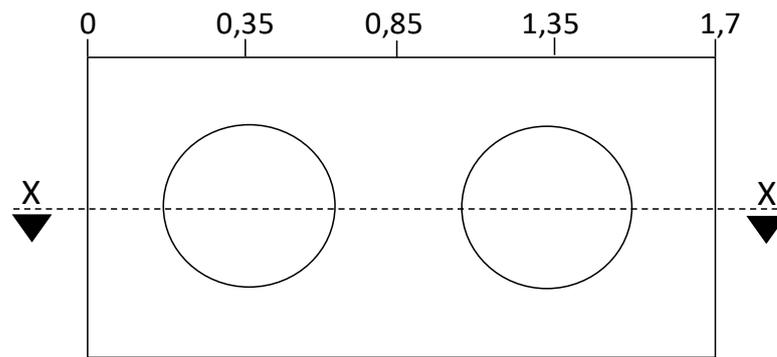


Figura 122 - Corte e coordenadas para resultados de recalques diferenciais para bloco de 170x70x60cm de dimensões.

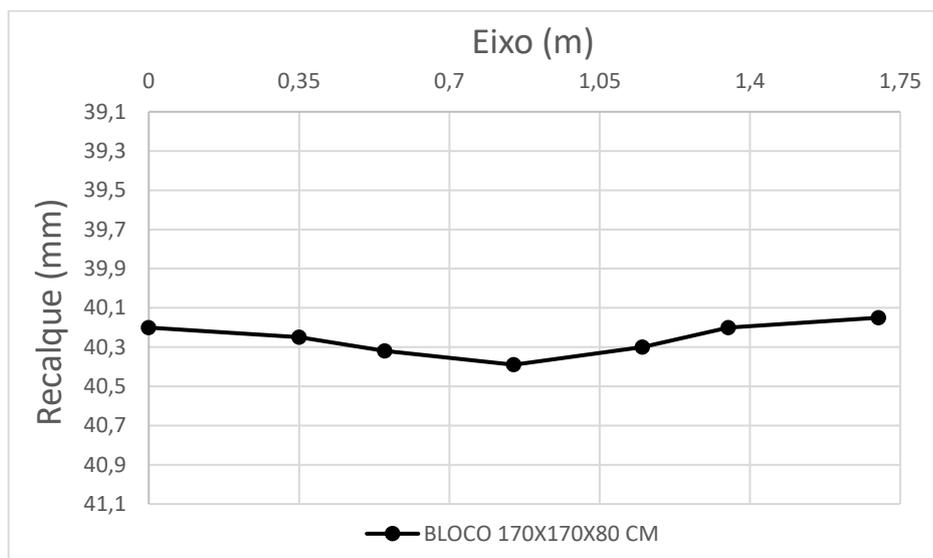


Figura 123 - Recalques diferenciais ao longo do bloco de 170x70x60cm de dimensões sobre duas estacas de  $\varnothing$  40cm.

#### 4.4 Bloco e radier sobre quatro estacas de $\phi$ 40 e L15

Na quarta análise, bloco de fundações possui 170x170x80cm de dimensões, sobre quatro estacas de diâmetro de 40cm e 15m de comprimento. Mantendo o método de análise, foram simulados sistemas a luz de grupo de estaca, radier estaqueado e bloco isolado para posterior comparação do comportamento estrutural das fundações.

A previsão das curvas carga *versus* recalque para tais sistemas é ilustrado na Figura 124 a seguir, demonstrando que novamente, o contato do bloco de fundação conferiu maior rigidez para a fundação.

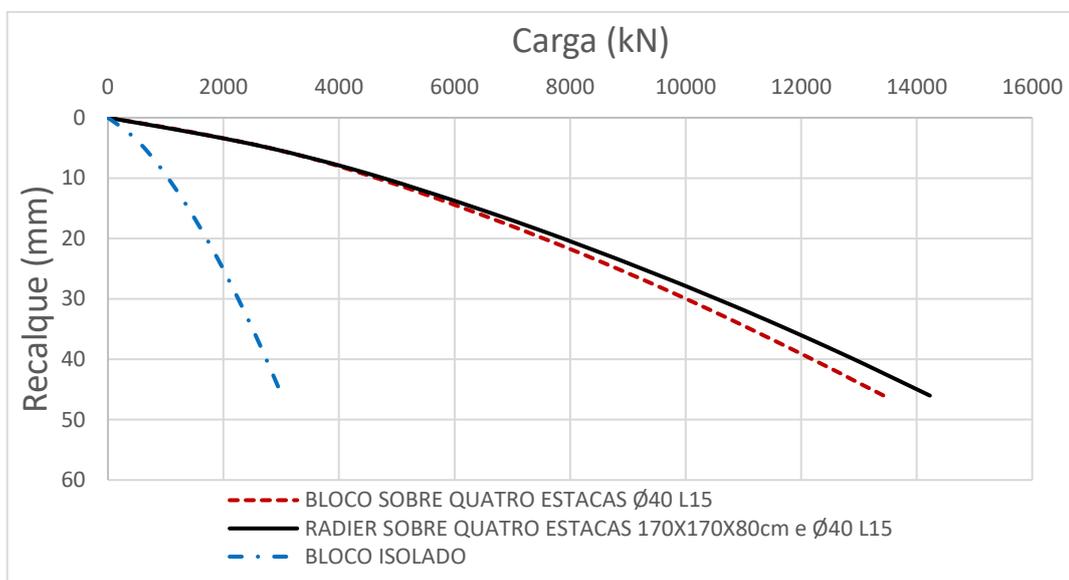


Figura 124 - Curvas carga recalque para bloco e radier sobre quatro estacas de  $\phi$  40cm e L15m e bloco isolado.

##### 4.4.1 Capacidade de carga a partir da curva carga recalque

Pelo método de Décourt (1993), a capacidade de carga prevista para a metodologia tradicional de grupo de estaca de  $\phi$  40cm e L15m foi 12200kN enquanto que para radier estaqueado foi prevista 13000kN, um aumento de 800kN (6,5%) na carga de ruptura, como ilustrado na Figura 125.

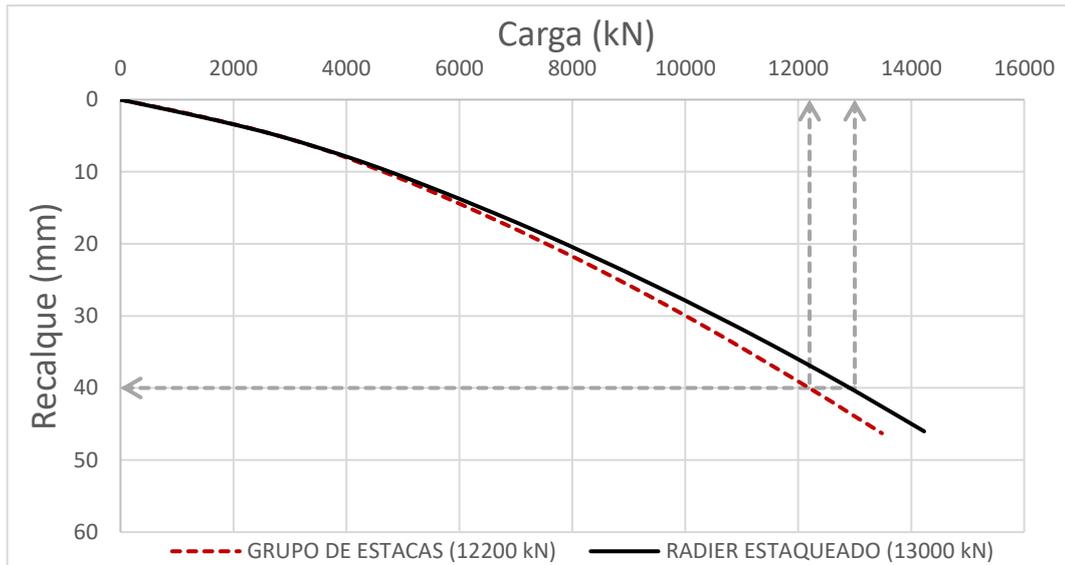


Figura 125 - Cargas de ruptura pelo método de Décourt (1993) para sistemas com quatro estacas de  $\phi$  40cm e L15m.

O Quadro 32 apresenta a previsão de carga de ruptura para os métodos propostos pela NBR 6122/10 e Davisson (1972) para sistemas de fundações com quatro estacas de  $\phi$  40cm e L15m e fator de eficiência 1,0.

Quadro 32 - Carga de ruptura pelos métodos NBR 6122/10 E Davisson (1972) para sistemas com quatro estacas de  $\phi$  40cm e L15m.

MÉTODO	ESTACA ( $\phi$ / L)	TÉCNICA	CARGA DE RUPTURA CONVENCIONADA INDIVIDUAL (kN)	CARGA DE RUPTURA CONVENCIONADA DE GRUPO (kN)
NBR 6122/10	40 / 15	GRUPO DE ESTACAS	2120	8480
		RADIÉR ESTAQUEADO	2300	9200
DAVISSON (1972)	40 / 15	GRUPO DE ESTACAS	1725	6900
		RADIÉR ESTAQUEADO	1800	7200

Na Figura 126 é apresentado o método da rigidez de Décourt (1996), ratificando que para este tipo de fundação tal método não se aplica para previsão da carga de ruptura do sistema.

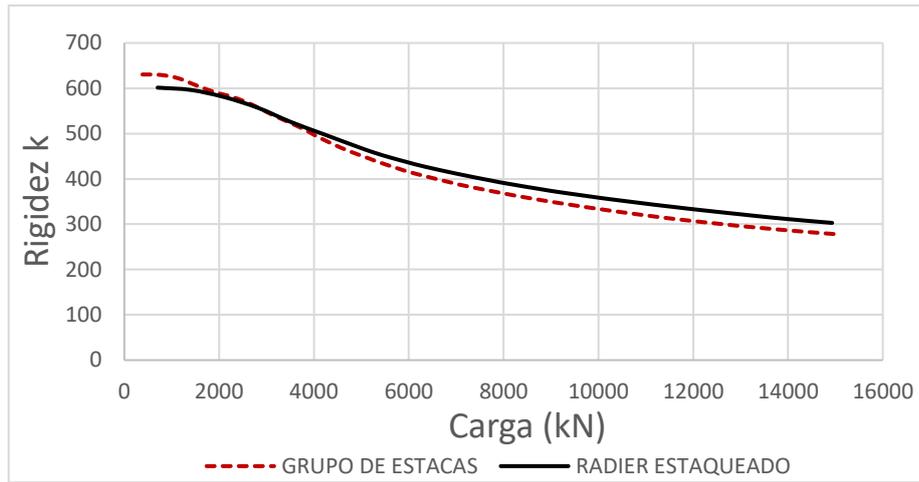


Figura 126 - Método da rigidez (Décourt, 1996) sistemas com quatro estacas de  $\phi$  40cm e L15m.

#### 4.4.2 Distribuição dos esforços no radier estaqueado

No sistema em radier estaqueado constituído por quatro estacas de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento, a forma de distribuição do carregamento ao longo da simulação numérica é apresentada no Quadro 33 e na Figura 127.

Quadro 33 - Distribuição dos esforços entre bloco quatro estacas de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento.

DISTRIBUIÇÃO DOS ESFORÇOS			
RECALQUE (MM)	CARGA TOTAL (KN)	CARGA NO RADIER (%)	CARGA NA ESTACA (%)
2,5	1600	0	100
5	2805	0	100
10	4900	0,4	99,6
20	7740	3,1	96,9
30	10700	3,7	96,3
40	13000	6,2	93,8

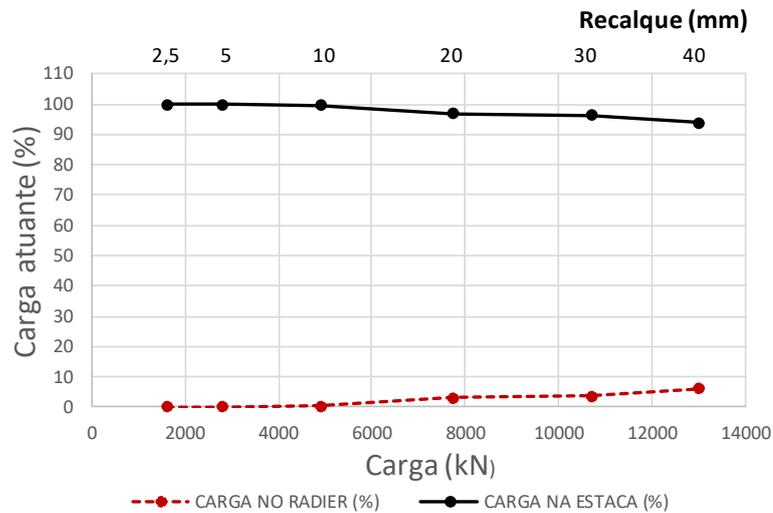


Figura 127 - Distribuição dos esforços entre bloco e quatro estacas de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento ao longo da aplicação da carga.

Neste sistema, o bloco não forneceu aumento de resistência na fundação para carga de trabalho (2400kN). No entanto, para a carga de ruptura pelo critério de Décourt (1993), o mesmo apresentou 6,2% (800kN) de parcela no recebimento do carregamento.

#### 4.4.3 Capacidade de carga do bloco isolado

Para o bloco com dimensões de 170x170x80cm, o método proposto por Skempton & MacDonald (1956) previu carga de ruptura de 2700kN, valor bem superior ao aumento de resistência no radier estaqueado ocasionado pelo contato do bloco (800kN).

#### 4.4.4 Recalques diferenciais

A Figura 128 ilustra o plano e o corte XX para apresentar os recalques diferenciais no bloco com dimensões de 170x170x80cm, ilustrados na Figura 129.

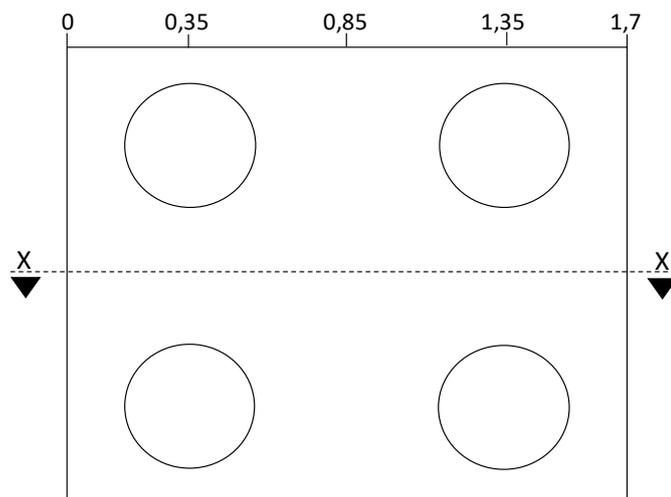


Figura 128 - Corte e coordenadas para resultados de recalques diferenciais para bloco de 170x170x80cm de dimensões.

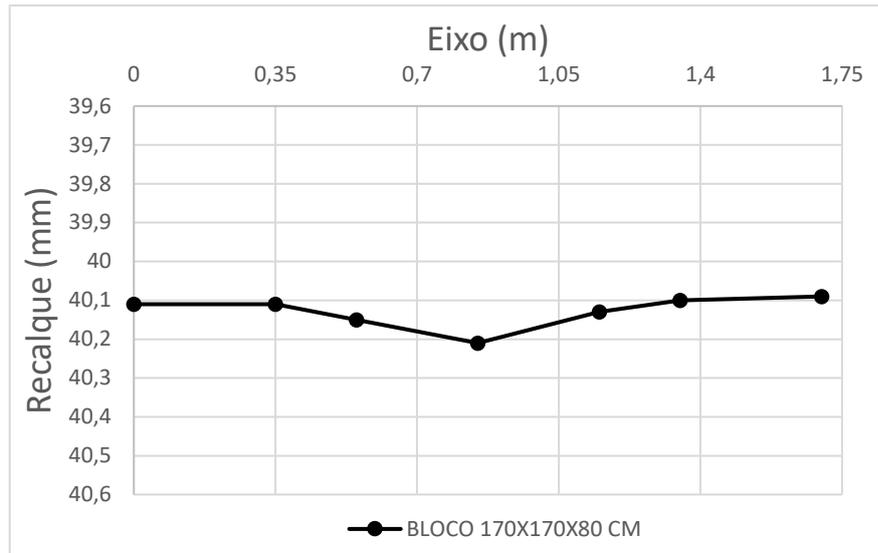


Figura 129 - Recalques diferenciais ao longo do bloco de 170x170x80cm de dimensões sobre quatro estacas de  $\varnothing$  40cm.

#### 4.5 Bloco e radier sobre quatro estacas de $\varnothing$ 25 e L17

Na quinta análise, os sistemas de fundações possuem bloco de 118x118x70cm sobre quatro estacas de diâmetro de 25cm e 17m de comprimento. O resultado das curvas carga recalque das simulações para grupo de estacas, radier estaqueado e bloco isolado é apresentado na Figura 111.

