



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



**GUILHERME SILVA MIRANDA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE FUNDAÇÕES PARA MELHORAMENTO DO  
DESEMPENHO DE CONSTRUÇÕES POPULARES

UBERLÂNDIA - MG

2019

GUILHERME SILVA MIRANDA

**OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE FUNDAÇÕES PARA MELHORAMENTO DO  
DESEMPENHO DE CONSTRUÇÕES POPULARES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jean Rodrigo Garcia

UBERLÂNDIA - MG

2019

GUILHERME SILVA MIRANDA

**OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE FUNDAÇÕES PARA MELHORAMENTO DO  
DESEMPENHO DE CONSTRUÇÕES POPULARES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

---

Prof. Dr. Jean Rodrigo Garcia  
Presidente da Banca - Orientador

---

Prof. Dr. Joaquim Mário Caleiro Acerbi  
Membro

---

Prof. Dr. Paulo Roberto Cabana Guterres  
Membro

---

Aluno Guilherme Silva Miranda  
Orientando

UBERLÂNDIA - MG

2019

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho primeiramente à Deus, pelas bênçãos e aos meus amados pais, Elder e Vilma, pela vida, pelo apoio, exemplo, ensinamento e amor incondicional.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus pelas bênçãos e por tudo que Ele realiza em minha vida, tudo é para Tua honra e glória.

Aos meus pais Elder e Vilma, por serem exemplos de amor à família, por ensinarem os valores inerentes à formação do caráter, por serem pais tão dedicados e presentes comigo e com meu irmão, por acreditarem em mim e tornar tudo isso possível.

Ao meu irmão Pedro Henrique, o qual eu amo muito, pela parceria, amizade e por ser uma pessoa muito especial em minha vida.

Ao meu querido avô Walter (*in memoriam*), fica aqui a minha lembrança e reconhecimento por todos os conselhos e ensinamentos.

Aos amigos e familiares que me ajudaram com dicas, incentivos e momentos de descontração.

Aos meus colegas e amigos da Universidade Federal de Uberlândia, por tornarem esta caminhada mais leve.

Ao meu orientador Jean Rodrigo Garcia, pela confiança, orientação, incentivo, paciência, críticas, apoio e por me inspirar com suas experiências profissionais.

Aos professores Joaquim Mário Caleiro Acerbi e Paulo Roberto Cabana Guterres, por todo o conhecimento repassado e conselhos, e pela participação na minha banca examinadora.

Aos mestres que se dedicam para nos tornar bons profissionais e por tantas outras contribuições ao longo da graduação.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Civil, por me proporcionarem a oportunidade de realizar a minha graduação e cederem os meios para a conclusão deste trabalho.

## RESUMO

O sistema de fundação em radier estaqueado vem sendo gradualmente empregado e tem se tornado uma opção relevante na concepção de projetos de fundação. Dessa forma, nesse sistema, tem-se a consideração do contato bloco-solo. E, portanto, a capacidade de carga do conjunto é a soma da capacidade de carga do radier (contato bloco-solo) e das estacas. Porém, pode-se fazer o uso de estacas nesse tipo de sistema visando o controle de recalques, sendo o elemento horizontal, radier, o responsável principal por suportar as cargas absorvidas pela fundação. No entanto, tem de se destacar que, embora as estacas estejam cooperando pouco na capacidade de carga do conjunto, a disposição e número de estacas inseridas na fundação interferem significativamente no recalque, ajudando, assim, a ter uma redução dos recalques totais. Com isso, o trabalho analisou uma construção popular, a qual se utiliza de um sistema de fundação em radier isolado, construída sobre um solo de baixa resistência. A partir disso, realizou-se a otimização, que, de um modo geral, visa a busca por uma melhor solução a um determinado problema. E assim, com a simulação numérica desse radier isolado em contraste com a simulação de 3 (três) radiers estaqueados com 4, 9 e 16 estacas avaliou-se a variação de recalques totais, diferenciais e como se comporta a carga suportada pelo conjunto radier mais estacas. Para isso, se utilizou de um radier de 7m x 7m com 0,1m de espessura e as estacas com 5m de comprimento e 25cm de diâmetro, com espaçamentos diferentes para cada caso de análise. Por se tratar de uma análise simplificada, as simulações numéricas foram realizadas por meio da ferramenta RS<sup>2</sup> que permite simulações bidimensionais em elementos finitos. Com os resultados e análises desse trabalho, pode-se concluir que com a introdução de estacas há uma redução dos recalques e que essa redução é diretamente relacionada ao número de estacas e distribuição destas na fundação. Por consequência, haverá um melhor desempenho dos sistemas de fundações em radier isolado para construções populares construídas em solo de baixa resistência, como foi no caso da modelagem numérica realizada, se utilizar, ao invés desse tipo de sistema de fundação, o sistema em radier estaqueado, avaliando o número e a distribuição ideais para as estacas.

**PALAVRAS-CHAVE:** radier isolado, radier estaqueado, análise numérica, fundação estaqueada, construção popular, otimização.

## ABSTRACT

The foundation system in piled raft has been gradually employed and has become a relevant option in the design of foundation projects. Thus, in this system, one has the consideration of the block-soil contact. And, therefore, the load capacity of the set is the sum of the load capacity of the of the radier (block-ground contact) and the piles. However, piles can be used for the control of settlements, and the horizontal element, radier, is the main responsible for supporting the loads absorbed by the foundation. However, it should be noted that although the piles are cooperating little in the load capacity of the set, the arrangement and number of piles inserted in the foundation significantly interfere in the settling, helping to have a reduction of the total settlements. With this, the work analyzed a popular building, which uses an isolated radier foundation system, built on a low resistance soil. From this, the optimization was carried out, which, in general, aims to search for a better solution to a given problem. Thus, with the numerical simulation of this isolated radier in contrast to the simulation of 3 (three) piled rafts with 4, 9 and 16 piles, the variation of total settlements, differential settlements and how the load supported by the set radier plus piles. For this, a 7m x 7m radier with 0.1m high was used and the piles with 5m in length and 25cm in diameter, with different spacings for each case of analysis. Because it is a simplified analysis, numerical simulations were performed using the RS<sup>2</sup> tool that allows two-dimensional simulations on finite elements. With the results and analyzes of this work, it can be concluded that with the introduction of piles there is a reduction of the settlements and this reduction is directly related to the number of piles and their distribution in the foundation. As a consequence, there will be a better performance of isolated radier foundations for popular buildings built on low resistance ground, as was the case for numerical modeling, if using, instead of this type of foundation system, the piled raft system, evaluating the ideal number and distribution for the piles.

**KEYWORDS:** radier, piled raft, numerical analysis, pile foundations, popular building, optimization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de sistemas de fundação: (a) Estaca isolada, (b) grupo de estacas; (c) radier estaqueado (BEZERRA, 2003).....	18
Figura 2 – Problema básico de estaca isolada carregada axialmente (POULOS, 1989). ....	21
Figura 3 – Mobilização de carga com o recalque sofrido por uma estaca flutuante e por uma estaca abaixo de um radier de largura infinita (Modificado - BURLAND, 1995).....	23
Figura 4 – Curva carga x recalque e definição da rigidez de uma estaca (SALES, 2000). ....	24
Figura 5 – Limites relacionados a deslocamentos angulares (Modificado – BJERRUM, 1963). .....	26
Figura 6 – Modelos de ruptura de um radier estaqueado (Modificado – PHUNG, 1993).....	34
Figura 7 – Efeito do contato no recalque de uma estaca isolada (POULOS, 1968b <i>apud</i> GARCIA, 2015).....	35
Figura 8 – Fatores de incremento na capacidade de carga das estacas e do bloco devido à interação bloco-estacas (Modificado – Akinmusuru, 1980). ....	36
Figura 9 – Distribuição de cargas absorvidas entre estacas (MANDOLINI <i>et al.</i> , 2005 <i>apud</i> Garcia, 2015). ....	38
Figura 10 – Porcentagem de distribuição de cargas no radier em um radier estaqueado (MANDOLINI <i>et al.</i> , 2005 <i>apud</i> Garcia, 2015).....	38
Figura 11 – Bulbo de tensões para pequeno e grande radiers estaqueados (VIGGIANI <i>et al.</i> , 2012) .....	39
Figura 12 – Situação esquemática de um pequeno radier estaqueado .....	40
Figura 13 – Interações solo-estrutura entre radiers, estacas e subsolo (Modificado - KATZENBACH <i>et al.</i> , 2005).....	42
Figura 14 – Tipos de sistemas de fundação e coeficientes $\alpha$ pr. (Modificado - Mandolini, 2003). .....	44
Figura 15 – Estacas na região central do radier para reduzir os recalques diferenciais (Modificado - RANDOLPH, 1994). ....	44
Figura 16 – Projeto esquemático da abordagem com estacas redutoras de recalque (Modificado - RANDOLPH, 1994). ....	45
Figura 17 – Curvas de carga x recalque para radiers estaqueados com diferentes filosofias de projeto (POULOS, 2001). ....	46
Figura 18 – Algumas situações desfavoráveis ao emprego de fundações em radier estaqueado (Bezerra, 2003). ....	51



Figura 19 – Relação entre custo e recalque (Modificado - De Sanctis <i>et al.</i> 2002). .....	55
Figura 20 – Sistema de fundação em radier para simulação de uma construção popular.....	56
Figura 21 – Divisão em áreas de influência. ....	57
Figura 22 – Casos de Análise. ....	58
Figura 23 – Situação de solo simulada.....	60
Figura 24 – Teste de convergência. ....	64
Figura 25 – Geometria das simulações e malha de elementos finitos. ....	64
Figura 26 – Área das faixas de influência. ....	66
Figura 27 – Compressão uniaxial no 1º estágio (valores em kPa).....	67
Figura 28 – Compressão uniaxial no 6º estágio (valores em kPa).....	68
Figura 29 – Compressão uniaxial no 11º estágio (valores em kPa).....	68
Figura 30 – Deslocamentos verticais no 1º estágio (valores em m). ....	69
Figura 31 – Deslocamentos verticais no 6º estágio (valores em m). ....	69
Figura 32 – Deslocamentos verticais no 11º estágio (valores em m). ....	70
Figura 33 - Gráfico carga x recalque - Radier Isolado.....	71
Figura 34 - Gráfico carga x recalque - Radier Estaqueado 4 estacas.....	71
Figura 35 - Gráfico carga x recalque - Radier Estaqueado 9 estacas.....	72
Figura 36 - Gráfico carga x recalque - Radier Estaqueado 16 estacas.....	72
Figura 37 – Marcação dos pontos para análise dos recalques diferenciais. ....	73
Figura 38 – Condição deformada em termos de compressão uniaxial- radier isolado (11º estágio). ....	73
Figura 39 – Condição deformada em termos de compressão uniaxial - radier estaqueado com 4 estacas (11º estágio). ....	74
Figura 40 – Condição deformada em termos de compressão uniaxial - radier estaqueado com 9 estacas (11º estágio). ....	74
Figura 41 – Condição deformada em termos de compressão uniaxial - radier estaqueado com 16 estacas (11º estágio). ....	74
Figura 42 – Condição deformada em termos de deslocamento vertical – radier isolado (11º estágio). ....	75
Figura 43 – Condição deformada em termos de deslocamento vertical – radier estaqueado com 4 estacas (11º estágio). ....	75
Figura 44 – Condição deformada em termos de deslocamento vertical – radier estaqueado com 9 estacas (11º estágio). ....	75

Figura 45 – Condição deformada em termos de deslocamento vertical – radier estaqueado com 16 estacas (11º estágio). .....	76
Figura 46 – Transferência de carga média nas estacas do radier estaqueado com 4 estacas. ..	78
Figura 47 – Transferência de carga média nas estacas do radier estaqueado com 9 estacas. ..	79
Figura 48 – Transferência de carga média nas estacas do radier estaqueado com 16 estacas. ..	79
Figura 49 – Contribuição do radier e das estacas no radier estaqueado com 4 estacas. ....	82
Figura 50 – Contribuição do radier e das estacas no radier estaqueado com 9 estacas. ....	82
Figura 51 – Contribuição do radier e das estacas no radier estaqueado com 16 estacas. ....	83
Figura 52 – Contribuição do radier, do fuste das estacas e da ponta das estacas no carregamento máximo para os 3 casos de radiers estaqueados. ....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas de atendimento do PMCMC por fase e subsídio relacionado (MORAGA, 2017). .....	28
Tabela 2 – Modelos de Planta Popular (MANUAL SIMPLIFICADO DA PLANTA POPULAR – PREFEITURA DE UBERLÂNDIA, 2017). .....	30
Tabela 3 – Consistência da argila em função do índice de consistência (PINTO, 2006). .....	32
Tabela 4 – Consistência da argila em função do $N_{SPT}$ (Modificado – ABNT NBR 6484:2001). .....	32
Tabela 5 – Consistência da argila em função da resistência à compressão simples (PINTO, 2006). .....	33
Tabela 6 – Métodos de cálculo em radier estaqueado (Modificado - NETO, 2013). .....	49
Tabela 7 - Ed. Akasaka – FS x Número de estacas (Modificado – POULOS, 1994b).....	53
Tabela 8 – Áreas de influência. ....	57
Tabela 9 – Espaçamento entre estacas (s) .....	59
Tabela 10 – Parâmetros médios de resistência e deformabilidade do solo. ....	61
Tabela 11 – Parâmetros do concreto. ....	62
Tabela 12 – Deslocamentos na extremidade do semi-espaço. ....	63
Tabela 13 – Estágios, fatores e tensões de ensaio. ....	65
Tabela 14 – Cargas de ensaio para todos os casos de análise. ....	67
Tabela 15 – Tensão máxima, carga máxima e recalque máximo no centro do radier para cada caso de análise. ....	70
Tabela 16 – Recalques nos casos de análise no estágio de carregamento máximo e cálculo dos recalques diferenciais. ....	76
Tabela 17 – Média dos valores de deslocamentos (recalques). ....	77
Tabela 18 – Área do radier em contato com o solo (área líquida). ....	84
Tabela 19 - Análise de SRF entre o radier isolado e os casos de radiers estaqueados. ....	85
Tabela 20 – SRF dos casos de análise para os recalques máximos no meio do radier. ....	86

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	VI
LISTA DE TABELAS .....	IX
1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Justificativa.....	15
1.2 Objetivos .....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 Conceitos básicos.....	16
2.1.1 Sistema de Fundação .....	16
2.1.1.1 Tipos de sistemas de fundação .....	17
2.1.2 O emprego de estacas em sistemas de fundações.....	18
2.1.3 Estaca isolada e seu comportamento .....	19
2.1.4 Rigidez de um sistema de fundação composto por uma estaca isolada.....	24
2.1.5 Fundações estaqueadas <i>versus</i> recalque.....	25
2.1.6 Construções Populares .....	27
2.1.6.1 Programa Minha Casa Minha Vida .....	27
2.1.6.2 Manual Simplificado de Planta Popular – Prefeitura de Uberlândia.....	29
2.1.7 Solos moles .....	30
2.1.7.1 Uso de radier estaqueado em solos moles .....	33
2.2 Breve histórico de radier estaqueado .....	34
2.3 Efeito do contato entre radier e o solo em fundações estaqueadas.....	37
2.3.1 Bulbo de tensões em radier estaqueado .....	39
2.4 Concepção e projeto de radier estaqueado .....	41
2.4.1 Etapas de projeto .....	47
2.4.2 Filosofias de Projeto .....	48
2.5 Métodos de análise.....	48
2.5.1 Métodos Simplificados ou Preliminares .....	49
2.5.2 Métodos Detalhados ou Numéricos.....	50
2.6 Aplicabilidade de radier estaqueado .....	50
2.7 Otimização de radier estaqueado.....	53
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	56
3.1 Definição dos cenários de análise.....	56
3.2 Modelo numérico de cálculo .....	59

3.3	Parâmetros do solo para a análise numérica.....	60
3.4	Parâmetros do concreto – material das estacas e dos radiers .....	61
3.4.1	Módulo de elasticidade do concreto ( $E_{ci}$ ).....	61
3.4.2	Coefficiente de Poisson ( $\nu$ ) e peso específico do concreto ( $\gamma_c$ ).....	62
3.4.3	Parâmetros adotados .....	62
3.5	Definição do semiespaço do modelo numérico .....	62
3.5.1	Teste de convergência.....	63
4	RESULTADOS E ANÁLISES .....	65
4.1	Carga-Recalque e Recalques diferenciais .....	65
4.2	Curva de transferência .....	78
4.3	Contribuição do contato bloco-solo.....	81
4.4	Análise de SRF .....	85
5	CONCLUSÃO .....	87
5.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	89
	REFERÊNCIAS .....	89
	ANEXO A.....	96
	ANEXO B .....	98
	APÊNDICE A.....	99
	APÊNDICE B.....	100
	APÊNDICE C.....	101

# 1 INTRODUÇÃO

O conhecimento dos diferentes sistemas de fundação e a interação destas estruturas com o solo, principalmente devido ao seu caráter prático, tem sido tema e estudo de diversos pesquisadores e engenheiros. Com isso, uma parte valiosa nessa abrangente área de fundações e da engenharia geotécnica são as fundações com a utilização de estacas. Existe, atualmente, a necessidade de se aprofundar no conhecimento do comportamento de uma fundação estaqueada e do contato bloco-solo.

O sistema de fundação em radier estaqueado, apesar de se ter poucos estudos e ser pouco usual no Brasil, tem tornado-se uma alternativa importante na elaboração de projetos de fundação. Esse sistema é composto por um elemento horizontal (radier) e por elementos verticais (estacas). Além disso, leva em conta a contribuição do contato bloco-solo na transferência de carga, o que difere das fundações estaqueadas convencionais, que não levam em conta a contribuição do elemento horizontal, em contato com o solo, no dimensionamento. Somado a existência de projetos de edifícios cada vez mais altos e a crescente tendência de verticalização, os sistemas de fundações demandam cada vez mais de blocos maiores com um número elevado de estacas para atingir os critérios de segurança exigidos em norma. Com a consideração do contato bloco-solo, há uma redução no número de estacas necessárias se comparado com o número de estacas que seriam necessárias numa fundação convencional de estacas coroadas por bloco. Segundo Randolph (1994), o número de estacas pode ser reduzido em três a quatro vezes do que corresponderia a alternativa de fundação estaqueada convencional. Logo, há uma significativa redução de custos, porque além de se ter menor número de estacas, pode-se ter estacas com diâmetros e comprimentos menores. Segundo Garcia (2015), é evidente o êxito de projetos em radier estaqueado como solução de fundações para os casos de edifícios altos e/ou de elevadas cargas dissipadas ao solo em áreas cada vez menores.

Ademais, além do fator econômico que o radier estaqueado contribui, esse tipo de fundação evita, de forma mais harmônica, os efeitos de recalque no solo. Isso devido a uma melhor distribuição das cargas nesse tipo de fundação. Segundo Castillo (2013), no sistema de radier estaqueado, o radier esbelto atua como elemento redutor de recalques totais e diferenciais, bem como absorvendo uma porcentagem do carregamento. Por outro lado, as disposições das estacas em posições estratégicas incrementam, também, a capacidade de suporte e reduzem o recalque diferencial. Conforme Randolph (1994), uma das principais razões para se adotar como fundação o radier estaqueado é o fato de se reduzir o recalque. Já para Poulos (2001), a aplicação

mais prática para uso do radier estaqueado se dá quando o mesmo pode suportar a capacidade de carga adequada, mas o recalque, considerando somente o radier, não exceda valores admissíveis.

A análise do sistema de fundação em radier estaqueado, por sua vez, é realizada a partir do sistema, de forma geral, formado entre o radier e a (s) estaca (s). Segundo Bezerra (2003), a análise isolada do comportamento de cada elemento estrutural (radier, estaca e o solo) deixou de ser realizada, voltando-se para uma avaliação do sistema como um todo, onde os efeitos de interação radier-estaca, estaca-solo, radier-solo são tratados simultaneamente a fim de obter uma melhor modelagem e resposta ao problema.

Segundo Poulos (2001), em situações nas quais somente os sistemas de fundações rasas não se apresentam como alternativas viáveis ou eficientes quanto aos critérios de capacidade de carga ou de recalques admissíveis, é necessário acoplar estacas àqueles elementos superficiais visando uma melhor distribuição de carga e redução do recalque a limites toleráveis. Nesse contexto, este trabalho visa analisar o uso de estacas no melhoramento do desempenho de fundações em radier isolado nas construções populares executados em solo da região de Uberlândia-MG.

## **1.1 Justificativa**

Com poucos estudos sobre fundação estaqueada no Brasil e a busca por soluções mais econômicas para a escolha da fundação aplicada a construções populares, é importante uma melhor compreensão do comportamento de fundações superficiais trabalhando em cooperação com fundações profundas, utilizando-se de espaçamentos entre estacas não convencionais. Outro aspecto a ser considerado é sobre o número ideal de estacas visando o melhor custo-benefício. Segundo Mandolini (2003), existe um número máximo de estacas a serem considerados na base do radier, que se superado pode ser pouco eficiente e, obviamente, antieconômico. E acrescenta que um número relativamente pequeno de estacas, distribuído estrategicamente por toda área do radier, pode melhorar sensivelmente o recalque diferencial. O trabalho trará novos conhecimentos para posteriores trabalhos mais aprofundados na área e servirá de base para fomentar os meios técnico e acadêmico.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo otimizar o projeto de fundação para melhoramento do desempenho de construções populares. Com isso; os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- i. Compreender como o uso de estacas sob um elemento superficial de fundação, radier isolado, possa resultar em um melhor custo-benefício sob o aspecto técnico e econômico;
- ii. Entender o comportamento tensão-deformação no solo, além da mobilização das resistências (elementos de fundação profunda e rasa) e da estimativa da formação do bulbo de tensões;
- iii. Comparar carga e recalque entre diferentes sistemas de fundação – radier isolado e radier estaqueado para construções populares;
- iv. Variar o número de estacas e a disposição das mesmas de forma a encontrar a melhor solução no sistema de fundação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados conceitos básicos como sistema de fundação, emprego de estaca, recalque, construções populares e solos moles. Além disso, são apresentados o efeito de contato entre radier e o solo, bulbo de tensões em radier estaqueado, a concepção e projeto de um radier estaqueado, aplicabilidade e otimização desse tipo de fundação.

### 2.1 Conceitos básicos

#### 2.1.1 Sistema de Fundação

Na engenharia estrutural e na área da construção civil, o termo “fundações” se refere aos elementos estruturais responsáveis por transferir ao solo, com segurança, os esforços provenientes do edifício. Assim, elementos estruturais como: radier, sapata, estaca e tubulão, são componentes do sistema de fundação ou da “infraestrutura”, para alguns autores, para resistir as cargas advindas da “superestrutura”. Ao contrário desse conceito, na engenharia geotécnica se define o termo “fundações” como sendo todos os elementos resistentes aos



esforços da edificação, ou seja, é a associação dos elementos estruturais da infraestrutura com o maciço de solo envolvente.

No presente trabalho, a definição de sistema de fundação é baseada no conceito da engenharia geotécnica. Isso porque a interação entre o solo e os elementos estruturais da infraestrutura deve ser levada em conta para o entendimento do comportamento analisado do “sistema de fundação” em questão. Sendo assim, o comportamento do solo que envolve os elementos estruturais da fundação é de fundamental importância para as análises neste trabalho. Além disso, pode-se concluir que o fator limitante é o solo. Deve-se destacar que essas últimas considerações estão sendo adotadas por diversos autores da área e projetistas de fundação para obter projetos mais econômicos.

### **2.1.1.1 Tipos de sistemas de fundação**

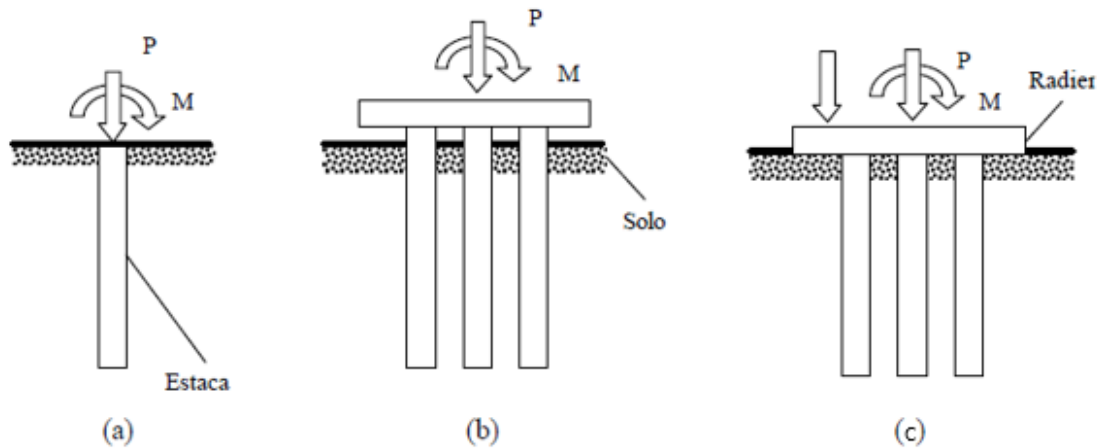
Cada sistema de fundação apresenta um comportamento geotécnico específico. Por isso, a compreensão dos diferentes tipos de sistemas de fundação se torna importante.

Soares (2011) informa que os tipos de sistemas de fundação variam de acordo com o elemento estrutural utilizado, e sua forma de transmissão de carga ao solo. Para esse trabalho, as descrições dos sistemas adotados estão abaixo listadas:

- Fundação superficial: elemento de fundação em que é transmitida a carga ao terreno, predominantemente pelas tensões distribuídas sob a base da fundação. Incluem-se as sapatas, radiers e blocos (NBR 6122:2010);
- Estacas isoladas: elemento de fundação profunda, ou seja, transmite esforços ao maciço pela sua resistência lateral, de ponta ou a combinação destas. Sua execução é feita com equipamento ou ferramenta sem descida de operário (NBR 6122:2010);
- Grupos de estacas: associações de diversas estacas interligadas por um elemento estrutural (bloco) geralmente de grande rigidez, que não tem contato com o solo (BEZERRA, 2003). Segundo a NBR 6122:2010, o bloco de coroamento é uma estrutura de volume usada para transmitir às estacas as cargas de fundação.
- Radier estaqueado: associações de uma estaca, ou grupos de estacas, com um elemento de fundação superficial (sapata, radier) ou bloco de coroamento, com ambas as partes contribuindo na transmissão das cargas ao maciço do solo.

A Figura 1 mostra os sistemas de fundação tratados neste trabalho.

Figura 1 – Tipos de sistemas de fundação: (a) Estaca isolada, (b) grupo de estacas; (c) radier estaqueado (BEZERRA, 2003).



A diferença entre o radier estaqueado e os grupos convencionais de estaca é que, neste último, o elemento de ligação (bloco de coroamento) não está em contato com o solo (SOARES, 2011). Assim, como o elemento de ligação do radier estaqueado está em contato direto com solo, segundo Bezerra (2003), esse elemento contribui na absorção das cargas derivadas da superestrutura.

### 2.1.2 O emprego de estacas em sistemas de fundações

O uso de estacas formando sistemas de fundações remonta a vários séculos e vem sendo desenvolvido ao longo do tempo pela humanidade. Segundo Nápoles Neto (1998), na Era Neolítica, o homem já havia alguma noção empírica, aprendida na era anterior, sobre a resistência e a estabilidade dos materiais da crosta terrestre. Assim, por necessidade de moradia, construiu choupanas de madeiras, leves, portanto, à beira de lagos, sobre estacas elevadas (as palafitas). Isso proporcionou ideias adicionais sobre a resistência do solo e a primeira utilização de estacas como elementos de fundação.

De acordo com Bezerra (2003), construções antigas como templos, igrejas históricas e castelos são exemplos clássicos das primeiras obras que implementaram estacas como elementos de transmissão de cargas ao solo. No entanto, somente a partir da Revolução Industrial do século 19, com a demanda por estruturas mais pesadas e a necessidade de barateamento dos custos das fundações dos prédios e das fábricas, houve a elaboração de uma teoria que fundamentasse a aplicação de estacas (TERZAGHI *et al.*, 1996).

Nas fundações estacadas, até meados da década de setenta, o número de estacas era empregado de forma a atingir a capacidade de carga requerida de projeto. Segundo Sales (2000), nesse período, sabia-se que o desempenho e a forma de transferência de carga de uma estaca eram diferentes daquele que utiliza numa fundação rasa. Logo, não se buscava a associação de dois tipos de fundações. Isso ocorre até hoje, muitos projetistas desconsideram a contribuição do elemento superficial em contato com o solo, tendo, portanto, um encarecimento do custo das fundações. Portanto, muitos projetos de fundação não levam em conta o contato bloco-solo na capacidade de carga do sistema de fundação.

Nas últimas décadas, muitos estudos e métodos de fundações vem sendo desenvolvidos afim de obter projetos de fundações mais seguros e com custos reduzidos. Houve a necessidade de uma melhor compreensão de como seria o comportamento de uma fundação envolvendo estacas e uma parte superior horizontal em contato com a camada superficial (SALES, 2000). A aplicação da Teoria da Elasticidade impulsionou novas metodologias e pesquisas para melhor compreensão acerca do “processo de interação entre uma fundação rasa (“cap”, sapata ou radier) e estacas sob a mesma” (SALES, 2000). Sendo assim, os primeiros e principais trabalhos sobre o emprego da teoria da elasticidade na análise de estacas isoladas e grupos de estacas compressíveis e que incentivaram os recentes estudos de comportamentos de fundações estacadas, incluindo o de radier estacado, foram os de Poulos (1968), Poulos & Davis (1968), Mattes & Poulos (1969) e Butterfield & Banerjee [1971(a),1971(b)].

### **2.1.3 Estaca isolada e seu comportamento**

Com a finalidade de melhor compreensão do comportamento de fundações estacadas, é necessário entender os mecanismos de transmissão de cargas para uma estaca isolada imersa em solo. Nas últimas décadas, vários métodos para análise de carregamento axial em estacas têm sido desenvolvidos. Segundo Poulos (1989), a maioria desses métodos envolvem um ou mais dos seguintes métodos de análise técnica:

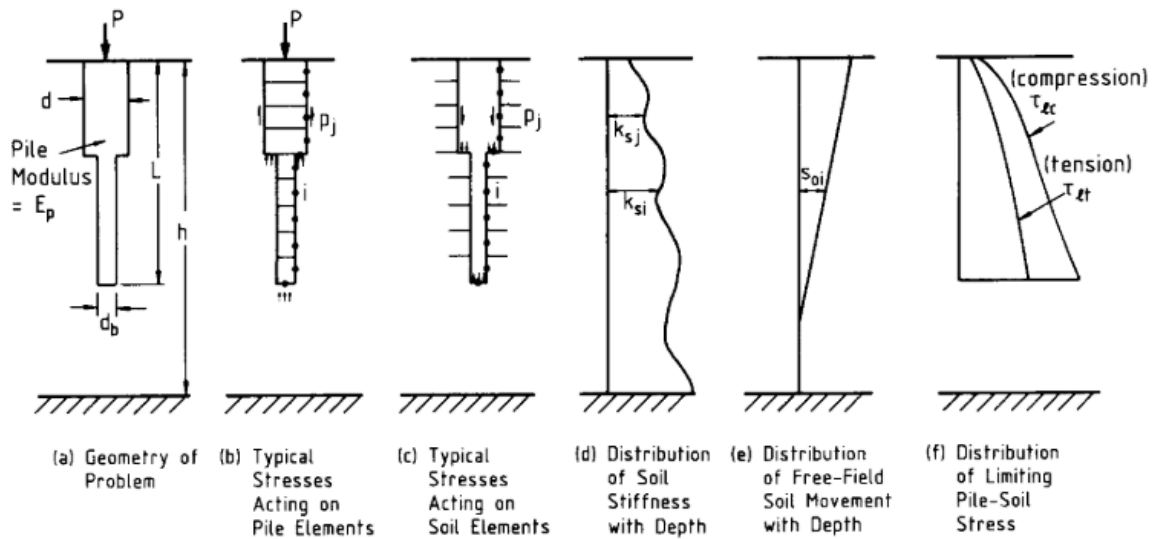
- (a) Métodos analíticos simplificados que envolvem a consideração de elementos horizontais independentes de estaca e solo (Randolph & Worth, 1978);
- (b) Métodos de elementos de contorno empregando ou as funções de carga-transferência para representar a resposta da interface estaca-solo (Coyle & Reese, 1966; Kraft *et al.*, 1981), ou a teoria contínua da elasticidade para representar a resposta do solo (Butterfield & Banerjee, 1971; Banerjee, 1978; Banerjee & Davies, 1978; Poulos & Davis, 1980);

- (c) Método de elementos finitos (Desai, 1974; Valliappan et al., 1974; Balaam *et al.*, 1975; Ottaviani, 1975; Jardine *et al.*, 1986) em que uma variedade de modelos constitutivos do solo pode ser utilizada, e fatores como heterogeneidade e anisotropia podem ser levados em conta.

O método de elementos finitos oferece uma poderosa ferramenta analítica para estudar problemas da engenharia, não somente pode modelar o comportamento não-linear do solo, mas pode simular a história completa da estaca, ou seja, seu processo de instalação, reconsolidação do solo após a instalação e carregamento da estaca. Contudo, ainda que essas análises sejam valiosas para um melhor entendimento do comportamento da estaca, não são prontamente aplicáveis a problemas práticos por conta da complexidade e do número considerável de parâmetros geotécnicos necessários.

