



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA

Bruna Mariane de Moura

***ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE RADIERS
ESTAQUEADOS À LUZ DE METODOLOGIAS
ANALÍTICAS***

OURO BRANCO-MG
DEZEMBRO/2021

Bruna Mariane de Moura

***ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE RADIERS
ESTAQUEADOS À LUZ DE METODOLOGIAS
ANALÍTICAS***

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado à Coordenação do
Curso de Graduação em Engenharia
Civil, da Universidade Federal de São
João del-Rei, *Campus* Alto
Paraopeba, como requisito parcial
para a obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Civil

Orientador: Leandro Neves Duarte

OURO BRANCO-MG
DEZEMBRO/2021

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ, com
os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M929a Moura, Bruna Mariane de .
Análise do comportamento de radiers estaqueados à
luz de metodologias analíticas / Bruna Mariane de
Moura ; orientador Leandro Neves Duarte. -- Ouro
Branco, 2021.
71 p.

Trabalho de Conclusão (Graduação - Engenharia
Civil) -- Universidade Federal de São João del-Rei,
2021.

1. radier estaqueado. 2. método simplificado PDR.
3. previsão de carga radier estaqueado. 4. previsão
de recalque radier estaqueado. I. Duarte, Leandro
Neves, orient. II. Título.

Bruna Mariane de Moura

***ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE RADIERS
ESTAQUEADOS À LUZ DE METODOLOGIAS
ANALÍTICAS***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Alto Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 13 / 12 / 2021

COMISSÃO EXAMINADORA:

Leandro Neves Duarte
Professor Orientador de PFC

Tales Moreira de Oliveira
Professor da Engenharia Civil da UFSJ

Paulo Roberto Borges
Avaliador Convidado

AGRADECIMENTOS

A Deus e Nossa Senhora Aparecida, a quem tenho especial devoção, por terem me permitido viver para realizar este sonho.

Aos meus pais, Jair e Vanda, por todo o amor e cuidado durante toda a minha vida, por todas as vezes que abriram mão de seus interesses por minha causa, pelo esforço em me dar uma boa educação e por serem exemplos de caráter, dignidade, perseverança e honestidade.

À minha filhinha Bárbara, por me mostrar o quanto os planos de Deus podem ser maravilhosos e por se tornar minha maior motivação para buscar sempre o melhor em mim.

Ao professor e orientador Leandro Neves Duarte, pela disponibilidade, paciência e compreensão diante das dificuldades enfrentadas para realização do presente trabalho e por todo o suporte fornecido durante o desenvolvimento do mesmo.

Aos amigos que acreditaram em mim e me incentivaram a continuar nos muitos momentos onde eu achei que não seria capaz.

Por fim, à Universidade Federal de São João del Rei, por todo o suporte, e aos professores do curso de Engenharia Civil, os quais estiveram sempre empenhados em realizar, da melhor forma possível e com excelência, suas funções de educadores. Com estes aprendi lições que vão muito além da engenharia civil e que levarei por toda a vida.

“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana, seja apenas outra alma humana.”

(Carl Jung)

RESUMO

Um dos maiores desafios da construção civil está na construção de edifícios altos. Modelos tradicionais de fundações compostas exclusivamente por estacas muitas vezes exigem uma quantidade muito grande ou grandes profundidades a fim de se reduzir os deslocamentos ou atender à solicitação da superestrutura. Já as fundações rasas muitas vezes resistem ao carregamento, porém, não conseguem, sozinhas, conter os deslocamentos verticais, ou mantê-los em níveis aceitáveis. Diante desta situação, surgiu o conceito de fundação mista, que é a fundação composta por um elemento superficial e elementos de fundação profunda. Um dos modelos que está ganhando espaço atualmente é o radier estaqueado. Neste tipo de fundação, a carga é distribuída através da base do elemento horizontal (radier) e também através do fuste e da ponta do elemento vertical (estaca). Com isto é possível obter fundações mais econômicas com capacidade de carga adequadas e que permitem o controle dos recalques em níveis aceitáveis. Dentre os métodos de cálculo deste tipo de fundação está o método simplificado proposto por Poulos, Davis e Randolph (PDR) e os métodos numéricos, em especial o Método dos Elementos Finitos. Neste trabalho foi aplicado o método simplificado (PDR) em um radier analisado através de um software de elementos finitos e também em um outro radier analisado por meio de provas de cargas. Ambas as análises foram previamente realizadas por outros autores e o objetivo deste trabalho é observar a resposta do método aplicado quando comparado aos resultados de métodos considerados mais rigorosos. Após as análises, verificou-se que, no solo onde as características eram mais variadas, o método não apresentou resposta satisfatória para todas as configurações verificadas e que, na fundação onde os resultados foram obtidos por meio de provas de carga, o método simplificado apresentou um comportamento semelhante no início do carregamento, obtendo, porém, capacidade resistente última acima do observado experimentalmente.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	v
RESUMO	vii
SUMÁRIO	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE APÊNDICES	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 – Objetivos Gerais	2
1.2 – Objetivos Específicos	2
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1 – Conceito de Fundações.....	3
2.1.1 – Fundações Rasas ou Diretas	4
2.1.2 – Fundações Profundas ou Indiretas	5
2.1.3 – Fundações Mistas.....	8
2.2 – Contexto Histórico.....	9
2.3 – Investigações Geotécnicas.....	12
2.3.1 – Sondagem a Percussão – SPT	13
2.3.2 – Sondagem Rotativa.....	13
2.3.3 – Sondagem Mista	14
2.3.4 – Ensaio de Piezocone (CPTU)	14
2.3.5 – Ensaio de Palheta (Vane Test).....	15
2.3.4 – Provas de Carga	15
2.4 – Metodologias de Cálculo de Fundações Mistas	19
2.4.1 – Métodos Simplificados	20
2.4.2 – Métodos Numéricos.....	26
2.5 – Estado da Arte	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1 – Metodologia para previsão de carga e recalque – Radier.....	33
3.1.1 – Metodologia para previsão de carga	33
3.1.2 – Metodologia para previsão de recalque	34
3.2 – Metodologia para previsão de carga e recalque – Grupo de estacas	36
3.2.1 – Metodologia para previsão de carga de uma estaca isolada	36

3.2.2 – Metodologia para previsão de carga do grupo de estacas.....	37
3.2.3 – Metodologia para previsão de recalque	37
3.3 – Metodologia para previsão de carga e recalque – Radier estaqueado	40
3.3.1 – Metodologia para previsão de carga	40
3.3.2 – Metodologia para previsão de recalque	41
3.3.3 – Definição do Fator de Segurança.....	44
3.4 – Descrição das fundações analisadas	45
3.4.1 – Radier estaqueado trabalho Pinto (2019) – Análise Numérica.....	45
3.4.2 – Radier estaqueado trabalho Garcia (2015) – Análise Experimental.....	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1 – Trabalho Pinto (2019) – Análises Numéricas	51
4.2 – Trabalho Garcia (2015) – Análise Experimental.....	56
5. CONCLUSÕES	57
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sapata isolada e Sapata associada.....	5
Figura 2 - Radier	5
Figura 3 – Zonas de ruptura em grupos de estacas	10
Figura 4 – Efeito do bloco no recalque de uma estaca isolada	10
Figura 5 – Taxa de recalque em sistemas com e sem influência do bloco.....	11
Figura 6 – Esquema prova de carga estática	17
Figura 7 – Esquema prova de carga dinâmica	19
Figura 8 – Radier equivalente – proposição de Randolph (1994).....	24
Figura 9 – Carga de ruptura dos radiers estaqueados.....	29
Figura 10 – Geometria dos blocos tipo do sistema de fundação do Instituto do Cérebro	30
Figura 11 – Coeficientes de correlação K e α	35
Figura 12 – Fatores de Janbu	35
Figura 13 – Curva carga x recalque de acordo com o método de Poulos e Davis (1980)	43
Figura 14 – Modelo para estimativa de recalque de radier estaqueado com estacas totalmente mobilizadas.....	44
Figura 15 – Configuração geométrica e geotécnica do modelo analisado.....	46
Figura 16 – Valores de N_{SPT} em profundidade	49
Figura 17 – Perfil geológico do solo.....	50
Figura 18 – Modelo Trilinear Radier Flexível – Estacas de 6m	52
Figura 19 – Modelo Trilinear Radier Flexível – Estacas de 9m	53
Figura 20 - Modelo Trilinear Radier Flexível – Estacas de 12m.....	54
Figura 21 - Modelo Trilinear Radier Flexível – Estacas de 15m.....	55
Figura 22 – Modelo Trilinear e Experimental.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Métodos de Cálculo em Radier Estaqueado	20
Tabela 2 – Fator característico do solo	37
Tabela 3 – Parâmetros de resistência drenada das estacas	47
Tabela 4 – Parâmetros do concreto	47
Tabela 5 – Recalques totais obtidos nas simulações numéricas do Radier Estaqueado Flexível.....	48
Tabela 6 – Parâmetros do Concreto	48
Tabela 7 – Recalques totais obtidos na análise experimental por prova de carga do radier estaqueado	49

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE A – PARÂMETROS DE CÁLCULO RADIER ESTAQUEADO – ANÁLISE NUMÉRICA	63
APÊNDICE B – PARÂMETROS DE CÁLCULO RADIER ESTAQUEADO – ANÁLISE EXPERIMENTAL	68
APÊNDICE C – VALORES DE CARGA E RECALQUE PARA O RADIER ESTAQUEADO NUMÉRICO (MÉTODO SIMPLIFICADO).....	70
APÊNDICE D – VALORES DE CARGA E RECALQUE PARA O RADIER ESTAQUEADO EXPERIMENTAL (MÉTODO SIMPLIFICADO)	71

1. INTRODUÇÃO

A construção de edifícios cada vez mais altos traz consigo a exigência de soluções cada vez mais inovadoras no que diz respeito às técnicas de fundações. Mesmo com todos os avanços da engenharia de fundações, ainda são escassas as referências bibliográficas que tratam das fundações mistas, sua utilização, vantagens e métodos de dimensionamento.