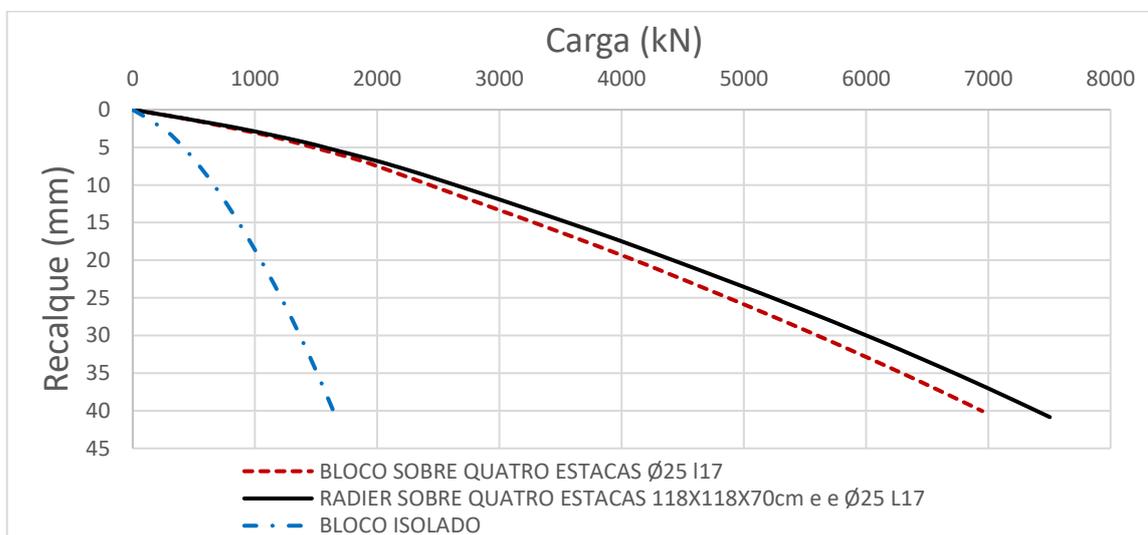


Figura 130 - Curvas carga recalque para bloco e radier sobre quatro estacas de  $\varnothing$  25cm e L17m e bloco isolado.

A partir da comparação das curvas carga recalque conclui-se novamente que a interação do bloco com o solo conferiu capacidade de carga para o sistema de fundação.

#### 4.5.1 Capacidade de carga a partir da curva carga recalque

O método de Décourt (1993) previu carga de ruptura de 4850kN e 5250kN para os sistemas de fundações em grupo de estacas e radier estaqueado, respectivamente. Um aumento de resistência em 400kN (8,9%), como ilustrado na Figura 131.

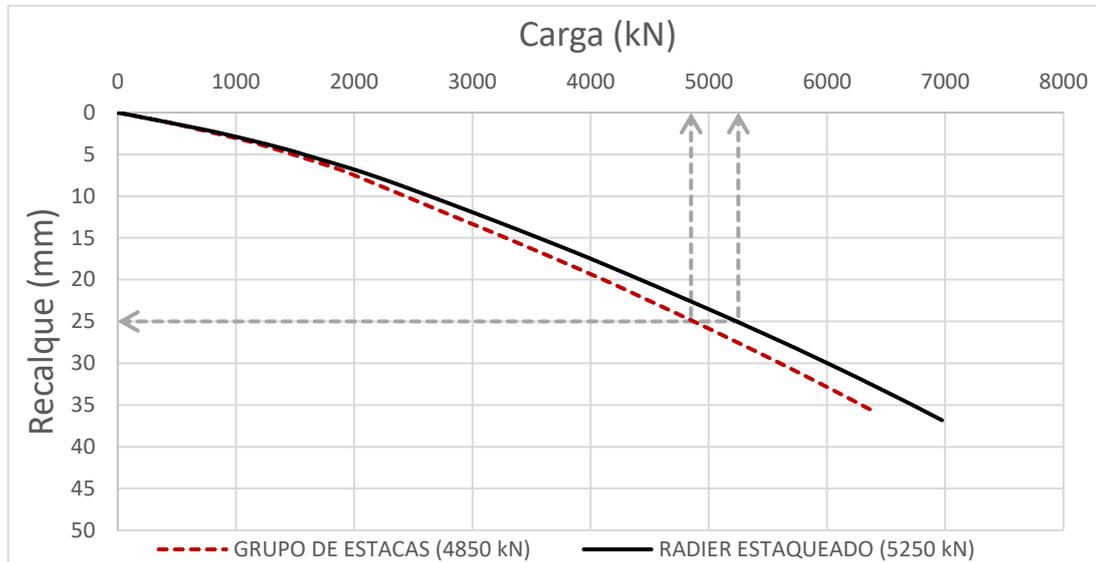


Figura 131 - Cargas de ruptura pelo método de Décourt (1993) para sistemas com quatro estacas de  $\varnothing$  25cm e L17m.

O Quadro 34 apresenta a capacidade de carga prevista pelos métodos propostos pela NBR 6122/10 e Davisson (1972) para fundações com quatro estacas de  $\varnothing$  25cm e L17m com fator de eficiência 1,0.

Quadro 34 - Carga de ruptura pelos métodos NBR 6122/10 E Davisson (1972) para sistemas com quatro estacas de  $\varnothing$  25cm e L17m.

MÉTODO	ESTACA ( $\varnothing$ / L)	TÉCNICA	CARGA DE RUPTURA CONVENCIONADA INDIVIDUAL (kN)	CARGA DE RUPTURA CONVENCIONADA DE GRUPO (kN)
NBR 6122/10	25 / 17	GRUPO DE ESTACAS	1320	5280
		RADIER ESTAQUEADO	1590	6360
DAVISSON (1972)	25 / 17	GRUPO DE ESTACAS	1220	4880
		RADIER ESTAQUEADO	1400	5600

A Figura 132 apresenta a aplicação do método da rigidez de Décourt (1996) para previsão da carga de ruptura, mostrando, como nas análises anteriores, que este método não se aplica para a fundação de estudo (escavada em solo arenoso).

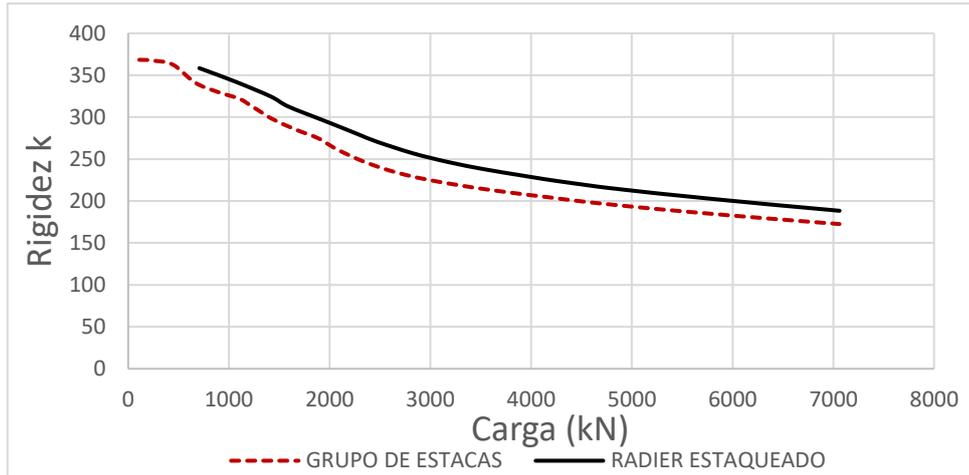


Figura 132 - Método da rigidez (Décourt, 1996) sistemas com duas estacas de  $\phi$  25cm e L17m.

### 4.5.2 Distribuição dos esforços no radier estaqueado

Na fundação composta por quatro estacas de 25cm de diâmetro e 17m de comprimento, a distribuição dos esforços ao longo da simulação numérica é apresentada no Quadro 35 e na Figura 133.

Quadro 35 - Distribuição dos esforços entre bloco quatro estacas de 25cm de diâmetro e 17m de comprimento.

DISTRIBUIÇÃO DOS ESFORÇOS			
RECALQUE (MM)	CARGA TOTAL (KN)	CARGA NO RADIER (%)	CARGA NAS ESTACAS (%)
2,5	820	0	100
5	1580	5,7	94,3
10	2570	6,2	93,8
15	3540	6,8	93,2
20	4415	7,1	92,9
25	5250	7,6	92,4

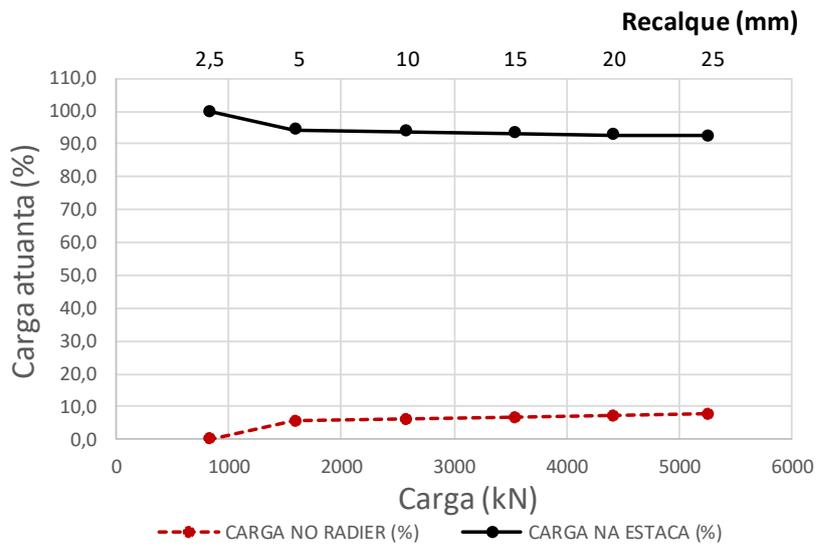


Figura 133 - Distribuição dos esforços entre bloco e quatro estacas de 25cm de diâmetro e 17m de comprimento ao longo da aplicação da carga.

Nesta configuração, o elemento superficial não apresentou contribuição no recebimento de esforços para a carga de trabalho (1000kN). Contudo, para a carga de ruptura pelo método de Décourt (1993), o mesmo teve 7,6% (400kN) de parcela na transferência da carga aplicada para o solo.

#### 4.5.3 Capacidade de carga do bloco isolado

O bloco com dimensões de 118x118x70cm, o método de Skempton & MacDonald (1956) previu carga de ruptura de 1660kN, carga bem superior ao incremento de resistência na fundação em radier estaqueado ocasionado pela interação do bloco com o solo (400kN).

#### 4.5.4 Recalques diferenciais

É ilustrado na Figura 134 o plano e o corte XX para apresentar os recalques diferenciais no bloco com dimensões de 118x118x70cm, mostrados na Figura 135.

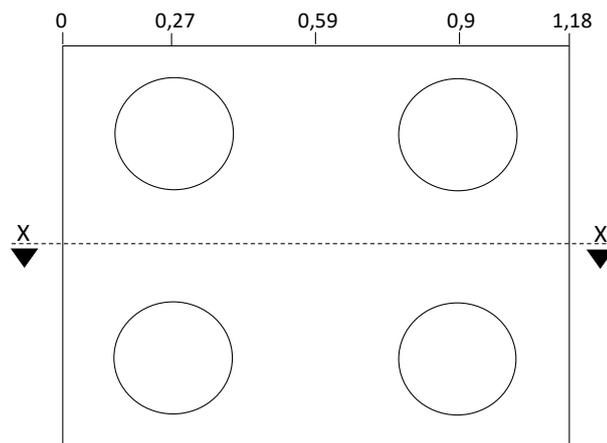


Figura 134 - Corte e coordenadas para resultados de recalques diferenciais para bloco de 170x170x70cm de dimensões.

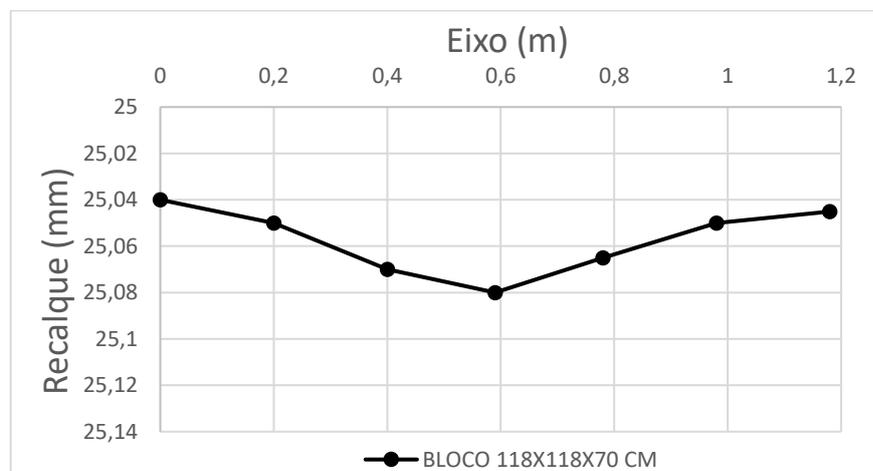


Figura 135 - Recalques diferenciais ao longo do bloco de 118x118x70cm de dimensões sobre quatro estacas de  $\varnothing$  25cm.

#### 4.6 Bloco e radier sobre quatro estacas de $\phi$ 50cm e L 20m

A sexta análise foi realizada em fundações com blocos de 205x205x100cm apoiado sobre quatro estacas de diâmetro de 50cm e 20m de comprimento. As curvas carga recalque das três metodologias estudadas são apresentadas na Figura 136.

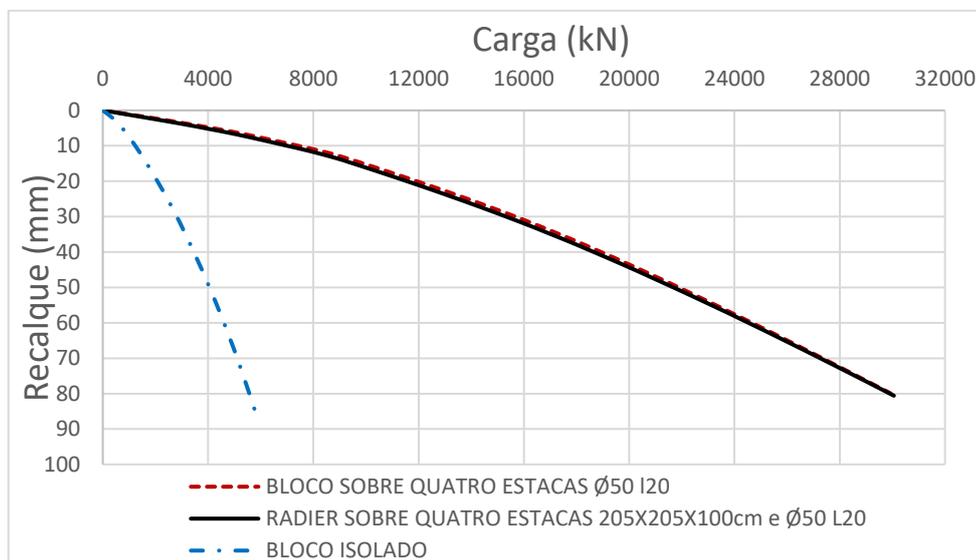


Figura 136 - Curvas carga recalque para bloco e radier sobre quatro estacas de  $\phi$  50cm e L20m.

A partir da análise comparativa das curvas carga recalque dos sistemas em grupo de estacas e radier estaqueado, conclui-se que para a fundação constituída por quatro estacas com diâmetro de 50cm e comprimento de 20m, o bloco não apresentou influência significativa em receber os esforços emitidos na fundação.

Este comportamento similar da fundação em grupo de estacas com a técnica radier estaqueado pode ser justificado pelo aumento de rigidez por parte do estaqueamento composto por estacas de diâmetro 50cm. Fato este que resultou na não participação do elemento superficial no recebimento de carga.

Tal fato corrobora com estudos realizados por Alnuiam, Naggat e Naggat (2013), que afirmam que conforme o diâmetro das estacas aumenta, a rigidez proporcionada pelo estaqueamento é incrementada, reduzindo a participação do radier no recebimento de esforços.

Este comportamento também é observado em análises numéricas do caso de radier sobre 16 estacas, proposto pelo TC-18, em que a elevada rigidez do estaqueamento faz com que o sistema se comporte mais como grupo de estacas (apenas as estacas recebem os esforços), do que radier estaqueado (radier e estacas resistem aos esforços).

#### 4.6.1 Capacidade de carga a partir da curva carga recalque

Como os sistemas de fundações em grupo de estacas e radier estaqueado apresentaram mesmo valores de recalques para mesmas cargas aplicadas, o método de Décourt (1993) previu a mesma carga de ruptura no valor de 21800kN para ambas configurações, como ilustrado na Figura 137.