Pelo método dos elementos de contorno pode se ter uma análise entre a complexidade excessiva e a simplicidade inaceitável. Esse método foi desenvolvido por muitos pesquisadores e é, amplamente, usado na prática. Um meio conveniente de desenvolver as simplificações e se ter uma análise unificada é considerar separadamente a (s) estaca (s) e o solo envolvente e, em seguida, compatibilizar os dois através de condições impostas. Já para o método de análise simplificado, lembrando que esse método considera os elementos horizontais independentes de partes da estaca e do solo, tem-se a estaca dividida em vários elementos em que o centro destes apresentam um plano vertical comum através do eixo da estaca. Com isso, somando as contribuições de reação de cada elemento se tem a resposta da estaca ao carregamento imposto. A Figura 2 contém um problema básico de estaca isolada carregada axialmente, onde tem-se: (a) geometria do problema, (b) tensões do solo atuando nos elementos da estaca, (c) tensões da estaca atuando nos elementos do solo, (d) distribuição de rigidez do solo com a profundidade, (e) distribuição do movimento do solo em campo livre com a profundidade e (f) distribuição de tensões na interface estaca-solo.

Figura 2 – Problema básico de estaca isolada carregada axialmente  
(POULOS, 1989).



Para o caso de uma estaca isolada submetida a um carregamento vertical, parte desse carregamento é transferido ao solo por atrito lateral ao longo do fuste (área lateral do elemento) e parte através da ponta da estaca por tensões de compressão.

A transferência de carga por atrito lateral, em porcentagem, depende de fatores como: propriedades e estratificação do solo, camada de apoio da ponta, comprimento da estaca, rigidez estaca-solo, entre outros (Poulos & Davis, 1980). Da mesma forma, a transferência de carga pela ponta da estaca depende de fatores como: diâmetro e comprimento da estaca, material da estaca, propriedades físicas do solo, entre outros.

A resistência lateral atuante na estaca é função das tensões cisalhantes desenvolvidas na interface fuste da estaca-solo. Estas tensões são representadas pela seguinte equação:

$$\tau = a + \sigma_n \cdot \text{tg}(\phi^*) \quad (\text{Equação 1})$$

Em que,

$a$  é a aderência estaca/solo (=  $\alpha \cdot c$ , onde “ $c$ ” é a coesão do solo e “ $\alpha$ ” um fator adimensional que expressa a parcela da coesão considerada como aderência na superfície da estaca);

$\sigma_n$  é a tensão normal à superfície da estaca;

$\phi^*$  é o ângulo de atrito estaca-solo.

A aderência estaca-solo, coeficiente “ $a$ ”, depende de fatores como coesão efetiva do solo, forma de instalação e o tempo passado após a instalação. A tensão normal à superfície, “ $\sigma_n$ ”, está

relacionada com as tensões geostáticas do solo e à forma de instalação. O ângulo de atrito, “ $\phi^*$ ”, resultante da interação fuste da estaca-solo, depende de vários fatores como: tipo de solo, material da estaca e rugosidade entre o solo e estaca.

Apesar de encontrar uma tensão cisalhante máxima, pela Equação 1, passível de ser mobilizada na interface estaca-solo, para se ter o valor dessa tensão mobilizado, deve haver um deslocamento relativo entre o solo envolvente e a estaca. A Equação 2 apresenta a fórmula para se obter a tensão de atrito lateral mobilizado ( $f_s$ ).

$$f_s(z) = F(z) \cdot \tau(z) \quad (\text{Equação 2})$$

Em que,

$z$  é a profundidade em questão;

$F(z)$  é a função do grau de mobilização do atrito lateral;

$T(z)$  é a tensão cisalhante máxima na profundidade “ $z$ ”.

A função  $F(z)$  é capaz de ser expressada por um comportamento bilinear, caso ocorra, em algum solo, da resistência residual se aproximar à de pico. Esse comportamento bilinear está representado na Equação 3.

$$F(z) = \begin{cases} \frac{\delta}{\delta_{ult}} & , se \delta < \delta_{ult} \\ 1 & , se \delta \geq \delta_{ult} \end{cases} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que,

$\delta$  é o deslocamento relativo estaca-solo;

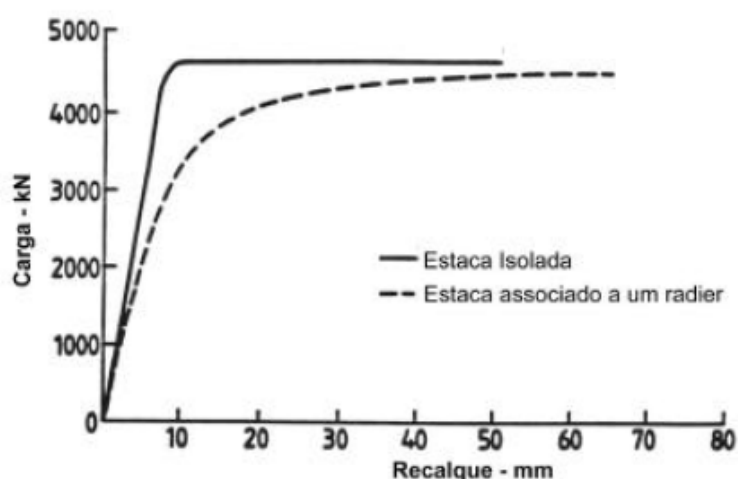
$\delta_{ult}$  é o deslocamento relativo estaca-solo necessário para a mobilização máxima do atrito lateral.

Para a mobilização do atrito lateral máximo, um deslocamento pequeno de pouco milímetros já basta. Conclui-se, portanto, que o atrito lateral mobilizado em uma estaca é influenciado pela aderência estaca-solo, pelo ângulo de atrito estaca-solo, pela tensão normal à superfície da estaca e do grau de mobilização do atrito lateral. Deste modo, havendo a presença de outros elementos de fundação perto de uma estaca, o comportamento desta será diferente do que o de

uma estaca isolada. Pois se tem a alteração tanto das tensões normais quanto do grau de mobilização do atrito lateral.

Burland (1995) deu prosseguimento aos estudos numéricos de Nyambayo (1992). Esses estudos tinham como objetivo analisar o comportamento de uma estaca flutuante, no qual a capacidade de carga da estaca é definida sobretudo pela resistência lateral, instalada sob um radier de largura infinita em relação ao comprimento da estaca. Com isso, Burland (1995) conseguiu obter a relação carga x recalque para uma estaca flutuante e para uma outra estaca, com as mesmas propriedades, associada a um radier de largura infinita. Essas relações são apresentadas na Figura 3 para as duas situações.

Figura 3 – Mobilização de carga com o recalque sofrido por uma estaca flutuante e por uma estaca abaixo de um radier de largura infinita (Modificado - BURLAND, 1995).



A partir de seus estudos e os de Nyambayo (1992), Burland (1995) notou que a estaca associada a um radier apresentava uma redução da sua rigidez em comparação à estaca isolada (Figura 3). Isso devido a um menor grau de mobilização do atrito lateral decorrente da interação entre a estaca e o radier. No caso da estaca associada a um radier, portanto, o grau de mobilização da resistência lateral é menor que aquele encontrado com a mesma estaca na situação de estar isolada.

Assim em um radier estaqueado, apesar do contato do elemento superficial com o solo aumentar as tensões normais e cisalhantes atuantes na interface estaca-solo, isso impõem campos de deslocamentos ao solo sob o radier, o que reduzirá os deslocamentos relativos estaca/solo e conseqüentemente, o nível de mobilização do atrito lateral da (s) estaca (s).

### 2.1.4 Rigidez de um sistema de fundação composto por uma estaca isolada

Sendo um sistema de fundação composto por uma estaca isolada, a “rigidez de uma estaca” é o quociente entre a carga aplicada ao sistema e o seu deslocamento. Portanto, a rigidez de uma estaca é expressa pela seguinte equação:

$$K_p = \frac{P}{\delta} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que,

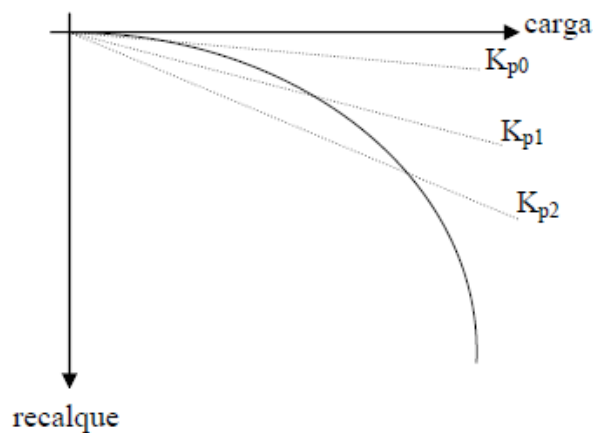
$K_p$  é a rigidez de uma estaca;

$P$  é a carga aplicada sobre a estaca;

$\delta$  é o recalque ou deslocamento da estaca.

Ao submeter uma estaca a diferentes carregamentos verticais e assim, obter a relação carga x recalque dessa estaca e representar isso graficamente, a rigidez da estaca é determinada pela tangente à curva carga x recalque, conforme é representado na Figura 4. Nesta, o valor inicial da rigidez de uma estaca ( $K_{p0}$ ) é caracterizada pela tangente inicial à curva carga x recalque. Assim sendo, nota-se que dependendo do nível de carregamento submetido numa estaca, haverá um determinado recalque e, por conseguinte, um valor correspondente da rigidez dessa estaca.

Figura 4 – Curva carga x recalque e definição da rigidez de uma estaca  
(SALES, 2000).



Ainda pela Figura 4, observa-se que quanto maior é a carga atuante em uma estaca, maior é o valor de recalque. Porém, esta relação ocorre, de modo geral, não linearmente. Por isso, a



rigidez da estaca passa a possuir um comportamento não linear, onde os valores  $K_{p0}$ ,  $K_{p1}$  e  $K_{p2}$  são representados por retas secantes à curva carga x recalque do sistema. Essa não linearidade da rigidez do sistema fez com que diversos autores apresentassem modelos representativos acerca dessa variação. Destaca-se, portanto, o modelo hiperbólico de Poulos (1994a). Neste modelo, Poulos (1994a) utilizou a seguinte equação hiperbólica:

$$K_p = K_{p0} \cdot \left[ 1 - R_f \cdot \left( \frac{P}{P_u} \right) \right] \quad (\text{Equação 5})$$

Em que,

$K_{p0}$  é a rigidez inicial da estaca;

$P$  é a carga atuante no sistema;

$P_u$  é a carga última do sistema;

$R_f$  é o fator hiperbólico de variação da rigidez do sistema.

Sales (2000) adverte que a definição de rigidez da estaca corresponde ao comportamento estaca-solo e não pode ser confundido com a rigidez estrutural de um material qualquer. Este é definido sendo o produto do módulo de elasticidade da estaca ( $E_p$ ) pelo módulo de inércia da seção transversal ( $I_p$ ).

### 2.1.5 Fundações estaqueadas *versus* recalque

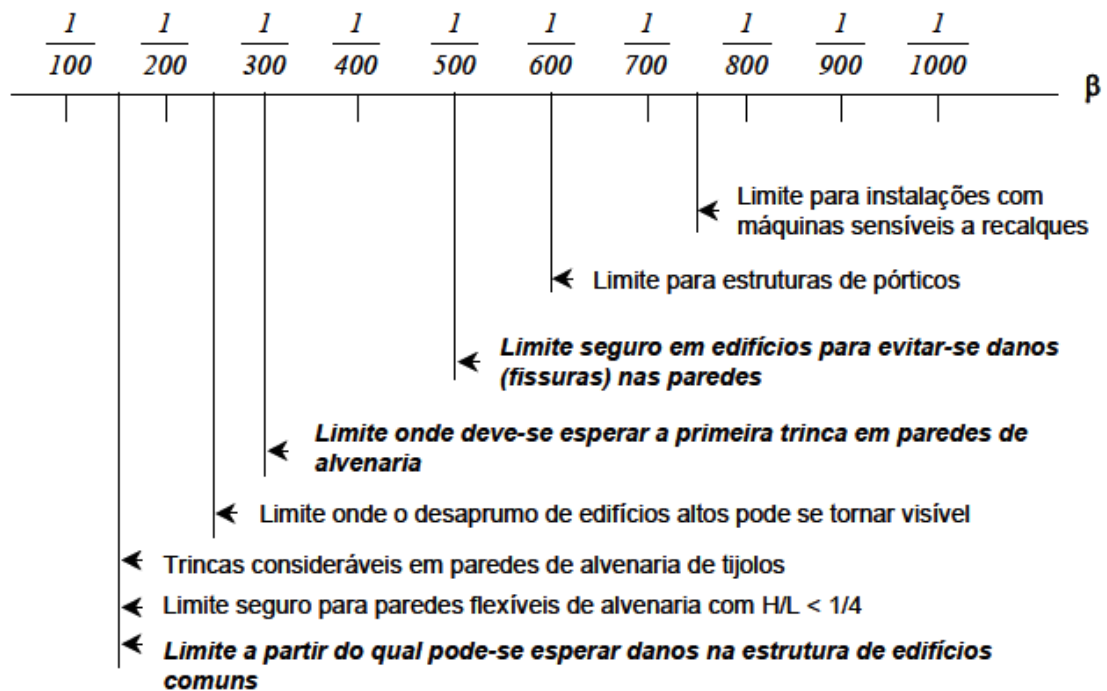
Segundo a NBR 6122:1996, o recalque é definido como sendo o movimento vertical descendente de um elemento estrutural. Ou seja, acontece quando uma edificação sofre um rebaixamento devido ao assentamento do solo sob sua fundação. O recalque é o motivo principal de trincas e rachaduras em edificações, sobretudo com a ocorrência do recalque diferencial. Este acontece quando uma parte da edificação rebaixa mais que outra, isso gera esforços estruturais não previstos e podem acarretar em danos estruturais.

A maior parte dos problemas em fundações são questões de recalques, porém, apesar que na prática o comportamento de um sistema de fundação seja condicionado por recalques, não se pode esquecer de se fazer uma análise preliminar, a parte, da segurança perante a ruptura (DE MELLO, 1975).

Segundo Milititsky, Consoli & Schnaid (2005), o recalque em fundações ocorre em toda obra, sendo os recalques admissíveis parcela importante nas análises e projetos de fundações. A

quantificação dos recalques admissíveis é, geralmente, realizada em termos de relações de deflexões ou de distorções angulares, dependendo do tipo de estrutura e de dano. A Figura 5 apresenta valores de distorção angular ( $\beta$ ) em relação aos danos associados propostos por Bjerrum (1963) citado por Velloso & Lopes (2004).

Figura 5 – Limites relacionados a deslocamentos angulares (Modificado – BJERRUM, 1963).



Segundo Burland *et al.* (1977), os projetos de fundações estaqueadas, em sua maioria, levam em conta somente o critério de capacidade de carga, por conta dos baixos níveis de recalques geralmente atingidos. Fato este também mencionado por Randolph (1994b) e Poulos (2001). Burland *et al.* (2001) recomendaram realizar projetos de fundação, visando projetos mais econômicos, com o uso de um número mínimo de estacas para conduzir a um recalque admissível para a fundação e, conseqüentemente, haveria um aumento da capacidade de suporte. Portanto, as estacas foram denominadas “elementos redutores de recalque”, onde o critério de recalque admissível seria o principal. De acordo com Fleming *et al.* (2009), a questão de projeto não é “quantas estacas são necessárias para suportar o peso da construção?”, e sim “quantas estacas são necessárias para reduzir os recalques (diferenciais) a um nível aceitável e onde elas devem ser posicionadas?”.

Segundo Garcia (2015), “há muito tempo o conceito de estacas como elementos redutores de recalque vem se estabelecendo no meio técnico como uma metodologia eficaz de projeto de

fundações em radier-bloco estaqueado”. Em radier estaqueado, além das estacas funcionarem como redutores de recalque, fato este comprovado nos trabalhos realizados por Fioravante & Giretti (2010) a partir de testes de centrífuga em modelos de sistemas de fundação em radier estaqueado, com a consideração da contribuição do contato bloco-solo para projetos mais eficazes, segundo Bezerra (2003), esse contato reduz os recalques totais desenvolvidos no radier.

Em um projeto de fundação estaqueada, apesar de outras variáveis importantes de projeto como espessura do radier, custos de execução, número de estacas, entre outros, o posicionamento estratégico das estacas com a finalidade de reduzir os recalques diferenciais excessivos é um fator importante. Esse planejamento na concepção do projeto é chamado de controle de recalques diferenciais (GARCIA, 2015).

### **2.1.6 Construções Populares**

O termo construções populares neste trabalho é definido como as habitações destinadas ao suporte das necessidades de moradia da população de classe baixa e média baixa. Segundo Junqueira e Vita (2002), citados por Larcher (2005), observa-se que a aquisição da habitação faz parte do conjunto de aspirações principais de uma parcela significativa da população brasileira. Por conta do custo alto para a construção de uma moradia, as classes menos favorecidas no Brasil compõem a maior demanda imediata por habitação.

Desse modo, as construções populares são de interesse social e está previsto na Constituição Federal de 1988, a qual aborda a função social do uso do solo urbano. Segundo Larcher (2005), o conceito de interesse social é constitucionalmente agrupado às políticas habitacionais para a parcela da população definida como de baixa renda.

Nesse contexto será abordado o Programa Minha Casa Minha Vida, o qual tem como objetivo a redução do déficit habitacional, e também outro programa habitacional específico para o município de Uberlândia-MG, o Manual Simplificado de Planta Popular da Prefeitura de Uberlândia, o qual mostra os benefícios oferecidos, condições de adesão e os modelos de projeto.

#### **2.1.6.1 Programa Minha Casa Minha Vida**

O Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) é o maior programa habitacional brasileiro e foi pelo governo federal através da Medida Provisória nº 459 no ano de 2009 com a intenção

de produzir novas unidades de moradia e reduzir o déficit habitacional brasileiro, posteriormente, no mesmo ano, foi convertida na Lei Ordinária nº 11.977. Entre os objetivos do PMCMV estão o auxílio aos municípios mais carentes de recursos materiais e humanos, o aumento da eficácia dos programas habitacionais e os parâmetros necessários para os agentes envolvidos para a boa aplicação do recurso público.

O programa tem dois segmentos, de acordo com Hiromoto (2018), o de Habitação de Interesse Social (HIS) e o de Habitação de Mercado Popular (HMP). A diferença entre esses segmentos está na faixa de renda, enquanto o HIS beneficia famílias de classe baixa, o HMP beneficia famílias de classe média baixa. Essa diferença distingue como é feita as regras de operação do programa, além do acesso ao benefício e o tamanho do subsídio (HIROMOTO, 2018).

Inicialmente, o PMCMV atendia famílias com renda mensal de até 10 salários mínimo. Nesse início, havia 3 faixas de renda para o atendimento. Segundo Moraga (2017), posteriormente a esse período inicial, a renda das famílias atendidas passou a ser nominal, atendendo 4 faixas que é o número de faixas atendidas atualmente. O mesmo autor cita que a prioridade do programa sempre foi de atendimento às famílias de mais baixa renda, 40% do orçamento da fase 1 e 60% da fase 2 para atendimento da Faixa 1. A Tabela 1 apresenta as faixas aplicadas em cada uma das fases do PMCMV e o subsídio relacionado.

Tabela 1 – Faixas de atendimento do PMCMC por fase e subsídio relacionado (MORAGA, 2017).

	Fase 1 (salários mínimos)	Fase 2 (Reais)	Fase 3 (Reais)	Subsídio (2017)
Faixa 1	0-3	< R\$ 1.800	< R\$ 1.800	Até 96%
Faixa 1,5	-	< R\$ 2.350	< R\$ 2.350	Até R\$ 47.500
Faixa 2	3-6	< R\$ 3.100	< R\$ 4.000	Até R\$ 29.000
Faixa 3	6-10	< R\$ 6.500	< R\$ 9.000	-

A Caixa Econômica Federal é a encarregada pelo financiamento das habitações, assim suas exigências têm de ser atendidas, juntamente com as normas vigentes e o Código de Defesa do Consumidor, pela empresa construtora e seus empreendimentos. Desse modo, o recurso financeiro é disponibilizado para a construtora de acordo com o cronograma evolutivo da obra. Este é verificado por um engenheiro da Caixa Econômica Federal.

Em Uberlândia, as primeiras unidades entregues pelo PMCMV ocorreram a partir de 2011. O primeiro conjunto habitacional financiado pelo PMCMV entregue no Residencial Jardim Sucupira com 270 casas, em seguida no Residencial Shopping Park III, em 2017, com 3.632 casas. (PEREIRA, 2017).

Na Cartilha Minha Casa Minha Vida disponibilizada no site <[www.fazenda.gov.br/noticias/2009/marco/Cartilha-Minha-Casa-Minha-Vida.pdf/view](http://www.fazenda.gov.br/noticias/2009/marco/Cartilha-Minha-Casa-Minha-Vida.pdf/view)> publicada no dia 18 de junho de 2014 com última modificação em 31 de outubro de 2014 tem-se as especificações padronizadas para a construção dos empreendimentos. Esses projetos-padrão visam auxiliar os municípios na obtenção e boa aplicação de recursos públicos. Nessa cartilha, os empreendimentos podem ser casas térreas ou prédios de acordo com as características, especificações e custos pré-definidos. A especificação padronizada se divide em duas tipologias:

- Tipologia 1 – casa térrea com 35m<sup>2</sup>;
- Tipologia 2 – apartamento com 42m<sup>2</sup>.

As especificações dessas duas tipologias se encontram no Anexo A.

No Cadernos CAIXA Projeto padrão – casas populares feito pela Equipe da Gerência de Desenvolvimento Urbano (GIDUR) de Vitória-ES descreve os métodos construtivos a serem utilizados e o padrão de acabamento para a construção de residência unifamiliar. Na descrição da estrutura, tem-se a especificação de como é executado a fundação direta. Tem-se as vigas baldrame executadas sobre um lastro de concreto magro com 5cm de espessura (radier). Isso é para justificar a utilização do sistema de fundação em radier como tipo de fundação adotada para uma grande parcela das construções do PMCMV.

#### **2.1.6.2 Manual Simplificado de Planta Popular – Prefeitura de Uberlândia**

A Lei Complementar nº 525 do ano de 2011 determina a modalidade de aprovação de projeto chamada de Planta Popular, beneficiando construções residenciais unifamiliares, destinada a uso próprio, do tipo econômico, com até 70m<sup>2</sup>. De acordo com o Manual Simplificado da Planta Popular (2017), na modalidade de Planta Popular o requerente tem as seguintes isenções:

- Taxa de protocolo de projeto;
- Taxa de revalidação de alvará de construção;
- Taxa de solicitação de Habite-se;
- IPTU.

Além disso, a Secretaria Municipal de Planejamento Urbano (SEPLAN) oferece 9 tipologias de projetos, de forma que o requerente não tem a necessidade de contratar um arquiteto/engenheiro para a elaboração do projeto da residência. Outros benefícios são a não necessidade de requerer Restrição Urbanística e a isenção de cobrança do responsável técnico pela execução da obra, esta deve ser feita em sistema de mutirão.

Para conseguir os benefícios da Planta Popular, o requerente deve atender os seguintes critérios:

- Ter renda mensal de até 5 salários mínimos;
- Possuir apenas 1 imóvel no Município (o requerente e seu cônjuge);
- Não ter requerido outra Planta Popular no Município;
- No caso de comodato, o proprietário do imóvel e o comodatário não podem ter mais de 1 imóvel no Município.

O Manual ressalta que para construções já realizadas, com até 70m<sup>2</sup> e das quais o requerente cumpre os critérios da Planta Popular e à legislação vigente são passíveis de regularização pela Planta Popular.

Com relação ao sistema de fundação empregado, o sistema utilizado, de modo geral, é o de radier isolado. A Tabela 2 apresenta os modelos disponibilizados pela prefeitura no Manual Simplificado de Planta Popular.

Tabela 2 – Modelos de Planta Popular (MANUAL SIMPLIFICADO DA PLANTA POPULAR – PREFEITURA DE UBERLÂNDIA, 2017).

Modelo	Dimensão	Características
PPU-01	43,00m <sup>2</sup>	Sala, cozinha, 2 quartos e banheiro social.
PPU-02	43,53m <sup>2</sup>	Sala, cozinha, 2 quartos e banheiro social.
PPU-03	54,00m <sup>2</sup>	Sala, cozinha, 2 quartos e banheiro social.
PPU-04	70,00m <sup>2</sup>	Sala, cozinha, 2 quartos e banheiro social, 1 suíte.
PPU-05	70,00m <sup>2</sup>	Sala, cozinha, 2 quartos e banheiro social, 1 suíte, área de serviço coberta.
PPU-06	70,00m <sup>2</sup>	Sala, cozinha, 2 quartos e banheiro social, área de serviço coberta.
PPU-07	61,51m <sup>2</sup>	Sala, cozinha, 2 quartos e banheiro social, 1 suíte, área de serviço e garagem cobertas.
PPU-08	39,52m <sup>2</sup>	Sala, cozinha, 2 quartos, banheiro social e área de serviço coberta.
PPU-09	35,00m <sup>2</sup>	Cozinha, quarto e banheiro social.

### 2.1.7 Solos moles

Solos moles são geralmente solos de origem sedimentar, argilosos e saturados. Esses solos possuem alto teor de umidade, por se encontrarem próximos de lençóis freáticos, e apresentam grandes frações de partículas finas (KAMON & BERGADO, 1991). Além disso, possuem baixa capacidade de suporte, baixa resistência ao cisalhamento, alta compressibilidade e baixa

permeabilidade. Com relação ao comportamento, esse tipo de solo pode apresentar grandes deformações com o passar do tempo quando submetido à variação de tensões efetivas ( $\Delta\sigma'$ ), assim, segundo Kempfert e Gebreselassie (2006), esse solo se caracteriza pela capacidade de suportar somente o peso de sobrecarga do solo. Isso tudo pode acarretar em recalques inadmissíveis dependendo do tipo da construção, Por conta da baixa permeabilidade, a dissipação do excesso de poropressão gerada pelo carregamento é lenta, fazendo com que esses recalques e movimentações ocorram em um longo período de tempo (FILHO, 2017).

Segundo Póvoa (2016), construções nesses locais com solos moles se tornam um desafio para os engenheiros geotécnicos, uma vez que a previsão da magnitude e velocidade dos recalques e a estimativa da resistência estão limitadas à capacidade de se identificar os parâmetros dos solos representativos da condição real de campo.

Os depósitos de solos moles são bastante comuns no Brasil, principalmente nas baixadas litorâneas. Massad (2009), citado por Oliveira (2018), aborda sobre os famosos “edifícios tortos” na orla de Santos (SP) construídos na década de cinquenta e que passaram a ter grandes problemas de recalques diferenciais e grandes inclinações entre a base e o topo da edificação. Isso porque o solo da baixada santista apresenta depósitos de argilas marinhas entre 20 e 40m de profundidade, havendo uma camada mais resistente logo abaixo disto. Desse modo, para as edificações altas seria necessário adotar sistemas de fundação profunda. Porém, os engenheiros da época optaram por utilizar fundações rasas (OLIVEIRA, 2018). O estudo de Póvoa (2016) destaca os problemas de manifestações patológicas ocasionadas por recalques na região da baixada em Macaé (RJ), nesta região há um extenso depósito de solo mole. Com isso, se observa patologias nas construções como trincas, desnível e ruptura de elementos de ligação.

De acordo com Pinto (2006), os critérios de classificação de solo para o definir como mole são:

**1. Índice de consistência (IC) < 0,5:**

$$IC = \frac{LL - w}{LL - LP} \quad (\text{Equação 6})$$

Em que,

LL é o Limite de Liquidez;

w é o teor de umidade;

LP é o Limite de Plasticidade.

Segundo Pinto (2006), o IC é especialmente representativo do comportamento de solos sedimentares. Porém, o autor faz a ressalva que o IC não tem significado quando aplicado a solos não saturados, pois estes podem apresentar elevado índice de vazios, baixa resistência e baixa umidade, o que indicaria um IC alto. A Tabela 3 apresenta a classificação adotada conforme o índice de consistência e é aplicável para solos remoldados e saturados.

Tabela 3 – Consistência da argila em função do índice de consistência (PINTO, 2006).

Consistência	Índice de consistência
mole	< 0,5
média	0,5 a 0,75
rija	0,75 a 1
dura	> 1

## 2. Número de golpes $N_{SPT} \leq 5$ :

A sondagem de simples reconhecimento com SPT determina o índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ). A norma responsável por padronizar a sondagem SPT no Brasil é a ABNT NBR 6484:2001. A princípio, segundo essa norma, a sondagem SPT é a perfuração e cravação dinâmica de amostrador-padrão, a cada metro, resultando na determinação do tipo de solo e de um índice de resistência, bem como da observação do nível do lençol freático. Dessa forma, baseia-se no número de golpes aplicados necessários para cravar 30 cm do amostrador-padrão, após 15 cm iniciais (PINTO, 2006). A Tabela 4 apresenta a classificação dos solos argilosos.

Tabela 4 – Consistência da argila em função do  $N_{SPT}$  (Modificado – ABNT NBR 6484:2001).

Solo	$N_{SPT}$	Consistência da argila
Argilas e siltes argilosos	$\leq 2$	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média (o)
	11 a 19	Rija (o)
	> 19	Dura (o)

## 3. Resistência à compressão simples $\leq 50$ kPa:

A consistência das argilas pode ser quantificada por meio de um ensaio de compressão simples, a resistência à compressão simples é a carga que leva o corpo de prova à ruptura, dividida pela área da seção transversal desse corpo (PINTO,2006). A Tabela 5 apresenta a consistência da argila em função da resistência à compressão simples.



Tabela 5 – Consistência da argila em função da resistência à compressão simples (PINTO, 2006).

Consistência	Resistência, em kPa
muito mole	< 25
mole	25 a 50
média	50 a 100
rija	100 a 200
muito rija	200 a 400
dura	> 400

### 2.1.7.1 Uso de radier estaqueado em solos moles

Em construções sobre solos moles, surgem dúvidas acerca do comportamento real da construção devido à variabilidade do perfil geotécnico e às dificuldades na previsão acurada da dissipação do excesso de poropressão como também dos deslocamentos que ocorrem na camada de argila (FILHO, 2017). Sendo assim, a utilização de sistema de fundação em radier estaqueado vem se tornando uma boa alternativa para determinados casos.

A adoção do sistema de fundação em radier estaqueado é mais indicado em solos com predominância de argilas relativamente rígidas, areias densas e perfis estratificados sem camadas moles abaixo do nível da ponta da estaca (POULOS & DAVIS, 1980).

Nos estudos de Cunha *et al.* (2000) e Sales (2000) voltados ao comportamento do radier estaqueado no solo poroso de Brasília, os autores apontaram que esse sistema de fundação é uma boa solução para problemas de fundações com a ressalva de que não se pode utilizá-lo em todas as situações.

Em solos contendo argilas tropicais, como é encontrado em solos da região de Uberlândia, os estudos de Cunha *et al.* (2004) e Ayala (2013) constataram que pode-se usar o sistema de fundação em radier estaqueado com o comportamento adequado de carga e recalques para redução dos custos da fundação, principalmente para pequenas construções.

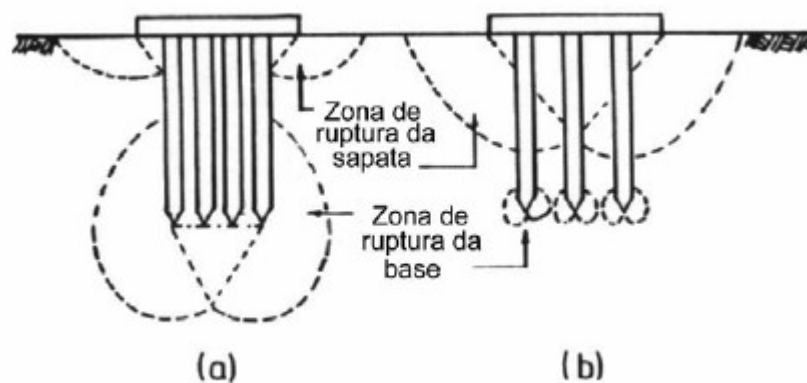
Os sistemas em radier estaqueado não externam importância em solos argilosos para muitos pesquisadores, conforme foi observado por Lee *et al.* (2010). Isso devido à associação com recalques excessivos e capacidades de suportes muito baixas. Já para Balakumar e Anirudhan (2011), citados por Rincon (2016), a utilização de radier estaqueado se torna melhor em depósitos de solo com presença de argilas sobreadensadas e em edifícios altos em que o radier se aprofunda, aliviando as condições de tensão nas bordas e, portanto, nos recalques.

## 2.2 Breve histórico de radier estaqueado

Segundo Teixeira (1996), a técnica de emprego do radier estaqueado foi elaborada por Zeevaert (1957). Este era engenheiro e professor de mecânica dos solos e fundações da Universidade do México. E foi numa consultoria ao problema de fundação do edifício “La Azteca”, construído na Cidade do México, num local onde há depósitos de argila altamente compressíveis, que Zeevaert desenvolveu a técnica do sistema de fundação em radier estaqueado. Ele utilizou um determinado número de estacas associada a uma fundação rasa, com o objetivo de reduzir os recalques até um valor desejado. Em seus estudos para o projeto de fundação do edifício “La Azteca”, Zeevaert notou a contribuição tanto das estacas quanto da fundação rasa na capacidade de carga do sistema de fundação e, disse que os recalques observados eram cerca da metade da estimativa de recalque se caso tivesse a mesma fundação sem estacas.