Diversos edifícios no mundo já foram construídos sobre radiers estaqueados e a técnica tem sido bem aceita uma vez que se consegue o mesmo nível de segurança de uma fundação profunda, porém com uma estrutura mais econômica e mais rápida de ser executada, pois neste caso considera-se, além das estacas, a contribuição do bloco na distribuição das cargas na fundação (Hachich, et al., 1998).

Pinto (2019) realizou uma série de ensaios geotécnicos em um solo característico da região amazônica, onde ocorre grande extração de bauxita, o qual é composto basicamente por argila de Belterra, oriunda do processo de exploração do referido minério, ou seja, material estéreo, em seu estado solto (pilha) e compactado. A partir dos resultados, a autora propôs uma fundação em radier estaqueado para um possível tanque de armazenamento de água. A análise carga versus deslocamento foi obtida por simulação numérica por meio do software Plaxis 3D, o qual se baseia no método dos elementos finitos.

Já Garcia (2015) realizou provas de carga em fundações do mesmo tipo, em solo de diabásio, da região de Campinas, onde também foram obtidas curvas de carga versus deslocamento.

Entendendo que a solução em fundações mistas pode ser uma alternativa viável de projeto, pretende-se, com este trabalho, recalcular duas fundações em radier estaqueado, utilizando métodos simplificados de análise de capacidade de carga e comparar com os resultados obtidos pelos seus respectivos autores.

1.1 – Objetivos Gerais

O objetivo geral deste trabalho é estabelecer um comparativo entre as curvas de carga versus deslocamento dos radiers estaqueados estudados por Pinto (2019) e Garcia (2015) com as curvas obtidas através de metodologias analíticas simplificadas de cálculo.

1.2 – Objetivos Específicos

- Avaliar a previsão de carga admissível de radiers estaqueados através de metodologias analíticas;
- Avaliar a previsão dos recalques de radiers estaqueados através de metodologias analíticas;
- Correlacionar a previsão da curva carga versus deslocamento, obtida através da metodologia analítica, com as previsões realizadas através de simulação numérica e ensaios de prova de carga.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 – Conceito de Fundações

Uma fundação pode ser entendida como sendo o conjunto formado pelo solo e pelo elemento estrutural que irá transmitir as cargas da edificação através de sua base e/ou fuste a este solo (Albuquerque & Garcia, 2020).

Tais elementos, em situação de serviço, devem oferecer garantia de segurança contra a ruptura, tanto do elemento estrutural propriamente dito, quanto do solo onde será executado. Deve ser durável e funcional, destacando, neste sentido, a questão dos deslocamentos verticais admissíveis (recalques), que estão diretamente relacionados à carga recebida pela fundação, e a interação solo-estrutura, que é a correlação entre os deslocamentos máximos definidos para a estrutura e o deslocamento calculado para a fundação (Alonso, 2019).

Poulos (2017) destaca a importância da interação solo-estrutura no caso de edifícios altos onde os movimentos do solo e da fundação, provocados pela edificação, interferem diretamente nas distribuições das cargas no edifício, gerando assim um processo interativo que requer um amplo conhecimento, tanto da estrutura, quanto do solo onde a obra será executada. Nestes casos, os métodos empíricos tradicionais se tornam insuficiente para a elaboração do projeto da fundação e, além do conhecimento, é necessário que se faça uma investigação aprofundada do subsolo local para, então, definir-se a melhor solução para o projeto.

É necessário que o engenheiro geotécnico seja capaz de prever as deformações que ocorrerão no solo para agir de forma a prevenir os recalques na fundação que podem levar a mesma ao colapso nos casos mais extremos, ou mesmo inviabilizar o seu uso. Considera-se que a estrutura entrou em colapso quando atinge-se a resistência do solo e ele se rompe; ou quando as deformações atingem tal nível que compromete o uso da edificação. Esta última situação geralmente ocorre a longo prazo (Albuquerque & Garcia, 2020).

Albuquerque e Garcia (2020) definem dois grupos básicos de fundações, sendo eles as fundações rasas ou diretas e as fundações profundas ou indiretas.

2.1.1 – Fundações Rasas ou Diretas

Alonso (2019) define as fundações rasas como sendo os blocos e as sapatas, os quais transmitem as cargas da superestrutura através de sua base.

A NBR 6122/2019 define a altura máxima de assentamento de duas vezes a menor dimensão da fundação para que a mesma seja classificada como fundação rasa (direta ou superficial).

Ainda de acordo com a NBR 6122/2019, sapata é o “elemento de fundação rasa, de concreto armado, dimensionado de modo que as tensões de tração nele resultantes sejam resistidas pelo emprego de armadura especialmente disposta para esse fim”. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019, p. 8)

As sapatas são elementos de altura reduzida quando comparada com as demais dimensões. É denominada “sapata isolada” se receber carga de apenas um pilar, ou “sapata associada” se forem dois pilares. Se a sapata receber carga de vários pilares não alinhados, esta recebe o nome de “radier” (Alonso, 2019).

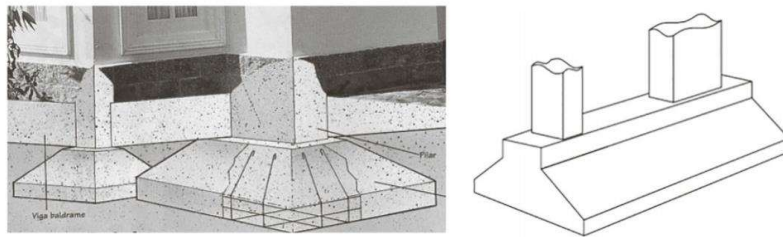
A NBR 6122/2019 define radier como “elemento de fundação rasa dotado de rigidez para receber e distribuir mais do que 70% das cargas da estrutura”. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019)

Um radier pode ter espessura variável e pode conter elementos enrijecedores, como vigas e nervuras. Quanto à rigidez a flexão, são classificados como rígidos e elásticos. Quanto à tecnologia utilizada na execução podem ser em concreto armado ou protendido. E quanto à geometria, classificam-se como lisos, nervurados e caixão. (Nazário, Silva, & Bertequini, 2019)

Veloso e Lopes (2010) recomendam o uso do radier se a área das sapatas ultrapassar a metade da área da edificação e quando duas ou mais sapatas estiverem muito próximas ou se interceptarem. Outra vantagem no uso do radier é com relação à distribuição dos recalques, que se torna mais uniforme.

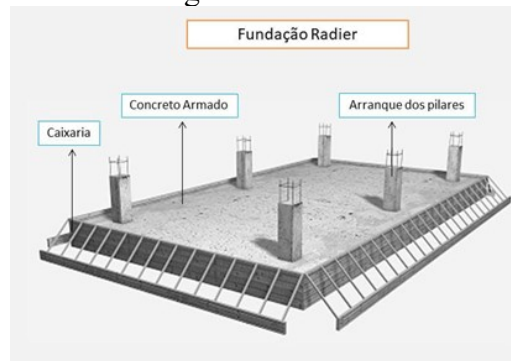
As sapatas e o radier estão ilustrados nas Figuras 1 e 2, abaixo.

Figura 1 – Sapata isolada e Sapata associada



Fonte: Guimarães & Peter (2018)

Figura 2 - Radier



Fonte: Schneider (2020)

2.1.2 – Fundações Profundas ou Indiretas

A NBR 6122/2019 estabelece a seguinte definição para fundação profunda:

“elemento de fundação que transmite a carga ao terreno ou pela base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação das duas, sendo sua ponta ou base apoiada em uma profundidade superior a oito vezes a sua menor dimensão em planta e no mínimo 3,0 m; quando não for atingido o limite de oito vezes, a denominação é justificada. Neste tipo de fundação incluem-se as estacas e os tubulões” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019).