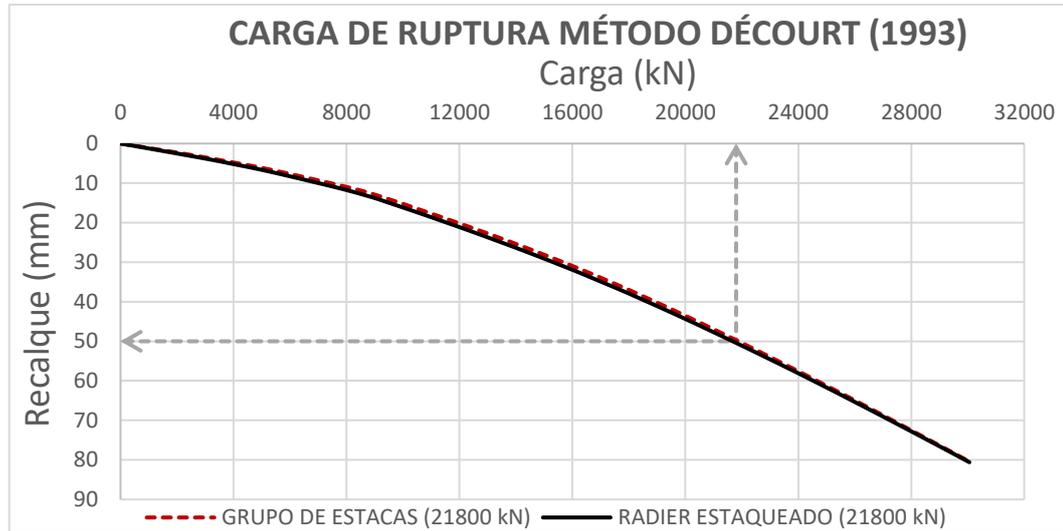


Figura 137 - Cargas de ruptura pelo método de Décourt (1993) para sistemas com quatro estacas de  $\varnothing$  50cm e L20m.

O Quadro 36 ilustra a previsão da capacidade de carga a partir dos métodos propostos pela NBR 6122/10 e Davisson (1972), para sistemas de fundações com quatro estacas de  $\varnothing$  50cm e L20m, com fator de eficiência 1,0.

Quadro 36 - Carga de ruptura pelos métodos NBR 6122/10 E Davisson (1972) para sistemas com quatro estacas de  $\varnothing$  50cm e L20m.

MÉTODO	ESTACA ( $\varnothing$ / L)	TÉCNICA	CARGA DE RUPTURA INDIVIDUAL (kN)	CARGA DE RUPTURA DE GRUPO (kN)
NBR 6122/10	50 / 20	GRUPO DE ESTACAS	5580	22320
		RADIER ESTAQUEADO	5700	22800
DAVISSON (1972)	50 / 20	GRUPO DE ESTACAS	4550	18200
		RADIER ESTAQUEADO	4695	18780

Na Figura 138 é apresentado o método da rigidez de Décourt (1996) para as metodologias grupo de estaca e radier estaqueado com quatro estacas de  $\varnothing$  50cm e L20m, demonstrando, como nas previsões dos sistemas anteriores, que o método não se aplica para o sistema de fundação estudado.

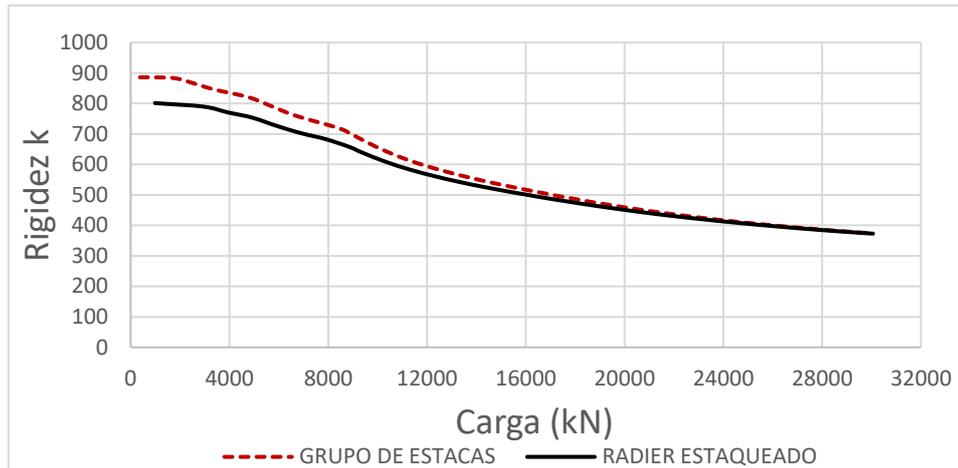


Figura 138 - Método da rigidez (Décourt, 1996) sistemas com quatro estacas de  $\phi$  50cm e L20m.

No radier estaqueado composto por quatro estacas de 50cm de diâmetro e 20m de comprimento, a curva carga recalque demonstrou mesmo comportamento para os sistemas em grupo de estacas e radier estaqueado. Assim, nesta configuração, as estacas no sistema em radier estaqueado foram responsáveis por receber 100% dos esforços aplicados na fundação.

#### 4.6.3 Capacidade de carga do bloco isolado

Para o bloco com dimensões de 205x205x100cm, o método de Skempton & MacDonald (1956) previu carga de ruptura de 3850kN para o recalque de 40mm.

#### 4.6.4 Recalques diferenciais

A Figura 139 apresenta o plano e o corte XX para ilustrar os recalques diferenciais no bloco com dimensões de 205x205x100cm, mostrados na Figura 140.

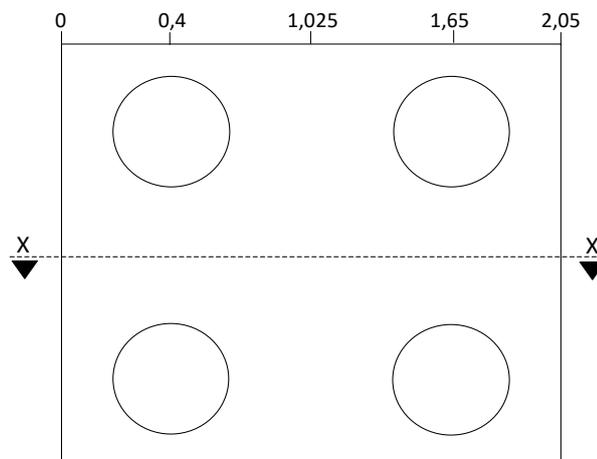


Figura 139 - Corte e coordenadas para resultados de recalques diferenciais para bloco de 205x205x130cm de dimensões.

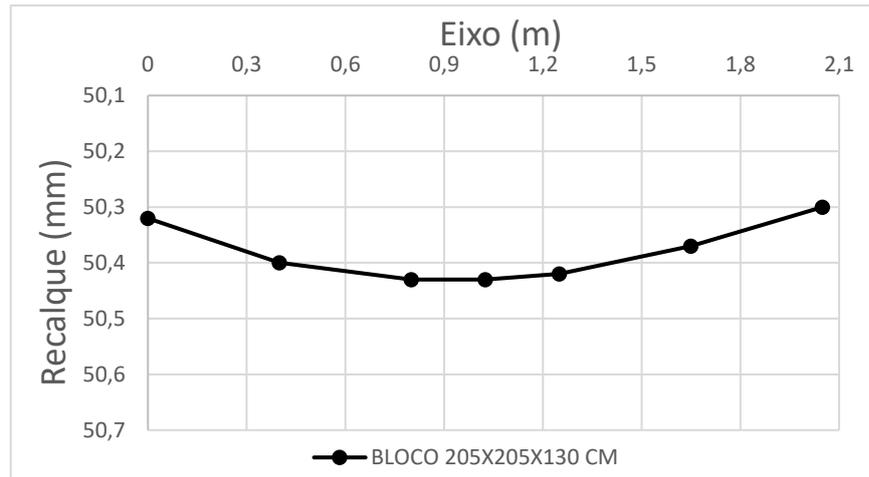


Figura 140 - Recalques diferenciais ao longo do bloco de 205x205x100cm de dimensões sobre quatro estacas de  $\varnothing$  50cm.

#### 4.7 Bloco e radier sobre cinco estacas de $\varnothing$ 50 e L15

Na sétima análise as fundações analisadas eram compostas por blocos de 280x205x130cm, apoiado em cinco estacas de diâmetro de 50cm e 15m de comprimento. As curvas carga *versus* recalque das metodologias grupo de estacas, radier estaqueado e bloco isolado estão apresentadas na Figura 141.

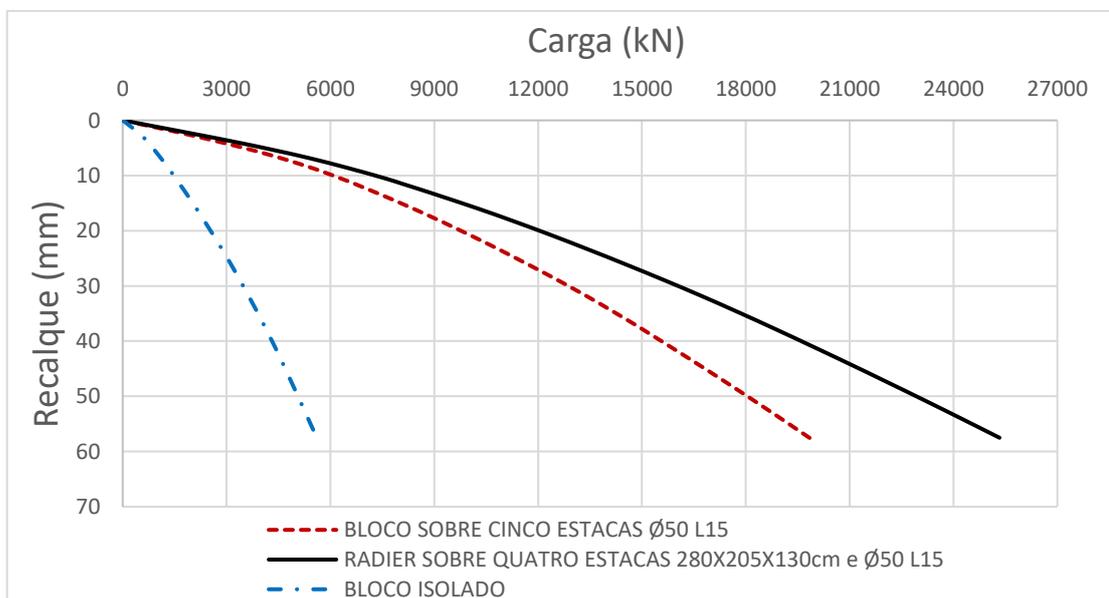


Figura 141 - Curvas carga recalque para bloco e radier sobre quatro estacas de  $\varnothing$  50cm e L20m.

A partir da análise das curvas carga recalque em grupo de estaca e radier estaqueado, pode se concluir que no sistema de fundação profunda composta por 5 estacas de  $\varnothing$  50cm e L20m, a interação do bloco com o solo conferiu um aumento substancial na capacidade de carga do sistema.

#### 4.7.1 Capacidade de carga a partir da curva carga recalque

Ao aplicar o método de Décourt (1993) para o sistema de fundação com 5 estacas, foi prevista carga de ruptura de 18100kN para metodologia de fundação em grupo de estacas e 23000kN para sistema em radier estaqueado, um incremento em 4900kN (27,0%) na capacidade de carga devido a interação do bloco com o solo. A Figura 142 ilustra este resultado.

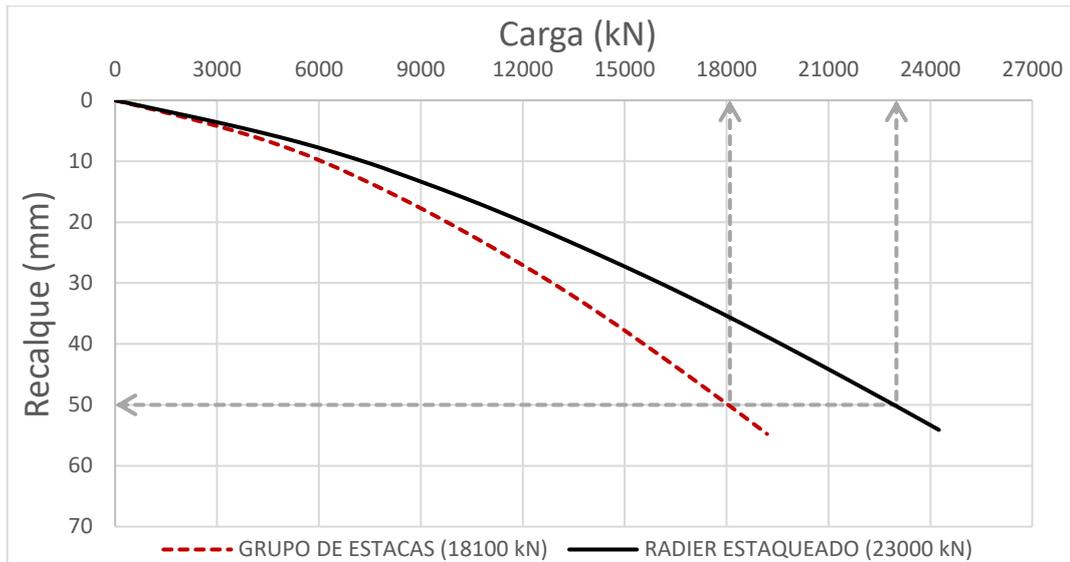


Figura 142 - Cargas de ruptura pelo método de Décourt (1993) para sistemas com cinco estacas de  $\varnothing$  50cm e L15m.

Este grande incremento de capacidade de carga por parte do elemento superficial para o sistema pode ser justificado pela maior área de contato do bloco com o solo em comparação, em termos de porcentagem, com os sistemas anteriormente analisados. Desta forma, o benefício da interação do bloco com o solo para este sistema foi mais evidente.

No Quadro 37 é apresentada a previsão da capacidade de carga pelos métodos da NBR 6122/10 e Davisson (1972), no sistema de fundação composto por cinco estacas de  $\varnothing$  50cm e L15m, com fator de eficiência 1,0.

Quadro 37 - Carga de ruptura pelos métodos NBR 6122/10 E Davisson (1972) para sistemas com quatro estacas de  $\varnothing$  50cm e L15m.

MÉTODO	ESTACA ( $\varnothing$ / L)	TÉCNICA	CARGA DE RUPTURA CONVENCIONADA INDIVIDUAL (kN)	CARGA DE RUPTURA CONVENCIONADA DE GRUPO (kN)
NBR 6122/10	50 / 15	GRUPO DE ESTACAS	3280	16400
		RADIÉR ESTAQUEADO	3850	1925
DAVISSON (1972)	50 / 15	GRUPO DE ESTACAS	2500	12500
		RADIÉR ESTAQUEADO	3000	15000

A Figura 143 apresenta a aplicação do método da rigidez de Décourt (1996) para as metodologias grupo de estaca e radier estaqueado com cinco estacas de  $\varphi$  50cm e L15m.

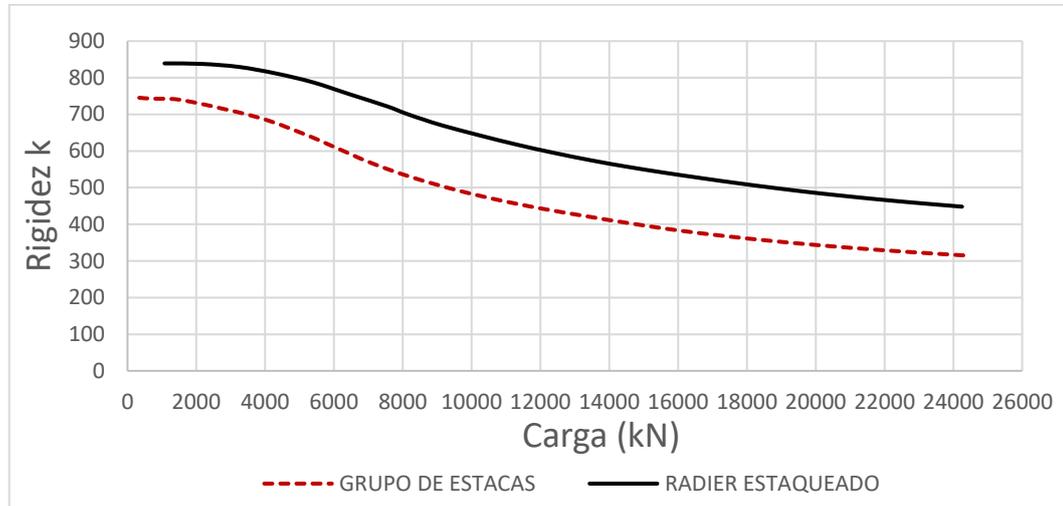


Figura 143 - Método da rigidez (Décourt, 1996) sistemas com quatro estacas de  $\varphi$  50cm e L15m.