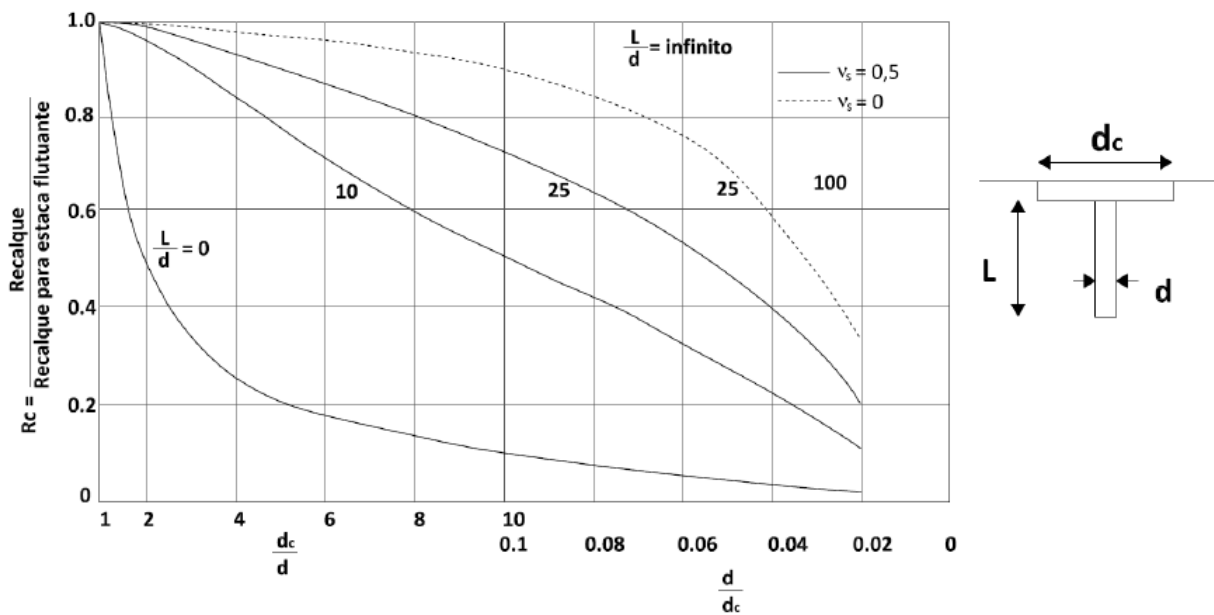
Um dos primeiros estudos teóricos a considerar a contribuição do bloco apoiado no solo superficial em um grupo de estacas foi o de Kishida & Meyerhof (1965). Estes, a partir da análise de grupo de estacas em areais, sugeriram dois modelos de ruptura para uma radier estaqueado. O primeiro modelo (Figura 6.a) considera que, para estacas com espaçamento elevado, a capacidade de carga da fundação seria a soma da capacidade de carga do radier com a do grupo de estacas, levando-se em conta a sobrecarga provocada pelo radier ao nível da ponta das estacas. E o segundo modelo (Figura 6.b) considera que, para estacas pouco espaçadas, ocorreria uma tendência de ruptura de todas as estacas em conjunto, como se fosse uma estaca única equivalente. Phung (1993) representou esses dois modelos de ruptura de Kishida & Meyerhof (1965) através da Figura 6.

Figura 6 – Modelos de ruptura de um radier estaqueado (Modificado – PHUNG, 1993).



Em relação ao comportamento carga x recalque de uma fundação com a presença de um elemento superficial associado a uma estaca, o primeiro trabalho teórico pode ser concedido a Poulos (1968b), que considerou a interação estaca-bloco para uma estaca isolada sob um radier circular em contato com o solo (Figura 7).

Figura 7 – Efeito do contato no recalque de uma estaca isolada (POULOS, 1968b *apud* GARCIA, 2015).



Poulos (1968b) considerou o solo como um semiespaço elástico e o radier, coroando a estaca, como um elemento rígido. Identificando-se por “L” o comprimento da estaca; “d” o diâmetro da estaca e  $d_c$  o diâmetro do radier circular em contato. Verifica-se, pela Figura 7, que quanto menor o comprimento da estaca em relação ao seu diâmetro ( $L/d$ ), maior a influência do contato, reduzindo-se os recalques. Além disso, outra observação é que para estacas curtas, com relação  $L/d < 10$ , não se pode desprezar a existência de contato.

O estudo de Akinmusuru (1973) tem o seu valor histórico, pois, embora alguns autores já haviam realizado testes com grupo de estacas com e sem o contato do bloco, acredita-se que foi o primeiro a analisar num mesmo solo o comportamento de sapata isolada, estaca isolada e grupo de estacas com e sem o contato do bloco com a superfície, com a finalidade de se obter a parcela de contribuição da interação bloco-estacas. Akinmusuru (1973) realizou uma série de testes em laboratório com modelos reduzidos de sapatas estaqueadas em areais. E concluiu que a capacidade de carga de uma sapata estaqueada é superior à soma algébrica da capacidade de

carga da sapata e do grupo de estacas, e expressou, essa inter-relação do sistema de fundação composta de sapatas com estacas, pela equação a seguir:

$$Q_t = \alpha \cdot Q_g + \beta \cdot Q_c \quad (\text{Equação 7})$$

Em que,

$Q_t$  é a capacidade de carga da sapata estaqueada;

$Q_g$  é a capacidade de carga do grupo de estacas;

$Q_c$  é a capacidade de carga da sapata isolada;

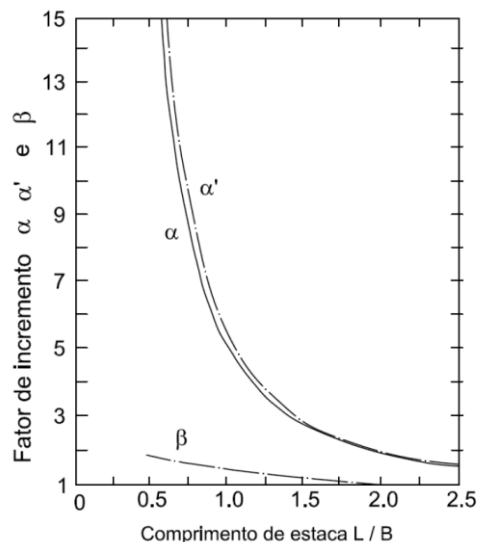
$\alpha$  é o fator de incremento de capacidade de carga do grupo devido à interação;

$\beta$  é o fator de incremento de capacidade de carga da sapata devido à presença do grupo de estacas.

Os testes de Akinmusuru (1973) apontaram que a contribuição do bloco em contato com o solo é função de seu tamanho e do comprimento das estacas. Porém, de uma forma geral, a parcela de capacidade de carga das estacas ( $Q_g$ ) é a mais influenciada pela interação bloco-solo-estacas, ou seja,  $\alpha \gg \beta$  como é mostrado na Figura 8. Por isso, pelo fato de  $\alpha \gg \beta$ , sugere-se, considerando  $\beta = 1$ , a equação simplificada apresentada na Equação 8, sendo  $\alpha'$  um outro fator de incremento de capacidade de carga do grupo devido à interação.

$$Q_t = \alpha' \cdot Q_g + Q_c \quad (\text{Equação 8})$$

Figura 8 – Fatores de incremento na capacidade de carga das estacas e do bloco devido à interação bloco-estacas (Modificado – Akinmusuru, 1980).



### 2.3 Efeito do contato entre radier e o solo em fundações estacadas

O comportamento dos elementos verticais (estacas) é influenciado pelo elemento horizontal (radier) que coroa os elementos de fundação profunda, caso esse radier esteja em contato com o solo. Segundo Garcia (2015), o radier passa a exercer em conjunto com as estacas tensões sobre o solo, compartilhando com as estacas a absorção de tensões. Além disso, com o radier em contato com o solo, há maior interação entre os elementos da fundação (radier + estacas), gerando por parte do radier maior capacidade de suporte e prevenção de recalques. Com a contribuição do contato bloco-solo (radier em contato com o solo), tem-se uma ruptura do tipo “bloco”, isto é, o sistema formado por radier, estacas e solo formam um único conjunto ou “bloco” (RANDOLPH, 1994). Esse tipo de ruptura em “bloco”, segundo Garcia (2015), é proveitoso por supor que haja um fator de segurança maior do que aos mesmos tipos de fundação quando separadamente analisados. Se tratando de radier estacado, é viável obter maior capacidade de carga e simultaneamente se ter recalques menores através da observação do comportamento carga x recalque, dependendo da concepção de projeto.

Além do efeito do contato bloco-solo, o espaçamento entre as estacas também exerce influência significativa no comportamento do radier estacado. Neste trabalho, o espaçamento entre estacas foi sendo variado a partir do aumento no número de estacas inseridas no sistema de fundação. Com isso, há uma influência em relação ao efeito de contato pelo fato de que com mais estacas se reduz a área líquida (área total do radier subtraído da área das estacas) do radier em contato com o solo e simultaneamente, influência do espaçamento entre estacas o qual foi sendo variado caso a caso.

A distribuição de carga entre as estacas sob um radier estacado foi estudado por Mandolini *et al.* (2005), os autores constataram que as estacas de canto e de borda do radier absorvem mais carga à medida que diminui o espaçamento entre estacas (Figura 9). Já na contribuição do radier em um sistema de radier estacado, a tendência se mostra inversa, observando valores de quase 70% para espaçamentos de 12x o diâmetro da estaca (Figura 10).

Figura 9 – Distribuição de cargas absorvidas entre estacas (MANDOLINI *et al.*, 2005 *apud* Garcia, 2015).

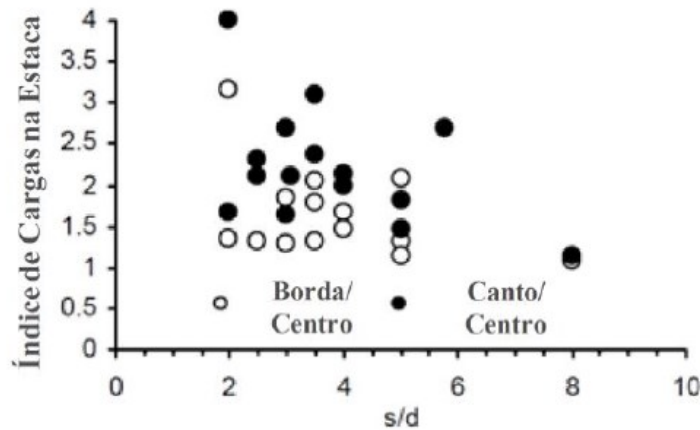
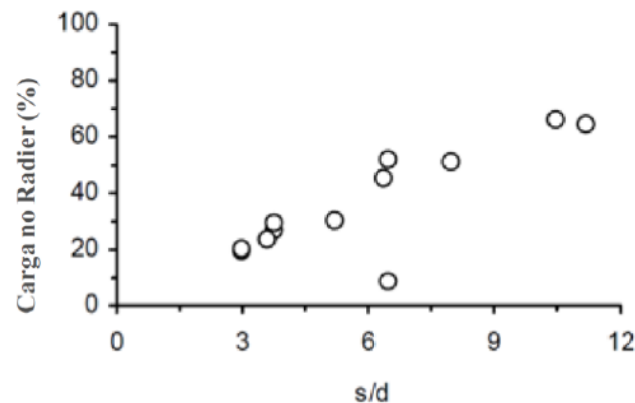


Figura 10 – Porcentagem de distribuição de cargas no radier em um radier estaqueado (MANDOLINI *et al.*, 2005 *apud* Garcia, 2015).



Com relação ao comportamento dos radiers estaqueados quanto a previsão dos recalques, Viggiani *et al.* (2012) consideraram dois grupos para uma melhor estimativa desses recalques: os “pequenos” e os “grandes” radiers estaqueados, ambos os grupos estão descritos em seguida: Os “pequenos” radiers estaqueados, segundo esses autores, são aqueles em que o radier isolado - sem estaca (s) não apresenta a capacidade de carga necessária para suportar a carga total com o adequado fator de segurança. Desse modo, a inserção de estacas é realizada a fim de aumentar a capacidade de carga do conjunto e atingir o fator de segurança adequado. Além disso, as dimensões do radier são da ordem de 5 a 15m e obedecem à relação  $B/L < 1$ , onde L é o comprimento das estacas.

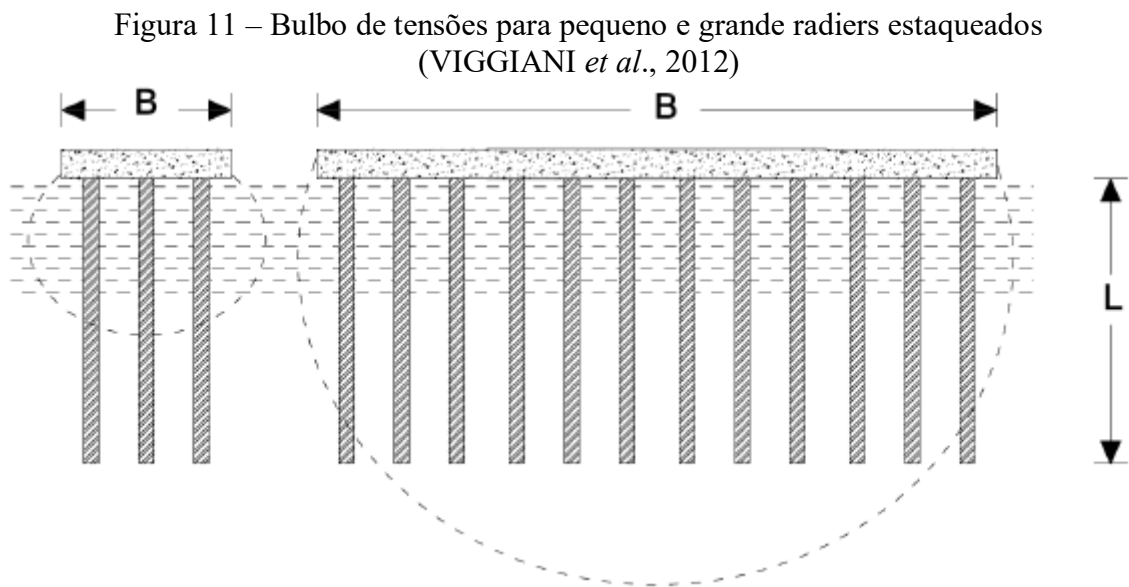
Os “grandes” radiers estaqueados, por sua vez, são aqueles em que o radier isolado – sem estaca (s) apresenta a capacidade de carga suficiente para suportar a carga total com uma margem adequada no fator de segurança. Desse modo, a inserção de estacas é feita a fim de reduzir os

recalques. Além disso, tem-se a relação  $B/L > 1$ , pois a largura do radier (B) é relativamente grande em relação ao comprimento das estacas.

Com a consideração de dois grupos de radier estaqueados, os “pequenos” e os “grandes”, essa diferença de conceitos será importante na análise de resultados deste trabalho e pode sinalizar qual a abordagem de projeto seria mais adequada.

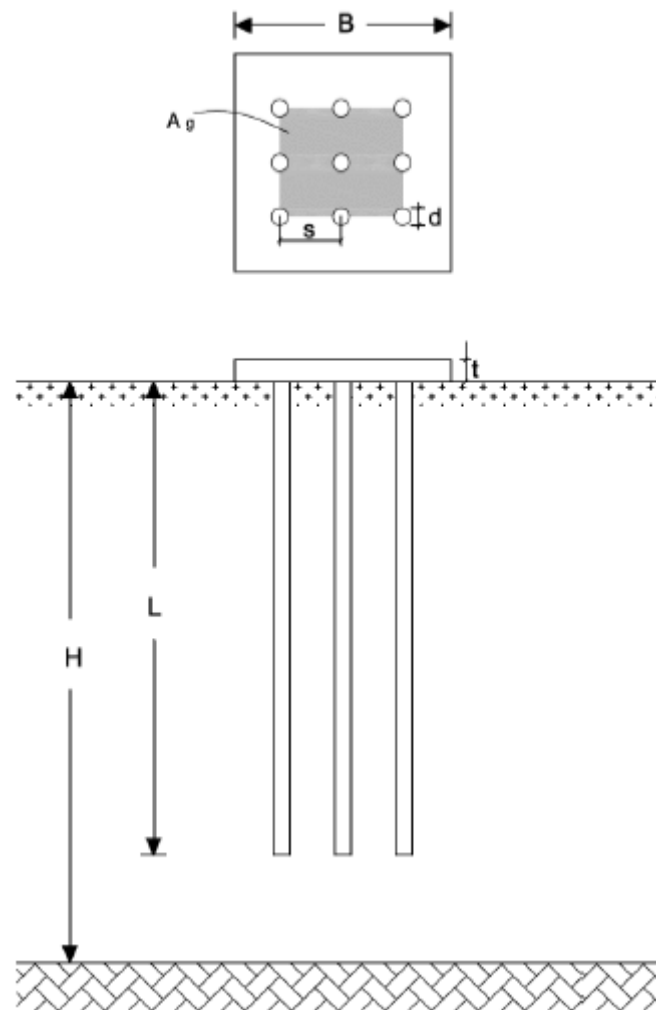
### 2.3.1 Bulbo de tensões em radier estaqueado

O bulbo de tensões para radiers estaqueados varia de acordo com as características geométricas do elemento horizontal (radier) e dos elementos verticais (estacas), conforme é apresentado na Figura 11. Segundo Garcia (2015), a influência do bulbo de tensões varia de acordo com a área em planta que o radier estaqueado possui em contato com o solo e sendo assim, a área de influência exerce influência no seu comportamento. Para os casos de pequenos radiers estaqueados, o bulbo de tensões fica compreendido ao longo do comprimento das estacas sob o radier. Já para os casos de grandes radiers estaqueados, o bulbo de tensões excede o comprimento das estacas, dissipando as tensões em camadas mais profundas do maciço.



A Figura 12 apresenta uma situação esquemática de um radier considerado pequeno devido a sua proporção em relação as dimensões geométricas.

Figura 12 – Situação esquemática de um pequeno radier estaqueado



Os parâmetros apresentados na figura acima exercem influência no desempenho do radier estaqueado. Esses parâmetros são:

- B – maior largura do radier;
- $A_G$  – área de influência;
- s – espaçamento entre estacas;
- d – diâmetro da estaca;
- t – espessura do radier;
- H – altura da camada de solo;
- L – comprimento das estacas.

A área de influência ( $A_G$ ) varia em função do número de estacas que integram o radier. Desse modo, segundo Viggiani *et al.* (2012), a proporcionalidade entre  $A_G/A_R$  tende a 1, onde  $A_R$  é a área total do radier, no caso,  $A_R = B \cdot B$ . A Equação 9 proposta pelos mesmos autores determina a área de influência.



$$A_G = [(\sqrt{n - 1}) * s]^2 \quad (\text{Equação 9})$$

Em que,

$n$  é o número de estacas sob o radier;

$s$  é o espaçamento entre estacas.

Segundo a divisão realizada por Viggiani *et al.* (2012), os raders estaqueados deste trabalho são considerados “grandes”, isto é,  $B/L > 1$ .

## 2.4 Concepção e projeto de radier estaqueado

Nos projetos convencionais de fundações profundas e grupos de estacas, a interação bloco-solo não é levada em conta entre o bloco de coroamento e o solo. Assim, o dimensionamento considera apenas a capacidade de carga das estacas (ponta e fuste) e despreza a contribuição da capacidade de carga ou da segurança no sistema por parte do elemento estrutural superficial, o qual é o elemento que coroa as estacas. Portanto, os esforços da superestrutura são transferidos ao solo somente pelas estacas. Contudo, o sistema de fundação em radier estaqueado considera que as cargas são absorvidas tanto pelo radier como pelas estacas. A norma brasileira não apresenta uma definição concreta e consensual acerca do termo radier estaqueado, porém aceita o projeto desse tipo de fundação “não convencional”.

Basicamente, o sistema de fundação em radier estaqueado é a associação de elementos de uma fundação rasa (sapata, radier ou bloco) com fundação profunda (estacas). Essa associação tem levado a comunidade técnico-científica a estudos mais abrangentes sobre esse sistema de fundação, considerando o efeito de contato bloco-solo no comportamento desse sistema. Em radier estaqueado, o mecanismo de transferência de carga envolve uma interação complexa entre os elementos componentes do sistema, radier-radier (caso se tenha mais de um radier na fundação), radier-estaca, radier-solo, estaca-estaca, estaca-solo e fuste das estacas-ponta (Figura 13). Segundo Cordeiro (2007), a transferência de cargas estruturais ao solo se faz de três modos: pela base do elemento horizontal (radier), assim como nas fundações superficiais, e também ao longo do fuste e da ponta do elemento vertical, tal como em fundações profundas. Ao se projetar um radier estaqueado, busca-se determinar a carga de trabalho, recalques totais e diferenciais para o sistema como um todo e não apenas para uma estaca isolada, dado que o efeito de grupo pode compensar possíveis anomalias em estacas isoladas. Isso é outra diferença em relação ao projeto convencional de bloco de estacas. Segundo Sousa (2003), no

dimensionamento de bloco de estacas e radier estaqueado, as principais diferenças entre as duas metodologias de cálculo de fundações estaqueadas são as seguintes:

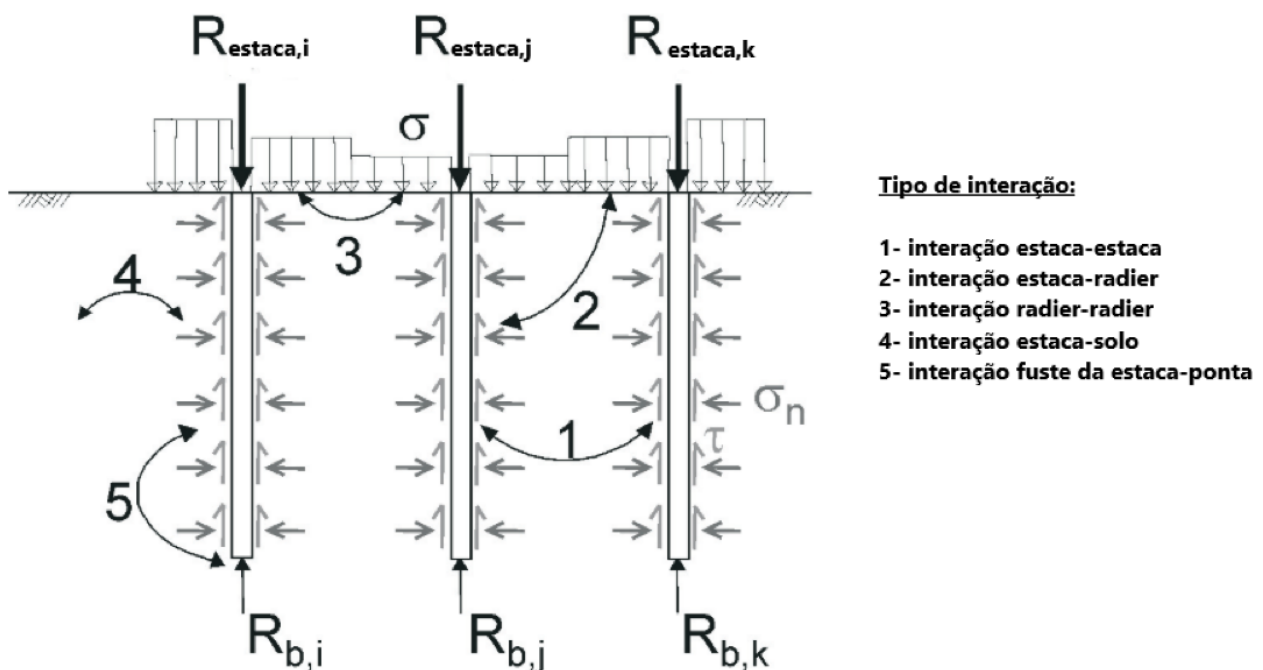
Bloco de estacas:

- Toda carga suportada apenas pelas estacas;
- Bloco considerado como rígido;
- Despreza-se o contato bloco-solo;
- Considera apenas as interações estaca-estaca.

Radier estaqueado:

- Considera-se o contato bloco-solo;
- Considera-se a rigidez real do bloco;
- Rigidez das estacas determinada em função do perfil do solo;
- Considera-se os tipos de interação (por exemplo, estaca-estaca, estaca-solo, solo-estaca e solo-solo).

Figura 13 – Interações solo-estrutura entre radiers, estacas e subsolo  
(Modificado - KATZENBACH *et al.*, 2005).



Segundo Poulos (2000, 2001b), como em qualquer outro sistema de fundação, o projeto de um radier estaqueado deve levar em consideração os seguintes itens:

- Capacidade de carga geotécnica última para cargas vertical, lateral e de momento;

- Recalque máximo admissível e rigidez;
- Recalque diferencial máximo admissível e rotações angulares;
- Esforços de cisalhamento e flexão para o projeto estrutural do radier;
- Cargas e momentos nas estacas, para o projeto estrutural destas.

Em grande parte da literatura disponível, os métodos desenvolvidos para radier estaqueado deram ênfase na capacidade de carga e recalques sob cargas verticais. Apesar destes serem aspectos críticos, outras questões devem ser abordadas. Em alguns casos, por exemplo, no projeto estrutural das estacas, deve-se considerar os esforços provenientes dos momentos provocados pela ação do vento. (POULOS, 2001).

Segundo Mandolini (2003), com relação a transferência de carga, tendo-se uma carga estrutural vertical  $Q_{PR}$ , o radier irá distribuir essa força para solo (força de reação do radier -  $Q_R$ ) e para as  $n$  estacas componentes do radier estaqueado (força de reação do grupo de estacas -  $Q_{PG}$ ). Assim sendo, tem-se que:

$$Q_{PR} = Q_R + Q_{PG} = Q_R + \sum_{i=1}^n Q_{pile,i} \quad (\text{Equação 10})$$

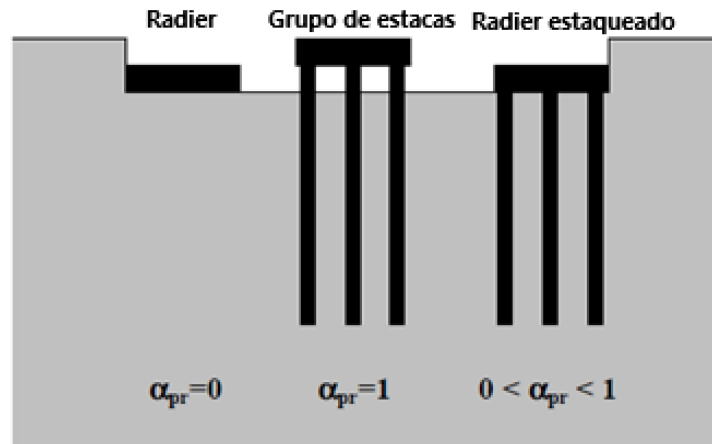
Em que,  $Q_{pile,i}$  é a capacidade de carga de cada estaca  $i$ .

A partir da equação acima, tem-se a definição do coeficiente  $\alpha_{pr}$ , o qual representa a distribuição de cargas entre o bloco e as estacas. O coeficiente  $\alpha_{pr}$  é definido por:

$$\alpha_{pr} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{pile,i}}{Q_{PR}} \quad (\text{Equação 11})$$

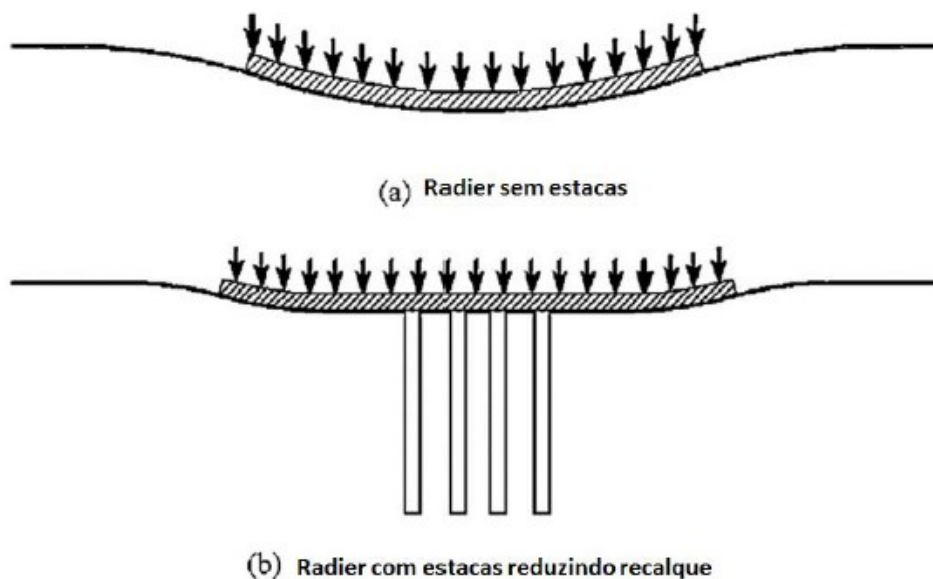
Esse coeficiente indica o compartilhamento de carga entre as estacas e o radier. Sendo que  $\alpha_{pr} = 0$  significa uma fundação sem estacas e rasa. Já para  $\alpha_{pr} = 1$  significa uma fundação formada por radier e estacas, porém sem levar em conta o contato do solo com o radier. É como se o radier estivesse “flutuando”. Por último, se o coeficiente estiver entre 0 e 1, ou seja,  $0 < \alpha_{pr} < 1$ , representa que se trata de uma fundação composta por um radier estaqueado. A Figura 14 mostra um esquema do que foi dito acima.

Figura 14 – Tipos de sistemas de fundação e coeficientes  $\alpha_{pr}$ . (Modificado - Mandolini, 2003).



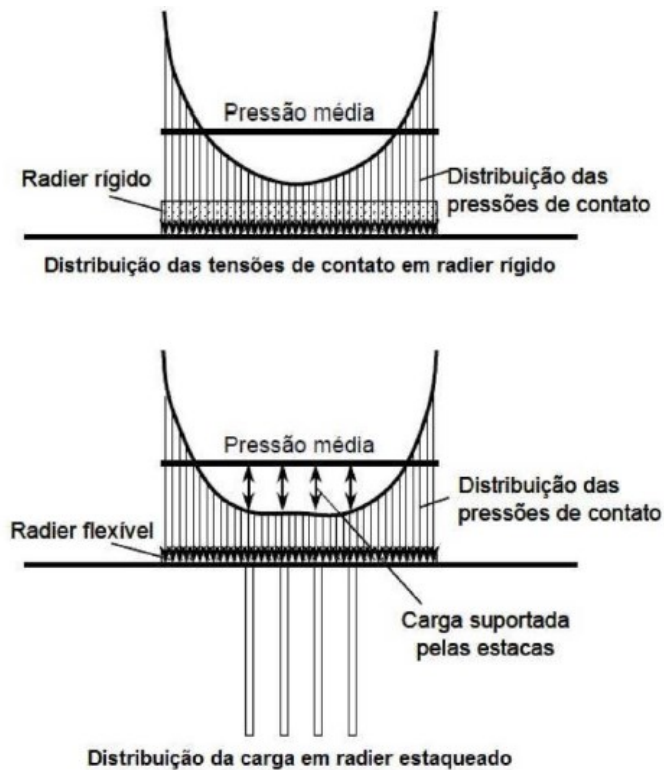
Conforme Randolph (1994), uma das principais razões para se adotar como fundação o radier estaqueado é o fato de se reduzir o recalque. A Figura 15 apresenta um esquema mostrando o princípio que permite ao projeto de estacas reduzir os recalques diferenciais. Com relação a esse esquema, considerando-se que a carga estrutural é relativamente uniforme e distribuída sobre a área do radier, e tendo-se conhecimento da tendência de recalques maiores na região central do radier isolado, nota-se que a inserção de poucas estacas na região central da fundação (radier) irá provavelmente reduzir o recalque na área central e minimizar os recalques diferenciais. Porém, Wong *et al.* (2000), citados por Garcia (2015), advertem quanto a inserção de poucas estacas sob o radier. Isto porque pode-se haver problemas de elevados momentos de flexão, fissuras no radier e uma concentração de esforços axiais no topo das estacas.

Figura 15 – Estacas na região central do radier para reduzir os recalques diferenciais (Modificado - RANDOLPH, 1994).



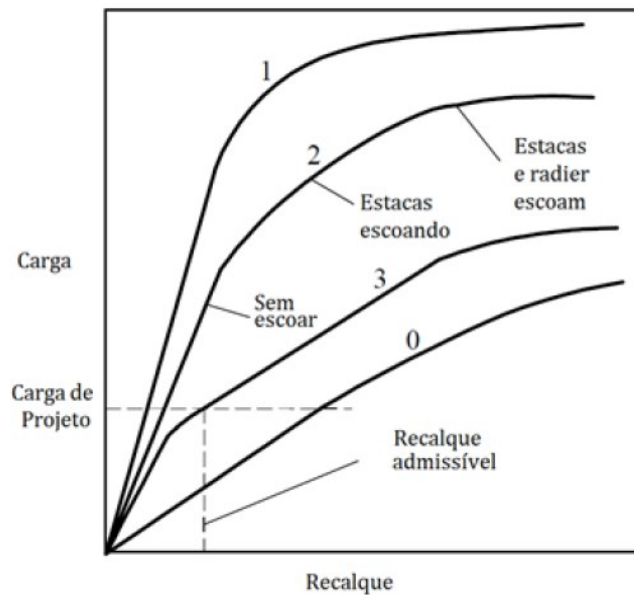
As estacas estrategicamente posicionadas na região central devem ser projetadas para absorverem de 50 a 70% da tensão média aplicada em um radier tido como rígido. Essa inserção de estacas, faz com que as tensões de contato de um radier flexível passem a se comportar como a de um radier rígido, resultando em recalques diferenciais mínimos (Figura 16).