As estacas são elementos que podem ser incorporados ao solo de duas formas: por meio de cravação, sendo classificadas como “de deslocamento” pelo fato de haver o deslocamento horizontal do solo onde ela será executada; ou por escavação. Neste caso, elas são classificadas como estacas “de substituição”, pois o solo do local da execução é removido, sendo substituído pela estaca. Haverá, portanto, uma diminuição nas tensões horizontais geostáticas. Com relação ao material, podem ser metálicas, de concreto, de madeira, dentre outros materiais (Velloso & Lopes, 2010).

Os tipos mais comuns de estacas de deslocamento são as estacas pré-moldadas e as metálicas. Dentre as escavadas, destacam-se as estacas tipo hélice contínua monitorada e as escavadas por trado mecânico, dentre outras (Hachich, et al., 1998).

Estacas Pré-Moldadas

Segundo Danziger e Lopes (2021) as estacas pré-moldadas são aquelas fabricadas no canteiro de obras ou em usina. Sua classificação é dada em função do tipo de confecção, sendo elas: concreto vibrado, centrifugado ou por extrusão; e de acordo com a armadura, que pode ser protendida ou não. Estes fatores, aliados à qualidade do concreto e ao processo de cravação é que irão definir as tensões de trabalho destas estacas.

Estacas pré-moldadas possuem maior controle da qualidade do concreto empregado e é mais facilmente executada em solos moles, onde torna-se difícil a execução da concretagem da estaca no local. Além destas, outras vantagens da estaca pré-moldada inclui a possibilidade de obter uma elevada resistência, tanto na compressão, quanto na tração e flexão composta e a facilidade de execução de variados comprimentos e seções transversais. A desvantagem está no processo de execução de cortes e emendas e na cravação em terrenos com solos irregulares, onde há grande variação da camada resistente (Velloso & Lopes, 2010).

Estacas Metálicas

As estacas metálicas são formadas por perfis de aço laminado, com seção W, ou soldado, com seções H e I, podendo também ser feitas de trilhos reaproveitados ou de chapas dobradas (Albuquerque & Garcia, 2020).

Apresentam diversas vantagens como, por exemplo, a facilidade na execução e a capacidade elevada de suporte de carga, possuem alta resistência e podem ser cortadas ou emendadas com facilidade. Dentre as desvantagens, cita-se o fato de haver a possibilidade de corrosão em ambientes mais agressivos e as vibrações causadas durante o processo de cravação (Albuquerque & Garcia, 2020).

Estaca Hélice Contínua

Também executada *in loco*, esta estaca é perfurada por um trado helicoidal contínuo que possui um tubo central através do qual o concreto é injetado sob pressão e sem interrupção

ao mesmo tempo em que o trado vai sendo retirado. Como a inserção da hélice no terreno é feita de forma contínua, ou seja, a perfuração progride até atingir a profundidade de assentamento, não ocorre alívio significativo nas tensões do solo fazendo com que essa estaca possa ser utilizada em solos arenosos ou coesivo independentemente da altura do nível d'água. Após a concretagem, a armadura em forma de gaiola é inserida (Hachich, et al., 1998).

Segundo Velloso e Lopes (2010) a execução dessa estaca passa por um monitoramento eletrônico dos seguintes elementos:

- Comprimento da estaca
- Pressão no concreto
- Inclinação
- Velocidade de penetração do trado
- Rotação
- Torque
- Velocidade da remoção do trado
- Volume de concreto
- Sobreconsumo de concreto (relação entre o volume consumido e o valor teórico calculado)

Estaca Raiz

Danziger e Lopes (2021) descrevem o processo de execução da estaca raiz como sendo da seguinte forma:

1. Realiza-se a perfuração por processo rotativo com circulação de água utilizando tubos metálicos como revestimento. Estes tubos serão removidos posteriormente.
2. Após a remoção do material interno do tubo é inserida a armadura.
3. Injeta-se a argamassa de cimento e areia enquanto o tubo vai sendo retirado. Ao mesmo tempo, é feito o adensamento da argamassa utilizando golpes de ar comprimido.

Terres (2020) cita a versatilidade de utilização da estaca raiz como uma vantagem dela, pois é possível executá-la em qualquer direção e também em solos rochosos. Além disso, o processo de execução não produz vibrações e descompressão do solo, evitando

possíveis danos em estruturas vizinhas. Também não há limitações com relação ao local de execução pois não são necessários equipamentos de grande porte. A desvantagem está relacionada ao consumo de cimento, ferragens e água, sendo esta uma obra de grande impacto ambiental.

2.1.3 – Fundações Mistas

As Fundações Mistas podem ser entendidas como aquelas compostas pela junção de uma fundação profunda a uma fundação rasa, sendo as mais comuns a Estaca T, a Estapata e o Radier Estaqueado. Nesse tipo de fundação, as cargas provenientes da edificação são transferidas ao solo tanto por meio do fuste e da ponta das estacas, quanto pela base da fundação rasa.

Estaca T

São fundações onde apenas uma estaca é adicionada à fundação rasa, unida de tal forma que receba apenas esforços verticais de compressão, não tendo engastamento entre as duas partes. Os momentos fletores e os esforços horizontais devem ser transmitidos ao solo pela base da sapata e a estaca suportará cerca de 80% de sua capacidade de carga última, obtida pelo método tradicional de cálculo de fundações profundas.

Estapata

Este tipo de fundação foi planejado de forma que a estaca sirva apenas como um limitador do deslocamento da sapata. Para tanto, calcula-se o deslocamento admissível para a fundação rasa. Este valor será o distanciamento que deverá haver entre o posicionamento do topo da estaca e a base da sapata. Assim, a estaca só terá função estrutural caso a sapata desloque verticalmente o valor correspondente ao espaçamento existente entre os elementos (Hachich, et al., 1998).

Radier Estaqueado

Sistema de fundação composto em que a laje do radier e as estacas suportam, de forma conjunta, o carregamento da estrutura. Esta solução de projeto pode ser empregada nos casos em que a fundação rasa suportaria o carregamento, mas não atenderia aos critérios de recalques admissíveis, e nos casos em que o dimensionamento é feito basicamente com fundações profundas, fazendo com que a contribuição da fundação rasa provoque uma

redução no número de estacas necessário. No entanto, a forma mais eficaz da utilização do radier estaqueado ocorre na primeira situação (Poulos H. G., 2017).

Ainda segundo Poulos (2017), os solos formados por argila rija e os formados por areias densas ou rochas são mais favoráveis à utilização da fundação em radier estaqueado, enquanto os perfis constituídos de argila mole e solo expansivo oferecem poucas ou nenhuma vantagem em se utilizar tal fundação.

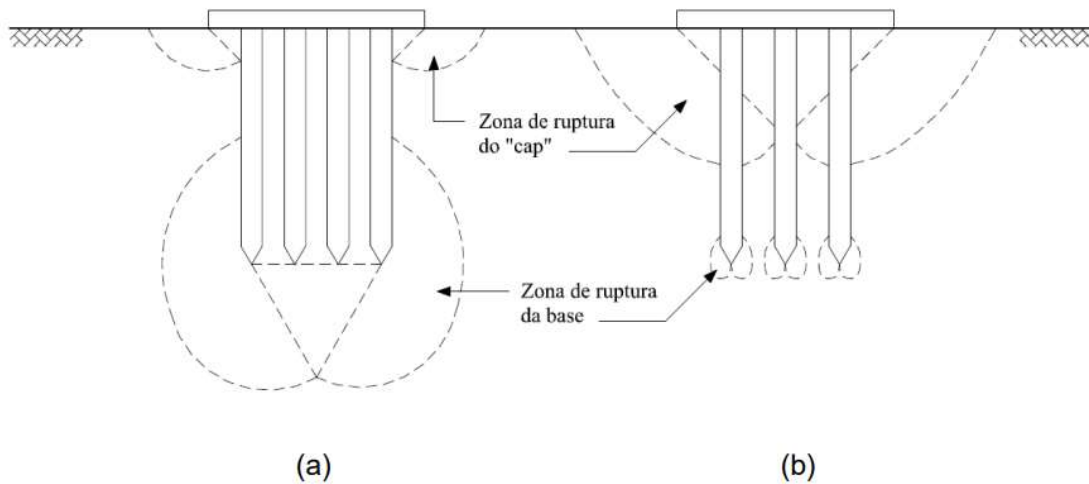
2.2 – Contexto Histórico

De acordo com Teixeira (1996) citado por Miranda (2019) a primeira observação referente à contribuição da fundação rasa, associada a um determinado número de estacas, na redução dos recalques e no aumento da capacidade de carga foi feita por Zeevaert (1957). Ele teria proposto um sistema de fundação para o edifício “La Azteca” onde as estacas teriam a função de reduzir os recalques até um certo valor. Zeevaert observou que, com as estacas, os recalques foram reduzidos pela metade se comparados ao mesmo sistema composto apenas pela fundação rasa.