#### 4.7.2 Distribuição dos esforços no radier estaqueado

No sistema de fundação composto por cinco estacas de 50cm e 15m de comprimento, a forma de distribuição dos esforços ao longo da aplicação da carga é apresentada no Quadro 38 e na Figura 144.

Quadro 38 - Distribuição dos esforços entre bloco cinco estacas de 50cm de diâmetro e 15m de comprimento.

DISTRIBUIÇÃO DOS ESFORÇOS			
RECALQUE (MM)	CARGA TOTAL (KN)	CARGA NO RADIÉR (%)	CARGA NA ESTACA (%)
5	4060	12,6	87,4
10	7100	14,8	85,2
20	12000	17,6	82,4
30	16000	18,8	81,2
40	19710	20,1	79,9
50	23000	21,3	78,7

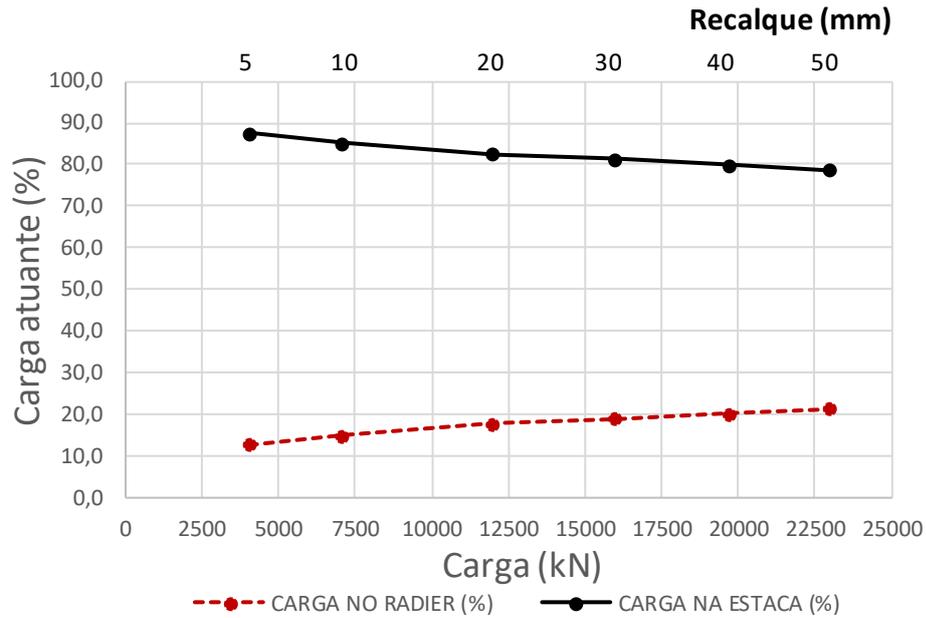


Figura 144 - Distribuição dos esforços entre bloco e cinco estacas de 50cm de diâmetro e 15m de comprimento ao longo da aplicação da carga.

Neste sistema, o bloco de fundação apresentou 13% (617kN) de contribuição no recebimento de esforços para a carga de trabalho (4750kN). Para a carga de ruptura pelo método de Décourt (1993), o mesmo teve parcela de 21,3% (4990kN) na transferência da carga aplicada para o solo.

#### 4.7.3 Capacidade de carga do bloco isolado

Para o bloco que possui dimensões de 280x205x130cm, foi previsto carga de ruptura de 4400kN pelo método de Skempton & MacDonald (1956) para recalque limite de 40mm, valor próximo daquele representado pelo incremento de resistência para a fundação em radier estaqueado.

#### 4.7.4 Recalques diferenciais

É apresentado na Figura 145 o plano e o corte XX para ilustrar os recalques diferenciais no bloco com dimensões de 280x205x130cm, demonstrados na Figura 146.

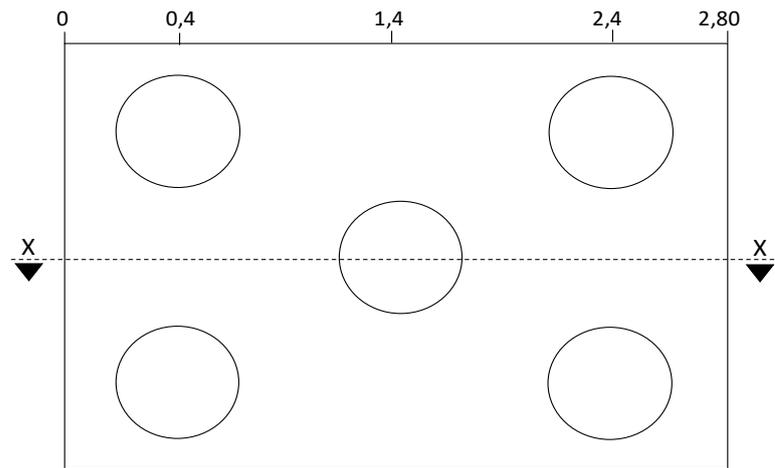


Figura 145 - Corte e coordenadas para resultados de recalques diferenciais para bloco de 280x205x130cm de dimensões.

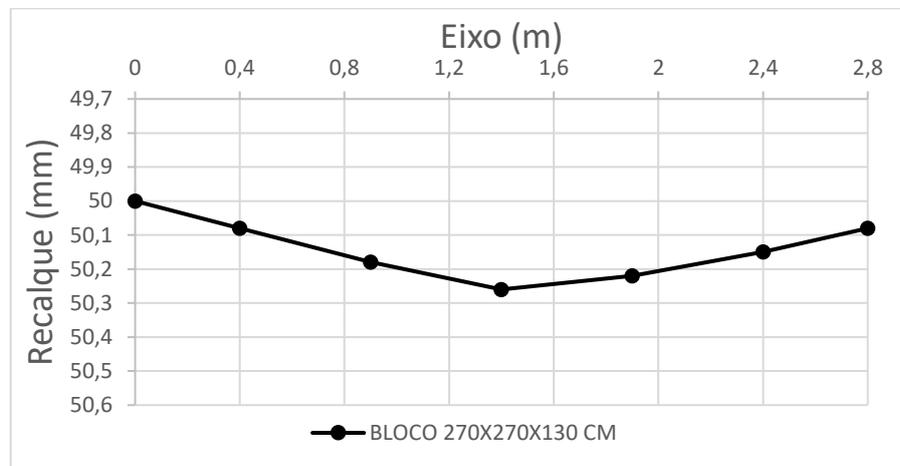


Figura 146 - Recalques diferenciais ao longo do bloco de 280x205x130cm de dimensões sobre cinco estacas de  $\varnothing$  50cm.

#### 4.8 Bloco e radier sobre nove estacas de $\varnothing$ 40 e L15

No último sistema analisado, a fundação é composta por um bloco de 270x270x130cm, apoiado sobre nove estacas com diâmetro de 40cm e 15m de comprimento. As curvas carga *versus* recalque das configurações em grupo de estacas, radier estaqueado e bloco isolado estão apresentadas na Figura 147.

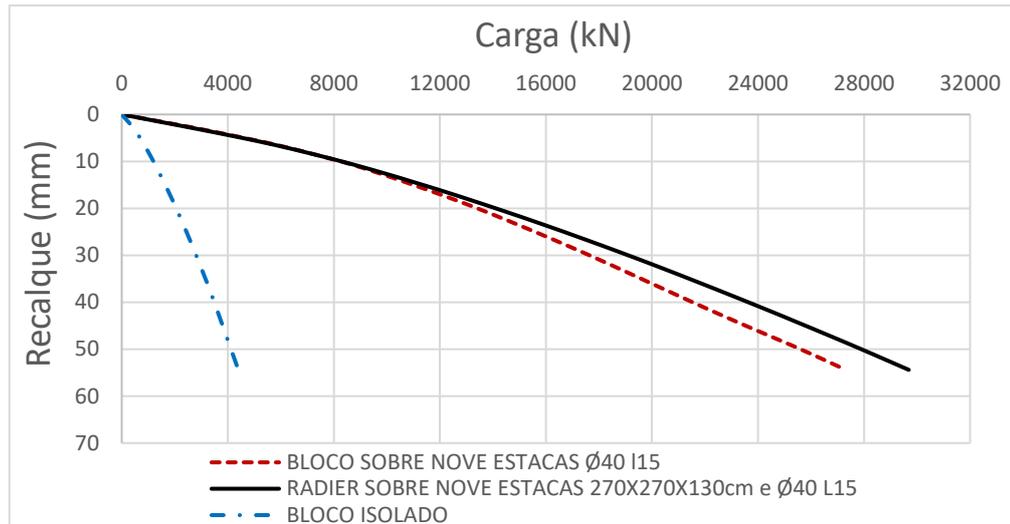


Figura 147 - Curvas carga recalque para bloco e radier sobre quatro estacas de  $\varnothing$  40cm e L15m.

Pela análise das curvas carga recalque dos sistemas de fundações profundas, conclui-se que nesta configuração, a fundação em radier estaqueado não apresentou um aumento de capacidade de carga expressivo como observado no sistema de fundação com 5 estacas.

#### 4.8.1 Capacidade de carga a partir da curva carga recalque

No método de Décourt (1993) para o sistema de fundação com 9 estacas, foi prevista carga de ruptura de 21500kN para fundação em grupo de estacas e 23750kN para o método em radier estaqueado, um aumento em 2250kN (10,5%) na carga de ruptura devido a interação do bloco com o solo, como demonstrado na Figura 148.

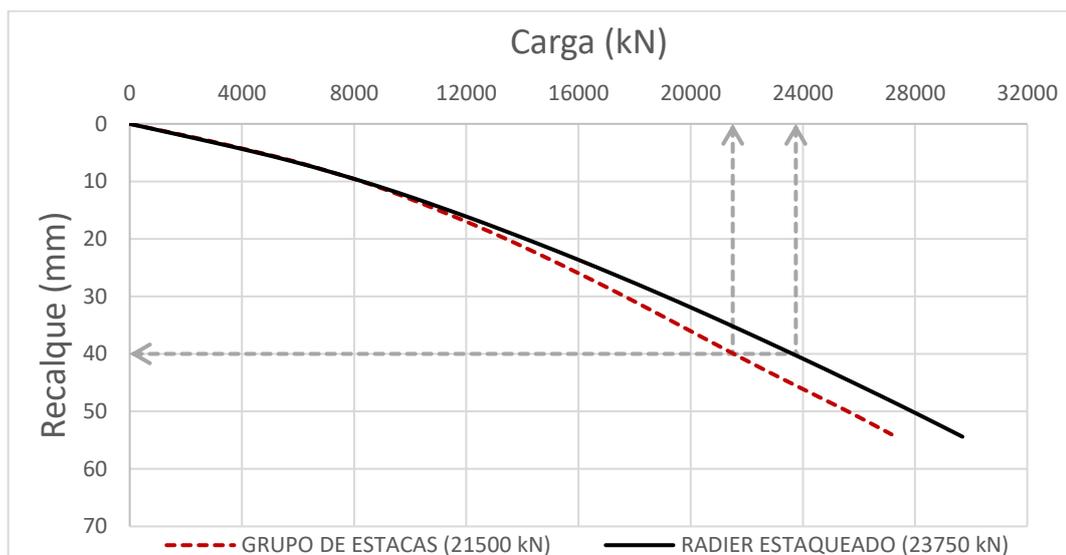


Figura 148 - Cargas de ruptura pelo método de Décourt (1993) para sistemas com nove estacas de  $\varnothing$  40cm e L15m.

A previsão da carga de ruptura pelos métodos da NBR 6122/10 e Davisson (1972) para fundações compostas por nove estacas de  $\phi$  40cm e L15m, com fator de eficiência 1,0 é apresentada no Quadro 39.

Quadro 39 - Carga de ruptura pelos métodos NBR 6122/10 E Davisson (1972) para sistemas com nove estacas de  $\phi$  40cm e L15m.

MÉTODO	ESTACA ( $\phi$ / L)	TÉCNICA	CARGA DE RUPTURA CONVENCIONADA INDIVIDUAL (kN)	CARGA DE RUPTURA CONVENCIONADA DE GRUPO (kN)
NBR 6122/10	40 / 15	GRUPO DE ESTACAS	2120	19080
		RADIER ESTAQUEADO	2300	20700
DAVISSON (1972)	40 / 15	GRUPO DE ESTACAS	1725	15525
		RADIER ESTAQUEADO	1800	16200

Na Figura 149 é apresentada a aplicação do método da rigidez de Décourt (1996) para os sistemas de fundações profundas com nove estacas, método o qual não se aplica, como já citado, para a fundação de estudo.

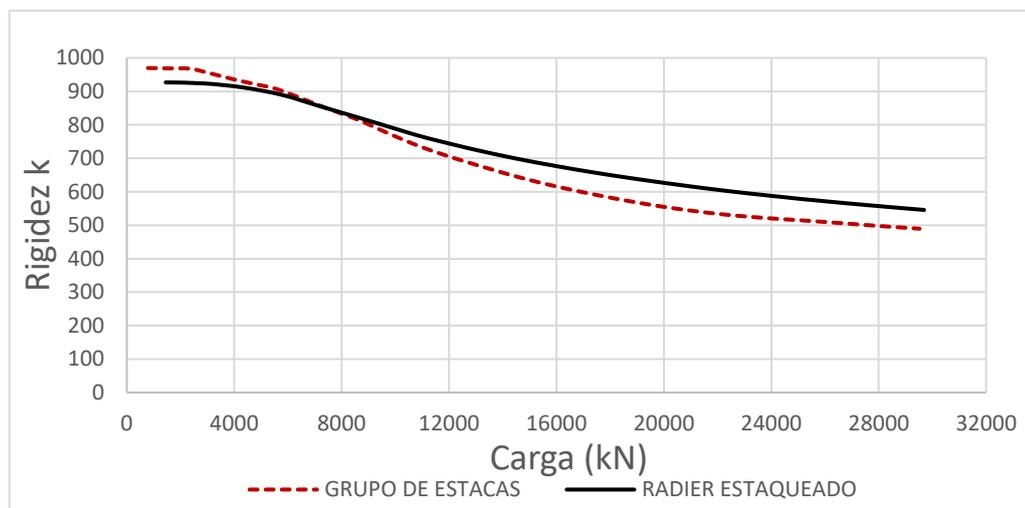


Figura 149 - Método da rigidez (Décourt, 1996) sistemas com quatro estacas de  $\phi$  40cm e L15m.

#### 4.8.2 Distribuição dos esforços no radier estaqueado

Na fundação constituída por nove estacas de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento, a distribuição dos esforços ao longo da aplicação do carregamento é apresentada no Quadro 40 e na Figura 150.

Quadro 40 - Distribuição dos esforços entre bloco e nove estacas de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento.

DISTRIBUIÇÃO DOS ESFORÇOS			
RECALQUE (MM)	CARGA TOTAL (KN)	CARGA NO RADIER (%)	CARGA NA ESTACA (%)
2,5	2370	0,0	100,0
5	4520	0,0	100,0
10	8100	0,0	100,0
20	14300	6,3	93,7
30	18850	7,7	92,3
40	23750	9,5	90,5

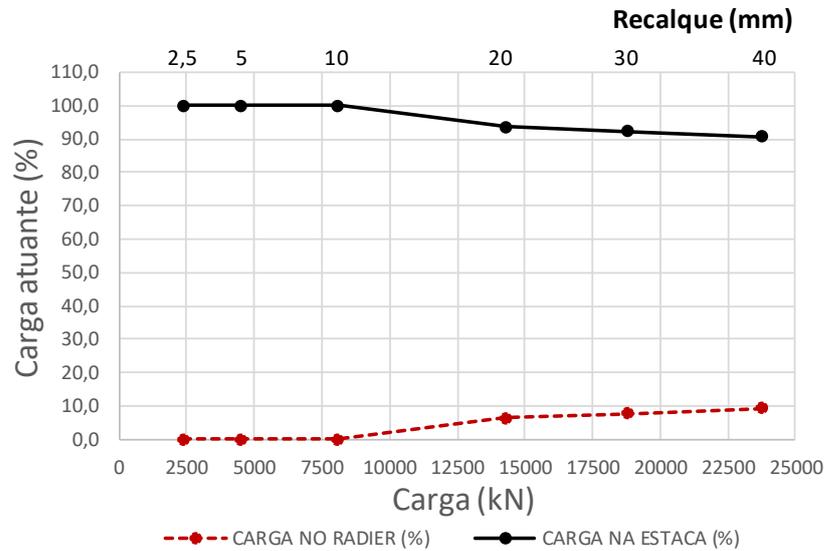


Figura 150 - Distribuição dos esforços entre bloco e nove estacas de 40cm de diâmetro e 15m de comprimento ao longo da aplicação da carga.

Nesta configuração de fundação, o bloco não apresentou contribuição no recebimento do carregamento aplicado para a carga de trabalho (5400kN). Contudo, para a carga de ruptura pelo método de Décourt (1993), o mesmo apresentou contribuição de 9,5% (2250kN) na transferência da carga aplicada para o solo.