Figura 16 – Projeto esquemático da abordagem com estacas redutoras de recalque (Modificado - RANDOLPH, 1994).



Portanto, em um projeto de radier estaqueado deve-se considerar vários fatores, sejam eles geotécnicos ou estruturais, pois o radier deve ser devidamente dimensionado para cumprir a função de distribuir de forma adequada as cargas para as estacas. E estas devem ser dimensionadas e posicionadas estrategicamente de forma a cooperar no desempenho estrutural do radier e reduzir os recalques médios e diferenciais. Assim, a escolha da filosofia de projeto a ser adotada se torna importante, pois deve-se visar o melhor desempenho do radier estaqueado tanto em aspectos estruturais e geotécnicos quanto em aspectos econômicos. A Figura 17 apresenta um gráfico com curvas de carga x recalque para diferentes filosofias de projeto de um radier estaqueado.

Figura 17 – Curvas de carga x recalque para radiers estaqueados com diferentes filosofias de projeto (POULOS, 2001).



No gráfico acima, a curva 0 se trata de um radier simples com recalque excessivo. A curva 1 mostra um radier estaqueado dimensionado para um fator de segurança convencional. A curva 2 mostra um radier estaqueado dimensionado para um fator de segurança mais baixo. Nessa curva nota-se um trecho com comportamento elástico (sem escoar), outro trecho com as estacas entrando em estado plástico (estacas escoando) e um trecho com as estacas e radier em fase plástica (estacas e radier escoam). E por último, a curva 3 mostra um radier estaqueado dimensionado com total capacidade de utilização (ideal). Nessa curva, o gráfico destaca o ponto da carga de projeto para o recalque admissível.

Segundo Poulos (2001), a rigidez do sistema de fundação composta por radier estaqueado, pode ser estimada com a seguinte fórmula:

$$K_{pr} = \frac{K_p + K_r(1 - \alpha_{cp})}{1 - \alpha_{cp}^2 K_r K_p} \quad (\text{Equação 12})$$

Em que,

$K_{pr}$  é a rigidez;

$K_p$  é a rigidez do grupo de estacas;

$K_r$  é a rigidez de somente do radier;

$\alpha_{cp}$  é o coeficiente de interação entre o radier e as estacas.

Do carregamento total aplicado ao radier estaqueado, a proporção de carga suportada pelo radier (X) é dada por:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{K_r(1 - \alpha_{cp})}{K_p + K_r(1 - \alpha_{cp})} = X \quad (\text{Equação 13})$$

Em que,

$P_r$  é a carga suportada pelo radier;

$P_t$  é a carga total aplicada ao sistema de fundação.

O comportamento do radier estaqueado depende de vários fatores, porém cita-se como fatores principais: Número de estacas; Natureza do carregamento (carga distribuída x carga concentrada); Espessura do radier; Magnitude de carga aplicada.

#### 2.4.1 Etapas de projeto

Para um projeto racional de radier estaqueado, Poulos (2001) sugere que o projeto envolva três estágios:

- (a) Um estágio preliminar para avaliar a viabilidade do uso de um radier estaqueado, e o número de estacas necessárias para satisfazer os requisitos de projeto;
- (b) Um segundo estágio para avaliar onde as estacas seriam exigidas e as características gerais das estacas, como, por exemplo, a capacidade de carga;
- (c) Um estágio final detalhado para obter o número ótimo, o posicionamento e a configuração das estacas, e para calcular a distribuição detalhada dos recalques, momentos fletores e esforços cortantes no radier e, cargas e momentos nas estacas.

O primeiro e o segundo estágio envolvem cálculos relativamente simples, os quais podem ser efetuados sem o uso de uma ferramenta computacional complexa. O estágio final detalhado precisará, geralmente, do uso de programas computacionais adequados que considerem, de uma forma racional, a interação entre solo, radier e estacas. Os efeitos da superestrutura também podem ser necessários na consideração.

## 2.4.2 Filosofias de Projeto

Randolph (1994) definiu três filosofias de projetos para radiers estaqueados, os quais são apresentados a seguir:

**(a) Abordagem convencional**

As estacas são dimensionadas para suportar a maior parte do carregamento. Sendo o radier absorvendo uma pequena parcela na capacidade máxima total;

**(b) “Creep Piling” ou critério de mobilização parcial ou total das estacas**

As estacas são projetadas para operarem perto do seu estado último, a partir do qual começam a sofrer deformações plásticas, “creep”. A quantidade de estacas é calculada de tal forma que a pressão no solo, sob o radier, não ultrapasse a pressão de pré-adensamento do solo;

**(c) Controle de recalques diferenciais**

As estacas são posicionadas de forma estratégica como mecanismo de prevenção de recalques.

## 2.5 Métodos de análise

Na literatura são encontrados vários métodos propostos por diferentes pesquisadores, os quais buscam desenvolver um método de concepção adequado em diversas abordagens no estudo do sistema de fundação em radier estaqueado (COLLANTES, 2017).

Segundo Neto (2013), nos vários métodos de dimensionamento que visam representar o comportamento do radier estaqueado, se tem desde métodos simplificados como correlações empíricas, ábacos de cálculo, métodos das fundações equivalentes e métodos baseados na teoria da elasticidade até aqueles baseados em Métodos Computacionais Aproximados, os quais o radier é representado por uma placa e as estacas por molas, e os Métodos Computacionais Rigorosos como o Método dos Elementos de Contorno (MEC) e o Método dos Elementos Finitos (MEF). Além destes, tem-se os métodos híbridos que são aqueles que combinam mais de um método de análise.

Neste trabalho, escolheu-se o uso da ferramenta computacional RS2, este *software* é baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). A Tabela 6 apresenta os métodos de cálculo, os quais estão subdivididos nas respectivas categorias.



Tabela 6 – Métodos de cálculo em radier estaqueado (Modificado - 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)	Butterfield & Banerjee (1971); Kuwabara (1989); El Mossalamy & Franke (1997); Sinha (1997).
	Método dos Elementos Finitos (MEF)*	Ottaviani (1975); Farias (1993); Zhuang <i>et al.</i> (1991); Lee (1993); Wang (1995); Katzenbach <i>et al.</i> (1998), dentre outros.
	Métodos Híbridos	Poulos (1994) – GARP; Russo (1998) – NAPRA.

\*Metodologia numérica implementada no programa RS2.

Os métodos de análise para prever o comportamento de um radier estaqueado são complexos devido ao grande número de fatores envolvidos na interação radier-solo-estacas (SALES, 2000). Conforme Poulos (2000) e Sales (2000), pode-se agrupar os principais métodos em duas categorias:

- Métodos Simplificados ou Preliminares;
- Métodos Detalhados ou Métodos Numéricos.

Além disso, de acordo com Poulos (2000), os métodos detalhados ou numéricos podem ser subdivididos em duas categorias: métodos computacionais aproximados ou métodos computacionais rigorosos.

### 2.5.1 Métodos Simplificados ou Preliminares

Os métodos simplificados se baseiam na verificação de viabilidade do uso de um sistema de fundação em radier estaqueado. Esses métodos se encaixam na definição de estágio preliminar, proposto por Poulos (1994b), para um projeto racional de um radier estaqueado. Assim, tem-se, por meio desses métodos, a estimativa das dimensões do radier e das estacas e do número de estacas que serão utilizadas. Segundo Bezerra (2003), a maior parte dos métodos presentes na literatura foram desenvolvidos apenas para carregamentos isolados, ou seja, considerou-se

somente a existência de cargas verticais ou horizontais ou de momento, mas nunca suas combinações. Os métodos simplificados apresentam certas limitações, conforme citado anteriormente, porém são bastante utilizados e as limitações superadas por aproximações e uso da superposição de efeitos em alguns casos.

Os métodos simplificados são classificados em:

- Correlações empíricas;
- Método das Fundações Equivalentes (Radier Equivalente, Tubulão Equivalente, Pórtico Equivalente);
- Método baseado na Teoria da Elasticidade;
- Método de “Suporte de Reação Constante”.

### **2.5.2 Métodos Detalhados ou Numéricos**

Os métodos detalhados representam melhor o desempenho e comportamento dos sistemas de fundação. Esses métodos foram desenvolvidos devido ao avanço dos métodos numéricos computacionais. Isso fez com que a análise do comportamento da fundação e do solo fosse mais fidedigno com a realidade. De acordo com Bezerra (2003), ainda há limitações como tempo de discretização e obtenção da solução, porém essas limitações já estão sendo superadas e em breve não serão consideradas como limitações.

Conforme citado anteriormente, os métodos detalhados podem ser enquadrados em duas categorias: métodos computacionais aproximados e métodos computacionais rigorosos. O primeiro são métodos resultantes de aproximações por modelagem do sistema, sendo o radier considerado como uma placa e as estacas como molas. O segundo, métodos computacionais rigorosos, são métodos complexos, dependentes de programas computacionais.

Os métodos computacionais rigorosos são classificados em:

- Método dos Elementos de Contorno (MEC);
- Método dos Elementos Finitos (MEF);
- Métodos híbridos ou mistos – combinação de mais de um método.

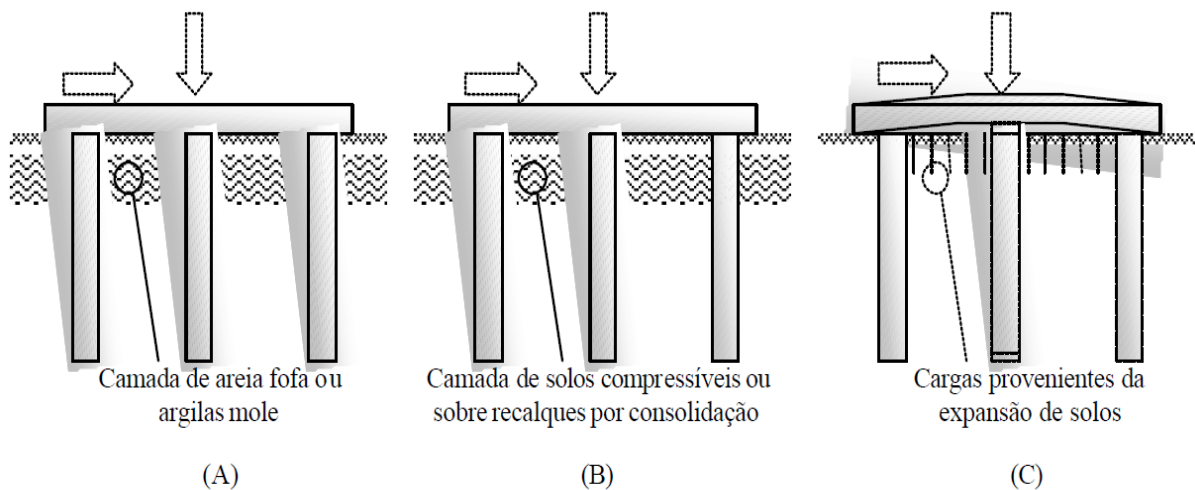
## **2.6 Aplicabilidade de radier estaqueado**

Segundo Neto (2013), “em toda fundação, existem fatores que influenciam na escolha do tipo de fundação a ponto de viabilizar ou não uma determinada alternativa”. O autor destaca que dentre os fatores mais relevantes estão: a capacidade de carga do radier; a capacidade de carga

axial e lateral das estacas; a presença de solos moles, expansivos e colapsíveis; a consideração do efeito de grupo; a interação entre estaca-estaca, estaca-solo, radier-estaca e radier-solo; a solicitação por carregamentos cíclicos; a heterogeneidade do solo; a presença de estacas com dimensões diferentes das previstas em projeto e estacas defeituosas, entre outros.

De acordo com Poulos (2001), a aplicação mais efetiva do sistema de fundação em radier estaqueado ocorre quando o radier pode suportar a capacidade de carga adequada, mas o recalque e/ou os recalques diferenciais, considerando somente o radier, não exceda valores admissíveis. O autor menciona ainda que perfis de solo com argilas relativamente rígidas e perfis com areias relativamente compactas se configuram como situação favorável ao uso do sistema de fundação em radier estaqueado. Em ambas as situações, de acordo com Poulos, o radier pode fornecer uma proporção significativa na capacidade de carga e na rigidez requerida do sistema, com as estacas contribuindo diretamente no desempenho da fundação. Poulos (2001) também destaca situações em que o uso do radier estaqueado não é favorável, como em perfis de solo contendo: argila mole ou areia fofa próximos à superfície, solos compressíveis ou sujeitos a recalques por consolidação e, solos expansivos. A Figura 18 ilustra algumas dessas situações desfavoráveis.

Figura 18 – Algumas situações desfavoráveis ao emprego de fundações em radier estaqueado (Bezerra, 2003).



Poulos (2011) menciona que solos argilosos moles não fornecem as condições ideais para o emprego do radier estaqueado. Porém, o autor cita uma possível solução para adequação ao solo fraco: escavação do terreno, antes ou depois da execução das estacas, a fim de causar um alívio nas tensões verticais do solo e impondo ao solo uma condição de pré-adensamento. Assim, as cargas subsequentes, impostas pelo radier, tendem a ocasionar menos recalques do

que a solução sem escavação do solo. Para esse tipo de solução, o autor utiliza o termo fundação em radier estaqueado compensada.

Segundo Sales *et al.* (2010), a concepção de fundações compensadas, frequentemente utilizada no passado para radiers compensados, pode ser extrapolada para radiers estaqueados. O termo “compensado” surgiu para as fundações onde a escavação prevista foi levada em consideração no projeto de fundação.

Poulos (2005) chama a atenção para as seguintes vantagens da utilização de radiers estaqueados compensados em argilas moles:

- A experiência de fundações compensadas incorre em menores recalques do que em fundações normais em radier estaqueado (sem escavação);
- As estacas recebem uma proporção significativamente menor de carga do que uma fundação não compensada, e, portanto, o radier pode ser mais efetivo;
- O recalque diferencial entre a fundação e o solo circundante é menor do que para radiers estaqueados não compensados. Para a capacidade de carga máxima das estacas, o adensamento do solo pode ser responsável pela perda do contato entre o solo e o radier, resultando na transferência de todo o carregamento para as estacas, possivelmente resultando em problemas arquitetônicos para o edifício.

Segundo Franke *et al.* (2000), mencionados por Bittencourt (2012), a escolha de um radier estaqueado é usualmente apropriada para edifícios com:

- Índice de esbelteza do edifício, relação entre a sua altura (H) e sua largura (B), maior ou igual a 4 e, portanto, sensível à inclinação;
- Elevadas pressões de contato no radier (média de 500 a 600 kPa) e grandes recalques;
- Excentricidade do carregamento da superestrutura;
- Fundação profunda com escavação superior a 10m por conta de ser fundações compensadas gerando pressões nas paredes;
- Estruturas adjacentes (edifícios, pontes, túneis, tubulações de esgoto, etc) próximas a fundação.

Segundo Maharaj e Gandhi (2004), mencionados por Castillo (2013), as vantagens do emprego de radier estaqueado seriam:

- Redução do recalque total e do recalque diferencial;
- Aumento da estabilidade global da estrutura;
- Redução do número de estacas comparado com o sistema convencional (grupo de estacas);
- Redução das tensões de flexão para o radier;

- Otimização do custo da fundação;
- Aumento da rigidez.

## 2.7 Otimização de radier estaqueado

A otimização, de um modo geral, é o processo de se buscar a melhor solução para um certo problema. Em fundações, seria o caso de buscar o melhor projeto, ou utilizar o menor número de estacas num sistema de fundações (LIMA, 2007).

O estudo realizado por Poulos (1994b) sobre o projeto do Edifício Akasaka, situado em São Paulo, Brasil, é um exemplo de otimização. No projeto do edifício estava previsto que haveria apenas sapatas isoladas sob cada pilar, porém, na sapata SP11, com 7,5 m x 5,5 m, a qual suportaria a carga do pilar com um fator de segurança de 1,57, o recalque previsto superior a 50 mm foi considerado inadmissível. Logo, se avaliou a possibilidade do uso de uma sapata estaqueada. Assim, afim de se reduzir esse recalque previsto optou-se pela inclusão de estacas. Poulos, em suas análises, adotou estacas de concreto pré-moldado, com 520 mm de diâmetro, 12,5 m de comprimento, e capacidade de carga individual de 2500 kN. Em seus estudos, o autor variou a quantidade de estacas, analisando o fator de segurança e o recalque do sistema, como está ilustrado na Tabela 7 com diferentes estratégias de projeto. Por fim, adotou-se um projeto final de uma sapata sobre 6 estacas, as quais seriam totalmente mobilizadas. Para esse projeto obteve-se um fator de segurança global (F.S.) da ordem de 2,25 e um recalque limitado a 30 mm. Com essas condições, foi previsto que as estacas suportariam 65% da carga e o radier 35%.

Tabela 7 - Ed. Akasaka – FS x Número de estacas (Modificado – POULOS, 1994b).

Estratégia de Projeto	Fator de Segurança (FS)		Número de estacas requerido
	p/ Estacas	Geral	
Estacas suportando toda a carga	2,5	4,1	23
Estacas com baixo fator de segurança	1,45	3,0	13
Estacas totalmente mobilizadas	1,0	2,5	8
Estacas totalmente mobilizadas e baixo FS global	1,0	2,0	4
Radier isolado (sem estacas)	-	1,57	0

Horikoshi e Randolph (1998), citados por Bittencourt (2012), destacam para a falta de desenvolvimento de projetos de radiers estaqueados que utilizem a diferença de recalques como um meio para a otimização dos sistemas de fundação.

Horikoshi e Randolph (1997) e Horikoshi e Randolph (1998), citados por Lima (2007), em suas pesquisas abordaram sobre otimização de radiers estaqueados e sugeriram alguns parâmetros para otimização:

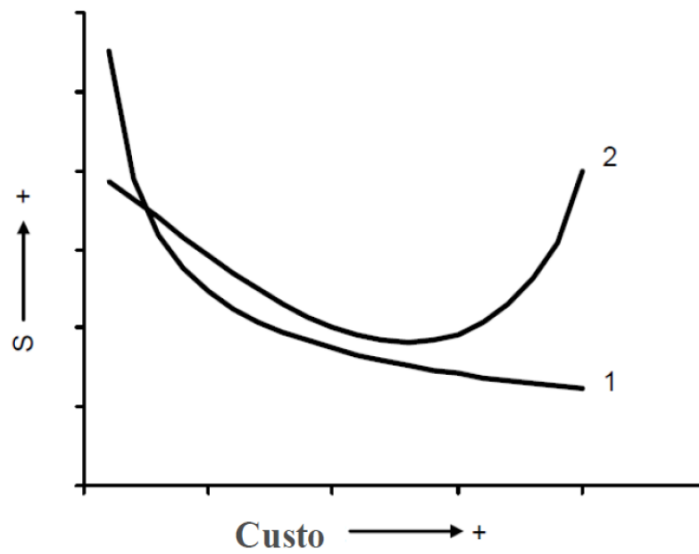
- As estacas devem ser distribuídas entre 16 a 25% da área central do radier;
- A rigidez do grupo de estacas ou do tubulão equivalente deve ser aproximadamente equivalente à rigidez do radier isolado;
- A capacidade de carga do grupo de estacas deve ser responsável por cerca de 40 a 70% da carga total de projeto, dependendo da razão de área do grupo de estacas e do módulo de Poisson do solo;
- Deve-se evitar ultrapassar uma mobilização das estacas superior a 80% de sua resistência última a fim de que não se aumentem os recalques diferenciais no radier.

Katzenbach (2012), citado por Castillo (2013), expõe que a otimização e sustentabilidade de projetos têm muita relevância, principalmente para edifícios altos onde há a necessidade de um maior projeto geotécnico de fundações, em que o material de construção empregado, o tempo de construção e energia consumida podem ser reduzidos dentro da construção civil e no tempo de serviço. O autor descreve o caso do Edifício Mirax Plaza, em Kiev, na Ucrânia, em que emprega a metodologia de otimização. Nesse caso foram projetados dois edifícios de 192 m que ao utilizar as abordagens de otimização avançadas e dispor dos efeitos positivos do radier estaqueado, o número de estacas foi reduzido para 120 com comprimentos de 40m, 64 estacas com comprimentos de 33m e altura do radier de 3m. Destaca-se que a otimização da fundação leva a uma diminuição considerável de recursos empregados, água, energia, tempo, etc. e obteve uma redução de custo de 3,3 milhões de US\$.

Segundo De Sanctis *et al.* (2002), o desempenho de uma fundação em radier estaqueado deve levar em conta a variação de custos em relação ao recalque (S), seja no tocante ao recalque absoluto ou ao recalque diferencial. Na Figura 19, as curvas indicam essa associação entre o valor do recalque em relação ao custo da fundação. Esse custo pode estar vinculado, por exemplo, ao aumento no número de estacas, no diâmetro destas ou na altura do radier. A redução do recalque (S), geralmente, implica em um aumento de custos. A curva 1, na Figura 19, representa os casos onde o recalque diminui conforme o aumento do custo e tende para um valor constante. Já a curva 2 representa os outros casos onde há um mínimo na curva ( $S_{\min}$ ) correspondente a um valor ótimo, onde mesmo havendo o aumento do custo da fundação ocorre

a tendência de aumento de  $S$ . Segundo os autores, nos casos em que se aplica o comportamento da curva 1, a melhor solução é atingir o valor máximo admissível ( $S_{adm}$ ), pois uma redução adicional da  $S$  resulta em aumento de custo ineficiente. Para os casos em que se aplica a curva 2, quando  $S_{adm}$  for menor que o  $S_{mín}$ , haverá duas soluções satisfatórias e, logicamente, o valor seria o localizado à esquerda do ponto de mínimo da curva 2, por conta do menor custo. Se a solução não corresponder as condições técnicas é necessário repensar o projeto original.

Figura 19 – Relação entre custo e recalque (Modificado - De Sanctis *et al.* 2002).



### 3 MATERIAL E MÉTODOS

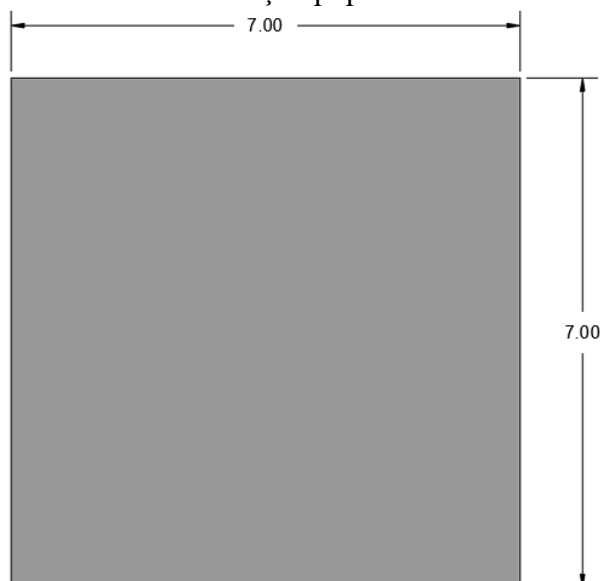
Neste capítulo serão apresentados os cenários de análise, o modelo de cálculo, assim como os parâmetros do solo utilizados para as análises numéricas e os parâmetros do concreto, material das estacas e dos radiers. Para analisar a otimização do projeto de fundações para o melhoramento do desempenho de construções populares se baseou numa análise simplificada por meio de um modelo numérico em elementos finitos, o programa computacional RS<sup>2</sup>, que permite simular o comportamento elastoplástico e não-linear do solo. Assim, pode-se analisar o comportamento das fundações em habitações populares, geralmente em radier, e como se dará esse comportamento com a utilização de estacas, constituindo, portanto, um sistema de fundação em radier estaqueado.

Para a utilização do *software* RS<sup>2</sup>, teve-se de fazer a calibração do modelo numérico para atingir resultados mais precisos. Após todos os parâmetros definidos, realizou-se a modelagem numérica e com os resultados tem-se posteriormente a análise.

#### 3.1 Definição dos cenários de análise

A definição dos cenários de análise levou em conta a simulação de uma construção popular com um sistema de fundação em radier isolado com 49m<sup>2</sup> (Figura 20). Para isso, adotou-se uma carga distribuída por área de 20kN/m<sup>2</sup> em virtude do carregamento vertical proveniente da construção. Além disso, por simplificação, também foi adotado a carga sendo distribuída em toda a área do sistema de fundação.

Figura 20 – Sistema de fundação em radier para simulação de uma construção popular.





Os casos de análise foram definidos em 4 (quatro), estes são:

- Radier isolado – sistema o qual pretende-se otimizar com a utilização de estacas;
- Radier estaqueado com 4 estacas;
- Radier estaqueado com 9 estacas;
- Radier estaqueado com 16 estacas.

Com isso, pode-se analisar o efeito do uso de estacas para a otimização da fundação. No entanto, teve-se de adotar uma forma de distribuição das estacas no radier estaqueado. Para isso, se utilizou da metodologia das áreas de influência para se fazer essa distribuição. A divisão em áreas de influência pode ser vista na Figura 21. A Tabela 8 apresenta o valor da área de influência das estacas para cada configuração do sistema de fundação em radier estaqueado.

Figura 21 – Divisão em áreas de influência.

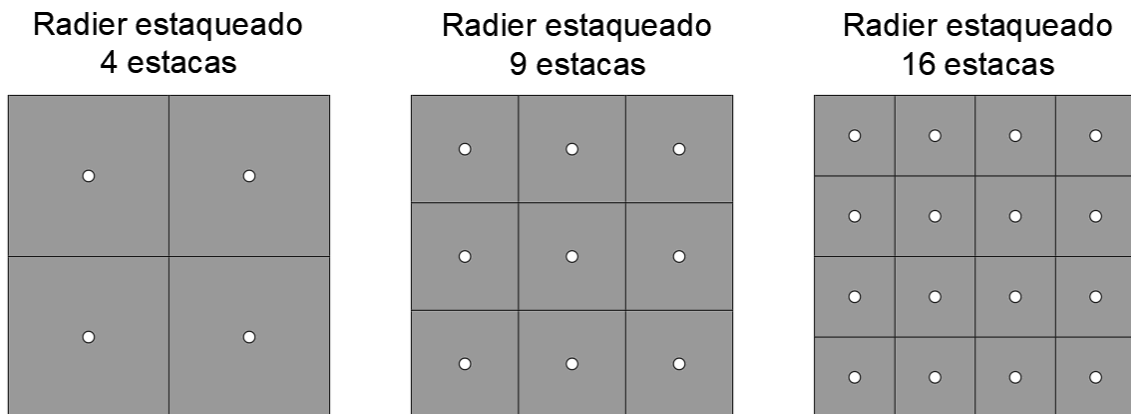


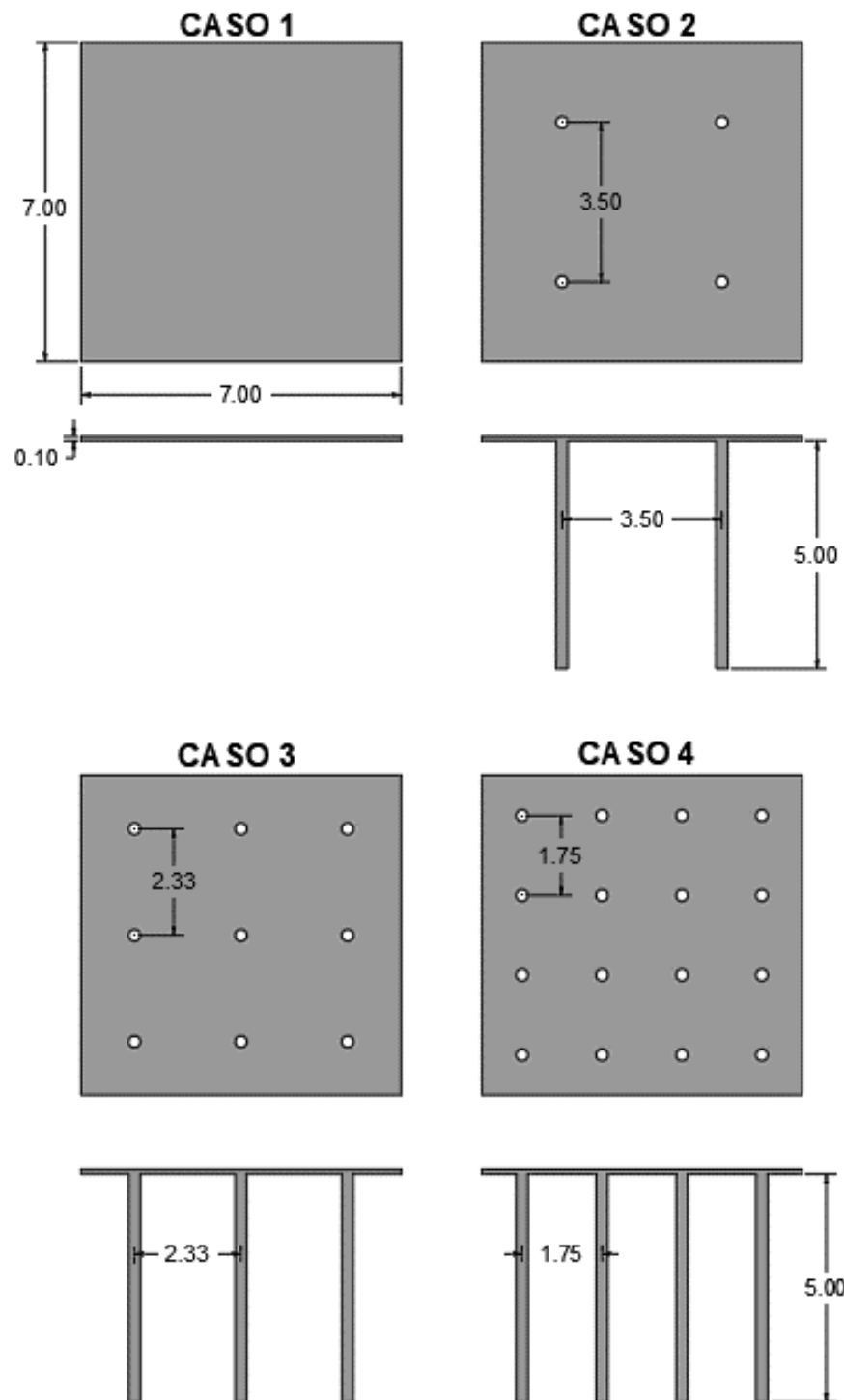
Tabela 8 – Áreas de influência.

<b>Radier estaqueado Número de estacas</b>	<b>Área de influência de cada estaca (m<sup>2</sup>)</b>
4	12,25
9	5,44
16	3,06

O radier utilizado como sistema de fundação teve sua altura (h) definida em 0,1m ou 10cm. As estacas utilizadas nos radiers estaqueados foram definidas com comprimento (L) de 5m e diâmetro (d) de 0,25m ou 25cm. Esta última dimensão geométrica foi definida por ser um diâmetro usual de estacas de fundações na região de Uberlândia-MG.

Com isso, a Figura 22 apresenta os casos de análise para as simulações realizadas no *software* RS<sup>2</sup>.

Figura 22 – Casos de Análise.



Nota-se que pela Figura 22 que o espaçamento entre as estacas (s) varia entre os casos de radier estaqueados. Logo, de acordo com o número de estacas inseridas, e seguindo a metodologia das áreas de influência, altera-se o espaçamento entre as estacas de forma que tanto em planta quanto em vista o espaçamento é o mesmo em um mesmo caso de análise. A Tabela 9 apresenta de forma organizada esses espaçamentos de acordo com o número de estacas.

Tabela 9 – Espaçamento entre estacas (s)

<b>Radier estaqueado</b> <b>Número de estacas</b>	<b>Espaçamento</b> <b>entre estacas (s)</b>
4	3,50m
9	2,33m
16	1,75m

### 3.2 Modelo numérico de cálculo

A ferramenta computacional RS<sup>2</sup> utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) como método de análise. Segundo Omeman (2012), o MEF é considerado a ferramenta mais exata comparada a outros métodos de análise. Além disso, ele acrescenta que o MEF leva em consideração o efeito dos fatores de interação, tais como estaca-estaca, estaca-radier, radier-radier e interações estaca-solo. Devido a isso, assim como Omeman (2012) adotou em sua pesquisa, escolheu-se o MEF como método de análise para se realizar a modelagem numérica da fundação e assim, estimar a relação carga x recalque e compartilhamento de carga entre as estacas e o elemento superficial do sistema de fundação nos casos de radier estaqueado. Essa simulação 2D reduz o tamanho do modelo estudado e permite, portanto, a vantagem de simplificar o problema.

Para o uso do RS<sup>2</sup>, foi utilizado o Modelo Mohr-Coulomb como modelo numérico constitutivo do solo utilizado. Pois este simula o comportamento elastoplástico e não-linear do solo, possibilitando se fazer as devidas análises numéricas. Para esse modelo é necessário determinar os seguintes valores do solo:

- Peso específico ( $\gamma$ );
- Ângulo de atrito ( $\phi$ );
- Coesão (c);
- Módulo de deformabilidade do solo ( $E_s$ );
- Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

Além das características do solo e do modelo adotado para esse material, tem de determinar as características das estacas e raders componentes do sistema de fundação e que são compostos por concreto. O modelo constitutivo adotado para esses materiais de comportamento frágil foi o Modelo Elástico-Linear. Neste é necessário determinar os seguintes valores para o concreto:

- Peso específico ( $\gamma_c$ );
- Módulo de Elasticidade ( $E_c$ );
- Coeficiente de Poisson ( $\nu_c$ ).