Outra referência envolvendo as fundações mistas foi feita por Kishida e Meyerhof (1965), que realizaram uma análise do comportamento de estacas cravadas em areia. No trabalho em questão é mencionada a capacidade de suporte de carga do bloco como contribuição para a capacidade de carga do sistema de fundação e sua influência como sobrecarga no cálculo da resistência de ponta das estacas. Através de modelos experimentais os autores observaram duas formas de ruptura das estacas, de acordo com o espaçamento entre elas, sendo as respectivas resistências dos grupos as seguintes:

- Estacas com grande espaçamento entre si: a capacidade de carga é obtida somando-se a capacidade do bloco à do grupo de estacas, considerando-se a sobrecarga na ponta das estacas provocada pelo bloco (Figura 3.b).
- Estacas com pequeno espaçamento entre si: comportam-se como uma única estaca, e a capacidade de carga é a soma da capacidade desta estaca, ou “tubulão equivalente) com a capacidade do bloco. Neste caso, porém, considera-se apenas a porção do bloco que excede o tubulão (Figura 3.a).

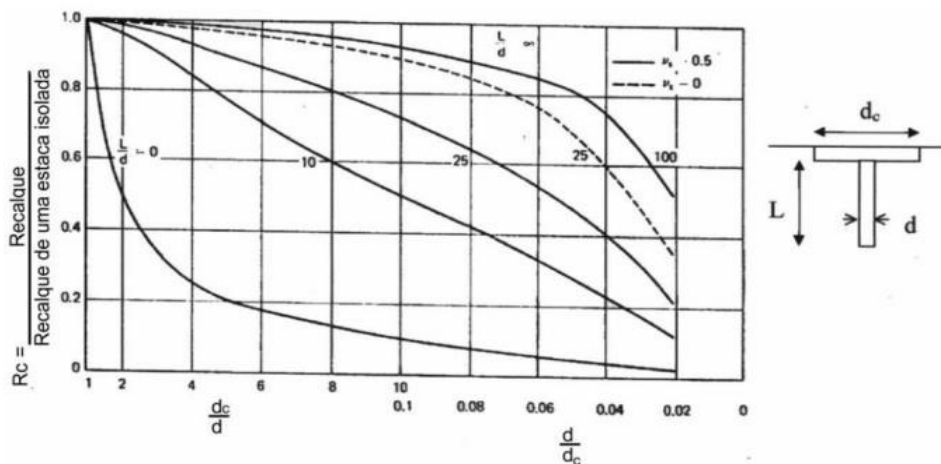
Figura 3 – Zonas de ruptura em grupos de estacas



Fonte: Kishida & Meyerhof (1965 apud Duarte 2011) - modificado

O primeiro estudo que analisou a capacidade de carga *versus* recalque de uma fundação mista foi realizado por Poulos (1968, apud Duarte, 2011). Esta análise foi feita em uma estaca unitária com um bloco, considerando o solo como um semi-espaço elástico e o capitel, ou bloco, como um elemento rígido. Os resultados foram compilados no gráfico da Figura 4, onde é possível verificar as variações de recalques para estacas com e sem o bloco. Observa-se, também que quanto maior o comprimento relativo, L/d , menor é a influência do bloco, sendo quase insignificante sua contribuição para estacas muito longas e de considerável relevância em estacas mais curtas. O valor do coeficiente de Poisson, ν , também exerce influência sobre os recalques uma vez que a contribuição do bloco aumenta com ν , causando, assim, a redução dos recalques.

Figura 4 – Efeito do bloco no recalque de uma estaca isolada

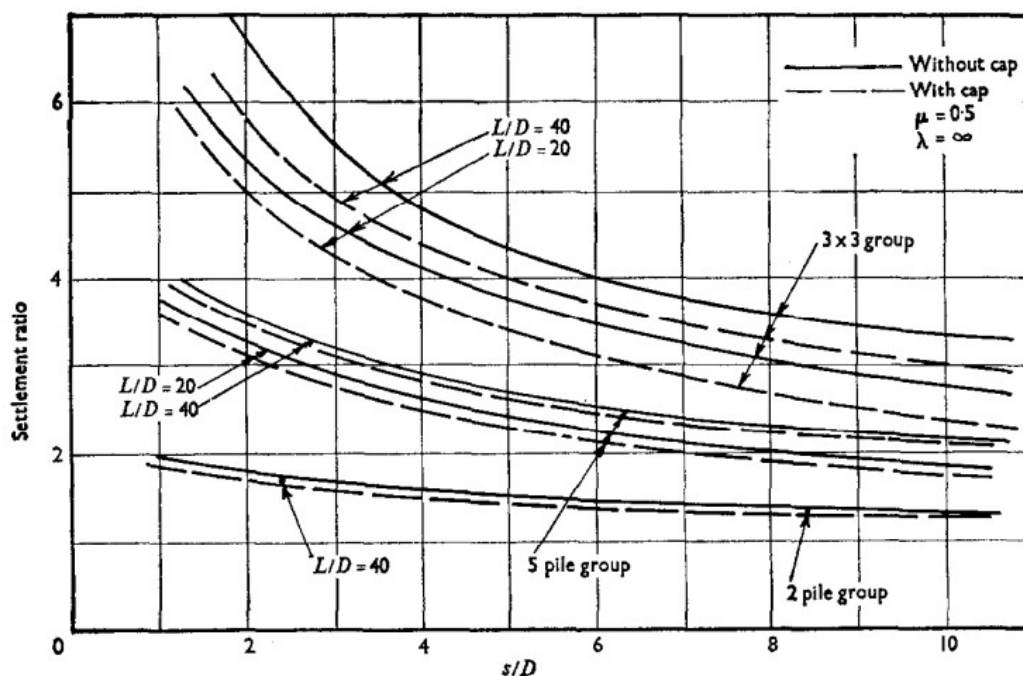


Fonte: Poulos (1968 apud Duarte 2011) - modificado

Poulos (1968) apresentou seu estudo para uma sapata isolada, sob bloco circular. Butterfield e Banerjee (1971) estenderam, então, o conceito para um grupo de estacas em blocos de qualquer geometria e apresentou um comparativo entre os deslocamentos com e sem a contribuição do bloco. Os resultados foram apresentados no gráfico da Figura 5.

Os autores concluíram que, em relação à rigidez do sistema, a inclusão do bloco provoca uma alteração pequena, de cerca de 5 a 15%, porém, quando se verifica a proporção da carga total suportada pelo bloco, esta se mostra bastante significativa, podendo ser de 20 a 60%, sendo maior nos grupos com mais estacas e com maior espaçamento entre elas, no intervalo $20 < L/d < 40$.

Figura 5 – Taxa de recalque em sistemas com e sem influência do bloco



Fonte: Butterfield e Banerjee (1971)

Randolph (1994) concluiu que, na maioria dos casos, não é a capacidade de suporte que deverá reger o projeto de uma fundação, mas sim a limitação dos recalques máximos, principalmente os recalques diferenciais, através da utilização de um número mínimo de estacas. Ele então definiu três filosofias de projeto para radiers estaqueados, a saber:

1. Convencional: nesta abordagem, o espaçamento entre as estacas adotado é regular em toda a área da fundação. Ocorre uma redução no número de estacas utilizadas, pois elas são projetadas para suportar cerca de 60 a 75% da carga estrutural apenas.

2. Creep-Piling: a fundação é projetada, essencialmente, como um radier e cada estaca é projetada de modo a operar em cerca de 70 a 80% de sua capacidade de suporte, quando as deformações plásticas (fluência) tomam proporções mais significativas. Também se adota uma distribuição uniforme das estacas sob o radier.
3. Controle de Recalque Diferencial: as estacas são inseridas de modo a reduzir os recalques diferenciais a níveis mínimos. A porção central do radier é a área mais susceptível a maiores recalques, portanto, nessa região deverão ser inseridas estacas, as quais poderão ser carregadas até o seu limite de utilização.

No Brasil, o conceito de fundação mista tipo radier estaqueado foi utilizado pela primeira vez por Décourt (1994). Ele caracterizou a “Estaca-T”, que é a associação de uma sapata com uma única estaca, que deve receber apenas esforços verticais de compressão. A carga é transferida ao solo tanto por meio da base da sapata, quanto por meio do fuste e da ponta da estaca.

Uma outra forma de aplicação das fundações mistas no Brasil foi apresentada por do Val (1995), que introduziu o conceito de “Estapata”. Esta seria a estaca posicionada abaixo da sapata, porém, sem contato entre os dois elementos. A estaca funcionaria como um limitador do deslocamento da sapata.