#### 4.8.3 Capacidade de carga do bloco isolado

O bloco com as dimensões de 270x270x130cm, o método de Skempton & MacDonald (1956) previu carga de ruptura de 3480kN, valor um pouco superior àquele apresentado pelo aumento de resistência para a fundação em radier estaqueado, ocasionado pelo contato do bloco com o solo.

#### 4.8.4 Recalques diferenciais

A Figura 151 apresenta o plano e o corte XX para ilustrar os recalques diferenciais no bloco com dimensões de 270x270x130cm, os quais são demonstrados na Figura 152.

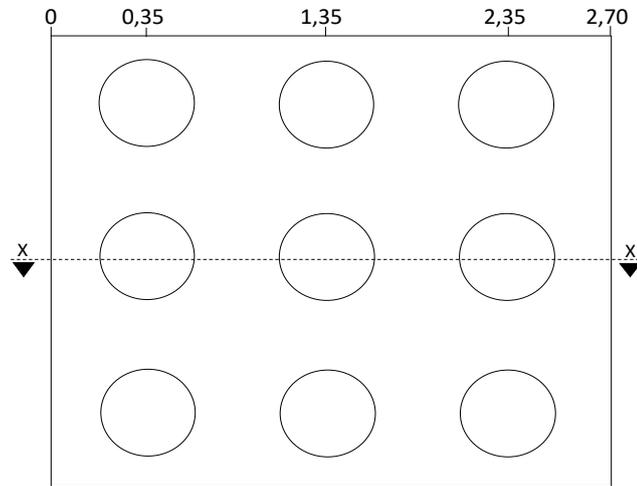


Figura 151 - Corte e coordenadas para resultados de recalques diferenciais para bloco de 270x270x130cm de dimensões.

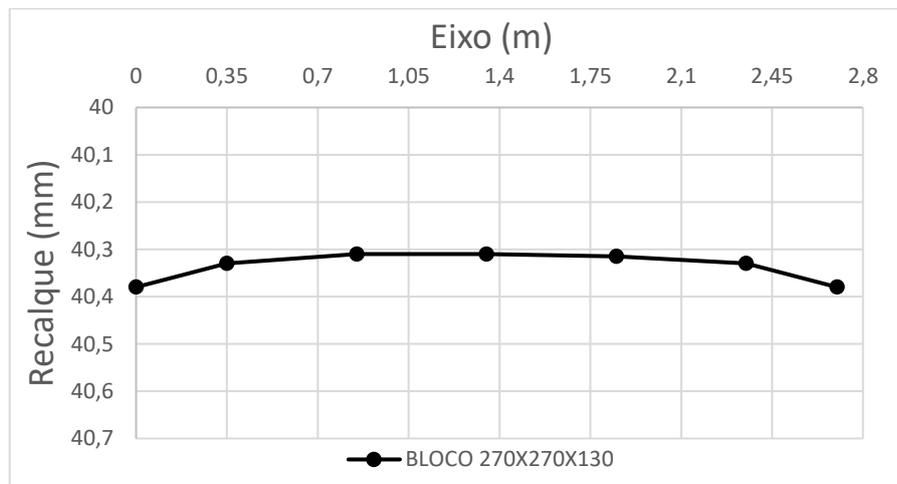


Figura 152 - Recalques diferenciais ao longo do bloco de 270x270x130cm de dimensões sobre nove estacas de  $\varnothing$  40cm.

#### 4.9 Considerações finais dos resultados das análises numéricas

Nesta pesquisa foram realizadas 8 modelagens de sistemas de fundações, tanto na metodologia de grupo de estacas quanto para radier estaqueado. Todos os sistemas em radier estaqueado são conceituados como pequenos radies estaqueados (*Small pile rafts*), conforme Russo e Vigiani (1998).

Observou-se nos resultados que os blocos não possuíam capacidade de carga suficiente para se adequar aos critérios de projeto, apresentando elevados recalques, corroborando com afirmação de Russo e Vigiani (1998), necessitando assim da instalação de estacas sob o elemento superficial.

Também foi verificado que o bloco de fundação apresentou contribuição de 11% em média no incremento de capacidade de carga para os sistemas de fundação. Estes resultados corroboram com estudos de Mandolini, Di laora e Mascarucci (2013), que devido a pequena área de contato do elemento superficial com o solo e o baixo espaçamento entre estacas, tem-se maior participação do estaqueamento no recebimento dos esforços.

Resultados de Soares, Coutinho e Cunha (2014) também ratificam este efeito da área de contato do elemento superficial no recebimento dos esforços aplicados na fundação. Neste estudo, a maior área de contato do bloco em porcentagem conferiu maior interação com o solo e conseqüente maior contribuição na capacidade de carga.

Esta parcela de contribuição dos blocos de fundação no comportamento mecânico dos sistemas também se justifica conforme afirmação de Poulos (2001), em que o elemento superficial teria maior participação no recebimento dos esforços em condições de solo arenoso compacto nas camadas superficiais; condição esta não presente na obra de estudo.

Contudo, projetos de fundações concebidos em radier estaqueado na cidade de Natal podem resultar num sistema de fundação otimizado, podendo reduzir o comprimento do estaqueamento e, conseqüentemente menor tempo de execução, resultando em economia para o projeto final.

O Quadro 41 ilustra as capacidades de carga pela metodologia grupo de estacas e radier estaqueado pelo método de Décourt (1993) de todos os sistemas, demonstrando o aumento de capacidade de carga da fundação devido a interação do bloco de fundação com o solo.

Quadro 41 - Resumo capacidades de carga grupo de estacas e radier estaqueado.

Sistema de fundação	grupo de estaca (kN)	radier estaqueado (kN)	Incremento na capacidade de carga (%)
1 estaca / $\phi$ 25 L15	1260	1435	13,9
1 estaca / $\phi$ 40 L15	3000	3270	9,0
2 estacas / $\phi$ 40 L15	6715	7350	9,4
4 estacas / $\phi$ 40 L15	12200	13000	6,5
4 estacas / $\phi$ 25 L17	4850	5250	8,9
4 estacas / $\phi$ 50 L20	21800	21800	0
5 estacas / $\phi$ 50 L15	18100	23000	27,0
9 estacas / $\phi$ 40 L15	21500	23750	10,5

## CAPÍTULO 5

# CONCLUSÃO

Diante do exposto na pesquisa, foi concluído que o software PLAXIS 3D *Foundation* respondeu de forma satisfatória na comparação dos comportamentos de fundações previamente analisadas por outros pesquisadores na etapa de verificação do software.

A retroanálise dos parâmetros do solo a partir das provas de carga efetuadas em campo foi eficiente uma vez que as previsões obtidas pelo software apresentaram comportamentos bem próximos daqueles apresentados pelos ensaios de campo.

O sistema de fundação em radier estaqueado apresentou ser uma solução geotécnica para obras de médio porte na cidade de Natal no aumento da capacidade de carga. Posto que, exceto para o bloco com 4 estacas de diâmetro de 50cm e comprimento 20m, os blocos de fundação analisados na obra do Instituto Cérebro contribuíram no aumento de capacidade de carga dos sistemas de fundação. Destaca-se o sistema com cinco estaca, em que sua contribuição foi de 21%.

A partir da análise da distribuição dos esforços entre bloco e estaca(s), concluiu-se que a resistência da fundação em radier estaqueado não se resume na soma algébrica das resistências isoladas do bloco e estaca(s).

O aumento do diâmetro do estaqueamento resulta no aumento da rigidez do estaqueamento e, conseqüentemente, menor participação do bloco no recebimento dos esforços, corroborando com estudos constantes na literatura apresentados nesta dissertação.

As resistências dos blocos apresentadas nos sistemas de fundação em radier estaqueados foram inferiores àquelas aferidas para blocos isolados, confirmando esta tendência do bloco de fundação no radier estaqueado possuir menor carga de ruptura em vista da perda de área de contato com o solo.

Na análise dos recalques diferenciais, observou-se, de maneira geral, que os blocos apresentaram pequenos valores de recalques diferenciais, com maiores deslocamentos na região central, ratificando o comportamento de blocos rígidos.

### **5.1 Sugestões para pesquisas futuras**

As retroanálises efetuadas na presente pesquisa foram por meio de provas de carga efetuadas em estaca isolada. Assim, sugere-se a realização de retroanálises dos parâmetros geotécnicos do solo com provas de carga em fundações compostas por mais de uma estaca, para desta forma aferir de forma mais precisa as interações entre estaca-estaca, estaca-bloco, estaca-solo e bloco-solo.

Adicionalmente, recomenda-se a realização de análises paramétricas, para averiguar a influência da variação do comprimento e número de estacas, seus espaçamentos, além da espessura e comprimento do bloco de fundação no comportamento do sistema de fundação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alnuiam, A., C. H. & El Naggar, M.H. (2013). "Performance of Piled-Raft System under Axial Load". In: Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013.
- Alonso, Urbano Rodriguez (1983). "Exercícios de Fundações". São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, 1983.
- Alshenawy, A. O., Alrefeai, T. O. & Alsanabani, N. M. (2016). "Analysis of piled raft coefficient and load-settlement on sandy soil". Arabian Journal of Geosciences, vol:9 pg:1 -8.
- 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.
- Aoki, N., Velloso, D. A. (1975). "An approximate method to estimate the bearing capacity of piles". In: Congreso Panamericano de Mecanica de Suelos y Cimentaciones - PASSMFE, 5., 1975, Buenos Aires. Anais. Buenos Aires: Sociedad Argentina de Mécanica de Suelos e Ingenieria de Fundaciones, p.367-376.
- Balakumar V. (2008). "Experimental Studies of Model Piled Rafts on Sand and Field Study of Prototype Behaviour". Ph.D. Thesis. Anna University. 304p.
- Balakumar V. and Ilamparuthi K. (2006). "Performance of Model Piled Raft on Sand". Proc. Indian Geotechnical Conference 2006, Chennai, India, p. 463-466.
- Balakumar V. and Ilamparuthi K. (2008). "Behavior of Rectangular Piled Raft and Numerical Validation" Proc. Indian Geotechnical Conference 2008, Bangalori, India, p. 141-144.
- Balakumar, V., Huang, M., Gartchev, I., Qin, H. Y., Bolton, M and Balasubramaniam A. S. (2013). "Parametric Study On The Interaction Factor of Piled Raft". In: 18th Southeast Asian Geotechnical Conference (18SEAGC) & Inaugural AGSSEA Conference (1AGSSEA). P. 829-834.
- Balakumar, V., Oh, E., Bolton, M. and Balasubramaniam A. S. (2013). "A Design Method for Piled Raft Foundations". Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013.
- Balakumar, V., Huang, M., Der-Wen Chang, Oh, E., Lin, S.S., and Balasubramaniam A. S. (2017) "Piles and piled raft foundations analyses for Surface Paradise, Gold Coast sub-soil conditions". In Proceedings of the 19<sup>o</sup> Internacional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seul 2017. p. 2715-2718.
- Basile, F. (2015). "Non-linear analysis of vertically loaded piled rafts". Computers and Geotechnics, January 2015, Vol.63, pp.73-82.

Belincanta, A. (1998). "Avaliação dos fatores intervenientes no índice de resistência à penetração do SPT". Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

Bessa, A. K. S., Monteiro, F. F., Aguiar, M. F. P. E Oliveira, F. H. L. (2015). "Análise de Métodos de Interpretação de Curva Carga x Recalque de Provas de Carga Estática em Fundações Profundas no Nordeste do Brasil". XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica

Bezerra, J.E. (2003). "Estudo do Comportamento de Fundações em Radier Estaqueado: Conceitos e Aplicações". Dissertação de Mestrado, Publicação nº G.DM-104/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 193 p.

Brown, P. T. (1969). "Numerical Analyses of Uniformly Loaded Circular Rafts on Deep Elastic Foundations". *Géotechnique* 19 (3), 399-404.

Bourgeois, E., Hassen, G. & Buhan, P. (2013). "Finite element simulations of the behavior of piled-raft foundations using a multiphase model." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2013. Vol.37(9), pp.1122-1139.

Bolton, M. D. (1986). "A Tensão e Dilatância de Areias" (Em Inglês). Cambridge University Engineering Department. *Geotechnique* 36, No.1. 14 Pag. 65-78

BS – British Standard – BS 8004:1986 – Code of Practice for Foundations.

Burland, J.B. (1995). "Piles as Settlement Reducers". Keynote Address, 18th Italian Congress on Soil Mechanics, Pavia, Italy.

Castillo, D.Y.A. (2013). "Uso da Técnica de Radier Estaqueado para Pequenos Edifícios assentes sobre Solo Colapsível". Dissertação de Mestrado, Publicação nº G.DM-223/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 154 p.

Cavalcante, E. H.; Danziger, A. A. B.; Danziger, B. R (2004). "Estimating the SPT penetration resistance from rod penetration based on instrumentation". In: *Int. Conf. On Site Characterization, 2.*, Porto, Portugal. Proceedings... Rotterdam: Millpress, 2004. p. 293-298.

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

Cintra, J.C.A e Aoki, N. (2010). "Fundações por estacas – Projeto Geotécnico". São Paulo, Oficina de Textos, 2010.

Clancy, P. & Randolph, M. F. (1993). "Analysis and design of piled raft foundations". *Int. J. NAM Geomech*.

Comisión Permanente Del Hormigón. Instrucción de Hormigón Estructural, EHE. Madrid, 2007.

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.

Cunha, R.P.; Camapum de Carvalho, J.; Silva, C.M. (2002). "Controle de qualidade e aceitação de estacas moldadas in loco via utilização de ensaios de integridade de estacas (PIT)". XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo, v.3, pp. 1569-1579.

Cunha, R.P e Pando, M. (2013). "Influence of Pile-Soil-Raft Parameters on the Behavior of Piled Raft and Conventional Piled Group Foundations". Soils and Rocks. Vol.36, p. 21-35.

Janda, T., Cunha, R. P., Kuklík, P. & 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

Deka, R. (2014). "Different Analysis Methods of Piled Rafts". International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences. September 2014, Volume 2 Issue 4, ISSN 2349-4476.

Delalibera, R. G.; Gingo, J. S. (2004 - b). "Simulação numérica não-linear de blocos de concreto armado". XXXI Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural. CD-ROM, Mendoza, Argentina.

De Sanctis, L., Mandolini, A. (2006). "Bearing Capacity of Piled Rafts on Soft Clay Soils". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, No. 12. p. 1600–1610.

Décourt, L.; Quaresma, A. R. (1978). "Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT". In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Fundações., 6., 1978, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABMS, p.45-53, v.1.

Décourt, L. (1989). "The standard penetration test. State-of-the-art report". Proceedings of the XIII CSMFE, Rio de Janeiro, v. 4, p. 2405-2416, 1989.

Décourt, L. (1993). "Prediction of load settlement relationships for foundations on the Basis of the SPT-T". Ciclo de Conferencias Internacionales Leonardo Zeevaert, p. 87-104, México.

Décourt, L. (1996). "A Ruptura de Fundações Avaliada com Base no Conceito de Rigidez". III SEFE; São Paulo, v. 1, p. 215-224, 1996.

Elwakil, A.Z & Azzam, W.R. (2015). "Experimental and numerical study of piled raft System". Alexandria Engineering Journal, March 2016, Vol.55(1), pp.547-560.

Fellenius, B. H. (1975). "Test Loading of piles and new proof testing procedure. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering Division, v. 101, n. GT-9 September 1975, p. 855-69.

Fellenius, B. H. (2006) "The analyses of results from routine pile load tests". Ground Engineering, London, v. 13, n. 6, p.19-31, Sep. 1980. Static Analysis of Pile Load Transfer. In:Basic of Foundation Design. Electronic Edition. Canada, 2006. cap.7. Disponível em: <http://www.Fellenius.net>

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-088/2003. Universidade de Brasília – DF

Gandhi, S. R. & Maharaj, D. H. (1995). "Behaviour of Piled under Uniform Loading". Indian Geotechnical Conference (IGC-95), Bangalore. Proc. Indian Geotechnical Conference, v.1, December.

Garcia, J. R. (2015). "Análise experimental e numérica de radiers estaqueados executados em solo da região de Campinas/SP". Tese de doutorado – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2015.

Garhy, B. El., Galil, A. A., Youssef, A. F. & Raia, M. A (2013). "Behavior of Raft on Settlement Reducing Piles: Experimental Model Study". Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. p. 389-399.

Hachich, W., Falconi, F.F., Saes, J.L., Frota, R.G., Carvalho, C.S., and Niyama, S. (1998). "Foundations: theory and practice". 2nd ed. PINI, São Paulo, SP. ISBN 8572660984.

Hemsley, J. A. (2000). "Design Applications of Raft Foundations". Thomas Telford Ltd, London.

Ibañez, J. P. (2003). "Modelagem Constitutiva para Solos com Ênfase em Solos Não Saturados". Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Dissertação de mestrado. 241 Pag.