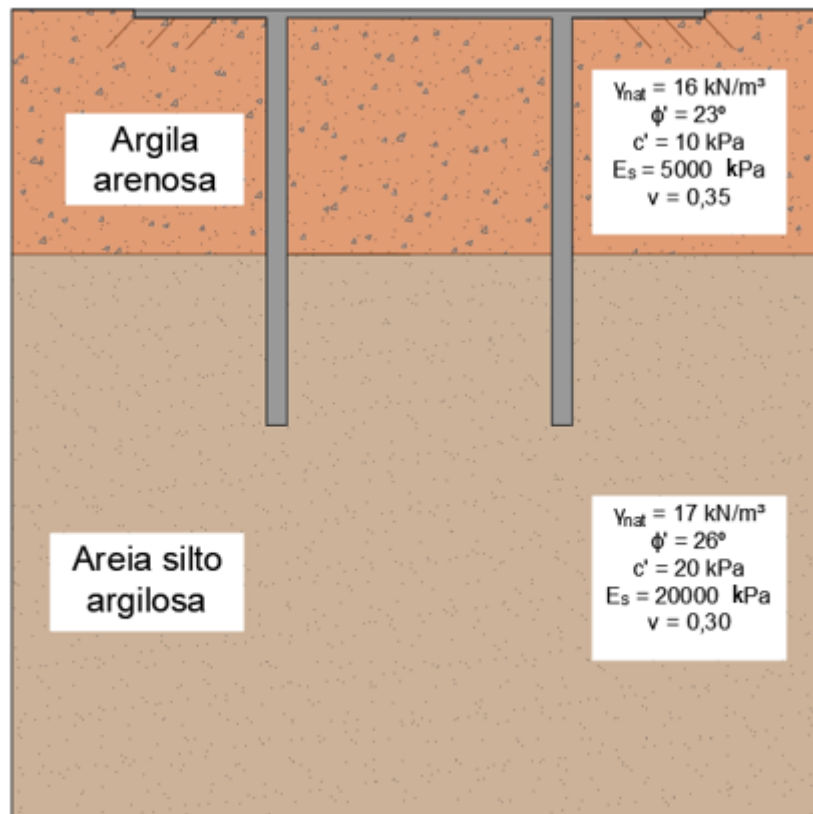
Todos esses valores foram determinados e estão descritos mais à frente. Após a definição dos parâmetros dos materiais, para prosseguir com a calibração da ferramenta numérica é necessário definir o semiespaço do modelo numérico e a escolha da malha de elementos finitos. Logo, há a discretização do modelo para, em sequência, realizar a modelagem numérica e fazer a análise e discussão dos resultados.

### 3.3 Parâmetros do solo para a análise numérica

Para a determinação dos parâmetros necessários do solo para o modelo numérico adotado, pensou-se na situação de uma construção popular sobre um solo mole e sob essa camada de solo mole, uma camada de solo mais rígida. Esse tipo de situação é muito comum em construções populares na região de Uberlândia e demais regiões próximas.

Com essa ideia de situação, adotou-se um solo formado por duas camadas, em que a primeira é composta por argila arenosa com profundidade de 3m e a segunda por areia silto argilosa. A Figura 23 exemplifica melhor o problema determinado para análise e as propriedades adotadas para cada camada de solo conforme os valores médios propostos por Joppert Jr. (2007) para parâmetros geotécnicos de vários tipos de solo (ANEXO B).

Figura 23 – Situação de solo simulada.



Por fim, calculou-se o coeficiente de empuxo em repouso ( $K_0$ ) para cada camada a partir da seguinte equação:

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (\text{Equação 14})$$

A Tabela 10 apresenta os parâmetros adotados para cada camada de solo de forma organizada. Esses parâmetros foram utilizados nas análises numéricas para o solo, trata-se de parâmetros médios adotados, porque a finalidade do estudo é uma avaliação qualitativa.

Tabela 10 – Parâmetros médios de resistência e deformabilidade do solo.

Camada		$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)	$E_s$ (kPa)	$\nu$	$K_0$
1	Argila arenosa	16	23	10	5000	0,35	0,609
2	Areia silto argilosa	17	26	20	20000	0,30	0,562

### 3.4 Parâmetros do concreto – material das estacas e dos radiers

Os parâmetros referentes ao concreto, material da estaca e do radier, foram obtidos seguindo as orientações da ABNT NBR 6118:2014. O concreto adotado é o C20. Portanto, a resistência característica do concreto à compressão ( $f_{ck}$ ) apresenta valor igual a 20MPa. Isso tanto para estaca quanto para radier.

#### 3.4.1 Módulo de elasticidade do concreto ( $E_{ci}$ )

Segundo a NBR 6118:2014, quando não se tem ensaios experimentais, o valor do módulo de elasticidade inicial pode ser estimado, sendo o  $f_{ck}$  igual a 20MPa, pela Equação 15.

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{Equação 15})$$

Em que,  $\alpha_E$  é o parâmetro em função da natureza do agregado. No caso, adotou-se  $\alpha_E$  igual a 1,2. Isso porque a região de Uberlândia-MG apresenta jazidas de basalto. Além disso, abordando sobre a localidade e geologia da Faculdade de Engenharia Civil (FECIV-UFU), esta está situada na região central da área urbanizada da cidade de Uberlândia. Geologicamente, encontra-se situada no Grupo São Bento, pertencente à formação Serra Geral (K1 $\delta$ sg), onde a geologia local é formada basicamente por basaltos maciços e amigdaloides, de coloração preta

a cinza escura, apresentando disjunção colunar, disjunção esferoidal e textura predominantemente afanítica, por vezes fanerítica fina ou microporfirítica.

### 3.4.2 Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e peso específico do concreto ( $\gamma_c$ )

A NBR 6118:2014 no item 8.2.9 orienta que para tensões de compressão menores que  $0,5.f_c$  e tensões de tração menores que  $f_{ct}$ , pode-se tomar o coeficiente de Poisson como sendo igual a 0,2. Em que,  $f_c$  e  $f_{ct}$  são, respectivamente, resistência à compressão e à tração do concreto.

O peso específico do concreto é adotado, usualmente, como sendo  $25\text{kN/m}^3$  para concreto armado.

### 3.4.3 Parâmetros adotados

Na Tabela 11 estão apresentados os parâmetros utilizados para representar o concreto armado das estacas e dos radiers para todos os cenários de análise.

Tabela 11 – Parâmetros do concreto.

Caso de Análise	Elemento da fundação	Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	s (m)	E (GPa)	E/s (GPa)	$\nu$
Todos os 4 casos	Radiers	Concreto	25,0	-	30,1	-	0,2
R.E. 4 estacas	Estacas			3,50m	-	8,6	
R.E. 9 estacas	Estacas			2,33m	-	12,9	
R.E. 16 estacas	Estacas			1,75m	-	17,2	

### 3.5 Definição do semiespaço do modelo numérico

Após a apresentação da metodologia para realizar a modelagem numérica, é necessário finalizar a calibração do programa computacional RS<sup>2</sup>, para isso definiu-se o semiespaço e a malha de elementos finitos.

A definição das dimensões do semiespaço foi determinada em função de testes realizados para assegurar que as condições de contorno impostas nas extremidades do modelo numérico pudessem ser consideradas como indeslocáveis ou apresentassem deslocamentos muito baixos e assim, não tivessem influência nos resultados das análises.

As condições de contorno adotadas foram:

- Topo da camada – deslocamentos em x e y permitidos;

- Laterais da camada – deslocamentos em x impedidos;
- Base da camada – deslocamentos em x e y impedidos.

Segundo Brinkgreve (2002), citado por Garcia (2015), os limites do modelo têm de ser determinados em distâncias suficientes de forma que as deformações nos limites dos contornos não exerçam influência sobre a fundação ou que essa influência seja minimizada.

A malha de elementos finitos foi discretizada com elementos triangulares de 6 pontos e a malha ideal escolhida também foi realizada por meio de teste de convergência. Este tem como objetivo verificar se os deslocamentos estabilizam para um determinado aumento do número de nós e elementos.

### 3.5.1 Teste de convergência

Os testes de convergência do semiespaço foram realizados no radier estaqueado com 4 estacas, porque este caso apresenta a maior área líquida em contato com solo (área do radier menos área das estacas). Com isso, as dimensões do semiespaço foram avaliadas para as geometrias de 15x15m, 20x20m e 30x30m. A Tabela 12 apresenta os valores de acordo com a geometria do semiespaço e os deslocamentos médios verticais e horizontais.

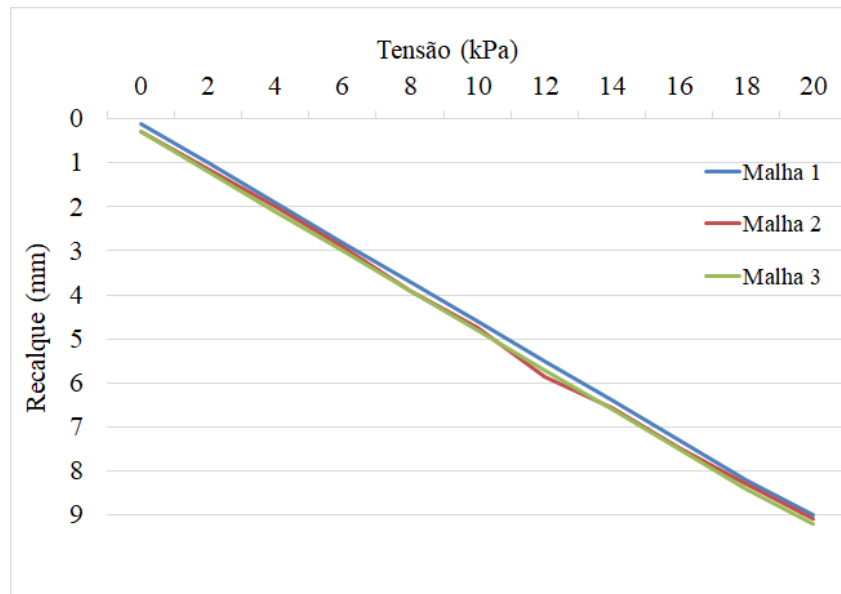
Tabela 12 – Deslocamentos na extremidade do semi-espço.

SEMI-ESPAÇO	Deslocamento médio vertical (mm)	Deslocamento médio horizontal (mm)
15 x 15m	1,76	0,00
20 x 20m	1,72	0,00
30 x 30m	0,10	0,00

Portanto, adotou-se o semiespaço com dimensões de 30x30m por apresentar, nas condições de contorno, deformações máximas menores ou iguais a um décimo de milímetro. Logo, estas deformações são desprezíveis para os tipos de problemas analisados.

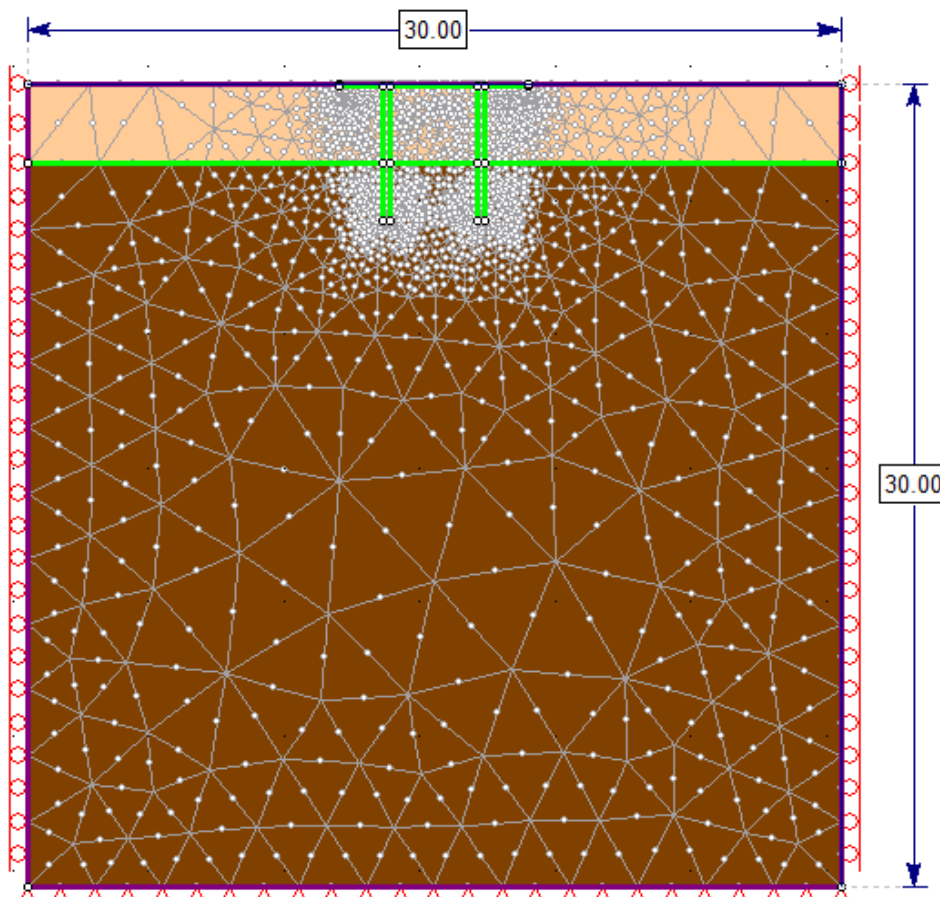
Em seguida, realizou-se os testes de malha por meio de testes de convergência. Para isso, realizou-se 3 configurações de malhas: Malha 1 – 1278 elementos e 2625 nós; Malha 2 – 1463 elementos e 3008 nós; Malha 3 – 1571 elementos e 3208 nós. A Figura 24 apresenta o gráfico de tensão x recalque com as três configurações de malha para o caso do radier estaqueado com 4 estacas. Nota-se que a partir da malha 2, os deslocamentos se estabilizam, variando muito pouco da malha 3. Porém, por ter um aumento muito pequeno de recalque na tensão máxima, adotou-se a malha 3.

Figura 24 – Teste de convergência.



A Figura 25 contém a geometria das simulações de um caso de análise (radier estaqueado com 4 estacas), além da malha utilizada e as condições de contorno.

Figura 25 – Geometria das simulações e malha de elementos finitos.





Com a definição de parâmetros necessários para o uso do RS<sup>2</sup> e a calibração do modelo numérico, realizou-se simulações conforme os cenários de análise na Figura 22.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

A tensão máxima de ensaio foi definida em 20kN/m<sup>2</sup> para simular uma construção popular construída sobre os cenários de análise que contém os sistemas de fundação. Para isso, realizou-se o carregamento em 11 estágios, sendo o primeiro estágio sem carga de ensaio aplicada (fator = 0,0), o último estágio com a tensão máxima de ensaio aplicada (fator = 1,0), e os demais estágios foram realizados de 10 em 10 por cento da tensão máxima de ensaio (fator = 0,1 a 0,9). Além disso, realizou-se o descarregamento em mais 4 estágios, estágios 12 a 15, com respectivamente, 75%, 50%, 25% e 0% da tensão máxima de ensaio aplicada (fatores = 0,75; 0,50; 0,25; 0,0). A Tabela 13 representa a relação de fatores com a tensão aplicada em cada estágio.

Tabela 13 – Estágios, fatores e tensões de ensaio.

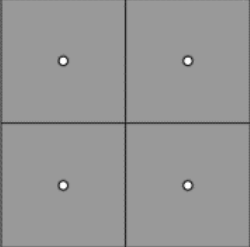
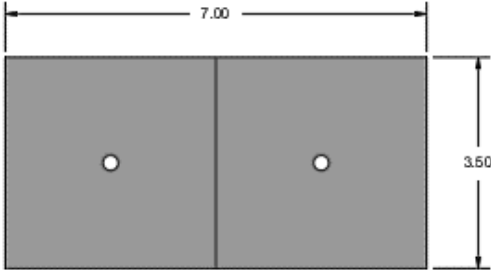
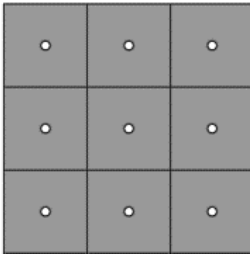
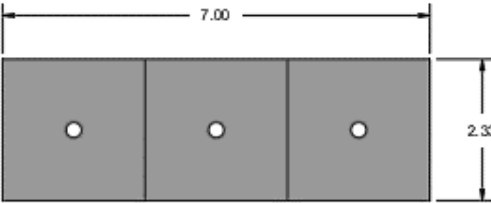
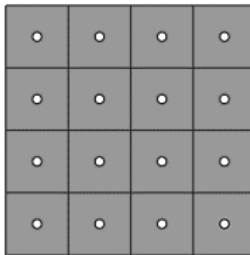
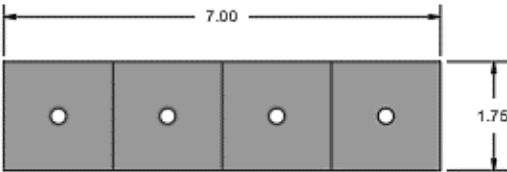
Estágio de carregamento	Fator	Tensão de ensaio kN/m <sup>2</sup>
1	0,00	0
2	0,10	2
3	0,20	4
4	0,30	6
5	0,40	8
6	0,50	10
7	0,60	12
8	0,70	14
9	0,80	16
10	0,90	18
11	1,00	20
12	0,75	15
13	0,50	10
14	0,25	5
15	0,00	0

### 4.1 Carga-Recalque e Recalques diferenciais

As curvas carga x recalque dos casos analisados foram obtidas em cargas totais para cada estágio de carregamento a partir de uma tensão de 20kN/m<sup>2</sup> distribuída uniformemente sob o elemento de fundação (radier 7x7m – 49m<sup>2</sup>). Em uma outra análise, pormenorizada, a fim de

se obter a carga por estaca por área de influência nos radiers estaqueados (Figura 26), em alguns casos as cargas foram analisadas por área de influência pela multiplicação das tensões pela área da faixa de influência – a qual contém a área de influência de cada estaca. Essas faixas de influência variam conforme o caso de análise. Com isso, para um melhor entendimento, está ilustrado na Figura 26 as de faixas de influência para cada caso de análise dos radiers estaqueados no intuito de obter a área de influência por estacas.

Figura 26 – Área das faixas de influência.

Caso de análise	Faixa de influência	Área de influência de cada estaca (m <sup>2</sup> )	Cálculo da área Faixa de influência (m <sup>2</sup> )
<p>Radier estaqueado 4 estacas</p> 		12,2500	$2 \times 12,25 = 24,5$ ou $7 \times 3,50 = 24,5$
<p>Radier estaqueado 9 estacas</p> 		5,4444	$3 \times 5,4444 = 16,33$ ou $7 \times 2,3333 = 16,33$
<p>Radier estaqueado 16 estacas</p> 		3,0625	$4 \times 3,0625 = 12,25$ ou $7 \times 1,75 = 12,25$

Com isso, fazendo-se uma análise com a carga total, a Tabela 14 apresenta as cargas de ensaio para todos os casos de análise e em cada estágio de carregamento.

Tabela 14 – Cargas de ensaio para todos os casos de análise.

Estágio	Tensão de ensaio kN/m <sup>2</sup>	Cargas de ensaio kN
1	0	0,00
2	2	98,00
3	4	196,00
4	6	294,00
5	8	392,00
6	10	490,00
7	12	588,00
8	14	686,00
9	16	784,00
10	18	882,00
11	20	980,00
12	15	735,00
13	10	490,00
14	5	245,00
15	0	0,00

Nas Figuras 27 a 32 é possível observar os modelos de resultado apresentados pelo *software* após o processamento do radier estaqueado com 4 estacas em termos, respectivamente, de tensão (Figuras 27 a 29) e deslocamento vertical (Figuras 30 a 32) para tensões de ensaio no 1º, 6º e 11º estágio, na devida ordem, estágio de carregamento inicial, carregamento intermediário e carregamento máximo. Nessas figuras destacou-se os valores em 6 pontos metro a metro no meio da estaca e os valores em 4 pontos na zona inferior do radier.

Figura 27 – Compressão uniaxial no 1º estágio (valores em kPa).

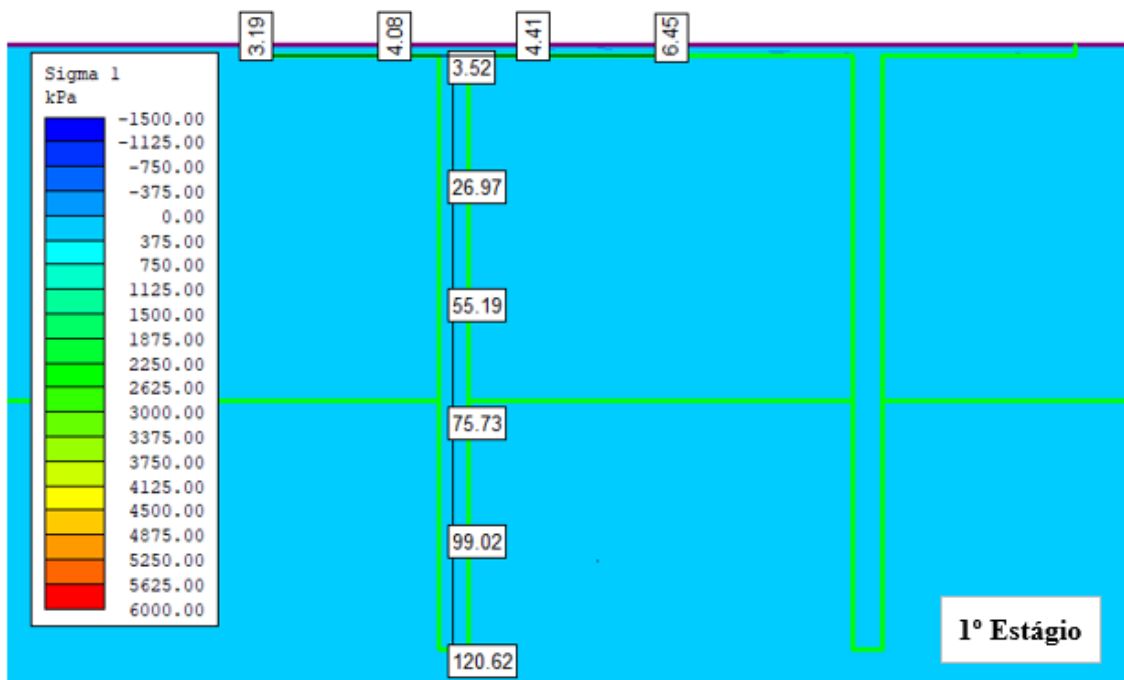


Figura 28 – Compressão uniaxial no 6º estágio (valores em kPa).

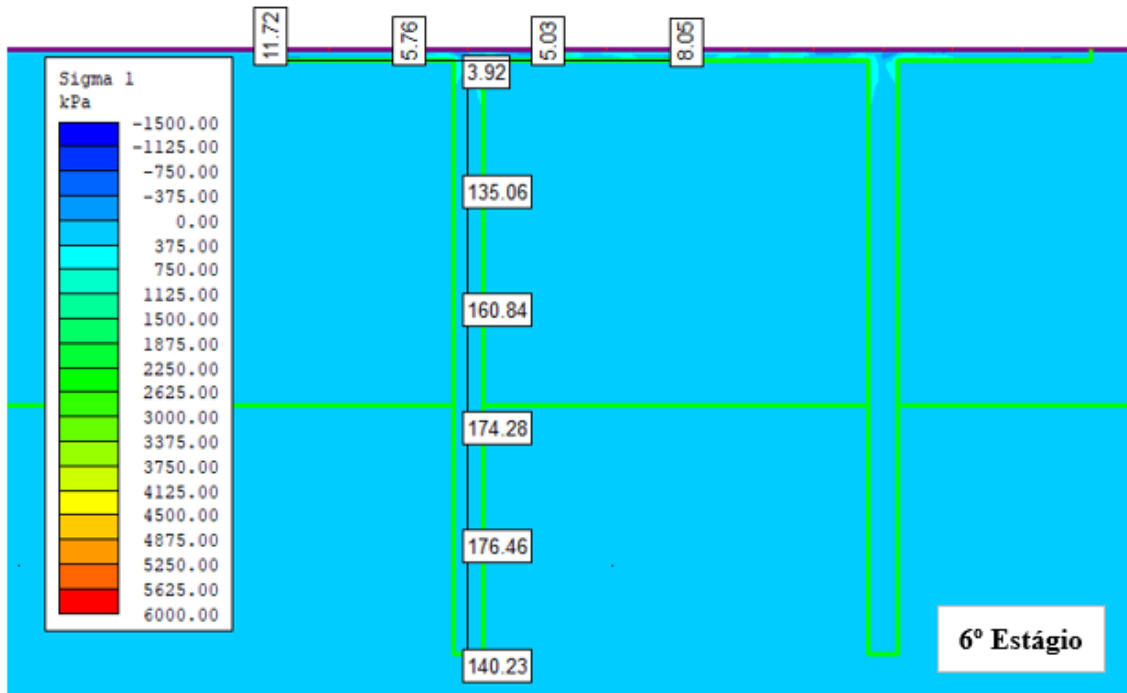


Figura 29 – Compressão uniaxial no 11º estágio (valores em kPa).

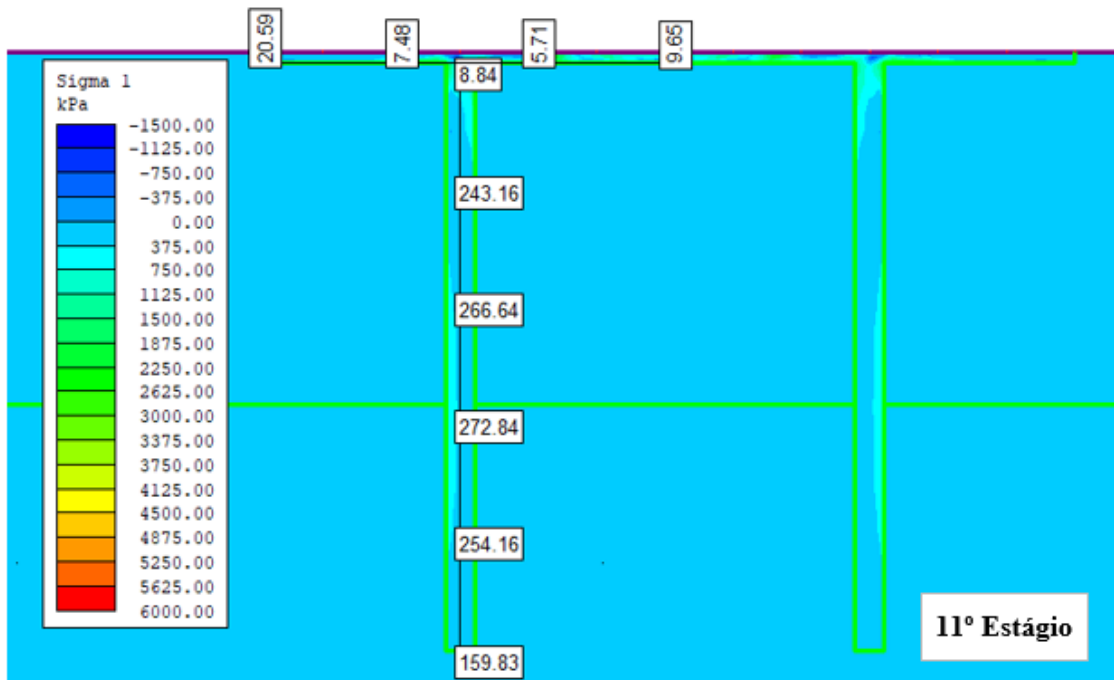


Figura 30 – Deslocamentos verticais no 1º estágio (valores em m).

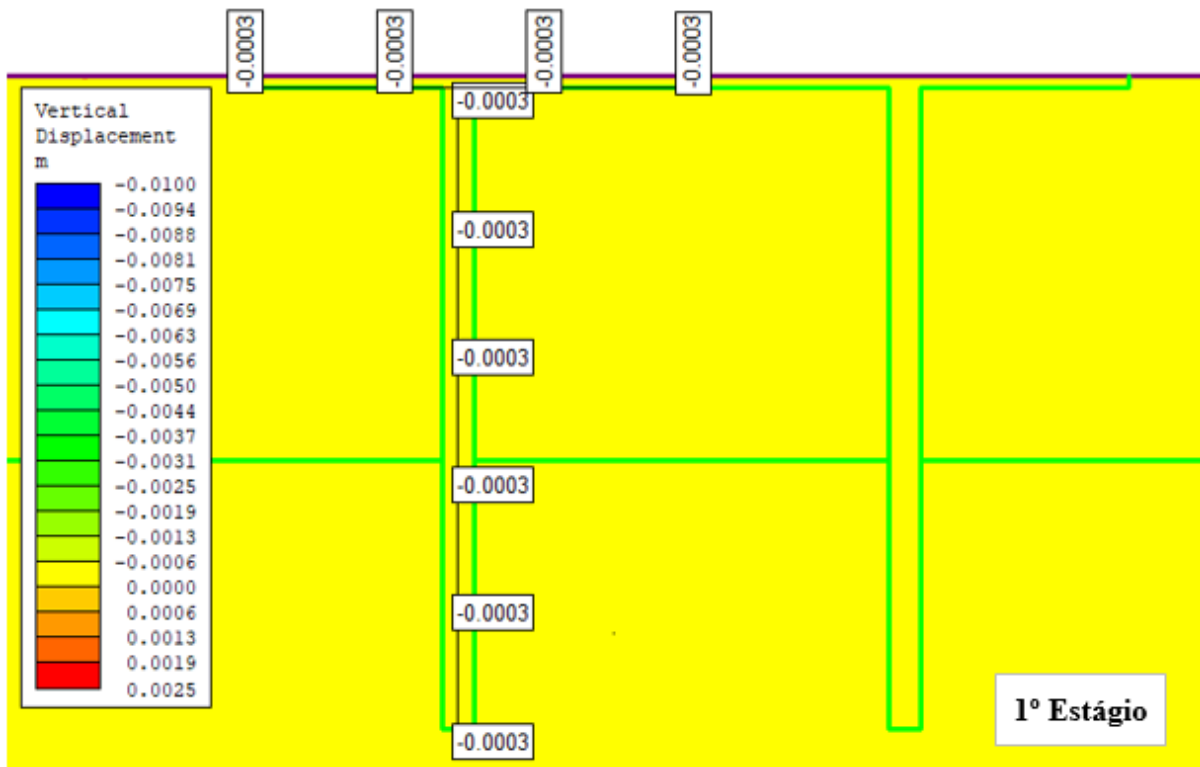


Figura 31 – Deslocamentos verticais no 6º estágio (valores em m).