2.3 – Investigações Geotécnicas

Ao dimensionar uma fundação é necessário, antes de tudo, conhecer o solo onde ela será executada. As sondagens são métodos, através dos quais é possível obter amostras de solo, deformadas ou não, e traçar um perfil do mesmo, bem como determinar algumas características, como, por exemplo, a sua resistência.

Os principais tipos de sondagens são: sondagem a trado, sondagem a percussão, sondagem rotativa e sondagem mista (Santos & Daibert, 2014).

Outra forma de se estimar a capacidade de carga de uma fundação e estabelecer uma relação entre essa carga e o deslocamento é através das provas de carga, que podem ser estáticas ou dinâmicas. Em fundações rasas as recomendações para a realização da prova de carga são dadas pela ABNT NBR 6489, já as fundações profundas seguem recomendações da ABNT NBR 6122 (Guimarães & Peter, 2018).

2.3.1 – Sondagem a Percussão – SPT

O Standard Penetration Test ou SPT é um método de investigação e caracterização do solo que consegue determinar o índice de resistência à penetração por meio da cravação de um amostrador padrão. Neste ensaio também é identificada a profundidade do nível d'água e o perfil estratigráfico do solo dentre outras informações.

As referências para a execução do ensaio são da NBR 6484/2001 e da ASTM-D1586-11 (Floriano, 2016).

O procedimento pode ser descrito da seguinte forma: é feito um furo de 1m de profundidade no solo, com a utilização de um trado manual, de onde são retiradas amostras. Posiciona-se no fundo desse furo o amostrador padrão preso a uma haste, que deverá aprofundar 45cm no solo por meio de golpes de um martelo de 65kg, que cai em queda livre de 75cm de altura. O número de golpes necessário para aprofundar os 30cm finais define a resistência (N) à penetração do amostrador. Retira-se a amostra da ponta do amostrador. Finalizada a primeira etapa, passa-se à realização do segundo metro do ensaio: cava-se mais um furo de um metro, desta vez usando um trado helicoidal e prossegue com a penetração do amostrador por mais 45cm.

A partir do momento em que a resistência do solo ou a determinação do nível d'água impedem a escavação com trado, o ensaio passa a ser realizado com o uso de água sob pressão e, ao invés do amostrador, um trépano é cravado no solo para determinar a resistência N.

Os resultados e amostras obtidas nesse ensaio fornecem subsídio para a elaboração de um relatório de sondagem, onde deverão constar as resistências obtidas a cada metro, o material verificado de acordo com as amostras e a altura do nível d'água (Guimarães & Peter, 2018).

2.3.2 – Sondagem Rotativa

É um método que utiliza uma broca de corte para fazer o furo e obter amostras do solo para análise. Apesar de ser mais usado em rochas, também é possível realizar a investigação em solos.

O equipamento é formado por uma ferramenta de perfuração, que pode ser uma broca de corte ou coroa, fixas em um conjunto de hastes, através das quais passará um fluido de refrigeração e que também é responsável pela lubrificação do sistema e remoção dos fragmentos de rocha e partículas do solo. Este fluido pode ser água ou lama, a qual é bombeada para baixo. Além disso, possui também um tripé, um motor e um mecanismo hidráulico que propicia o avanço da perfuração.

Em solos mais duros e rochas, é possível obter amostras indeformadas para análise em laboratório, porém, por ser um ensaio que é feito com circulação de água, isso pode aumentar a umidade natural da amostra (Knappett & Craig, 2018).

Floriano (2016) cita que os comprimentos dos amostradores, também chamados de barriletes, estão entre 0,5 metro e 3 metros, sendo mais usual o de 1,5 metro.

2.3.3 – Sondagem Mista

Segundo Albuquerque e Garcia (2020), a sondagem mista ocorre em solos de grande resistência, com presença de rochas, quando apenas um dos tipos de sondagem (percussão ou rotativa) não é suficiente para realizar a perfuração. Neste caso, utiliza-se os dois métodos, onde um complementa o outro.

2.3.4 – Ensaio de Piezocone (CPTU)

A realização deste ensaio é feita por meio da cravação de uma haste com ponta cônica, onde são medidas as resistências na ponta (q_c) e por atrito lateral (f_s), cuja razão é um dos parâmetros utilizados na classificação dos solos, conhecida como “razão de atrito ($R_f=f_s/q_c$)” (Pinto, 2019). A razão de atrito indica o tipo de solo atravessado. O cone, denominado “piezocone”, tem área da ponta normalizada em 10cm^2 e ângulo da ponta em 60° . A velocidade de cravação é constante, de 2cm/s até se chegar na profundidade desejada. (Velloso & Lopes, 2010).

Na argila, pode-se realizar uma operação denominada “ensaio de dissipação”, que consiste na observação da velocidade de dissipação do excesso de poropressão quando se para a cravação.

Os principais objetivos do ensaio são:

- Obtenção do perfil estratigráfico do solo;
- Determinação de parâmetros geotécnicos; e
- Fornecimento de informações relevantes ao processo de projeto de fundações, como, por exemplo, a determinação da capacidade de carga para dimensionamento de estacas.

Tais informações, no entanto, devem ser utilizadas em conjunto com outros métodos onde seja possível realizar uma análise tátil-visual do solo, avaliar efeitos do histórico de tensões e obter correlações entre os resultados (Pinto, 2019).

2.3.5 – Ensaio de Palheta (Vane Test)

Pinto (2019) destaca a aplicação deste ensaio em argilas moles com o objetivo de se determinar a resistência ao cisalhamento não drenada *in situ* (S_u). O ensaio segue as recomendações da ABN NBR 10905 e os equipamentos utilizados recebem a classificação Tipo A ou Tipo B, sendo, respectivamente, sem e com a necessidade de furação prévia.

No ensaio Tipo A, onde os resultados possuem melhor qualidade, a palheta é cravada, sem rotação, até uma profundidade maior ou igual a 0,5m abaixo da sapata de proteção. Aplica-se então um torque com rotação de 6°/min. Registra-se o torque máximo ou a curva torque-rotação aplicada. Após esta definição, determina-se a resistência amolgada (S_{ur}) através da aplicação de dez revoluções completas.

2.3.4 – Provas de Carga

Segundo Neto (2013), fatores como materiais, controle do processo de execução da fundação e características do terreno, são variáveis que estão diretamente ligadas ao comportamento das estacas e da fundação como um todo ao longo do tempo. Inúmeros problemas podem surgir e os reparos podem exigir soluções complexas, de alto custo e grande responsabilidade. Por isso é necessário realizar o controle da qualidade das estacas mesmo após sua execução. Quando se trata da verificação do desempenho, utiliza-se um ensaio denominado Prova de Carga, que pode ser estática ou dinâmica.