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. 279296.

Katzenbach, r.; Arslan, u. & Moormann, C. (2000) "Piled Raft Foundations Projects in Germany". Design Applications of raft Foundations", apud J.A Hemsley.

Kishida, H. & Meyerhof, G.G. (1965). "Bearing capacity of pile groups under eccentric loads in sand". Proc. 6th ICSMFE, Toronto, 2: 270-274.

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

Laprovitera, H. (1988). "Reavaliação do método semi-empírico de previsão de capacidade de carga de estacas a partir de banco de dados". 1988. 213p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1988.

Leung, Y. F., Klar, A. & Soga, K. (2010). "Theoretical Study on Pile Length Optimization of Pile Groups and Piled Rafts". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE. Vol. 136. No. 2. pp. 319-330.

Long, P. D. (1993). "Footings with settlement -reducing piles in non-cohesive soil". Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

Long, P. D. (2015). "Settlement analysis for piled raft foundations". In 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Arc 2015: New Innovations and Sustainability, 2015, pp.1244-1249.

Macedo, J. W. N. (2017). "Modelagem numérica de radier estaqueado em solo arenoso". Monografia (Graduação) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil. Natal, RN, 2017.

Mandolini, A. (2003). "Design of piled raft foundations: Practice and development". In: Proceedings 4th international geotechnical seminar on deep Foundation on bored and auger piles. Rotterdam, p.59-80

Mandolini, A., Di Laora, R. & Mascarucci, Y. (2013). "Rational Design of Piled Raft ". 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST, 2013.

Mandolini, A.; Di Laora, R.; Iodice, C. (2017). Simple Approach to Static and Seismic Design of Piled Rafts. 3rd Bolivian International Conference on Deep Foundations, pp. 107-124.

Marahaj, D. K. & Gandhi, S. R. (2004). "Non-linear finite element analysis of piled-raft foundations". Geotechnical Engineering 157 July 2004, p.107–113.

Mayerhof, G. G., (1959): "Compaction of sands and bearing capacity of piles". Proc. A.S.C.E., Vol. 95, No. SM6, p. 1

Medeiros, L. M. L. (2016). "Análise das fundações do reservatório R-10 do Campus Central da UFRN." Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil. Natal, RN, 2016.

Meyerhof, G. G. (1976). "Bearing capacity and settlement of pile foundations". JGED, ASCE, vol. 102 No. GT3, pp. 197-228.

Munhoz, F. S.; Delalibera, R. G.; Giongo, J. S. (2004 – b). “Avaliação da rigidez de blocos de coroamento em estaqueamentos paralelos com ações verticais excêntricas. 46° Congresso Brasileiro do Concreto. CDROM, Florianópolis, SC.

NBR 6118 (2014). “Projeto e execução de obras de concreto armado – Procedimento”. ABNT. Rio de Janeiro, 2014.

NBR 6122 (2010). “Projeto e Execução de Fundações”. ABNT. São Paulo.

NBR 6484 (2001). “Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio”. ABNT. São Paulo.

NBR 12313 (2006). “Estacas – Prova de Carga Estática - Método de Ensaio”. ABNT. São Paulo.

Novak, J. L., Reese, L.C. Honorary member ACSE & Wang, S. T. (2005). “Analysis of Pile-Raft Foundations with 3D Finite Element Method”. Proceedings of the Structures congress.

Nguyen, D. D. C; Dong-Soo Kim, D. & Jo, S. (2013). “Parametric study for optimal design of large piled raft foundations on sand”. Computers and Geotechnics, January 2014, Vol.55, pp.14-26.

Ottaviani, M. (1975). “Three-dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups”. Géotechnique, v. 25:2, p. 159-174.

O’neill, M. W; Hawkins, R. A. & Mahar, L. J. (1982). “Load Transfer Mechanisms in Piles and Piles Group”. J. Geotech. Engng. Div., Proc. ASCE vol. 108, No. GT2, p.1605-1623.

Passos, P. G. O. (2005). “Melhoramento de Solos Arenosos com Estacas de Areia e Brita”. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-032/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 141 p.

Pezo, O. B. (2013). “Análises numéricas de provas de carga em radier estaqueado utilizando o método dos elementos finitos”. Dissertação de mestrado. Recife: 2013. xix, 132 folhas.

Philcox, K. T. (1962). “Some recent developments in the design of high buildings in Honk Kong”. *Srtuct. Eng.*, vol. 40, Oct: 303-323.

Phung, D. L. (1993). “Footings With Settlement-Reducing Piles in Non-Cohesive Soil”. PhD Thesis, Dep. Of Geotechnical Eng. Chalmers Univ. of Technology, Gothenburg, Sweden, 191p.

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

Poulos, H.G., & Davis, E.H. (1974). “Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics”. John Wiley and Sons. Inc. New York.

Poulos, H. G. & Davis, E. H. (1980). "Pile Foundatin Analysis and Design". New York, United States of America: John Wiley & Sons, 397p.

Poulos, H.G. (1991). "Foundation economy via piled raft systems". Keynote Paper of Pile talk International' 91. Kuala Lumpur, p. 97-106.

Poulos, H. G. (1994a). "An approximate numerical analysis of pile raft interaction". Int. J. NAM Geomech. 18, 73- 92.

Poulos, H. G., Small, J. C., Ta, L. D., Sinha, J. & Chen, L. (1997). "Comparison of some methods for analysis of piled rafts". Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng, Hamburg 2, 1119-1124.

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

Poulos, H.G. (2000). "Practical design procedures for piled raft foundations". In Design applications of raft foundations. Edited by J.A. Hemsley. Thomas Telford. pp. 425–467. ISBN 0727725947.

Poulos, H. G. (2001). "Methods of Analysis of Piled Raft Foundations". A Report Prepared on Behalf of Technical Committee TC18 on Piled Foundations. Chairman: Prof. Dr. Ir W.F. Van Impe. International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

Poulos, H. G, (2001). "Piled Raft Foundations: design and applications". Geotechnique v. 51, n. 2, p. 95-113.

Rabiei, M. (2010). "Effect of Pile Configuration and Load Type on Piled Raft Foundations Performance". Proceedings GeoShanghai International Conference, p. 34-41.

Rabiei, M., & Choobbasti, A. J. (2016). "Piled Raft Design Strategies for High Rise Buildings". Geotechnical and Geological Engineering, vol. 34, p. 75-85.

Ramos, F. A. C. (2007). "Analise Numérica De Blocos Sobre Dez Estacas: Calculo Das Reações De Apoio". Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.

Randolph, M. F. & Worth, C. P. (1978). "Analysis of deformation of vertically loaded piles". Journal of Geot. Eng. Div., ASCE, v. 104, n. 12, p.1465-1488.

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.State of art". report. Proc. 13h Intern. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng., New Delhi, v. 5, p. 61-82.

Rincon, E.R. (2016). "Análise experimental do comportamento de sistemas radier estaqueado em solos moles em processos de adensamento". Tese de Doutorado, Publicação G.TD-119/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 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, p. 477-493

Russo, G., and Viggiani, C. (1998). "Factors controlling soil-structure interaction for piled rafts." *Proc., Int. Conf. on Soil-Structure Interaction in Urban Civil Engineering*, 297–322.

Sales, M.M. (2000). "Análise do comportamento de sapatas estaqueadas". Tese de doutorado, Publicação GTD/002<sup>a</sup>. Universidade de Brasília – DF.

Sales, Mauricio M. Small, John C. e Poulos, Harry G. (2010). "Compensated piled rafts in clayey soils: behaviour, measurements, and predictions". *Canadian Geotechnical Journal*, March, 2010, Vol.47(3), p.327(19)

Sinha, J. (1997). "Piled Raft Foundations Subjected to Swelling and Shrinking Soils". PhD Thesis, Univ. of Sydney, Australia.

Sinha, A. & Hanna, A.M. (2017) "3D Numerical Model for Piled Raft Foundation". *International Journal of Geomechanics*, 1 Feb. 2017, Vol.17(2).

Soares, W. C. (2011). "Radier Estaqueado com Estacas Hollow Auger em Solo Arenoso". Universidade Federal de Pernambuco. Tese. 340 Pag.

Soares, W. C., Coutinho, R. Q e Cunha, R. P. (2014). "Piled raft with hollow auger piles founded in a Brazilian granular deposit". *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, Vol.52(8), pp.1005-1022.

Sosa, S. F. (2010). "Análise do Comportamento de Radier Estaqueados pelo Método dos Elementos Finitos em 3D". (Em Espanhol). Instituto Superior Politécnico "Jose A. Echeverría". Tesis. 134 Pag.

Sousa, L. C. M., (2003). "Estudo experimental do comportamento de sapatas assente em solo poroso reforçado". Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-106A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 133p.

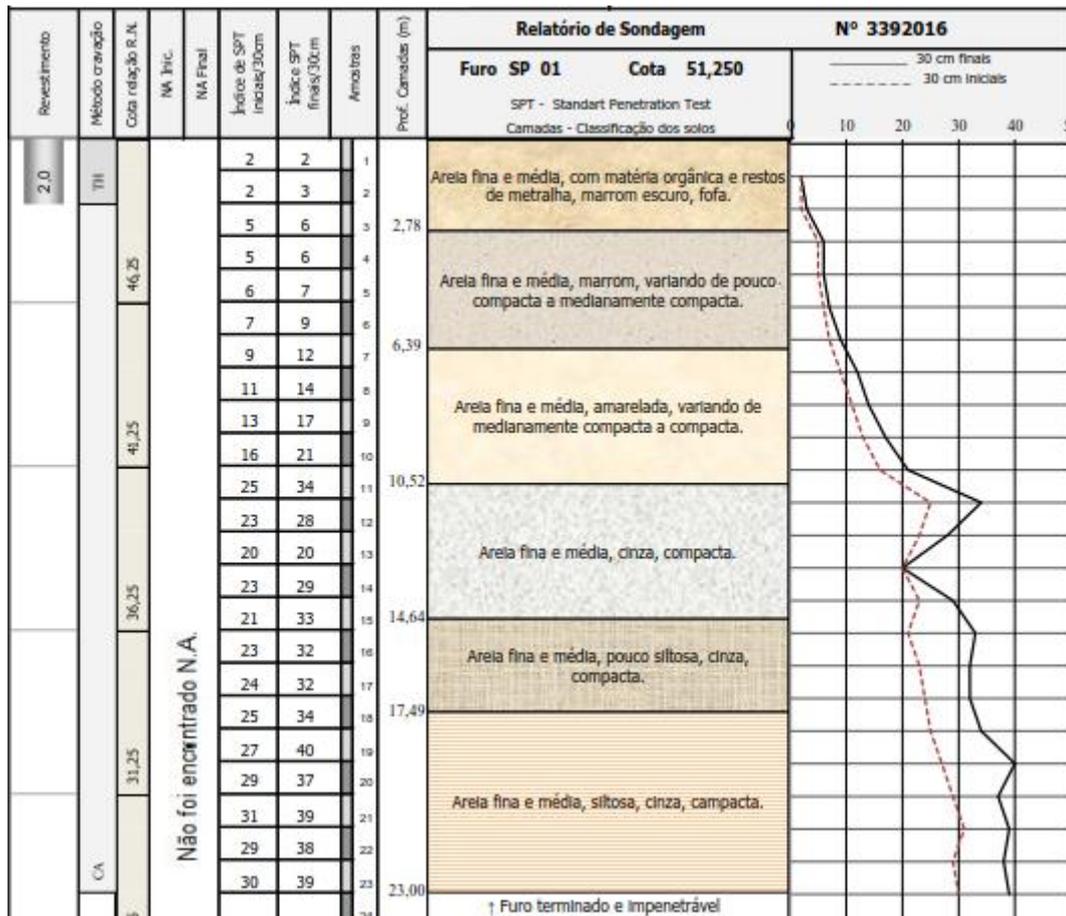
Souza, R. S. (2010). "Análise dos Fatores de Interação Entre Estacas em Radier Estaqueado: Comparação Entre duas Ferramentas Numéricas". Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2010.

SKEMPTON, A.W. (1953). "Discussion: Piles and Pile Foundations Settlement of Pile Foundation". III ICSMFE, Zurich, p.172.

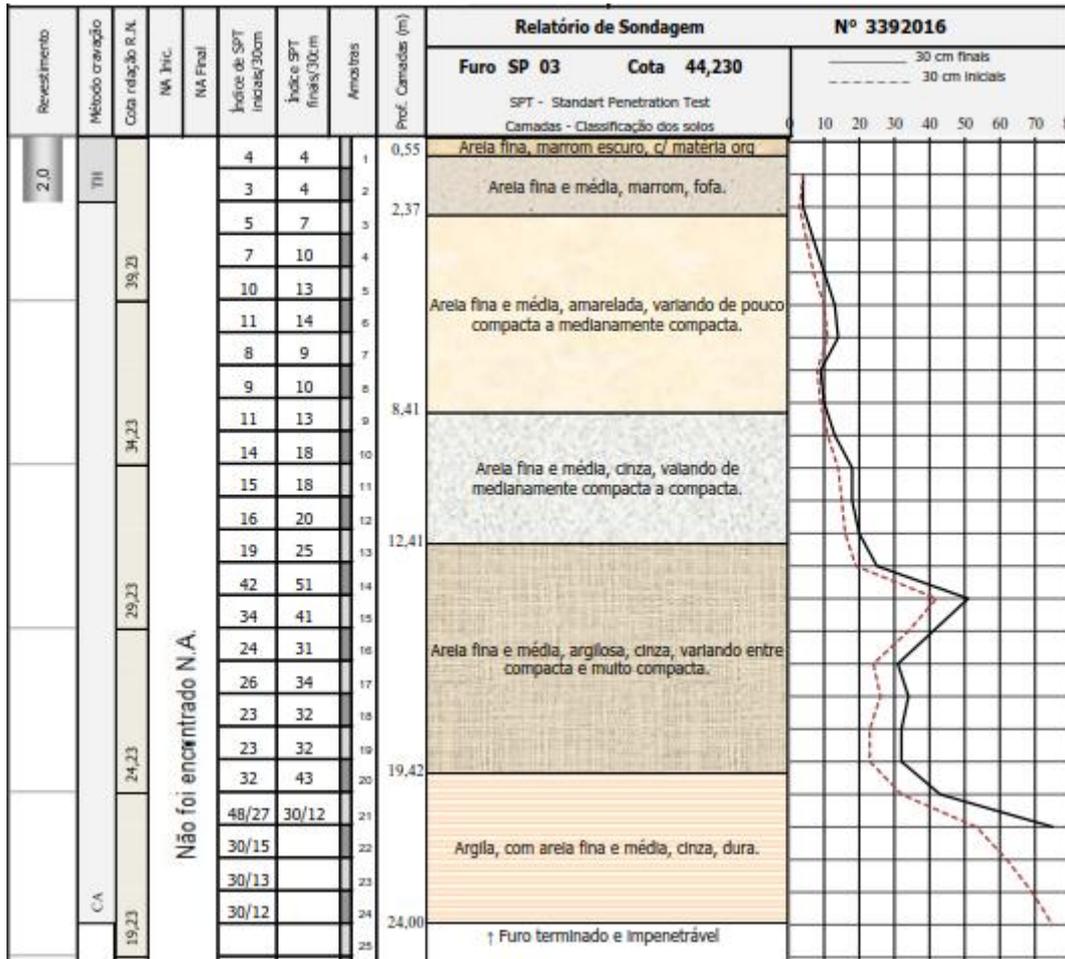
Skempton, A. W.; MacDonald, D. H. (1956). "Allowable Settlement of Buildings". In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. London. 1956, v. 5, p.727-784.

- 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, p. 57-72.
- Tang, Y. J., Pei, J. & Zhao, X. H. (2014). "Design and measurement of piled raft foundations". *Geotechnical Engineering*. Vol. 167, October 2014 Issue GE5 Pag. 461–475.
- Teixeira, A.H. (1993). "An improvement of the standard penetration tests". In *Proceedings, Soils of São Paulo*. pp. 75–93.
- Teixeira, A.H. (1996). "Projeto e execução de fundações". In: *Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia*, 3., 1996, São Paulo. *Anais...São Paulo*, 1996. p. 33-50. v1.
- Teixeira, A.H. & Godoy, N.S (1996). "Análise, projeto e execução de fundações rasas". In: *Fundações: teoria e prática*. São Paulo: PINI, 1996. p. 227-264.
- Terzaghi, K. (1942). "Discussion on pile formulas". *ASCE*, 68(2). p. 311-323.
- Terzaghi, K. (1943). "Theoretical Soil Mechanics". 1 ed. John Wiley and Sons, New York.
- Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1948). "Soil Mechanics in Engineering Practice". John Wiley & Sons, Hoboken.
- Trofimenkof, J.G. (1974). "Penetration testing in eastern Europe". In *Proceedings of the European Symposium on Penetration Resistance*, Stockolm.Vol.2.1, p.24–28.
- Velloso, D. A. & Lopes, F. R. (2002). "Fundações Volume 2 – Fundações Profundas". COPPE/UFRJ, p. 472, Rio de Janeiro.
- Vesic, A. S. (1975). "Principles of pile foundation design". *Soil Mechanics Series*, n. 38, School of Engineering, Duke University, 1975.
- Viggiani, C. (1998). "Pile groups and piled rafts behavior". In *Deep foundations on bored and auger piles* (eds van Impe & Haegman), pp. 77-90. Rotterdam: Balkema.
- Wulandari, P. S. & Tjandra, D. (2015). "Analysis of piled raft foundation on soft soil using PLAXIS 2D ". *The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5)*.
- Yamashita, K., Yamada, T. and Kakurai, M. (1998). "Simplified method for analysing piled raft foundations". *Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, Ed. W. F. van Impe, Balkema, Rotterdam, 457-464.