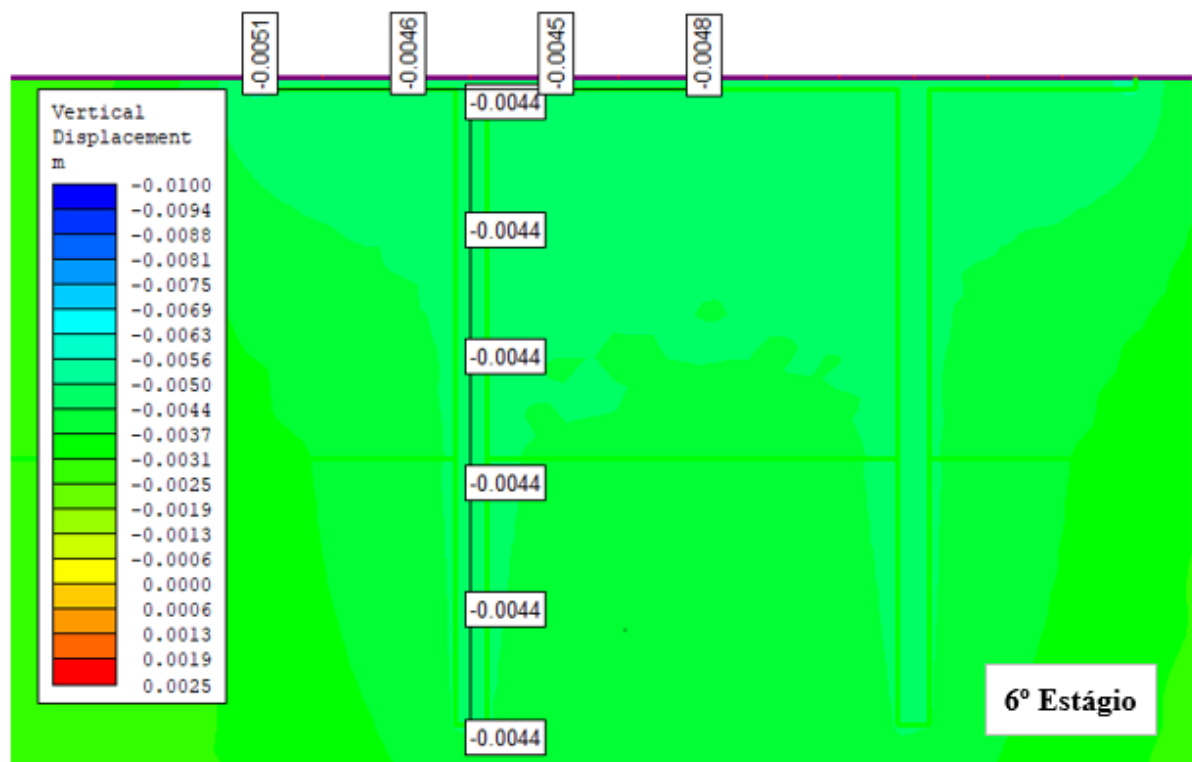
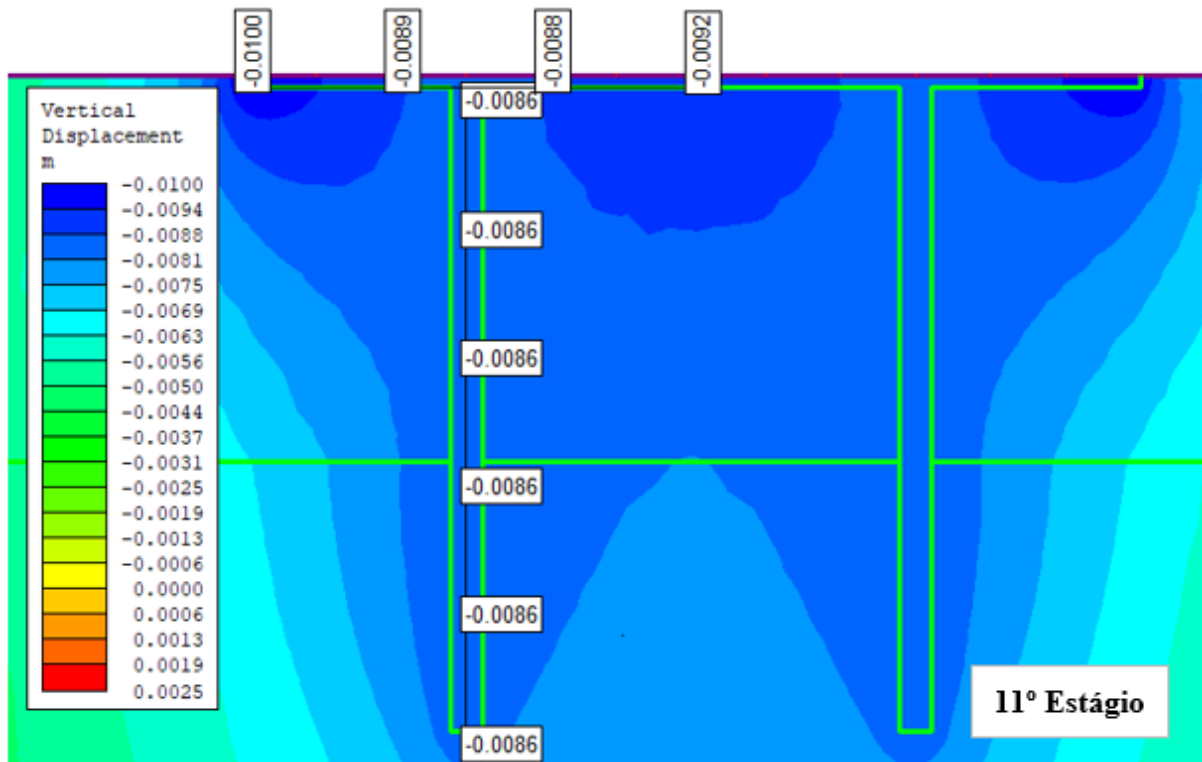


Figura 32 – Deslocamentos verticais no 11º estágio (valores em m).



A seguir, na Tabela 15, estão apresentadas as tensões máximas, as cargas máximas multiplicadas pela área total do radier e o respectivo recalque máximo atingido no centro do radier.

Tabela 15 – Tensão máxima, carga máxima e recalque máximo no centro do radier para cada caso de análise.

Caso de análise	Tensão máxima (kPa)	Carga máxima (kN)	Recalque máximo (mm)
<b>Radier isolado</b>	20	980,00	16,40
<b>Radier estaqueado 4 estacas</b>	20	980,00	8,90
<b>Radier estaqueado 9 estacas</b>	20	980,00	8,20
<b>Radier estaqueado 16 estacas</b>	20	980,00	8,10

Ao final da modelagem numérica de cada caso foram definidos pontos de interesse para obtenção de dados para análise dos recalques. Dessa forma, definiu-se um ponto no eixo do radier isolado e dos radies estaqueados. Esses pontos foram localizados na base de aplicação das tensões de ensaio. Coletando os valores de recalque no centro do radier para cada estágio de tensão e transformando essas tensões em carga pela multiplicação da área conforme já fora dito anteriormente, obteve-se o comportamento carga x recalque para todos os quatro casos de análise. Assim, com os dados obtidos em cada estágio, realizou-se um gráfico de carga x

recalque para cada caso de análise (APÊNDICE A). É importante ressaltar que os valores de recalque encontrados no 1º estágio (fator 0,00) foram descontados nos demais estágios para todos os casos. Isto, pois, os valores do 1º estágio são referentes aos recalques do peso próprio do sistema de fundação e pretende-se analisar os recalques referentes aos estágios de carregamento externo (construção popular). Dessa forma, estão apresentados nas Figuras 33 a 36 os gráficos carga x recalque para os casos de análise.

Figura 33 - Gráfico carga x recalque - Radier Isolado.

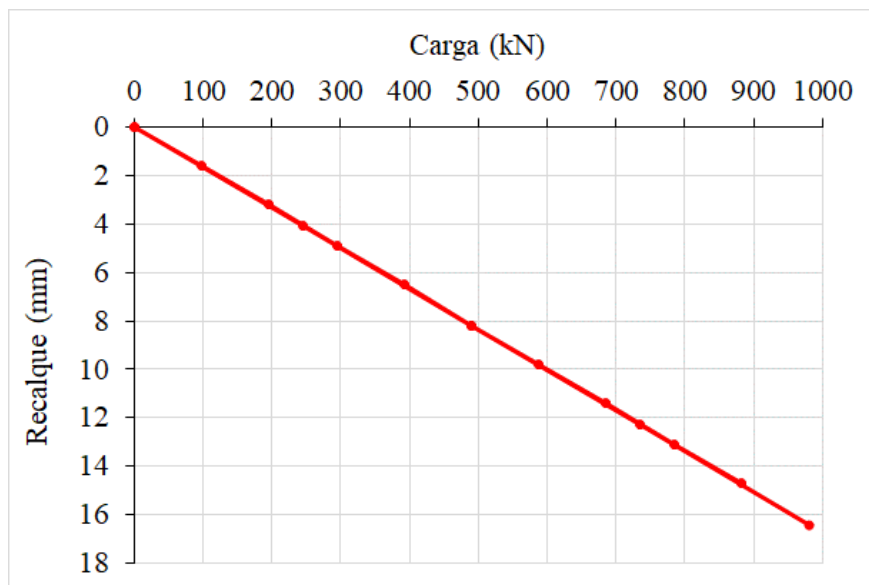


Figura 34 - Gráfico carga x recalque - Radier Estaqueado 4 estacas.

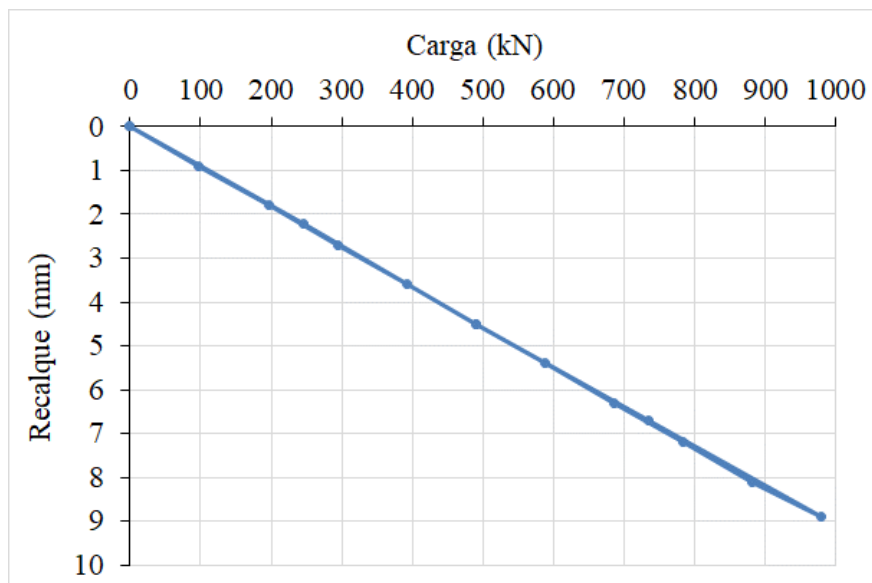


Figura 35 - Gráfico carga x recalque - Radier Estaqueado 9 estacas.

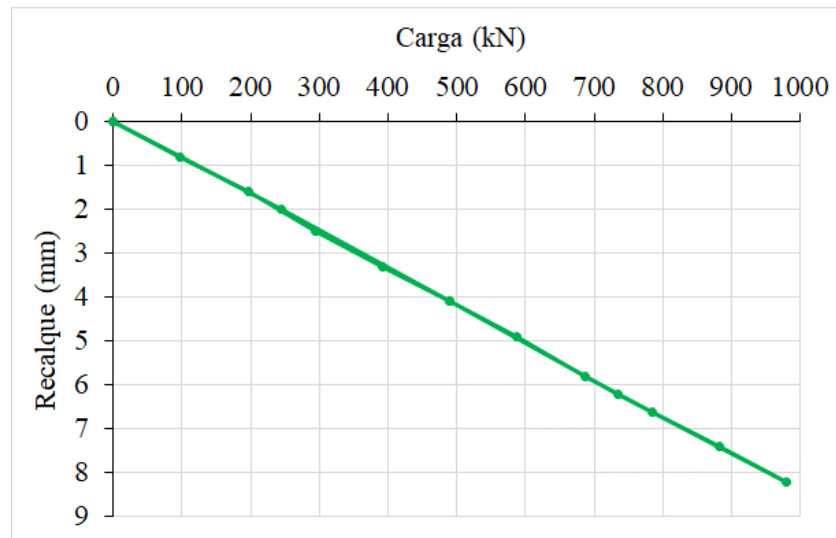
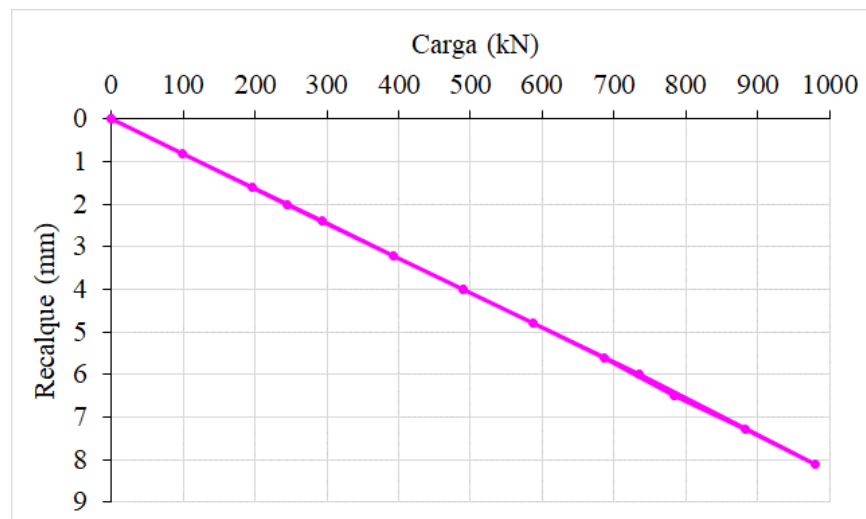


Figura 36 - Gráfico carga x recalque - Radier Estaqueado 16 estacas.



Com os resultados, nota-se que os recalques observados no radier isolado são bem maiores que os recalques observados nos radiers estaqueados. Além disso, quanto mais estacas são inseridas, há uma maior redução nos valores de recalque.

No radier isolado tem-se um recalque máximo no centro do radier de 1,64cm, com a utilização de radier estaqueado o recalque máximo é de 0,89cm, 0,82cm e 0,81cm no meio do radier, respectivamente, para o radier estaqueado com 4, 9 e 16 estacas.

Outra observação feita pelos gráficos de carga x recalque, é a constatação de que o conjunto em todos os casos estarem trabalhando no estado elástico. Isso é verificado pela linearidade da curva em todos os casos.



Após essas análises iniciais, realizou a análise dos recalques diferenciais em todas as configurações de fundação. Para essa análise, realizou-se a observação dos recalques na base do radier e, da condição deformada do solo e da fundação que pode ser verificada através do *software*. As análises dos recalques diferenciais foram realizadas considerando-se 5 pontos equidistantes na base do radier em relação ao centro do radier (Figura 37 e Tabela 16). Nesta tabela, ressalta-se que o eixo de marcação escolhido foi o centro do radier, portanto na distância 0m os valores correspondem aos do meio do radier em todos os casos e assim por diante. A Figura 37 contém a marcação dos pontos para a coleta de dados (recalques) e a distância desses em relação ao eixo de simetria no radier para todos os casos de análise. As Figuras 38 a 45 apresentam as deformações do solo e da fundação em cada caso de análise no estágio de tensão máxima (11º estágio), em termos de compressão uniaxial (Figuras 38 a 41) e de deslocamentos verticais (Figuras 42 a 45).

Figura 37 – Marcação dos pontos para análise dos recalques diferenciais.

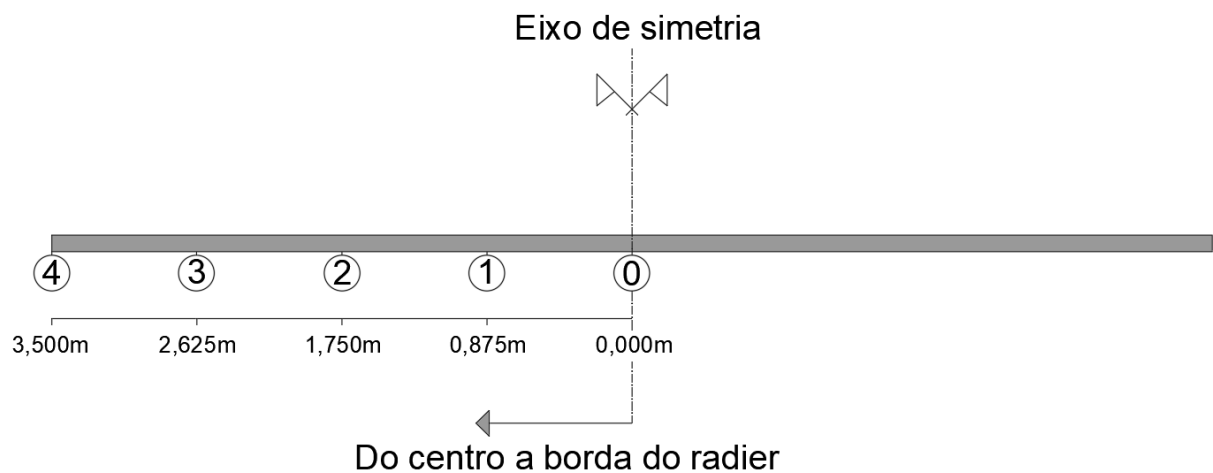


Figura 38 – Condição deformada em termos de compressão uniaxial- radier isolado (11º estágio).

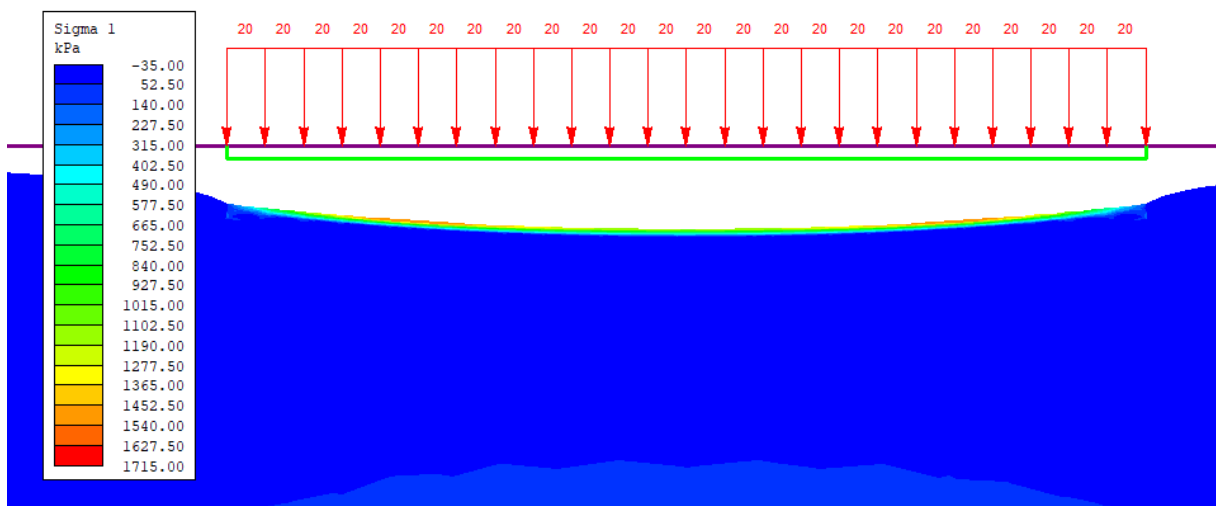


Figura 39 – Condição deformada em termos de compressão uniaxial - radier estaqueado com 4 estacas (11º estágio).

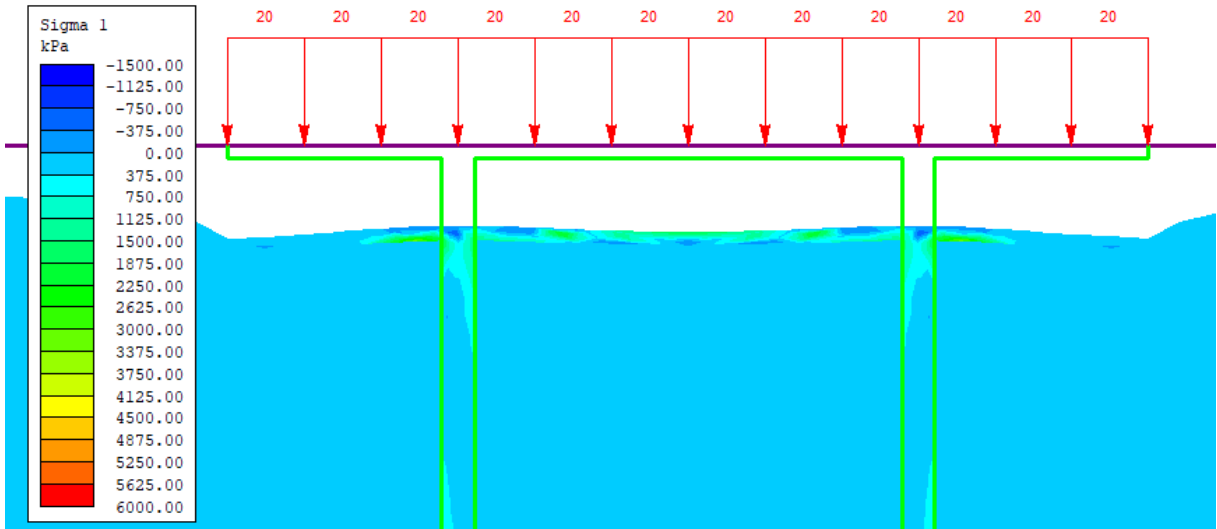


Figura 40 – Condição deformada em termos de compressão uniaxial - radier estaqueado com 9 estacas (11º estágio).

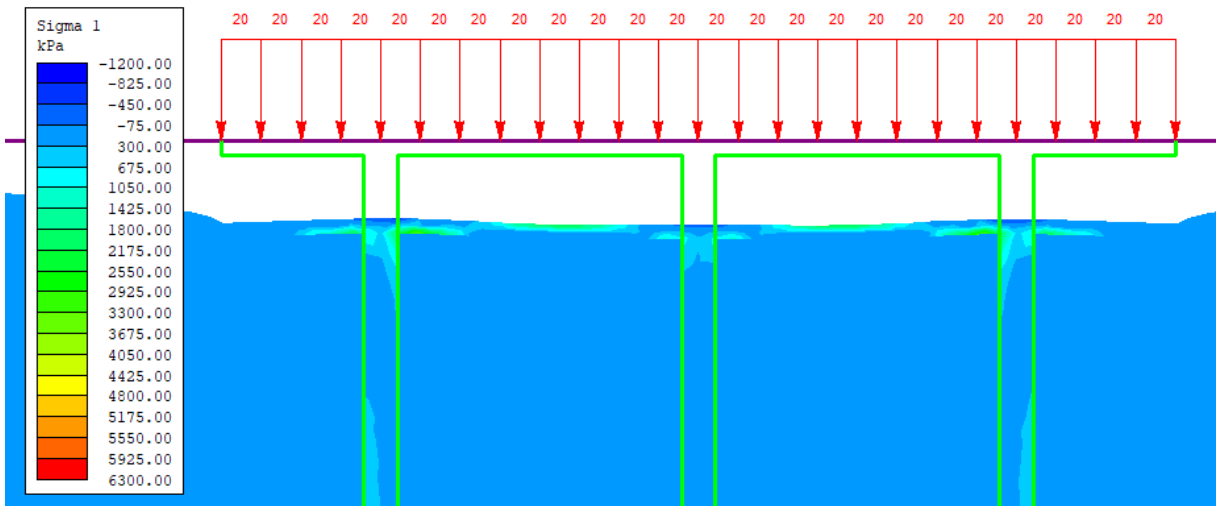


Figura 41 – Condição deformada em termos de compressão uniaxial - radier estaqueado com 16 estacas (11º estágio).

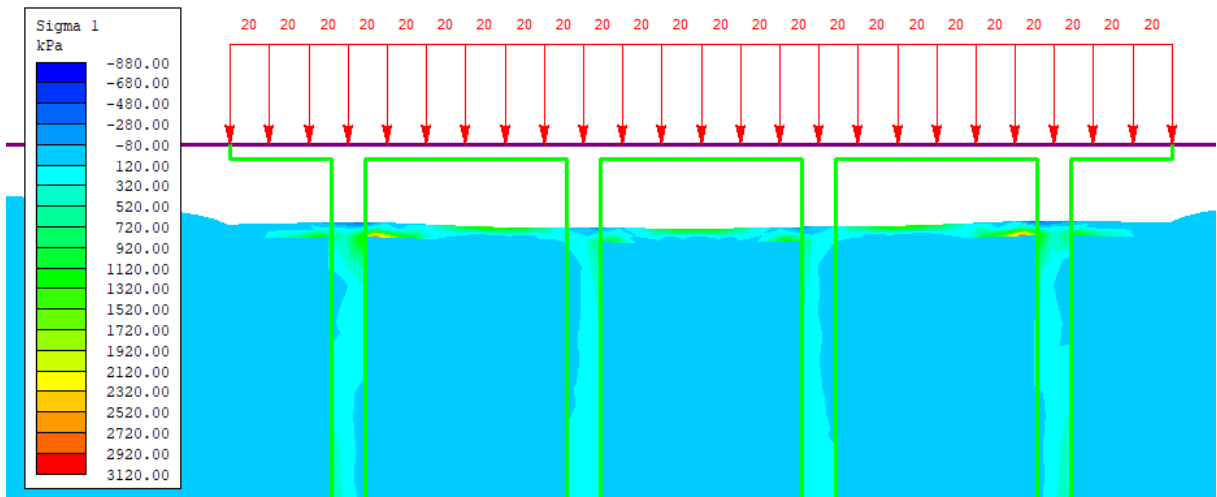


Figura 42 – Condição deformada em termos de deslocamento vertical – radier isolado (11º estágio).

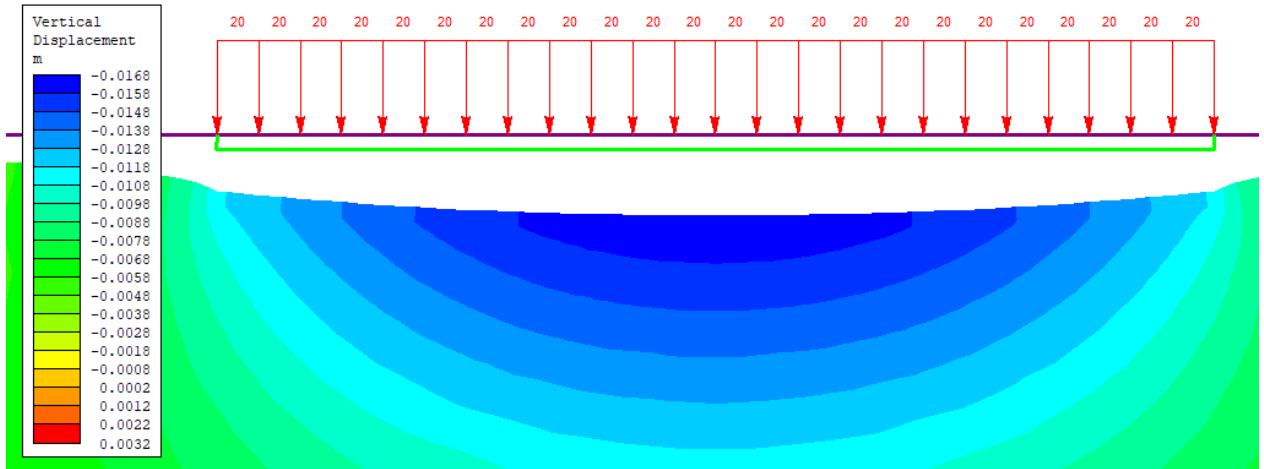


Figura 43 – Condição deformada em termos de deslocamento vertical – radier estaqueado com 4 estacas (11º estágio).

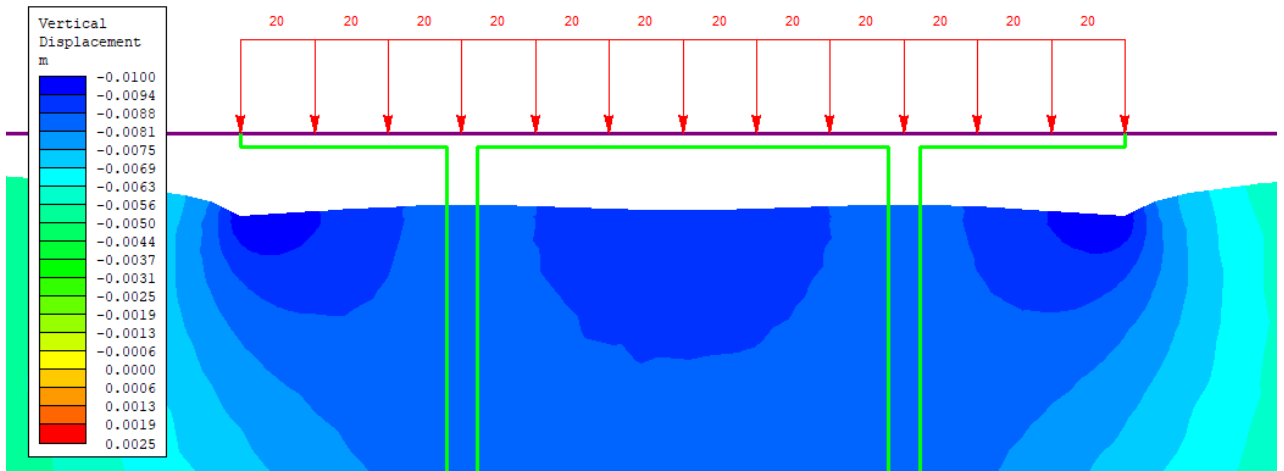


Figura 44 – Condição deformada em termos de deslocamento vertical – radier estaqueado com 9 estacas (11º estágio).

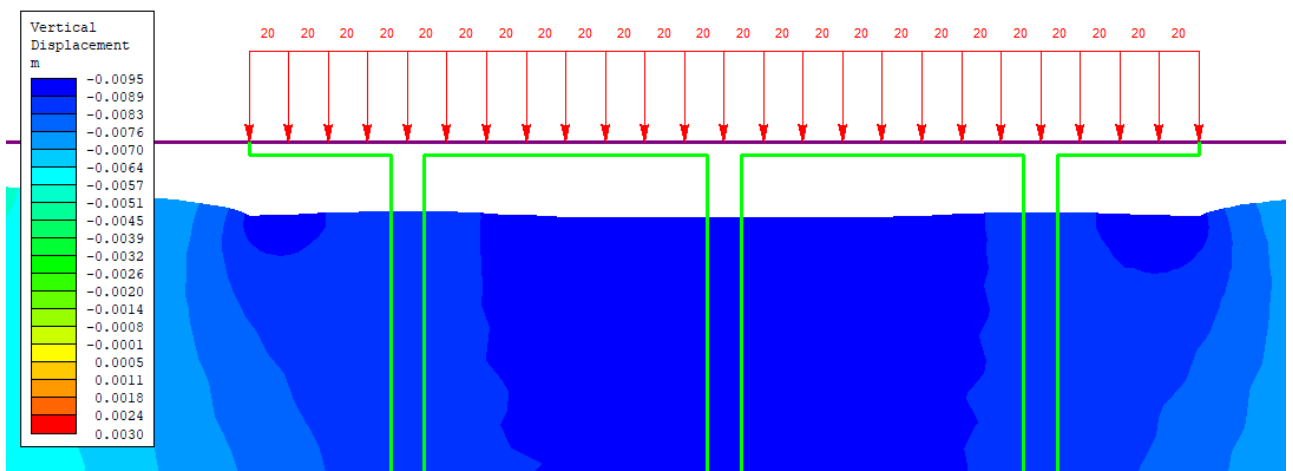


Figura 45 – Condição deformada em termos de deslocamento vertical – radier estaqueado com 16 estacas (11º estágio).

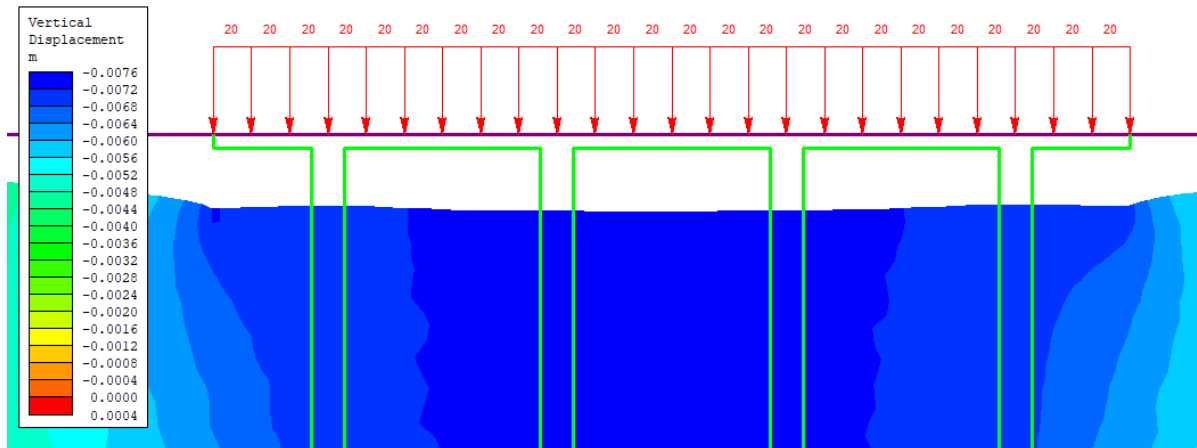


Tabela 16 – Recalques nos casos de análise no estágio de carregamento máximo e cálculo dos recalques diferenciais.

Ponto	0	1	2	3	4
<b>Distância do centro do radier (m)</b>	0,000	0,875	1,750	2,625	3,500
<b>Deslocamentos - Radier Isolado (mm)</b>	16,4	16,1	15,3	13,7	11,5
<b>Recalques diferenciais (mm)</b>	-	$\beta_{0-1} = 0,3$	$\beta_{0-2} = 1,1$	$\beta_{0-3} = 2,7$	$\beta_{0-4} = 4,9$
<b>Deslocamentos - Radier estaqueado 4 estacas (mm)</b>	8,9	8,6	8,3	8,8	9,7
<b>Recalques diferenciais (mm)</b>	-	$\beta_{0-1} = 0,3$	$\beta_{0-2} = 0,6$	$\beta_{0-3} = 0,1$	$\beta_{0-4} = -0,8$
<b>Deslocamentos - Radier estaqueado 9 estacas (mm)</b>	8,2	8,3	8,0	7,8	8,3
<b>Recalques diferenciais (mm)</b>	-	$\beta_{0-1} = -0,1$	$\beta_{0-2} = 0,2$	$\beta_{0-3} = 0,4$	$\beta_{0-4} = -0,1$
<b>Deslocamentos - Radier estaqueado 16 estacas (mm)</b>	8,1	8,0	7,8	7,5	7,7
<b>Recalques diferenciais (mm)</b>	-	$\beta_{0-1} = 0,1$	$\beta_{0-2} = 0,3$	$\beta_{0-3} = 0,6$	$\beta_{0-4} = -0,4$

Pela Tabela 16, nota-se que além da redução do recalque total no centro do radier, há uma redução nos recalques diferenciais com a introdução de estacas e com o aumento no número destas. Para o cálculo dos recalques diferenciais em relação ao centro do radier, utilizou-se a equação a seguir, em que  $n$  é o valor do recalque nos pontos de 1 a 4:

$$\beta_{0-n} = \text{recalque (ponto 0)} - \text{recalque (ponto n)} \quad (\text{Equação 16})$$

No caso do radier isolado, pela análise de resultados, há um encurvamento do radier com concavidade para cima (Figuras 38 e 42). Os recalques na extremidade são inferiores que os do

meio do radier. Sendo 16,4mm no centro da fundação e 11,5mm na extremidade. Pensando-se numa “laje” com carregamento externo, é de se esperar esse efeito de arqueamento do radier. Isso comprova que esse elemento isolado é bastante flexível. Já para os casos de raders estaqueados, com a introdução de estacas, o elemento radier se torna mais rígido. Desse modo, os recalques na extremidade vão se uniformizando em relação ao recalque no centro do radier. No radier estaqueado com 4 estacas (R.E. 4 estacas), o recalque no centro do radier é de 8,9mm e na extremidade de 9,7mm. Percebe-se que a um aumento do recalque na extremidade, isso porque as estacas se comportam como apoio para a parte central do radier (de uma estaca a outra) e este por sua vez tem comportamento de uma “viga bi-apoiada”. Por isso, há uma leve concavidade para baixo no centro e as extremidades do radier se comportam como “vigas em balanço” havendo, para esse caso de análise, uma “flecha” grande, ou seja, uma deformação maior nas extremidades (Figuras 39 e 43).