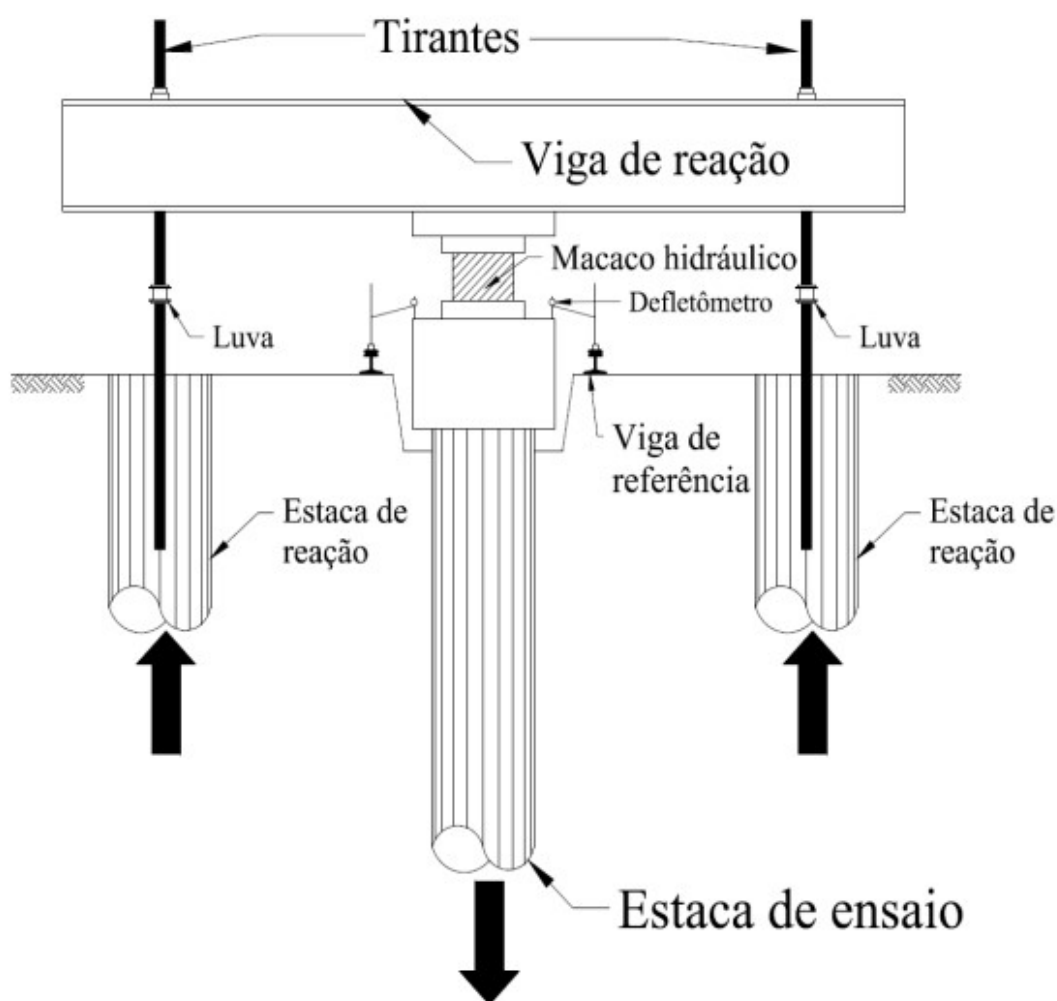
Prova de Carga Estática

Cintra et al. (2014) descrevem o procedimento de realização da Prova de Carga Estática da seguinte maneira: aplica-se no topo da estaca cargas conhecidas, com sucessivos incrementos de iguais valores de carga. Os deslocamentos verticais da cabeça da estaca devem ser monitorados até que ocorra a ruptura ou até que se atinja a carga máxima programada. O ensaio também poderá ser interrompido caso ocorra um deslocamento considerado excessivo antes de se atingir a carga máxima desejada.

O mecanismo do ensaio é composto pela estaca de ensaio, um sistema de reação que consiste em uma viga de reação ancorada em estacas de reação, armadas à tração, e dispostas ao redor da estaca de ensaio, e um macaco hidráulico, que irá atuar contra o sistema de reação (Cintra, Aoki, Tsuha, & Giacheti, 2014).

A Figura 6 mostra o processo de forma esquemática.

Figura 6 – Esquema prova de carga estática



Fonte: Cunha (2016)

Para que não ocorra interferência nos resultados, as estacas de reação devem ser posicionadas a uma distância mínima de três vezes o diâmetro da estaca de ensaio, não podendo a distância entre eixos ser inferior a 1,5m, conforme prescrição da ABNT NBR 12131, que é a norma que estabelece as diretrizes para realização deste tipo de ensaio (Cintra, Aoki, Tsuha, & Giacheti, 2014).

Ainda segundo Cintra et al. (2014), a forma mais tradicional de execução da prova de carga estática é a lenta, cujo processo de execução é normatizado pela ABNT NBR 12131. Neste ensaio aplica-se incrementos de carga sucessivos e iguais a 20% da carga admissível de projeto. Em cada estágio, a carga é mantida até a estabilização dos recalques, sendo o tempo mínimo de 30 minutos. A duração do ensaio pode chegar a 3

dias (por isso a denominação “lenta”), o que levou à proposição de um novo método, denominado atualmente por “prova de carga rápida”, onde os incrementos seriam da ordem de 10% da carga e o tempo de duração dos estágios variando entre 5 e 15 minutos.

Prova de Carga Dinâmica

No ensaio dinâmico utiliza-se o próprio bate estacas para produzir golpes no topo da estaca ensaiada. Ele deve estar perfeitamente centralizado em relação à estaca e posicionado na direção do eixo, caindo de uma altura controlada.

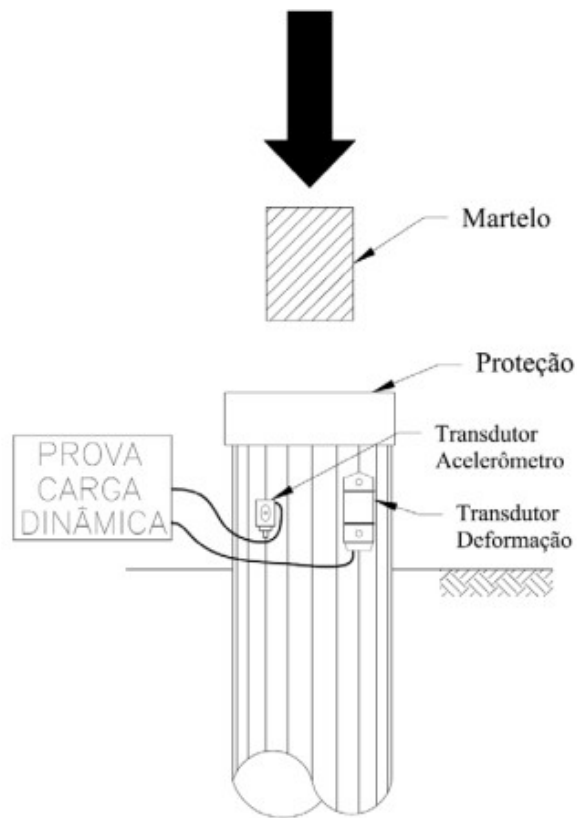
Em uma seção no topo da estaca são instalados transdutores de aceleração (acelerômetros) e de deformação específica que fornecem os parâmetros para o cálculo da força aplicada e o deslocamento do ponto instrumentado, conforme ilustrado na Figura 7. Os sinais são transmitidos para um equipamento denominado PDA (Pile Driving Analyser) que, através da teoria de propagação de ondas, irá determinar:

- força máxima no impacto (FMX);
- energia máxima no golpe (EMX);
- resistência estática mobilizada (RMX);
- deslocamento máximo da estaca durante o impacto (DMX);
- integridade da estaca;
- tensões máximas na estaca;
- eficiência do equipamento da cravação (Cintra, Aoki, Tsuha, & Giacheti, 2014).

Os autores citam algumas vantagens do ensaio, sendo elas:

- rapidez e baixo custo, possibilitando a análise da capacidade de carga de um número maior de estacas;
- possibilidade de se verificar a capacidade de carga quando a estaca está sendo cravada;
- permite verificar a integridade da estaca;
- permite verificar a resistência lateral e de ponta de forma separada.

Figura 7 – Esquema prova de carga dinâmica



Fonte: Cunha (2016)

2.4 – Metodologias de Cálculo de Fundações Mistas

Neto (2013) compilou os principais métodos de cálculo para radier estaqueado, os quais foram apresentados e classificados na Tabela 1, abaixo.

Tabela 1- Métodos de Cálculo em Radier Estaqueado

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 et al. (1991); Lee (1993); Wang (1995); Katzenbach et al. (1998), dentre outros.
	Métodos Híbridos	Poulos (1994) – GARP; Russo (1998) – NAPRA.

*Metodologia numérica implementada no programa LCPC-CESAR

Fonte: Neto (2013)

De acordo com Poulos (2001) os métodos podem ser classificados em duas categorias: “Métodos Preliminares ou Simplificados” e “Métodos Numéricos ou Detalhados”.

2.4.1 – Métodos Simplificados

- Correlações Empíricas

Segundo Bezerra (2003) são métodos simples e práticos, baseados em resultados obtidos através de análises de laboratório e de campo, tendo alta confiabilidade quando aplicado em solos e fundações cujas características sejam semelhantes às dos solos ensaiados. A mesma confiança, porém, não pode ser afirmada caso o método seja aplicado sob condições diversas daquelas em que foi elaborado.

- a) Previsão da Capacidade de Carga

Segundo Kishida & Meyerhof (1965) a capacidade de carga da fundação seria a soma das capacidades de carga das estacas e do radier:

$$Q_t = Q_g + Q_c$$

Equação 1

Onde:

Q_t = Capacidade de carga total da fundação;

Q_g = Capacidade de carga do grupo de estacas; e

Q_c = Capacidade de carga do radier.

Akinmusuru (1973) avaliou a interação radier-solo-estaca e incluiu um fator de majoração da carga do grupo de estacas (α'), ficando a carga total dada pela expressão:

$$Q_t = \alpha' Q_g + Q_c$$

Equação 2

Através de ensaios de campo, Liu et al (1985) perceberam que diversos fatores influenciam os valores das resistências lateral e de ponta das estacas e propôs a seguinte equação para a capacidade de carga total:

$$Q_t = N(\eta_s Q_s + \eta_b Q_b) + Q_c$$

Equação 3

Onde:

N = Número de estacas;

η_s e η_b = fatores de influência na carga do fuste e da ponta, respectivamente, devido às interações radier-solo-estaca;

Q_s e Q_b = capacidade de carga por atrito lateral e na ponta, respectivamente, de uma estaca isolada.