## **ANEXO A – SONDAGENS DE SIMPLES RECONHECIMENTO (SPT)**







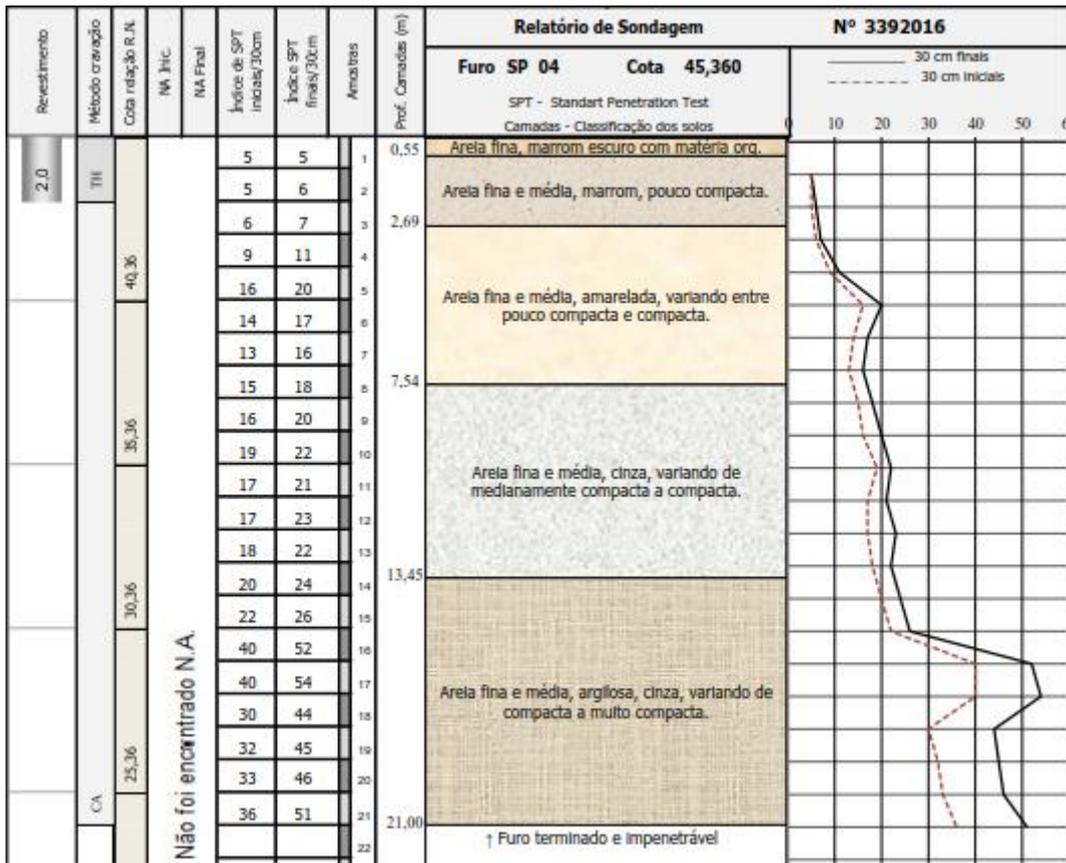


Figura 156 - SPT 4





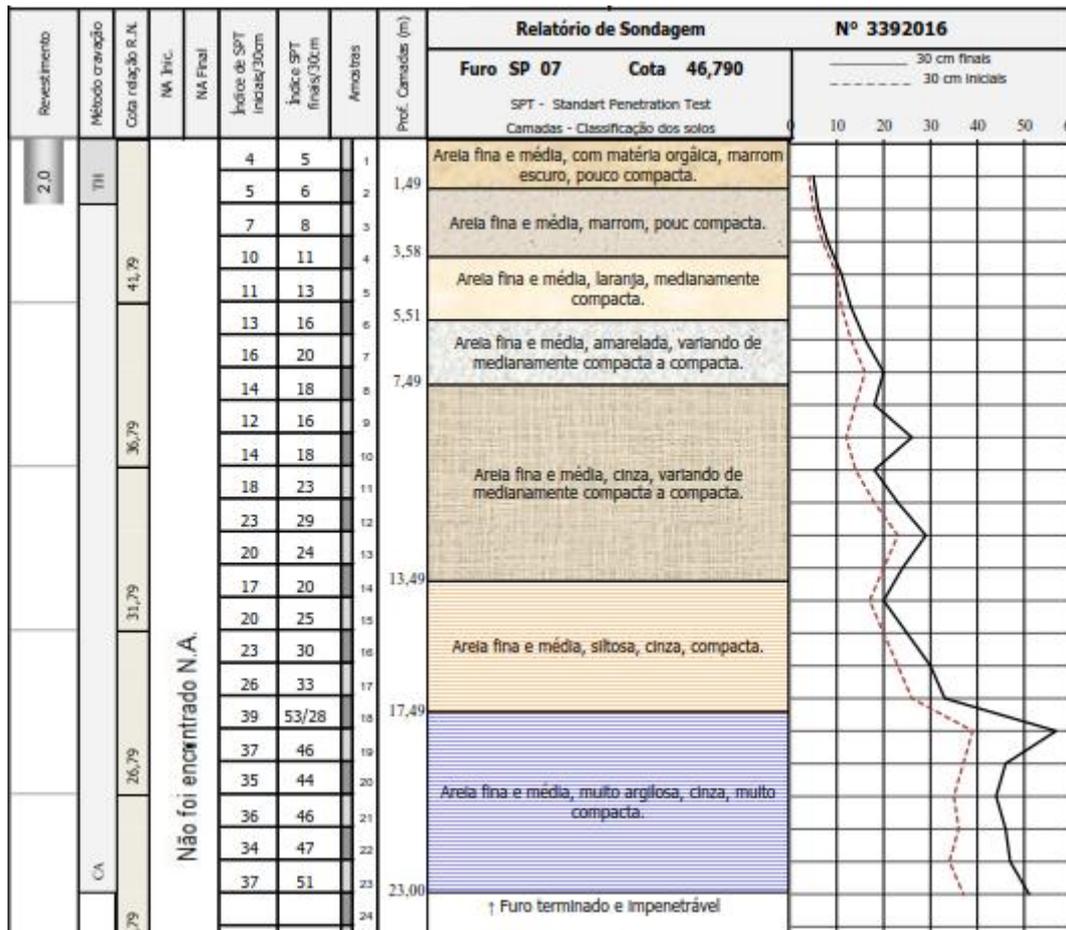


Figura 159 - SPT 7

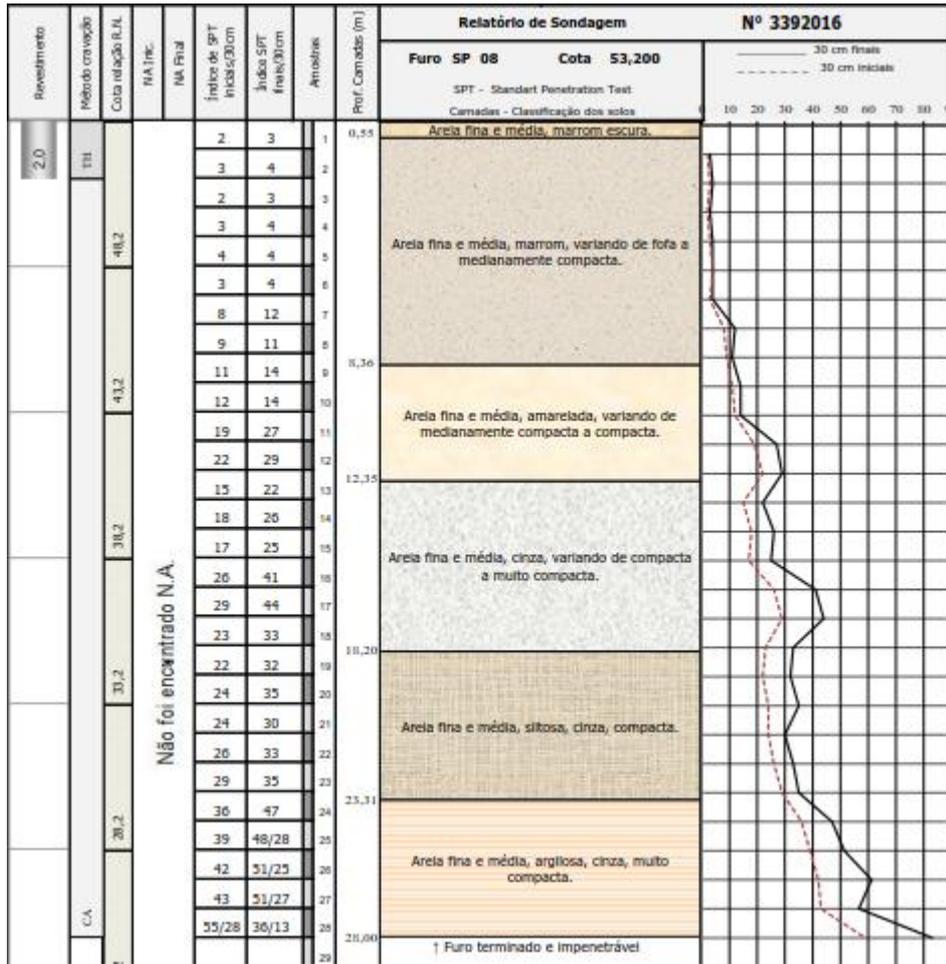


Figura 160 - SPT 8

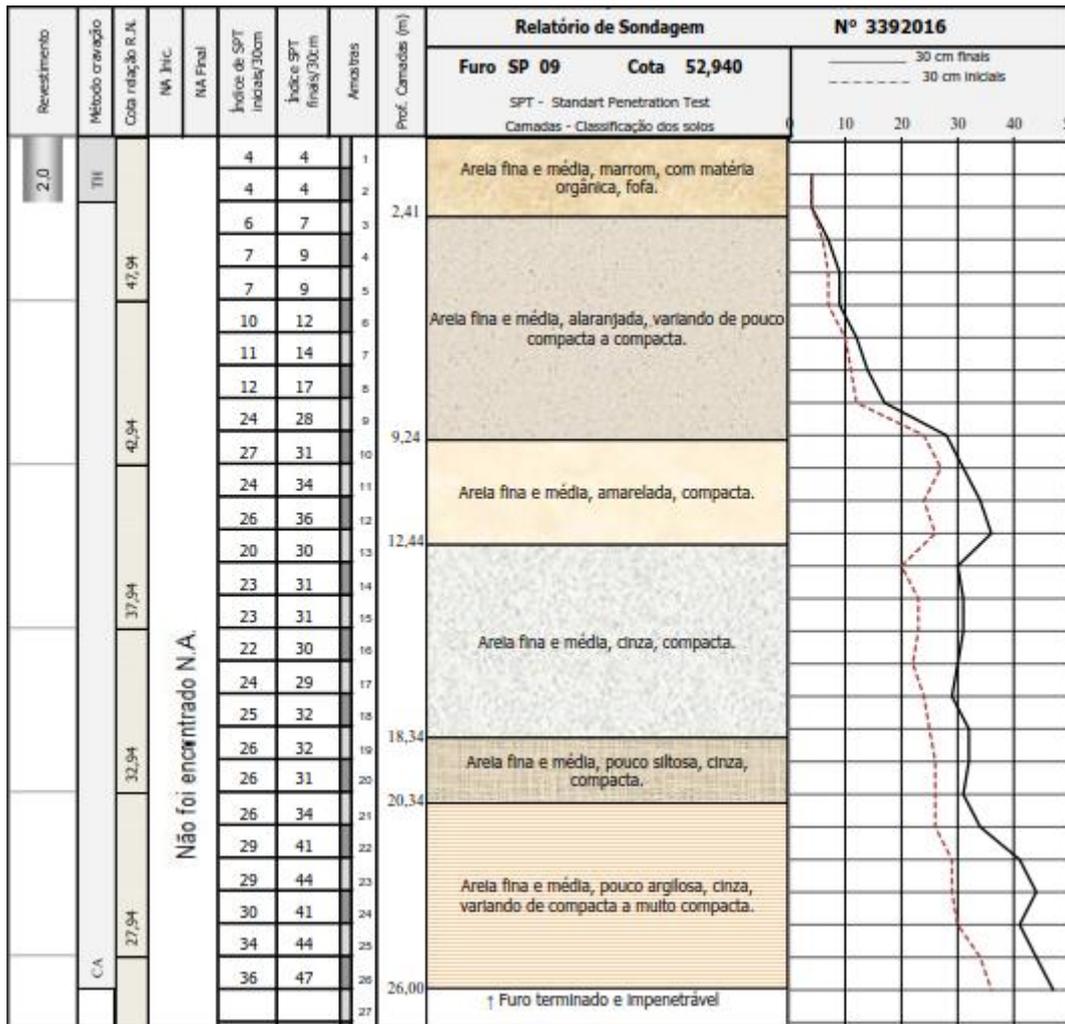
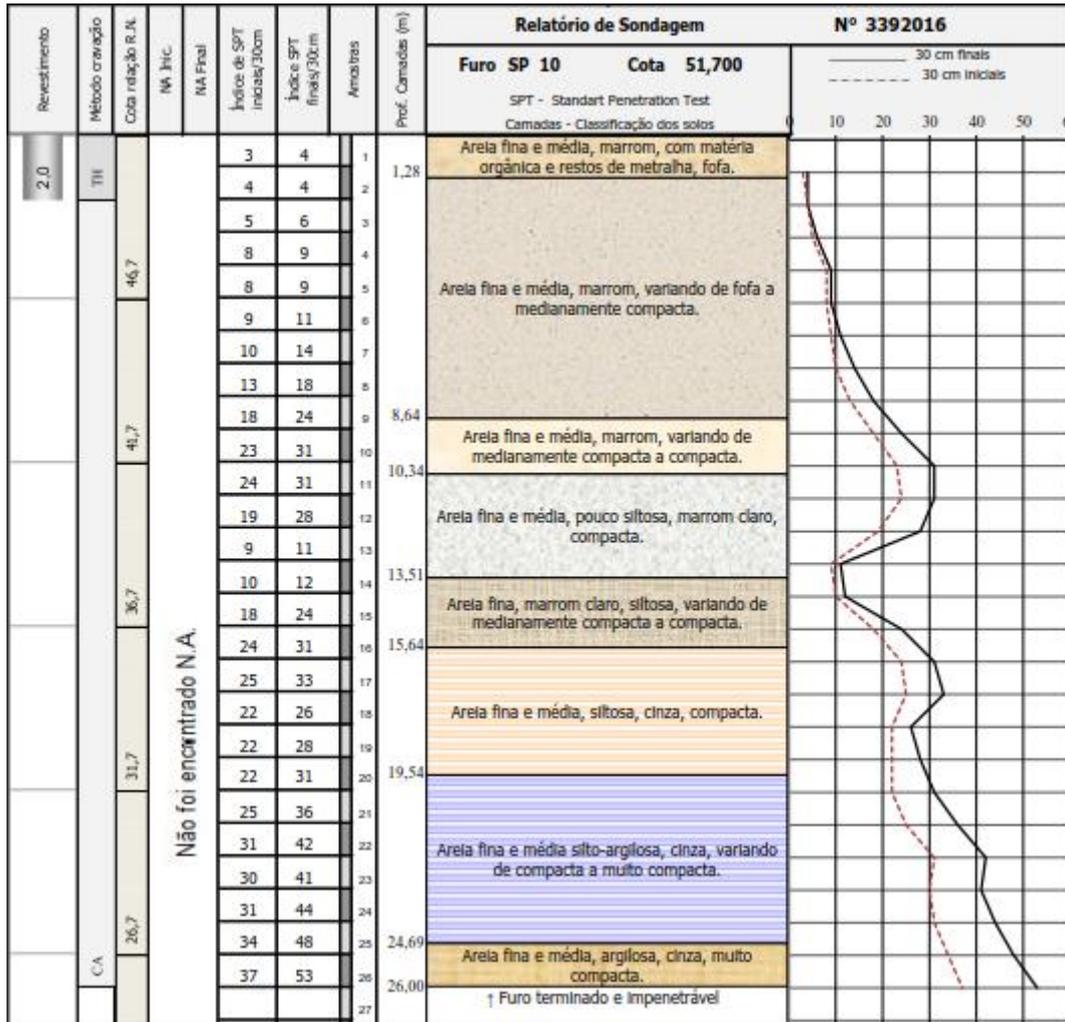