A partir do radier estaqueado com 9 (R.E. 9 estacas) e 16 estacas (R.E. 16 estacas), percebe-se que essas extremidades do radier sofre menor deformação em relação ao centro do radier. Isso é devido ao aumento no número de estacas e o espaçamento entre elas e entre as estacas de bordo e a extremidade do radier. Desse modo, observa-se que para o radier estaqueado com 16 estacas, diferentemente do de 9 estacas, os recalques na extremidade se tornam inferiores aos recalques no centro da fundação. Isso é evidenciado pela magnitude da deformação do solo e deslocamento da fundação (Figuras 40, 41, 44, 45 e Tabela 16). Para o R.E. 9 estacas, os recalques no centro do radier é de 8,2mm e na extremidade de 8,3mm. Já para o R.E. 16 estacas, no centro do radier é de 8,1mm e na extremidade de 7,7mm. Entretanto, pela análise dos recalques diferenciais em relação ao centro do radier, calculados na Tabela 16, o R.E. com 9 estacas apresenta recalques mais uniformes do que o R.E. 16 estacas. Fazendo-se uma média dos valores de deslocamentos (Tabela 17) e analisando os recalques diferenciais na Tabela 16, percebe-se que o melhor sistema pensando-se em deslocamentos médios e recalques diferenciais é o R.E. 9 estacas, isto, porque além deste apresentar os menores valores de  $\beta$  em relação ao centro (exceto no ponto 3) entre todos os sistemas, apresenta na média dos deslocamentos um valor menor que o radier isolado e R.E. 4 estacas e pouco acima do que o R.E. 16 estacas.

Tabela 17 – Média dos valores de deslocamentos (recalques).

	<b>Radier Isolado</b>	<b>Radier estaqueado 4 estacas</b>	<b>Radier estaqueado 9 estacas</b>	<b>Radier estaqueado 16 estacas</b>
<b>Média dos valores de deslocamentos (mm)</b>	14,6	8,86	8,12	7,82

## 4.2 Curva de transferência

Após a realização dos gráficos carga-recalque e análise de recalques diferenciais, obteve-se a curva de transferência de carga média nas estacas dos radiers estaqueados. Para isso, obteve-se, para cada caso, a tensão média por profundidade de estaca para cada estágio de carregamento (1º ao 11º estágio). Transformando as tensões em cargas, a partir da multiplicação da área da estaca, e fazendo a média dessas cargas de acordo com o número de estacas de cada caso, realizou-se os gráficos de curva de transferência de uma “estaca média”, conforme é mostrado nas Figuras 46 a 48.

Figura 46 – Transferência de carga média nas estacas do radier estaqueado com 4 estacas.

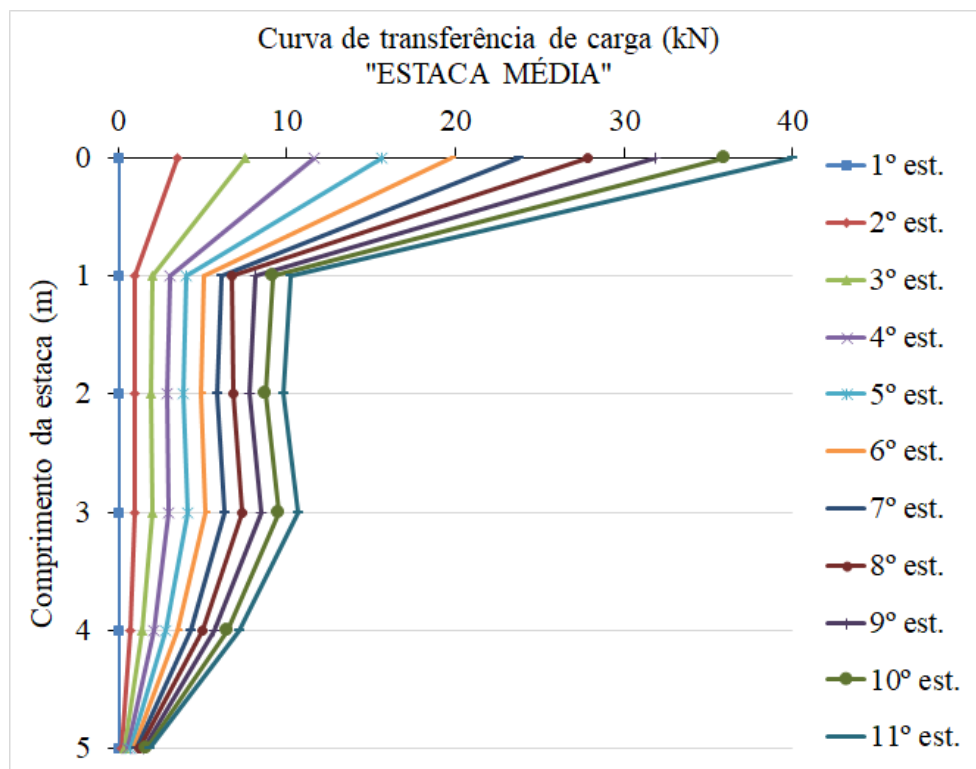


Figura 47 – Transferência de carga média nas estacas do radier estaqueado com 9 estacas.

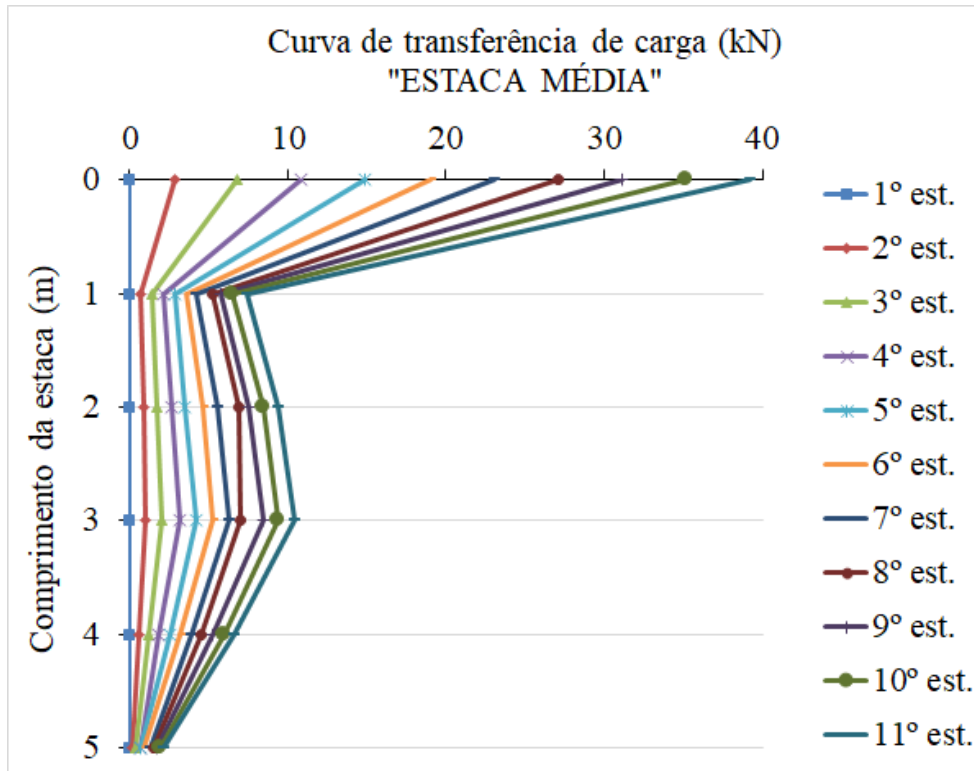
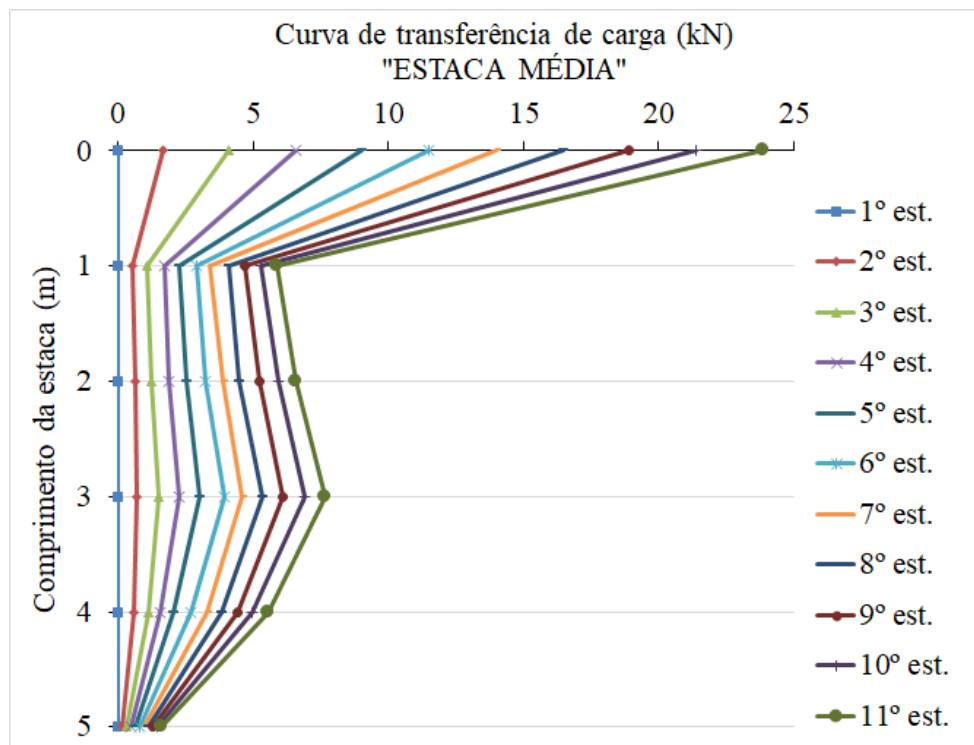


Figura 48 – Transferência de carga média nas estacas do radier estaqueado com 16 estacas.



A partir das curvas de transferência dos radiers estaqueados, com o aumento no número de estacas utilizadas, há uma menor transferência de carga para cada estaca. Isso é devido a distribuição de cargas, pois, com mais estacas, conseqüentemente, haverá menor intensidade de carregamento que cada estaca suporta (Figuras 46 a 48). Outro ponto analisado, é o distanciamento e a configuração entre as curvas de transferência de todos os estágios se comparado entre os 3 casos. Isso pode ser por conta do bulbo de tensões das estacas.

No caso do R.E. 4 estacas, os bulbos de tensões formados por cada estaca não interferem entre si, e portanto não há mobilização do solo entre estacas. Com isso, uma parcela do solo entre estacas não está mobilizado e serve somente como apoio para o elemento de fundação superficial. Assim, se justifica o comportamento das curvas de transferência para a estaca média no R.E. 4 estacas. Além disso, verifica-se para esse caso, que a mobilização do atrito lateral da estaca começa a ocorrer no 2º estágio e até o estágio de carregamento máximo (11º estágio) continuou essa mobilização do atrito lateral, isto é, a partir do incremento do carregamento externo começa a ocorrer a mobilização do atrito lateral e não há esgotamento deste. Com o aumento no número de estacas, nota-se a formação de um maior encurvamento nas curvas de transferência, evidente no trecho entre 1 a 5m de comprimento de estaca, principalmente no R.E. 9 e 16 estacas. Esse encurvamento pode ser ocasionado por conta de se ter duas camadas de solo e a interferência de bulbos de tensões entre as estacas. A questão das duas camadas também ocorre para o R.E. 4 estacas, porém, como as estacas não estão com seus bulbos interferindo entre si, não é tão evidente esse encurvamento.

No caso do R.E. 9 estacas, a mobilização do atrito lateral se dá de forma semelhante ao do R.E. 4 estacas e não há esgotamento do atrito lateral. Além disso, pode ser que o bulbo de tensões formado por cada estaca comece a interferir no bulbo de tensões das demais estacas e há mobilização do solo entre estacas. Por fim, para o caso do R.E. 16 estacas, o comportamento é semelhante ao de 9 estacas. Porém, como as estacas estão mais próximas, isto é, o espaçamento diminuiu com a inserção de mais estacas, os bulbos de tensões formados por cada estaca podem estar se interferindo mais do que no caso do R.E. 9 estacas.

Além disso, é importante ressaltar a resistência de ponta que é bem pequena para todos os casos de análise, isso é evidenciado pelo pouco distanciamento dos pontos no comprimento 5m em todos os casos.

Na obtenção de dados para traçar as curvas de transferências, notou-se que as estacas de bordo são mais solicitadas que as estacas centrais nos casos de R.E. 9 estacas e 16 estacas. O que não acontece no R.E. 4 estacas, por se ter duas estacas com mesma proporcionalidade e simetria. Os valores de carga, em cada estágio, para os casos de R.E. 9 e 16 estacas estão apresentados



nas tabelas no APÊNDICE B. Nessas tabelas, se tem os valores médios da (s) estaca (s) central ou centrais (no caso do R.E. 16 estacas) e os valores médios para as estacas de bordo.

### 4.3 Contribuição do contato bloco-solo

A seguir foi analisado a contribuição do contato bloco-solo. O objetivo dessa análise é se conhecer a parcela de contribuição do radier no sistema de fundação em radier estaqueado. Para isso, para os 3 casos de raders estaqueados, obteve-se as tensões médias no topo de cada estaca para cada estágio de carregamento (1º ao 11º estágio). Com isso, tem-se as cargas médias aplicadas no topo da estaca pela multiplicação das tensões pela área da estaca. Assim, fez-se o somatório das cargas aplicadas no topo das estacas, para o R.E. 4 estacas somou-se os valores do topo das duas estacas, já para o R.E. 9 estacas das três estacas e, por fim, para o R.E. 16 estacas das quatro estacas. Posteriormente, fez-se a subtração da carga de ensaio (tensão de ensaio x área de aplicação da tensão) pela carga média no topo das estacas para cada estágio. O valor dessa subtração é o quanto de carga que está sendo suportada pelo radier (contribuição do radier – contato bloco-solo). Com os dados obtidos para cada radier estaqueado, fez-se os gráficos de carga de ensaio pela porcentagem de contribuição do radier e da estaca. Esses gráficos estão apresentados nas Figuras 49, 50 e 51. No APÊNDICE C se encontra as tabelas com os valores em casas decimais para melhor visualização da contribuição dos elementos da fundação.

Aprofundando na análise, descobriu-se o quanto de carga era suportada pelas pontas das estacas e pelo atrito lateral das mesmas (fuste das estacas). Sabendo-se dos valores de tensões médias nas ponta das estacas e conseqüentemente, as cargas médias na ponta das estacas, pela subtração das cargas médias suportadas nos topos das estacas pelas cargas médias suportadas pelas pontas das estacas, tem-se as cargas suportadas por atrito lateral das estacas. Com isso, descobriu-se para cada caso a contribuição do radier, do fuste da estaca e da ponta da estaca. Logo, para efeitos de comparação, fez-se o gráfico de porcentagem de contribuição no carregamento máximo com os 3 casos de raders estaqueados (Figura 52).

Figura 49 – Contribuição do radier e das estacas no radier estaqueado com 4 estacas.

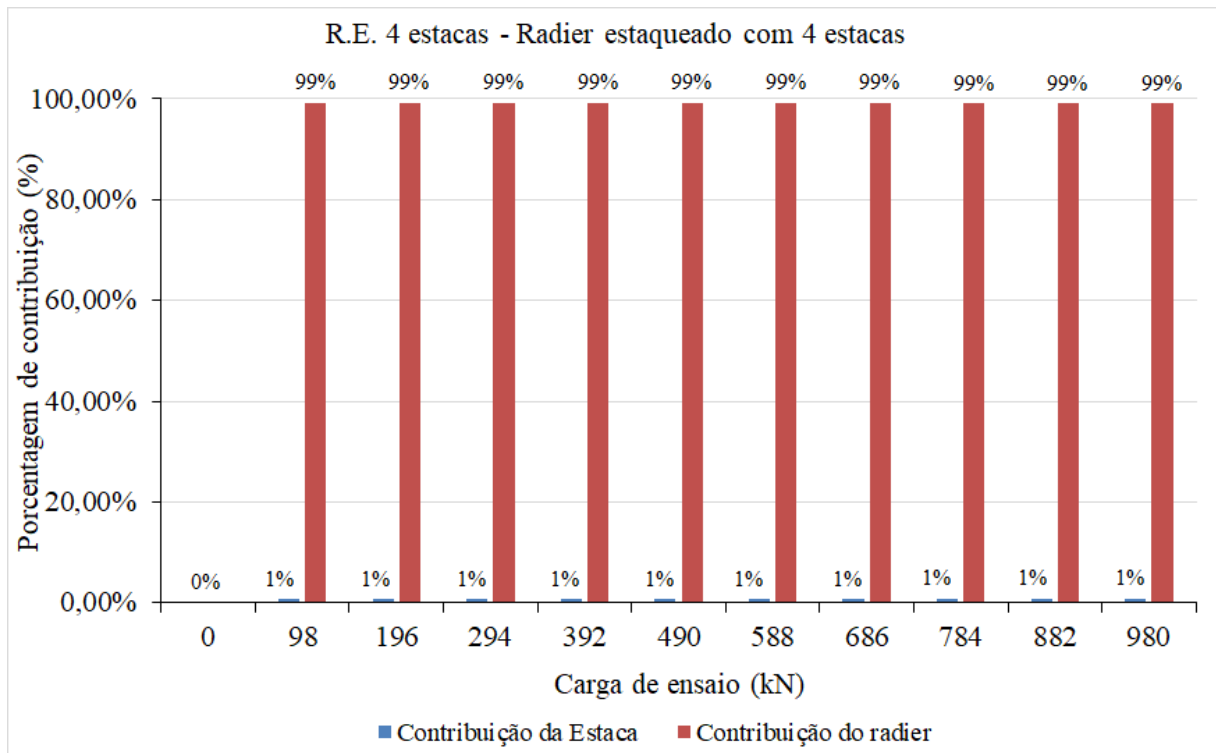


Figura 50 – Contribuição do radier e das estacas no radier estaqueado com 9 estacas.

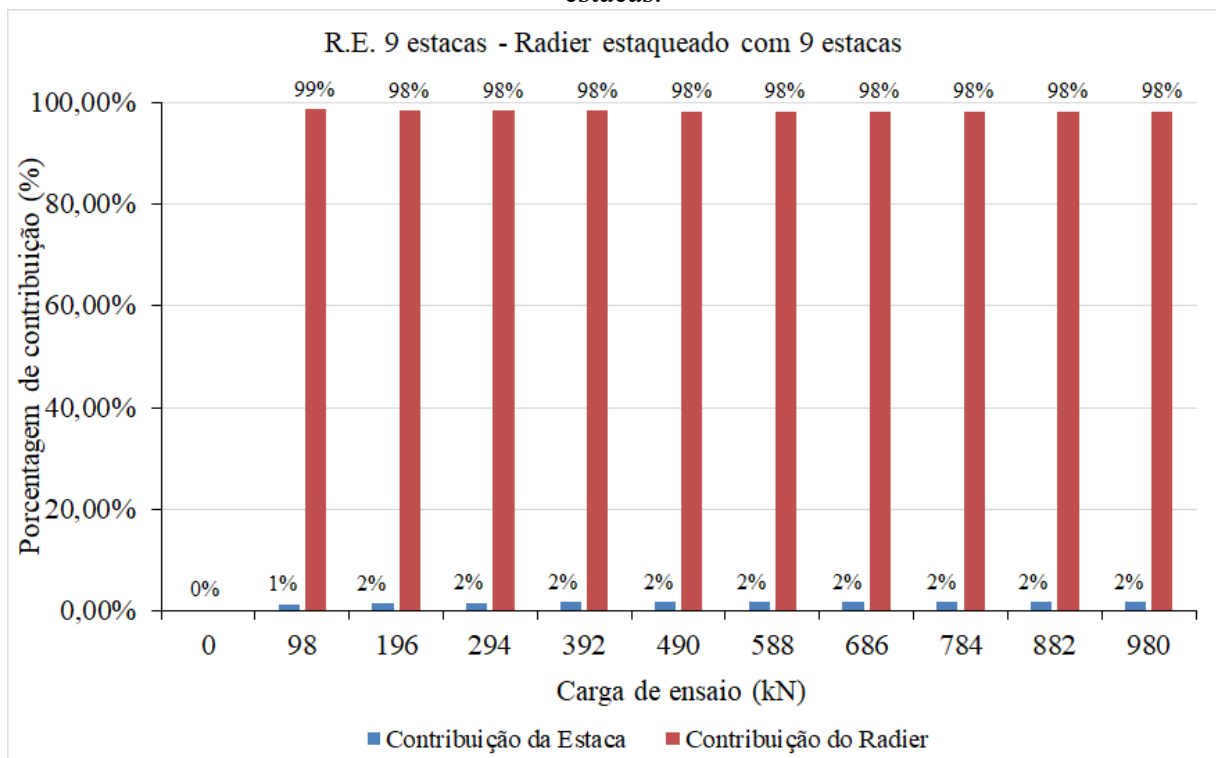


Figura 51 – Contribuição do radier e das estacas no radier estaqueado com 16 estacas.

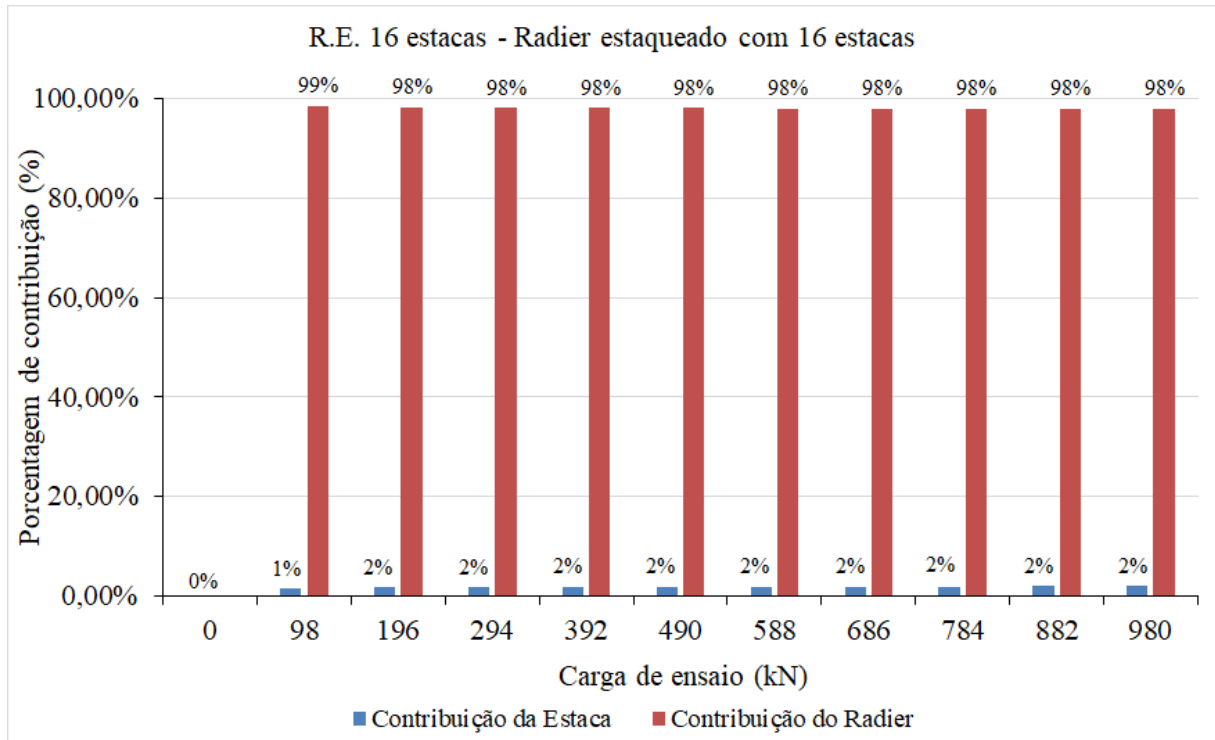
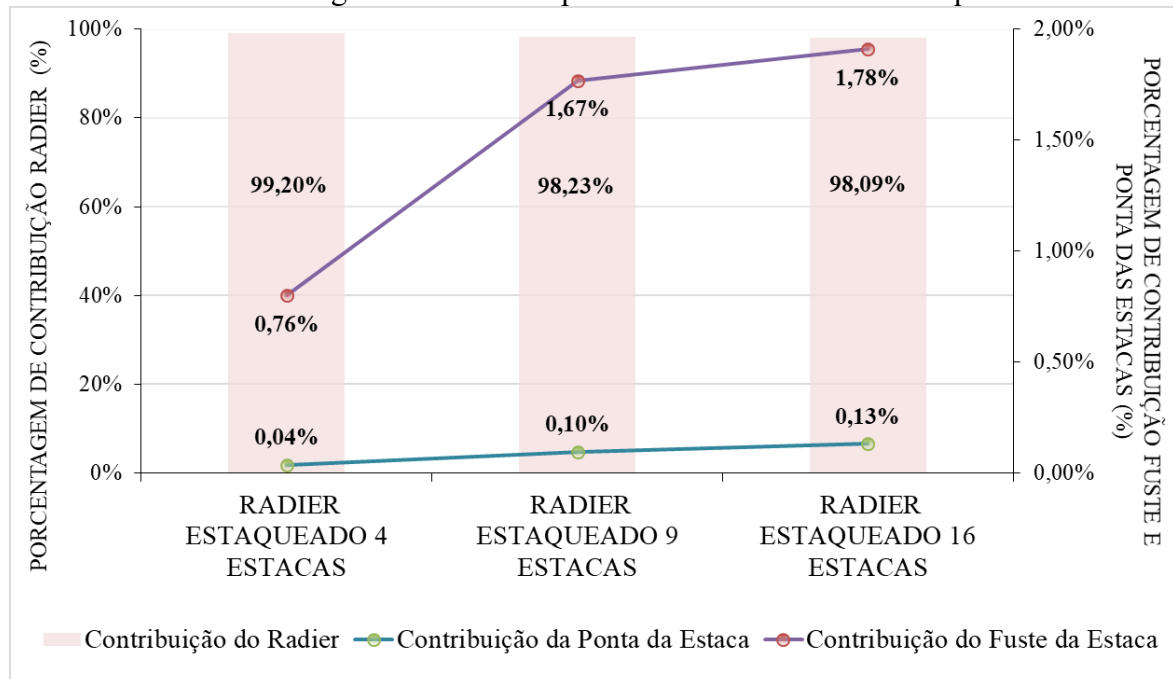


Figura 52 – Contribuição do radier, do fuste das estacas e da ponta das estacas no carregamento máximo para os 3 casos de radiers estaqueados.



Com a análise da contribuição do contato bloco-solo, nota-se a pequena participação na capacidade de carga no sistema das estacas em todos os casos de radiers estaqueados (Figuras

49 a 51). Apesar de se verificar que com o aumento no número de estacas, a um aumento na contribuição das estacas. Isso ocorre porque se trata de “grandes” radiers estaqueados, isto é,  $B/L > 1$ . Segundo consta no item 2.3 e no subitem 2.3.1, todos os radiers estaqueados analisados neste trabalho apresentam  $B/L = 1,4$  e de acordo com a classificação dada por Viggiani *et al.* (2012), são considerados “grandes”. Com isso, o bulbo de tensões excede o comprimento das estacas dissipando as tensões em camadas mais profundas do maciço (Figura 11). Além disso, pode-se firmar que a capacidade de carga do radier sem estaca (s) é suficiente para suportar a carga advinda da construção popular. E com as estacas adicionadas, o intuito é diminuir os recalques.

A Figura 52 compara a contribuição do radier, do fuste das estacas e da ponta das estacas entre os casos de radiers estaqueados no carregamento máximo. Sobre a contribuição do radier, ela diminui com o aumento das estacas, 99,20% para o R.E. 4 estacas e 98,23% e 98,09%, respectivamente, para o R.E. 9 estacas e R.E. 16 estacas. O contrário ocorre com a contribuição da ponta e fuste das estacas com o aumento no número de estacas. Sendo para a ponta das estacas, contribuição de 0,04% para o R.E. 4 estacas e de 0,10% e 0,13%, respectivamente, para o R.E. 9 estacas e R.E. 16 estacas. E para o fuste das estacas, de 0,76% para o R.E. 4 estacas e de 1,67% e 1,78%, respectivamente, para o R.E. 9 estacas e R.E. 16 estacas.

Essa diminuição da contribuição do radier, concomitantemente com o aumento da contribuição da ponta e fuste das estacas, com o aumento no número de estacas acontece por conta da área líquida ( $A_c$ ). Com mais estacas, há menor contato do radier com o solo (diminui a área líquida). A área líquida é área do radier menos a área das estacas. E por consequência, com maior número de estacas, haverá um aumento da contribuição destas no sistema. A Tabela 18 apresenta a área líquida para os 3 casos de radiers estaqueados e a porcentagem de diminuição dessa área em relação a área líquida do radier sem estacas.

Tabela 18 – Área do radier em contato com o solo (área líquida).

Radier Estaqueado	$A_r$ (m <sup>2</sup> )	$A_e$ (m <sup>2</sup> )	$A_c$ (m <sup>2</sup> )	Diminuição da área líquida (%)
<b>4 estacas</b>	49	0,20	48,80	0,40%
<b>9 estacas</b>		0,44	48,56	0,90%
<b>16 estacas</b>		0,79	48,21	1,60%

Em que,  $A_r$  é a área do radier (m<sup>2</sup>);  $A_e$  é a área de todas as estacas (m<sup>2</sup>), varia caso a caso;  $A_c$  é a área líquida.

Pela tabela acima, é evidente os valores baixos das áreas das estacas em comparação com a área do radier. Em vista disso, os valores de área líquida são muito elevados e consequentemente,

mesmo com o acréscimo de mais estacas, a diminuição da área líquida é muito pequena. Portanto, novamente pode-se afirmar que a porcentagem de contribuição do radier é muito elevada perante a contribuição das estacas como pode-se notar pelas Figuras 45 a 48 e também pela Tabela 18, o que indica que o radier, por si próprio, é capaz de suportar a carga da construção.

#### 4.4 Análise de SRF

A análise de recalque é importante para se ter conhecimento de quanto a inserção de estacas contribui para a redução dos recalques do radier isolado. Para isso, se utiliza do SRF, que vem do inglês “*settlement reduction factor*”, em português, significa fator de redução de recalques. Este é dado pela seguinte fórmula:

$$SRF = 1 - \frac{\delta_s^+}{\delta^*} \quad \text{(Equação 17)}$$

Em que,

$\delta_s^+$  é o recalque verificado no radier estaqueado;

$\delta^*$  é o recalque verificado no radier isolado.

Portanto, fez-se a análise de SRF entre o radier isolado em comparação com cada um dos 3 casos de radiers estaqueados a partir dos recalques no meio do radier, onde está o maior recalque observado no radier isolado. A Tabela 19 apresenta os valores de SRF para cada estágio de carregamento de acordo com o caso de radier estaqueado em comparação com o radier isolado.

Tabela 19 - Análise de SRF entre o radier isolado e os casos de radiers estaqueados.

$\delta^*$ Radier Isolado (mm)	$\delta^+$ R.E. 4 estacas (mm)	SRF	$\delta^+$ R.E. 9 estacas (mm)	SRF	$\delta^+$ R.E. 16 estacas (mm)	SRF
0,0	0,0	-	0,0	-	0,0	-
1,6	0,9	0,44	0,8	0,50	0,8	0,50
3,2	1,8	0,44	1,6	0,50	1,6	0,50
4,9	2,7	0,45	2,5	0,49	2,4	0,51
6,5	3,6	0,45	3,3	0,49	3,2	0,51
8,2	4,5	0,45	4,1	0,50	4	0,51
9,8	5,4	0,45	4,9	0,50	4,8	0,51
11,4	6,3	0,45	5,8	0,49	5,6	0,51
13,1	7,2	0,45	6,6	0,50	6,5	0,50
14,7	8,1	0,45	7,4	0,50	7,3	0,50
16,4	8,9	0,46	8,2	0,50	8,1	0,51

Por fim, a Tabela 20 – apresenta os valores de SRF para todos os casos de análise com os recalques máximos observados no meio do radier. Lembrando que esses recalques máximos acontecem no estágio de carregamento máximo (11º estágio).

Tabela 20 – SRF dos casos de análise para os recalques máximos no meio do radier.

	$\delta_{\text{máx}}$ (mm)	SRF
<b>Radier Isolado</b>	16,4	0,00
<b>Radier Estaqueado 4 estacas</b>	8,9	0,46
<b>Radier Estaqueado 9 estacas</b>	8,2	0,50
<b>Radier Estaqueado 16 estacas</b>	8,1	0,51

Pela análise de SRF através da Tabela 20, nota-se que com a utilização de 4 estacas no sistema de fundação o recalque diminui 46% em relação ao recalque no centro do radier isolado. Já com a utilização de 9 estacas, a redução é de 50% e com 16 estacas, de 51%.