A Equação 3 foi reformulada por Phung (1993) e reescrita da seguinte forma:

$$Q_t = N(\eta_{1s}\eta_{4s}Q_s + \eta_{1b}\eta_{4b}Q_b) + \eta_6 Q_c$$

Equação 4

Onde:

η_{1s} = fator de influência no atrito lateral das estacas devido às interações estaca-solo-estaca;

η_{4s} = fator de influência no atrito lateral das estacas devido às interações radier-solo-radier;

η_{1b} = fator de influência na resistência de ponta devido às interações estaca-solo-estaca;

η_{4b} = fator de influência na resistência de ponta devido às interações radier-solo-radier;

η_6 = fator de influência na capacidade de carga do radier devido às interações radier-solo-estaca.

Para todas as equações acima existem ábacos, elaborados pelos autores, para determinação dos coeficientes “ α ” e “ η ” (Sales, 2000 apud Ferreira, 2012).

b) Previsão de Recalque

As correlações a seguir são representadas em termos do Fator de Recalque (R_c), sendo esta a razão entre os recalques do grupo de estacas e de uma estaca isolada.

De acordo com Skempton (1953) o fator de recalque pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$R_c = \left(\frac{4B + 9}{B + 12} \right)^2$$

Equação 5

Onde:

R_c = fator de recalque

B = largura do grupo de estacas (em metros)

Meyerhof (1959) levou em consideração a relação entre o espaçamento (S) e o diâmetro (D) das estacas, e também o número de linhas de estacas, e propôs:

$$R_c = \frac{c \left(5 - \frac{c}{3} \right)}{\left(1 + \frac{1}{n_r} \right)^2}$$

Equação 6

Onde:

$c = S/D$;

n_r = número de linhas de estacas.

Para Vésic (1969) o cálculo seria da seguinte forma:

$$R_c = \sqrt{\frac{B}{D}}$$

Equação 7

Randolph (1985) propôs:

$$R_c = n^w$$

Equação 8

Onde:

n = número de estacas

w = constante cujo valor seria entre 0,4 e 0,6 de acordo com o grupo de estacas

- Ábacos de Cálculo

Poulos e Davis (1980) elaboraram diversos ábacos para determinação do fator de recalque em função de algumas variáveis, como espaçamento, quantidade e comprimento relativo das estacas, além do Coeficiente de Poisson do solo.

- Método das Fundações Equivalentes

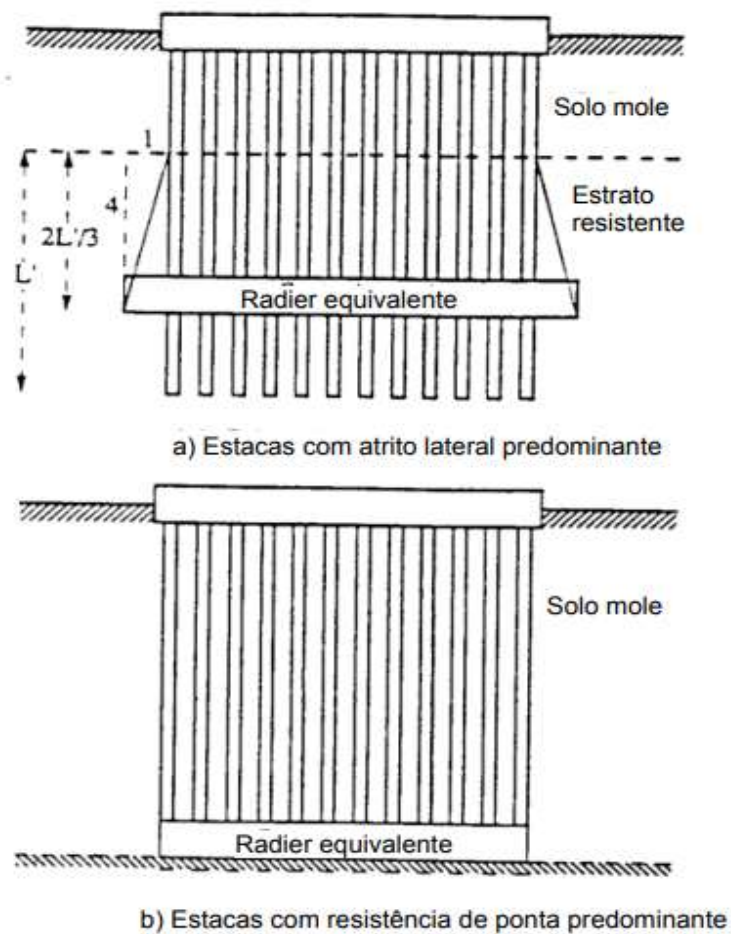
Neste método, para fins de cálculo, as fundações são transformadas em outras que já possuem solução existente.

- a) Método do Radier Equivalente

Terzaghi (1943) propôs que as estacas poderiam ser substituídas por um radier situado a 1/3 da altura da ponta do grupo de estacas, e, através da teoria da elasticidade aplicada em fundações superficiais, se estimaria o valor do recalque.

Randolph (1994) sugeriu que a altura fosse a 1/3 do comprimento onde o atrito lateral atue de forma mais efetiva e apenas nos grupos de estacas onde predomina a resistência lateral (Figura 8.a.). Nos grupos onde a resistência de ponta é predominante, o radier equivalente deve ser posicionado na mesma cota das pontas (Figura 8.b.).

Figura 8 – Radier equivalente – proposição de Randolph (1994)



Fonte: Neto (2005)

b) Método do Tubulão Equivalente

O método do tubulão equivalente foi proposto por Poulos e Davis (1980), onde o diâmetro (d_e) do tubulão seria dado por:

- estacas onde a resistência por atrito lateral é predominante:

$$d_e = 1,27 \sqrt{A_g}$$

Equação 9

- estacas onde a resistência de ponta é predominante:

$$d_e = 1,13 \sqrt{A_g}$$

Equação 10

Onde:

A_g = área que da figura que circunda as estacas

Poulos (1993) ressalta que a aplicação do radier equivalente pode ser mais eficiente em grupos com mais de 16 estacas e o tubulão equivalente para grupos com menos de 16 estacas.

- Métodos Baseados na Teoria da Elasticidade

- a) Método de Poulos, Davis e Randolph

Este método, denominado Método Simplificado PDR, foi proposto inicialmente por Poulos e Davis (1980) que estabeleceram um modelo de caracterização do comportamento de um radier estaqueado considerando três estágios: no primeiro, as estacas suportariam o carregamento até que sua capacidade limite fosse alcançada. No segundo estágio, o radier passariam a assumir as cargas adicionais. O terceiro estágio seria a ruptura, quando o radier e as estacas atingissem suas capacidades limites. Nesse método não é considerado o efeito das interações entre as estacas, o radier e o solo.

Randolph e Wroth (1978) apresentam uma solução para uma estaca isolada, expressa em termos de sua rigidez (K_p) onde prevê a variação do módulo cisalhante (G) de acordo com a profundidade. Randolph e Wroth (1979) estendem o conceito para um grupo de estacas e Randolph (1994) propõe o coeficiente K_{pr} que representa a interação entre o radier e a estaca passando a analisar o radier estaqueado como um sistema único.

Poulos (2001) apresenta uma nova versão de seu método onde passa a considerar que, no primeiro estágio, o radier trabalha em conjunto com as estacas, suportando uma parte do carregamento.

- b) Método de Sales

Sales (2000) apresentou um método que se difere do método apresentado por Poulos ao considerar a interação entre o radier e o grupo de estacas após se atingir a carga de mobilização total do grupo de estacas (P_{up}). Com esta consideração obtém-se recalques maiores.

Assim sendo, tem-se que, antes da total mobilização do grupo de estacas, onde a carga é menor ou igual à carga última do grupo de estacas (P_a):

$$\delta = \frac{P_t}{K_{pr}}$$

Equação 11

Sendo:

$$P_a = \frac{P_{up}}{\beta}$$

Equação 12

Onde:

β = parcela de carga absorvida pelo grupo de estacas

$$\beta = 1 - \frac{(1 - \alpha_{rp})K_r}{K_{pg} + (1 - 2\alpha_{rp})K_r}$$

Equação 13

Ao ultrapassar a carga última do grupo de estacas:

$$\delta = RG \frac{(P - F_m P_{up})}{K_r}$$

Equação 14

$$RG = \frac{K_r}{(1 - \beta)K_{pr}}$$

Equação 15

Onde:

F_m = fator de mobilização da capacidade de carga última da fundação.

2.4.2 – Métodos Numéricos

São métodos que surgiram para proporcionar maior qualidade nos projetos, reduzindo sua dependência de variáveis empíricas e tornando-os mais eficientes. São utilizados na análise de viabilidade do projeto, após a aplicação de método preliminares. Os softwares

utilizados geralmente utilizam métodos de análise baseados na teoria da elasticidade, permitindo variações de parâmetros relacionados às características dos materiais, como seu comportamento elasto-plástico ou elasto-rígido-plástico (Lima, 2007).