Figura 161 - SPT 9



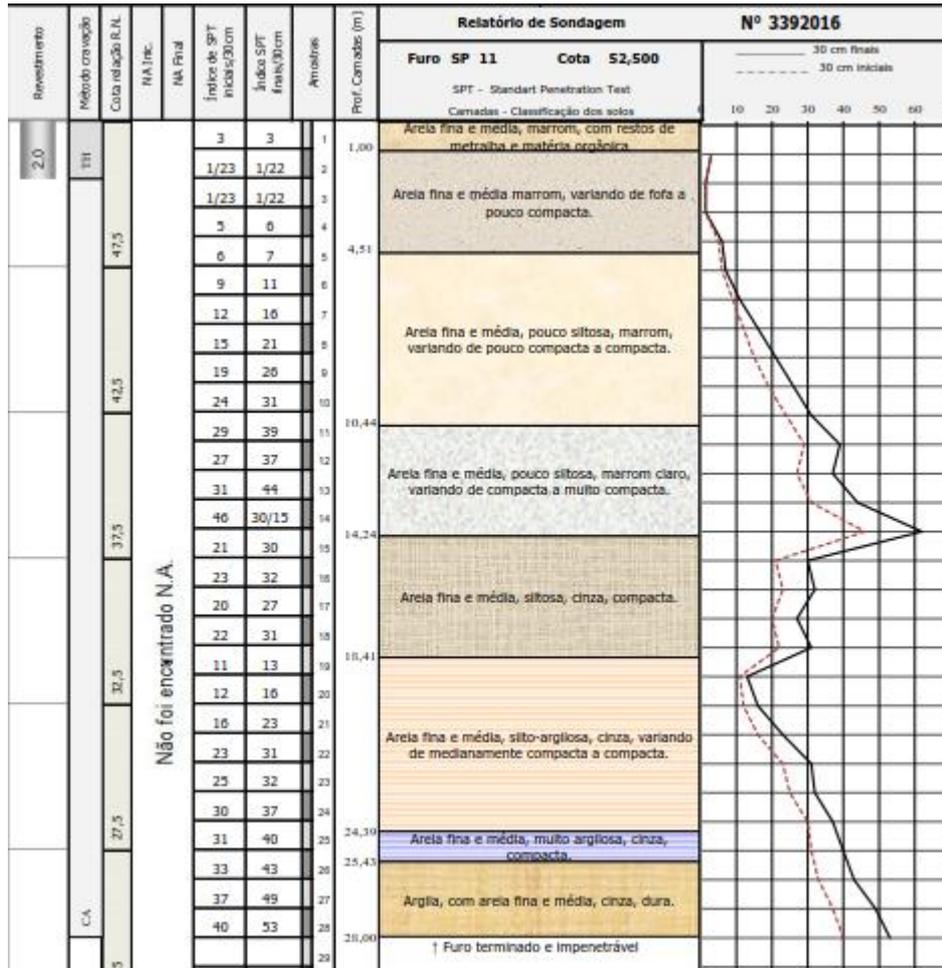


Figura 163 - SPT 11

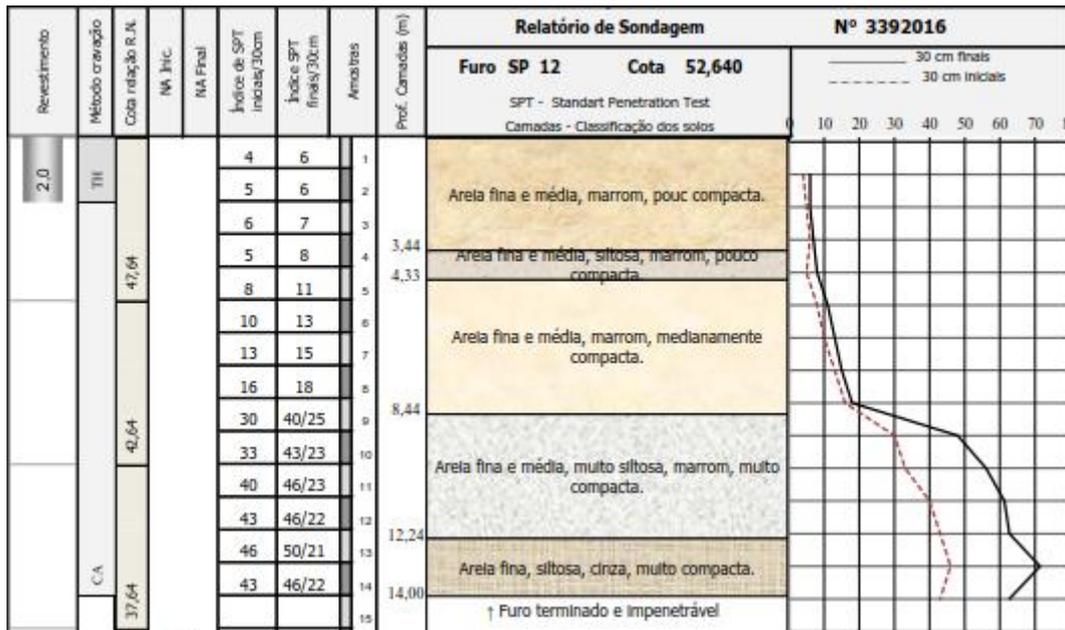
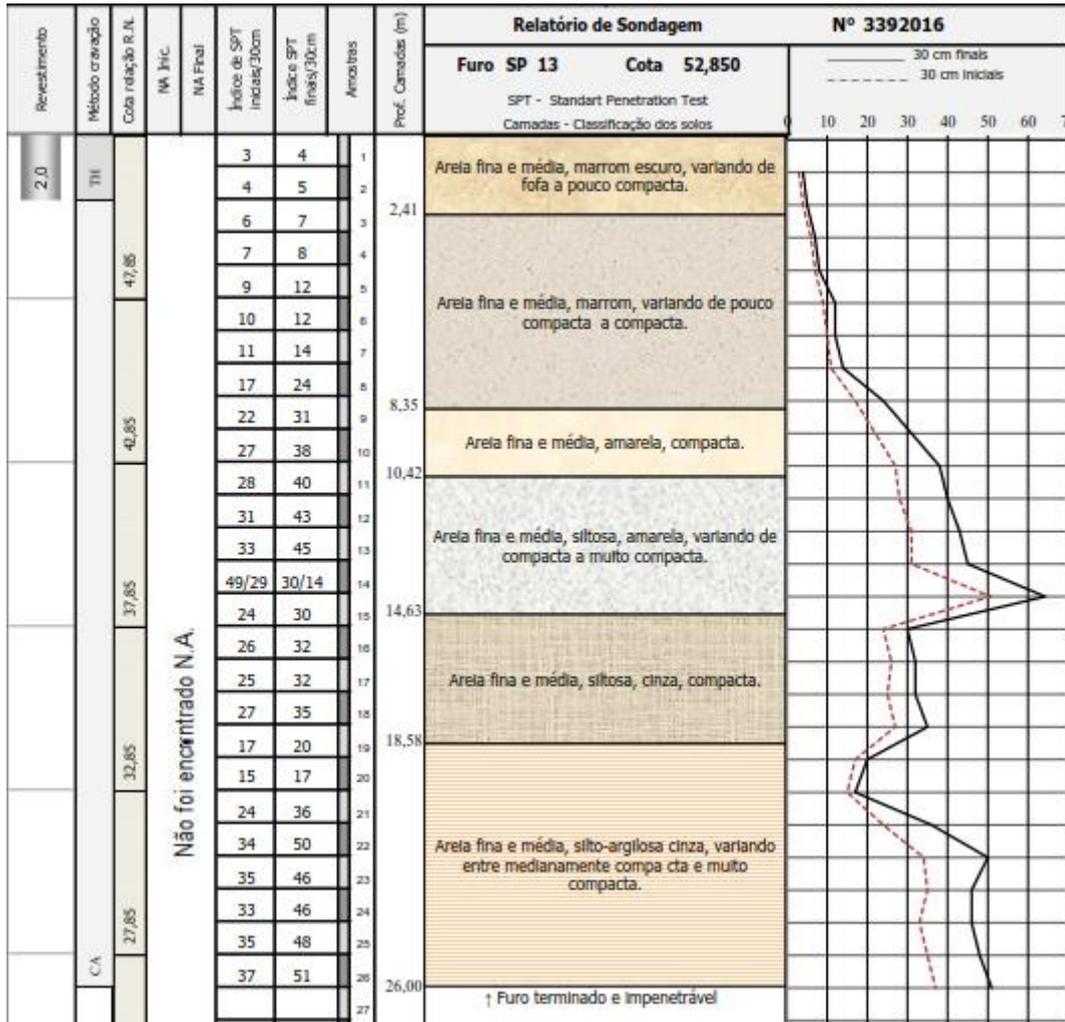


Figura 164 - SPT 12



**ANEXO B – LOCAL DA EXECUÇÃO DAS  
PROVAS DE CARGA E PROJETO DE  
FUNDAÇÃO DO INSTITUTO DO CÉREBRO**

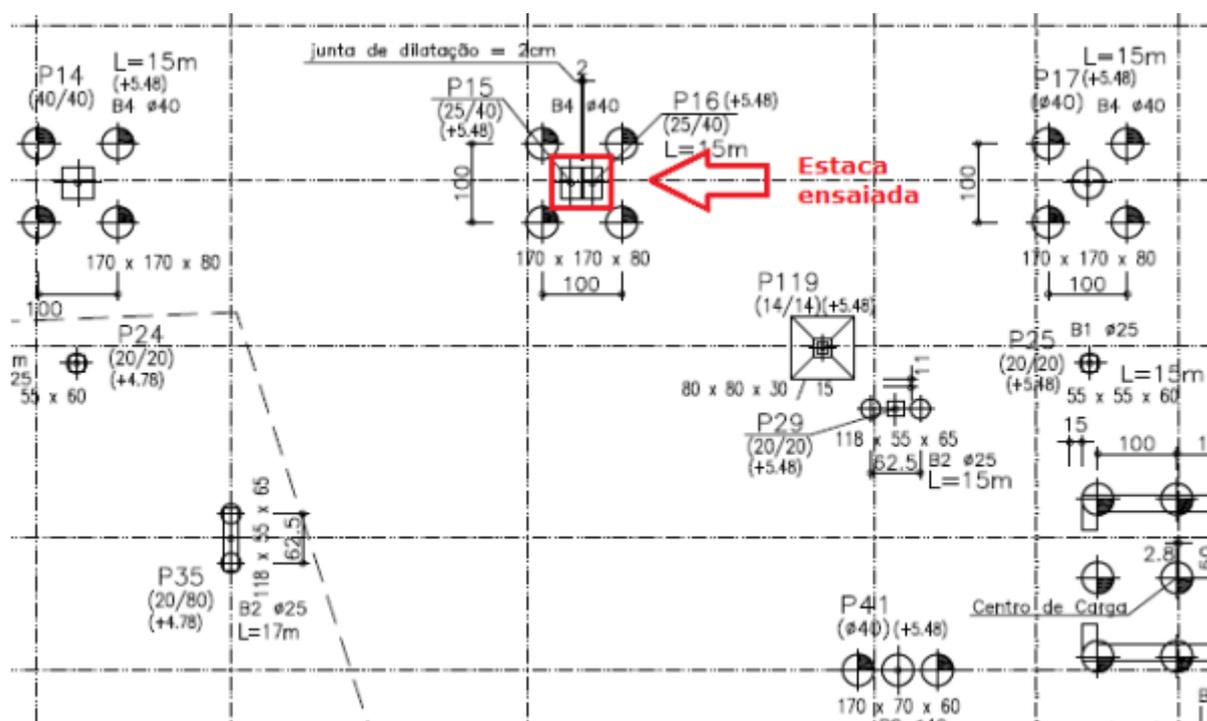


Figura 166 - Local de execução da Prova de carga 1.

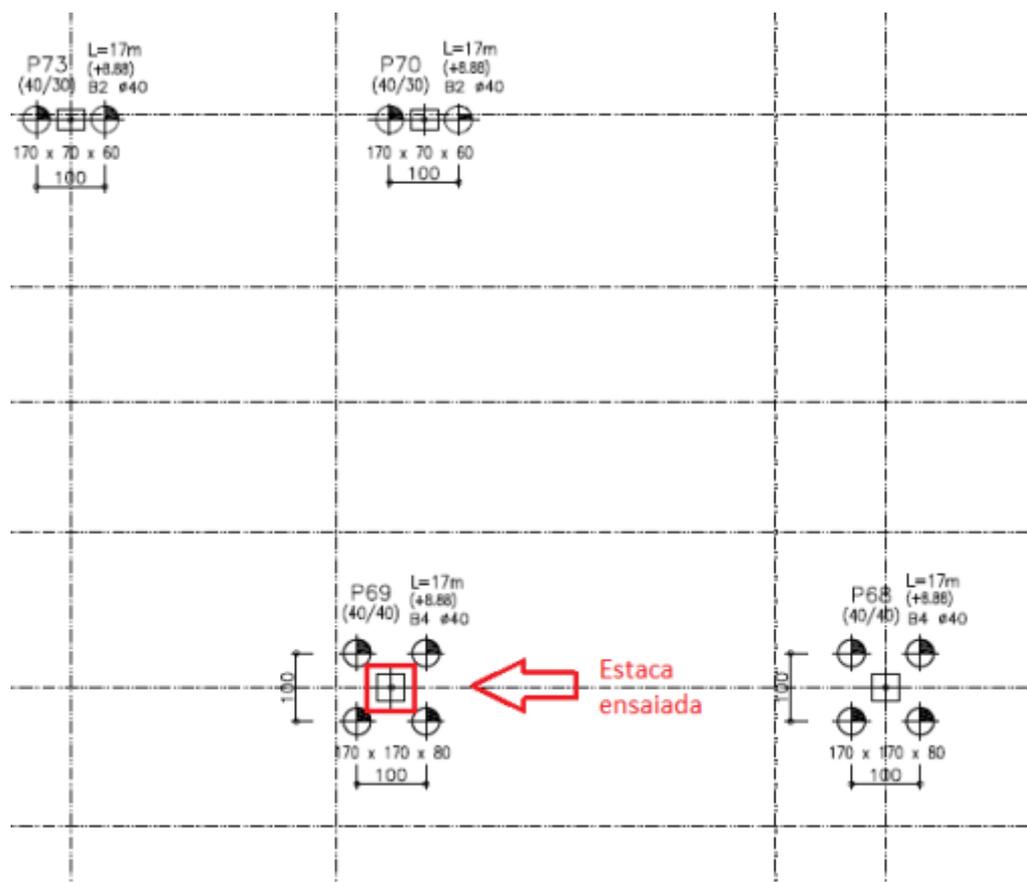


Figura 167 - Local de execução da Prova de carga 2.

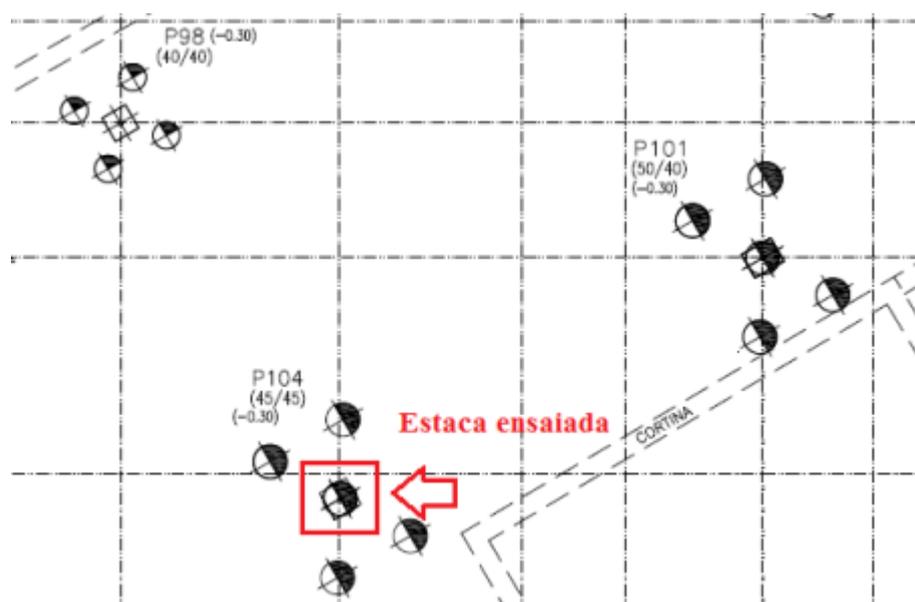


Figura 168 - Local de execução da Prova de carga 3.