Observa-se que com a introdução de 4 estacas, a redução foi expressiva. Essa redução aumentou mais com a utilização de 9 estacas no radier estaqueado, porém com acréscimo na redução de 4% comparada ao valor encontrado para o SRF no R.E. 4 estacas. A redução cresce mais um pouco com a utilização de 16 estacas, porém com um acréscimo de 1% na redução se comparado ao R.E. 9 estacas e 5% ao R.E. 16 estacas.

Como o aumento de SRF é muito pequeno entre o R.E. 9 estacas e o R.E. 16 estacas, e levando em consideração que há um aumento de 7 estacas, pode ser que a opção de radier estaqueado com 16 estacas se torne muito onerosa para os benefícios que traz para a fundação. Portanto, a utilização desse tipo de sistema de fundação com 16 estacas já é desconsiderada para a otimização.

Com suas devidas proporções, o mesmo ocorre entre o R.E. 4 estacas e o R.E. 9 estacas. Há um aumento pequeno de SRF, porém maior do que na comparação R.E. 9 e 16 estacas, e há um aumento de 5 estacas, o que pode também tornar essa opção onerosa para os benefícios que traz para a fundação. Entretanto, ressalta-se que para os recalques diferenciais o R.E. 9 estacas é a melhor opção. Com isso, uma análise de custo-recalque se torna essencial.

Por fim, nota-se que com a utilização de 4 estacas no radier, o aumento do SRF é grande e pela quantidade de estacas inseridas é vantajoso pelo melhoramento no desempenho da fundação em construções populares. Assim, como o R.E. 9 e 16 estacas também é, no melhoramento do

desempenho, entretanto, o que está sendo discutido é se o valor gasto para a execução de mais estacas compensa os benefícios que um radier estaqueado com mais estacas trará a fundação. Com isso, uma análise mais detalhada dos custos para a execução de estacas deve ser feita para se ter a melhor configuração do radier estaqueado para se utilizar como sistema de fundação em construções populares.

## 5 CONCLUSÃO

Considerando os resultados obtidos nas análises, pode-se concluir que construções populares construídas em solos pouco resistentes (areias fofas e argilas moles) com sistema de fundação em radier isolado apresentam recalques elevados. E a inserção de estacas, ajuda no controle e na redução desses recalques.

As estacas funcionam como elementos redutores de recalque, tendo participação muito pequena na capacidade de carga do conjunto. No radier isolado, no estágio de carregamento máximo, o recalque observado foi de 16,40mm no centro do radier. Utilizando-se do sistema de fundação em radier estaqueado com 4 estacas, no estágio de carregamento máximo, o recalque observado foi de 8,90mm. Percebe-se a redução dos valores de recalque. Além disso, com o aumento do número de estacas, há maiores reduções. Para o radier estaqueado de 9 estacas, o recalque máximo observado foi de 8,20mm e para o radier estaqueado de 16 estacas, de 8,10mm.

Outra observação é que com a inserção de estacas, as tensões de contato de um radier flexível passem a se comportar como a de um radier rígido. Além disso, quanto maior o número de estacas, maior a rigidez do radier e conseqüentemente, serão menores os recalques diferenciais. Porém, destaca-se que, para os recalques diferenciais, o melhor sistema de fundação é o radier estaqueado com 9 estacas.

Com relação as curvas de transferência, conclui-se que com o maior número de estacas, menos solicitadas estão as estacas. Outro ponto, é que com a análise metro a metro de cada estaca componente de cada radier estaqueado percebeu-se a diferença de solicitação entre as estacas centrais e as estacas de bordo. No caso do radier estaqueado com 4 estacas, as duas estacas apresentaram resultados iguais. Porém, para o caso do radier estaqueado com 9 estacas, a estaca central estava menos solicitada que as duas estacas de bordo. O mesmo aconteceu com o radier estaqueado com 16 estacas, as duas estacas centrais estavam menos solicitadas que as duas estacas de bordo.

A análise de contribuição do contato bloco-solo foi importante para notar que as estacas apresentam participação muito pequena na capacidade de carga da fundação. Nos 3 casos de radiers estaqueados, estes sistemas de fundação são considerados “grandes”, isto é,  $B/L > 1$  e por conta do bulbo de tensões do radier, faz com que as estacas não tenham participação relevante na contribuição de carga e atuem somente na redução dos recalques. Com isso, conclui-se que o radier sem estacas tem capacidade de carga suficiente para suportar a carga da construção popular.

O radier estaqueado com 4 estacas apresentou uma contribuição do radier no carregamento máximo de 99,20%, e de 98,23% e 98,09% para os radiers estaqueados com 9 e 16 estacas, respectivamente. Essa diminuição, mesmo que muito pequena, é justificada pela diminuição da área líquida do radier em contato com o solo. Com maior número de estacas, reduz a área de contato do radier.

Na análise de SRF, tem-se a sintetização da ideia de otimização dos projetos de fundação para melhoramento de desempenho de construções populares. Pois, com a análise do SRF, nota-se que a inserção de estacas melhora os recalques e evita possíveis patologias no sistema de fundação. Com o maior número de estacas, maior o valor de SRF. Para o caso do radier estaqueado com 4 estacas, o valor de SRF foi de 0,46 para o carregamento máximo referente ao recalque no centro do radier, e de 0,50 e 0,51 para os radiers estaqueados com 9 e 16 estacas, respectivamente.

Pelos valores obtidos de recalque com o aumento no número de estacas e pelos valores de SRF, conclui-se que a utilização de 16 estacas ou mais não trará resultados expressivos para a otimização da fundação. Isto porque o SRF aumentou somente 1% do radier estaqueado com 16 estacas em relação ao radier estaqueado com 9 estacas.

Portanto, a utilização de estacas e do sistema em radier estaqueado melhora o desempenho das fundações utilizadas na construção de habitações populares e faz com que a fundação seja otimizada.

Do ponto de vista financeiro, uma redução de 46% no recalque entre o radier estaqueado com 4 estacas em relação a fundação em radier isolado se mostra eficaz. Porém, para maiores números de estacas, mesmo que com 9 estacas se tenha uma redução de 50%, é necessário fazer uma análise de custo e fazer a relação recalque-custo para obter a melhor configuração para o radier estaqueado. Ressaltando que a análise dos recalques diferenciais também é importante, e sob o aspecto técnico, o radier estaqueado com 9 estacas se sobressai em relação ao com 4 estacas.



Um último ponto a se destacar é a filosofia de projeto utilizado, pensando-se em redução de recalques totais e diferenciais. De acordo com Randolph (1994), a filosofia adotada para este trabalho é o de controle de recalques diferenciais.

Por fim, sistemas de fundação em radier estaqueado em solos de baixa resistência são eficazes para essas situações. E a utilização de estaca com área de influência entre 5,44 a 12,25m<sup>2</sup> podem reduzir os recalques em até 50% se comparado aos recalques de um radier isolado para uma construção popular em solos de baixa resistência.

### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Analisar o sistema em radier estaqueado com melhor relação custo benefício e recalque;
- Alterar os comprimentos das estacas e observar as alterações no comportamento do sistema de fundação;
- Alterar a área de influência de cada estaca entre 5,44 e 12,25m<sup>2</sup> e observar o impacto nos recalques totais e diferenciais;
- Alterar as espessuras dos radiers e observar as alterações no comportamento do sistema de fundação;
- Por meio de uma ferramenta computacional 3D em elementos finitos, realizar as modelagens numéricas com os casos de análise desse trabalho visando determinar se às análises 2D (simplificadas) possuem boa concordância com o modelo de análise sofisticado em MEF3D.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. p. 238, 2014.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. p. 1–18, 1996.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. p. 1–18, 2010.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. p. 1–17, 2001.

- AKINMUSURU, J. O. The influence of a pile cap on bearing capacity of piles in sand. Dissertação de mestrado. University of Zaria Nigéria, 1973.
- AYALA, D. J. Uso da Técnica de Radier Estaqueado para Pequenos Edifícios Assentes Sobre Solo Colapsível. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, p.181, 2013.
- BALAAM, N. P., POULOS, H. G.; BOOKER, J. R. Finite element analysis of the effects of installation on pile load-settlement behaviour. *Geotech. Engng* 6, Ejo. 1, 33-48, 1975.
- BALAKUMAR, V.; ANIRUDHAN, I. V. Piled raft behaviour-model studies and field performance. *Proceedings of Indian Geotechnical Conference*. December 15-17, Kochi, India: 947-950, 2011.
- BANERJEE, P. K. Analysis of axially and laterally loaded pile groups. In *Developments in Soil Mechanics*.ed. C. Scott, Ch. 9, London: Applied Science Publishers, 1978.
- BANERJEE, P. K.; DAVIES, T. G. The behavior of axially and laterally loaded single piles embedded in non-homogeneous soils. *Geotechnique* 28, No. 3, 309-326, 1978.
- BEZERRA, J. E. Estudo do comportamento de fundações em radier estaqueado: conceitos e aplicações. p. 213, 2003.
- BITTENCOURT, D. M. A. Construção de uma ferramenta numérica para análise de radiers estaqueados. p. 221, 2012.
- BJERRUM, L. Allowable Settlement of Structures, *Proceedings European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Wiesbaden, Germany, Vol III, pg 135–137, 1963.
- BURLAND, J.B. Piles as settlement reducers. *Proc. 19<sup>th</sup> Italian National Conference on Soil Mechanics*, Pavia, 1995.
- BURLAND, J. B.; BROMS, B. B.; DE MELLO, V. F. B. Behaviour of foundations and structures. *9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, n. January 1977, p. 53, 1977.
- BUTTERFIELD, R.; BANERJEE, P. K. The Elastic Analysis of Compressible Piles and Pile Groups. *Géotechnique*, v. 21, n. 1, p. 43–60, 1971a.
- BUTTERFIELD, R.; BANERJEE, P. K. The Problem of Pile Group – Pile Cap Interaction. *Géotchnique*, n. January, p. 8, 1971b.
- CASTILLO, D. J. A. Uso da técnica de radier estaqueado para pequenos edifícios assentes sobre solo colapsível. p. 181, 2013.
- COLLANTES, C. A. P. Avaliação da influência da posição da estaca integrando um radier estaqueado em sua capacidade de carga lateral. p. 116, 2017.
- CORDEIRO, A. F. B. Avaliação Numérica de Reforço de Grupo de Estacas pela Introdução de Estacas Adicionais Brasília, 2007.

- COYLE, H.M.; REESE, L.C. Load Transfer for Axially Loaded Pile in Clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 92, 1-26, 1966.
- CUNHA, R. P.; BEZERRA, J. E.; ZHANG, H. H.; SMALL, J. C. Back analyzed parameters from piled foundations founded on tropical porous clay. *GeoSupport 2004: Innovation and Cooperation in the Geo-Industry*: 1-12, 2004.
- DE MELLO, V. F. B. Deformações como base fundamental de escolha da fundação. *Portugal. Geotecnia*, 1975.
- DE SANCTIS, L.; RUSSO, G.; VIGGIANI, C. Piled raft on layered soils. *Ninth International Conference on Piling and Deep Foundations*, v. 1, n. June, 2002.
- DESAI, C. S. Numerical design-analysis for piles in sands. *J. Geotech. Engng, Am. Soc. Civ. Engrs* 100, No. GT6, 613 – 635, 1974.
- EMBRAPA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 2ª Edição ed. Rio de Janeiro: [s.n.].
- FILHO, R.G. Obras sobre solos moles e suas respectivas soluções: um exemplo prático da obra de um Complexo de Vacinas em Santa Cruz, RJ. *Universidade Federal do Rio de Janeiro*, p. 151, 2017.
- FIORAVANTE, V.; GIRETTI, D. Contact versus Noncontact Piled Raft Foundations. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 47. No. 11. pp. 1271-1287, 2010.
- FLEMING, K. et al. *Piling Engineering*. 3rd Editio ed. [s.l.] Taylor & Francis, 2009.
- FRANKE, E.; EL-MOSSALLAMY, Y.; WITTMANN, P. Calculation Methods for Raft Foundations in Germany. In: HEMSLEY, J. A. *Design applications of raft foundations*. 1sted. London: Thomas Telford Ltd. 2000. p. 283-322, 2000.
- GARCIA, J. R. Análise experimental e numérica de radiers estaqueados executados em solo da região de Campinas/SP. p. 321, 2015.
- HACHICH, W. et al. (EDS.). *FUNDAÇÕES: Teoria e prática*. 2ª edição ed. São Paulo: PINI, 1998.
- HIROMOTO, M.H. Análise de três dimensões do Programa Minha Casa Minha Vida: Expansão Urban, Infraestrutura de Saneamento e Emprego. *Tese de Doutorado*, São Paulo, p. 160, 2018.
- HORIKOSHI, K.; RANDOLPH, M. F. Optimum design of piled raft foundations. *14th ICSMFE*, p. 1073–1076, 1997.
- HORIKOSHI, K.; RANDOLPH, M. F. A Contribution to Optimum Design of Piled Rafts. *Geotechnique*, 48(3): 301-317, 1998
- JARDINE, R. J. et al. Studies of the influence of non-linear stress–strain characteristics in soil–structure interaction. *Géotechnique*, v. 36, n. 3, p. 377–396, 1986.

- JOPPERT JR., I. Fundações e Contensões de Edifícios - Qualidade Total na Gestão do Projeto e Execução. [s.l.] PINI, 2007.
- KAMON, M.; BERGADO, D.T. Ground Improvement Techniques. Proc. 9th Asian Regional Conf. Soil Mech. Found. Eng., Bangkok, Thailand, p. 526-546, 1991.
- KATZENBACH, R. Theory and Practice of Cost-Optimised and Sustainable Deep Foundation Systems for High-Rise Buildings and Civil Engineering Structures. SEFE7, 2012.
- KATZENBACH, R.; BACHMANN, G.; BOLED-MEKASHA, G.; RAMM, H. Combined Pile Raft Foundations (CPRF): An appropriate solution for the foundations of high-rise buildings. Slovak Journal of Civil Engineering, v. 3, p. 19–29, 2005.
- KEMPFERT, H.G.; GEBRESELASSIE, B. Excavations and Foundations in Soft Soils. Springer Verlag NY, New York, USA, p. 576, 2006.
- KISHIDA, H.; MEYERHOF, G. G. Bearing capacity of piles groups under eccentric loads in sand. Proc. of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, v. c, p. 270–274, 1965.
- LARCHER, J. V. M. Diretrizes visando a melhoria de projetos e soluções construtivas na expansão de habitações de interesse social. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2005.
- LEE, J.; KIM, Y.; JEONG, S. Three-dimensional analysis of bearing behavior of piled raft on soft clay. Computers and Geotechnics, 37(1): 103-114, 2010.
- LIMA, B. S. Otimização de Fundações Estaqueadas. [s.l.] Universidade Federal de Brasília, 2007.
- MAHARAJ, D.K.; GANDHI, S.R. Non-linear Finite Element Analysis of Piled Raft Foundations. Geotechnical Engineering, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, July 2004, Vol. 157, GE3, pp 107-113, 2004.
- MANDOLINI, A. Design of piled raft foundations : practice and development. 4th International Geotechnical Seminar on Deep Foundation on Bored and Auger Piles, p. 59–80, 2003.
- MANDOLINI, A.; RUSSO, G.; VIGGIANI, C. Pile foundations : experimental investigations , analysis and design Fondations sur pieux : recherche expérimentale , analyse et projet. Xvi Icsmge, n. 2003, p. 37 p., 2005.
- MASSAD, F. Solos marinhos da Baixada Santista: características e propriedades geotécnicas. Oficina de Textos, São Paulo, 2009.
- MATTES, N. S.; POULOS, H. G. Settlement of Single Compressible Pile. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, v. 95, n. 1, p. 189–208, 1969.
- MILITITSKY, J.; CONSOLI, N. C.; SCHNAID, F. Patologia das Fundações. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

- MORAGA, G.L. Avaliação do Ciclo de Vida e simulação termoenergética em unidade habitacional unifamiliar do Programa Minha Casa Minha Vida. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.161, 2017.
- NETO, O. DE F. Avaliação experimental e numérica de radiers estaqueados com estacas defeituosas em solo tropical do brasil. p. 293, 2013.
- NOVAIS, G. T. Caracterização climática da mesorregião do triângulo mineiro / alto paranaíba e do entorno da serra da canastra ( mg ), 2011.
- OLIVEIRA,B.L.M. Avaliação do atrito negativo em grupos de estacas assentes em solos moles. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Brasília,Brasília, p. 143, 2018.
- OMEMAN, Z. M. Load sharing of piled-raft foundations in sand subjected to vertical loads. Canda, 2012.
- OTTAVIANI, M. Three-dimensional finite element analysis of vertically loaded pile groups. *Geotechnique*, 25, No. 2, 159-174, 1975.
- PEREIRA, T.R. O desenho das habitações populares e sua influência sobre a privacidade e conflitos de convivência dos moradores: casos dos Residenciais Tocantins 1 e 2. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, p. 199, 2017.
- PHUNG, D. L. Footings with settlement-reducing piles in non-cohesive soil. Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 1993.
- PINTO, C.S. Curso básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas. 3ª edição, Oficina de Textos, São Paulo, 2006.
- POULOS, H. G. Alternative Design Strategies for Pile Raft Foundations. 3rd Int. Conf. Deep Foundations, Singapore, p. 239-244, 1994b.
- POULOS, H.G. An approximate numerical analysis of pile-raft interaction. *Int. Journal for Num. & Anal. Meth. In Geomechanics*, 18:73-92, 1994a.
- POULOS, H. G. Analysis of the Settlement of Pile Groups. n. December 1968, 1968a.
- POULOS, H. G. Analysis of the Settlement of Pile Groups. *Géotechnique*, v. 18, n. 4, p. 449–471, 1968b.
- POULOS, H. G. Pile behaviour—theory and application. *Géotechnique*, v. 39, n. 3, p. 365–415, 1989.
- POULOS, H. G. Piled raft foundations: design and applications. *Géotechnique*, v. 51, n. 2, p. 95–113, 2001.
- POULOS, H. G. Piled Raft and Compensated Piled Raft Foundations for Soft Soil Sites. v. 40772, n. December, p. 214–235, 2005.

- POULOS, H. G. Practical design procedures for piled raft foundations. In: HEMSLEY, J. A. (editor). Design applications of raft foundations. 1st ed. London: Thomas Telford Ltd. p. 425-467, 2000.
- POULOS, H. G. The de Mello foundation engineering legacy. *Soils and Rocks*, v. 34, n. 1, p. 3–34, 2011.
- POULOS, H. G.; DAVIS, E. H. *Pile Foundations Analysis and Design*. John Wiley and Sons, New York, 397p, 1980.
- POULOS, H. G.; DAVIS, E. H. The Settlement Behaviour of Single Axially Loaded Incompressible Piles and Piers. *Géotechnique*, v. 18, n. 3, p. 351–371, 1968.
- PÓVOA, L. M. M. Caracterização geotécnica de um depósito de solo mole em área de baixada localizada em Macaé-RJ. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, p. 138, 2016.
- RANDOLPH, M. F. Design methods for pile groups and piled rafts. XIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, p. 61–82, 1994a.
- RANDOLPH, M. F. Design Methods for pile groups and pile rafts. XIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Anais...New Delhi: ISSMGE, 1994b
- RANDOLPH, M.F.; CLANCY, P. Design and Performance of a Piled Raft Foundation. Research Report G1088. Dep. of Civil Eng. Univ. of Western Australia, 1994.
- RANDOLPH, M. F.; WROTH, C. P. Analyses of deformation of vertically loaded piles. *J. Geotech. Engng, Am. Soc. Ciu. Engrs* 104, No. GT12, 1465-1488, 1978.
- REUL, O. Soil-structure-interaction of a pile draft foundation of a 121 m high office building in Berlin. Proc. 12<sup>th</sup> European Young Geot. Eng. Confer., Tallinn, Estonia, p. 1-12, 1998.
- RINCON, E.R. Análise experimental do comportamento de sistemas radier estaqueado em solos moles em processos de adensamento. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, p. 237, 2016.
- SALES, M. M. Análise do comportamento de sapatas estaqueadas. p. 257, 2000.
- SALES, M. M.; SMALL, J. C.; POULOS, H. G. Compensated piled rafts in clayey soils: behaviour, measurements, and predictions. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 47, n. 3, p. 327–345, 2010.
- SOARES, W. C. Radier estaqueado com estacas hollow auger em solo arenoso. p. 340, 2011.
- SOUSA, L. C. DE M. Estudo Experimental Do Comportamento De Sapatas, 2003.
- TEIXIERA, R. S. Resistência ao cisalhamento de um solo compactado não saturado. Dissertação de mestrado, Departamento de Geotecnia, São Carlos, EESC/USP. 161p, 1996.

- TEIXIERA, A. H.; GODOY, N. S. Análise, projeto e execução de fundações rasas. In. Hachich et al. (eds). Fundações: teoria e prática. São Paulo: Pini. p. 227-264, 1996.
- TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. Soil Mechanics in Engineering Practice. Third Edition. New York: Wiley-Interscience, 1996.
- VALLIAPPAN, S., LEE, I. K.; BOONLUALOHR, P. Settlement of piles in layered soils. Proc. 7th Biennial Conf., Aust. Road Res. Board, Adelaide I, Pt 7, 144-153, 1974.
- VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. Fundações Vol. 1. Nova Edição. São Paulo, SP, Oficina de Textos, 2004.
- VIGGIANI, C.; MANDOLINI, A.; RUSSO, G. Piles and Pile Foundations. Editora: Spon Press, New York – USA, p. 278, 2012.
- ZEEVAERT, L. Compensated friction-pile to reduce the settlement of the highly compressible volcanic clay of Mexico City. Proceedings of the fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, p. 81–86, 1957.

## ANEXO A

### Especificação da Tipologia 1 (Casa Térrea com 35m<sup>2</sup>)

- Compartimentos: sala, cozinha, banheiro, 2 dormitórios, área externa com tanque;
- Área da unidade: 35m<sup>2</sup>;
- Área interna: 32m<sup>2</sup>;
- Piso: cerâmico na cozinha e banheiro, cimentado no restante;
- Revestimento de alvenarias: azulejo 1,50m nas paredes hidráulicas e box. Reboco interno e externo com pintura PVA no restante;
- Forro: laje de concreto ou forro de madeira ou pvc;
- Cobertura: telha cerâmica;
- Esquadrias: janelas de ferro ou alumínio e portas de madeira;
- Dimensões dos compartimentos: compatível com mobiliário mínimo;
- Pé-direito: 2,20m na cozinha e banheiro, 2,50m no restante;
- Instalações hidráulicas: número de pontos definido, medição independente;
- Instalações elétricas: número de pontos definido, especificação mínima de materiais;
- Aquecimento solar/térmico: instalação de kit completo;
- Passeio: 0,50m no perímetro da construção.

### Especificação da Tipologia 2 (apartamento com 42m<sup>2</sup>)

- Compartimentos: sala, cozinha, área de serviço, banheiro, 2 dormitórios;
- Prédio: 4 pavimentos, 16 apartamentos por bloco – opção: até 5 pavimentos e 20 apartamentos;
- Área da unidade: 42m<sup>2</sup>;
- Área interna: 37m<sup>2</sup>;
- Piso: cerâmico na cozinha e banheiro, cimentado no restante;
- Revestimento de alvenarias: azulejo 1,50m nas paredes hidráulicas e box. Reboco interno e externo com pintura PVA no restante;
- Forro: laje de concreto;
- Cobertura: telha fibrocimento;
- Esquadrias: janelas de ferro ou alumínio e portas de madeira;
- Dimensões dos compartimentos: compatível com mobiliário mínimo;
- Pé-direito: 2,20m na cozinha e banheiro, 2,40m no restante;



- Instalações hidráulicas: número de pontos definido, medição independente;
- Instalações elétricas: número de pontos definido, especificação mínima de materiais;
- Aquecimento solar/térmico: instalação de kit completo;
- Passeio: 0,50m no perímetro da construção.

## ANEXO B

## Parâmetros Médio do Solo

Tipo de solo	Faixa de STP	Módulo de elasticidade (t/m <sup>2</sup> )	Peso específico (g)		Ângulo atrito efetivo (f)	Coesão efetiva (tf/m <sup>2</sup> )
			Natural (t/m <sup>3</sup> )	Saturado (t/m <sup>3</sup> )		
Areia pouco siltosa / pouco argilosa	0 - 4	2000 - 5000	1,7	1,8	25°	–
	5 - 8	4000 - 8000	1,8	1,9	30°	–
	9 - 18	5000 - 10000	1,9	2,0	32°	–
	19 - 41	8000 - 15000	2,0	2,1	35°	–
	≥ 41	16000 - 20000	2,0	2,1	38°	–
Areia média e fina muito argilosa	0 - 4	2000	1,7	1,8	25°	0
	5 - 8	4000	1,8	1,9	28°	0,5
	9 - 18	5000	1,9	2,0	30°	0,75
	19 - 41	10000	2,0	2,1	32°	1,0
Argila porosa vermelha e amarela	0 - 2	200 - 500	1,5	1,7	20°	0,75
	3 - 5	500 - 1000	1,6	1,7	23°	1,5
	6 - 10	1000 - 2000	1,7	1,8	25°	3,0
	≥ 10	2000 - 3000	1,8	1,9	25°	3,0 a 7,0
Argila siltosa pouco arenosa (terciário)	0 - 2	100	1,7	1,8	20°	0,75
	3 - 5	100 - 250	1,8	1,9	23°	1,5
	6 - 10	250 - 500	1,9	1,9	24°	2,0
	11 - 19	500 - 1000	1,9	1,9	24°	3,0
	20 - 30	3000 - 10000	2,0	2,0	25°	4,0
	≥ 30	10000 - 15000	2,0	2,0	25°	5,0
Argila arenosa pouco siltosa	0 - 2	500	1,5	1,7	15°	1,0
	3 - 5	500 - 1500	1,7	1,8	15°	2,0
	6 - 10	1500 - 2000	1,8	1,9	18°	3,5
	11 - 19	2000 - 3500	1,9	1,9	20°	5,0
	≥ 20	3500 - 5000	2,0	2,0	25°	6,5
Turfa / argila orgânica (quaternário)	0 - 1	40 - 100	1,1	1,1	15°	0,5
	2 - 5	100 - 150	1,2	1,2	15°	1,0
Silte arenoso pouco argiloso (residual)	5 - 8	8000	1,8	1,9	25°	1,5
	9 - 18	1000	1,9	2,0	26°	2,0
	19 - 41	15000	2,0	2,0	27°	3,0
	≥ 41	20000	2,1	2,1	28°	5,0

## APÊNDICE A

Radier isolado			Radier estaqueado 4 estacas		
$\sigma$ (kPa)	q (kN)	Recalque (mm)	$\sigma$ (kPa)	q (kN)	Recalque (mm)
0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
2	98,00	1,60	2	98,00	0,90
4	196,00	3,20	4	196,00	1,80
6	294,00	4,90	6	294,00	2,70
8	392,00	6,50	8	392,00	3,60
10	490,00	8,20	10	490,00	4,50
12	588,00	9,80	12	588,00	5,40
14	686,00	11,40	14	686,00	6,30
16	784,00	13,10	16	784,00	7,20
18	882,00	14,70	18	882,00	8,10
20	980,00	16,40	20	980,00	8,90
15	735,00	12,30	15	735,00	6,70
10	490,00	8,20	10	490,00	4,50
5	245,00	4,10	5	245,00	2,20
0	0,00	0,00	0	0,00	0,00

Radier estaqueado 9 estacas			Radier estaqueado 16 estacas		
$\sigma$ (kPa)	q (kN)	Recalque (mm)	$\sigma$ (kPa)	q (kN)	Recalque (mm)
0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
2	98,00	0,80	2	98,00	0,80
4	196,00	1,60	4	196,00	1,60
6	294,00	2,50	6	294,00	2,40
8	392,00	3,30	8	392,00	3,20
10	490,00	4,10	10	490,00	4,00
12	588,00	4,90	12	588,00	4,80
14	686,00	5,80	14	686,00	5,60
16	784,00	6,60	16	784,00	6,50
18	882,00	7,40	18	882,00	7,30
20	980,00	8,20	20	980,00	8,10
15	735,00	6,20	15	735,00	6,00
10	490,00	4,10	10	490,00	4,00
5	245,00	2,00	5	245,00	2,00
0	0,00	0,00	0	0,00	0,00

## APÊNDICE B

### RADIER ESTAQUEADO COM 9 ESTACAS

CARGAS MÉDIAS DA ESTACA CENTRAL											
PROFUNDIDADE DA ESTACA	ESTÁGIO										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m	Carga - (KN)										
0	0,00	0,07	2,63	5,46	8,30	11,14	13,99	16,83	19,68	22,52	25,37
1	0,00	0,71	1,43	2,14	2,86	3,58	4,29	5,01	5,73	6,44	7,14
2	0,00	0,75	1,50	2,25	3,00	3,75	4,50	5,25	6,00	6,75	7,50
3	0,00	0,70	1,41	2,11	2,81	3,52	4,22	4,93	6,03	6,33	7,04
4	0,00	0,56	1,12	1,68	2,24	2,79	3,35	3,91	4,47	5,03	5,59
5	0,00	0,20	0,41	0,62	0,82	0,61	1,24	1,45	1,66	1,87	2,08
CARGAS MÉDIAS DAS ESTACAS DE BORDO											
PROFUNDIDADE DA ESTACA	ESTÁGIO										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m	Carga - (KN)										
0	0,00	4,28	8,91	13,57	18,22	22,88	27,54	32,20	36,87	41,53	46,19
1	0,00	0,70	1,35	2,10	2,84	3,63	4,11	5,33	5,81	6,55	7,29
2	0,00	0,99	1,87	2,93	3,75	5,06	6,13	7,68	8,26	9,33	10,39
3	0,00	1,18	2,40	3,64	4,84	6,06	7,28	8,01	9,72	10,94	12,16
4	0,00	0,60	1,22	1,91	2,64	3,39	4,13	4,88	5,63	6,39	7,14
5	0,00	0,21	0,43	0,64	0,64	1,08	1,30	1,51	1,73	1,95	2,17

### RADIER ESTAQUEADO COM 16 ESTACAS

CARGAS MÉDIAS DAS ESTACAS CENTRAIS											
PROFUNDIDADE DA ESTACA	ESTÁGIO										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m	Carga - (KN)										
0	0,00	0,79	2,22	3,69	5,16	6,63	8,10	9,57	11,05	12,52	13,99
1	0,00	0,45	0,97	1,49	2,01	2,54	3,07	3,59	4,13	4,66	5,19
2	0,00	0,61	1,01	1,38	2,03	2,54	3,05	3,55	4,06	4,57	5,08
3	0,00	0,61	1,11	1,60	2,10	2,59	3,09	3,58	4,08	4,58	5,09
4	0,00	0,75	1,16	1,57	1,97	2,38	2,79	3,20	3,61	4,01	4,42
5	0,00	0,15	0,30	0,46	0,61	0,76	0,92	1,07	1,22	1,38	1,53
CARGAS MÉDIAS DAS ESTACAS DE BORDO											
PROFUNDIDADE DA ESTACA	ESTÁGIO										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m	Carga - (KN)										
0	0,00	2,57	6,02	9,48	12,86	16,40	19,87	23,33	26,79	30,25	33,71
1	0,00	0,60	1,21	2,00	2,46	3,26	3,73	4,57	5,22	5,87	6,53
2	0,00	0,64	1,41	2,43	3,08	3,92	4,75	5,39	6,43	7,27	8,10
3	0,00	0,79	1,86	2,89	3,94	5,29	6,05	7,10	8,15	9,20	10,25
4	0,00	0,37	1,12	1,60	2,15	3,04	3,76	4,49	5,21	5,94	6,66
5	0,00	0,17	0,34	0,52	0,69	0,87	1,04	1,21	1,39	1,56	1,74

## APÊNDICE C

CARGA DE ENSAIO	Porcentagem de contribuição (%)	
	ESTACA	RADIER
KN	%	%
0,00	0,00%	0,00%
98,00	0,70%	99,30%
196,00	0,76%	99,24%
294,00	0,77%	99,23%
392,00	0,78%	99,22%
490,00	0,79%	99,21%
588,00	0,79%	99,21%
686,00	0,80%	99,20%
784,00	0,80%	99,20%
882,00	0,80%	99,20%
980,00	0,80%	99,20%

RADIER ESTAQUEADO  
COM 4 ESTACAS

CARGA DE ENSAIO	Porcentagem de contribuição (%)	
	ESTACA	RADIER
KN	%	%
0,00	0,00%	0,00%
98,00	1,29%	98,71%
196,00	1,54%	98,46%
294,00	1,63%	98,37%
392,00	1,68%	98,32%
490,00	1,71%	98,29%
588,00	1,73%	98,27%
686,00	1,74%	98,26%
784,00	1,75%	98,25%
882,00	1,76%	98,24%
980,00	1,77%	98,23%

RADIER ESTAQUEADO  
COM 9 ESTACAS

CARGA DE ENSAIO	Porcentagem de contribuição (%)	
	ESTACA	RADIER
KN	%	%
0,00	0,00%	0,00%
98,00	1,35%	98,65%
196,00	1,65%	98,35%
294,00	1,76%	98,24%
392,00	1,80%	98,20%
490,00	1,85%	98,15%
588,00	1,87%	98,13%
686,00	1,88%	98,12%
784,00	1,90%	98,10%
882,00	1,90%	98,10%
980,00	1,91%	98,09%

RADIER ESTAQUEADO  
COM 16 ESTACAS