- Método dos Elementos Finitos

É uma ferramenta que possibilita uma análise tridimensional do problema, sendo capaz de analisar conjuntamente as interações radier-solo-estaca. O método, aliado a ensaios de campo, como SPT e CPT, permitem analisar as previsões de carga e recalque de fundações das mais variadas dimensões e elevados número de estacas. Um dos softwares utilizados neste método é o Plaxis 3D (Bittencourt, 2018). Dentre as vantagens do software mencionado, Pinto (2019) destaca: distinção das fases de construção, carregamento, adensamento, etc.; possibilidade de realizar a etapa de carregamento por partes, obtendo curvas de carga x recalque, tensão x deformação, dentre outras, de acordo com a variação do carregamento.

Pinto (2019), resume o processo de análise pelo Método dos Elementos Finitos em quatro etapas:

1. Divisão do domínio em uma certa quantidade de elementos finitos, triangulares ou quadrangulares;
2. Resolução das equações que regem os elementos;
3. Formação da malha através da conexão de todos os elementos;
4. Resolução das equações resultantes.

Ainda de acordo com a autora, a malha deve ser mais refinada em áreas sujeitas a grandes tensões concentradas, onde se espera maiores deformações, não sendo necessário o mesmo refinamento nas demais áreas, otimizando assim o tempo de cálculo do programa, que se torna maior quanto mais fina for a malha.

- Método dos Elementos de Contorno

Segundo Sales (2000), o MEC é um método cuja solução numérica é obtida inicialmente nos contornos, através da solução de um grupo de equações integrais e posteriormente são inferidos os valores nos pontos interiores do domínio em questão.

- Métodos Híbridos

Tanto o MEF quanto o MEC possuem suas limitações. Uma forma de se aproveitar as vantagens de cada método, é através da associação de ambos em uma mesma análise. Vários trabalhos foram desenvolvidos empregando-se o MEF na representação do radier, onde verifica-se os efeitos de sua flexibilidade e as cargas em diversos pontos do mesmo; e o MEC na representação das estacas no solo, onde as variáveis são em menor quantidade, o que resulta em menos interações e sistemas de equações menores (Bittencourt D. M., 2012).

2.5 – Estado da Arte

Esta seção destina-se à apresentação de trabalhos anteriores, cujos autores analisaram, de alguma forma, algum dos métodos apresentados neste trabalho. As observações dos resultados obtidos são relevantes para o entendimento do tema proposto e também para discussões futuras acerca do assunto.

No trabalho realizado por Pinto (2019) foram feitas análises numéricas através do software Plaxis 3D para verificar a viabilidade de utilização de uma fundação em radier estaqueado em áreas de lavra mineral. A região estudada é formada por estéril de bauxita, composto basicamente por argila de Belterra, em seu estado solto (pilha). O carregamento proposto seria equivalente ao peso de um tanque de armazenamento de água (1.250kN) e tal carregamento foi analisado numa situação de longo prazo, com análise drenada, cujo objetivo era a verificação dos deslocamentos máximos admissíveis, definidos como 10% do diâmetro da estaca, ou seja, 30mm, para o recalque total admissível, e distorção angular de 0,0013 para avaliação do recalque diferencial. A autora realizou os testes numéricos considerando 3 espessuras diferentes para um radier de 5 x 5 metros, sendo de 0,1m, 0,5m e 1,0m, caracterizando os radiers como flexível, semiflexível e rígido, respectivamente. Para cada espessura, a autora também realizou as análises considerando 4 comprimentos diferentes de estacas, sendo de 6, 9, 12 e 15 metros, todas com 0,3 metros de diâmetro e pré-fabricadas em concreto.

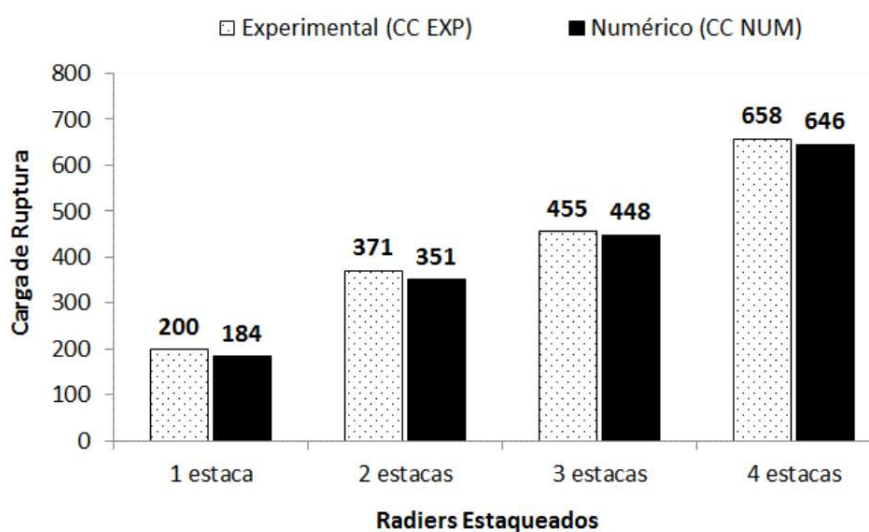
Em resumo, dentre todas as simulações realizadas a autora concluiu que:

- O radier rígido ($t=1,0m$) não se mostrou viável devido ao aumento na tensão sobre as estacas provocado pelo peso próprio da estrutura, o que causaria uma ruptura em 3 das 4 configurações de estacas analisadas.

- O radier flexível ($t=0,1m$) foi o que se apresentou mais viável para suportar a carga de projeto de acordo com o critério de máximo recalque admissível, sendo a configuração com estacas de 12 metros a mais vantajosa.
- O carregamento não foi considerado crítico na análise dos recalques imediatos máximos considerando apenas o radier.

O segundo trabalho descrito nesta seção foi realizado por Garcia (2015). O autor realizou provas de carga do tipo estática e lenta em radiers estaqueados compostos por 1, 2, 3 e 4 estacas cada um, com o objetivo de avaliar, dentre outros aspectos, a carga de ruptura, definida para um recalque de $0,1\phi$, bem como a parcela de contribuição do radier e das estacas na resistência das fundações. As estacas foram escavadas a trado, tendo $0,25m$ de diâmetro, $5,0m$ de comprimento e espaçamento entre elas de 5ϕ . A altura dos radiers foram de $0,5m$, $0,5m$, $0,55m$ e $0,65m$ respectivamente para as configurações de 1, 2, 3 e 4 estacas. A região é constituída de solo de Diabásio, composto em sua maior parte por silte arenoso e areia siltosa de elevada porosidade. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados a análises numéricas realizadas através do software LCPC-Cesar, sob as mesmas características geométricas e de carregamento. Ao final do experimento, o autor concluiu que os métodos apresentaram grande concordância nos resultados, sendo os valores de carga de ruptura ligeiramente maiores para o ensaio experimental, como era o esperado. A Figura 10 apresenta os valores obtidos pelo autor.

Figura 9 – Carga de ruptura dos radiers estaqueados

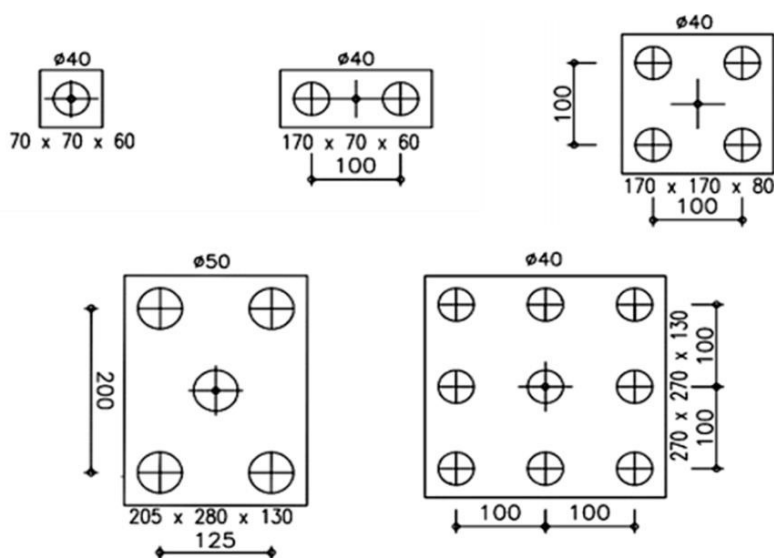


Fonte: Garcia (2015)

Com relação à parcela de contribuição do radier e das estacas, Garcia (2015) concluiu que a carga assumida pelo radier corresponde a 21% da carga última aplicada no radier estaqueado e as estacas participam com 79%. Tais valores correspondem à média simples dos valores encontrados para cada uma das 4 configurações analisadas e são compatíveis com os valores encontrados na literatura.

Bittencourt (2018) também realizou uma série de análises baseadas no método dos elementos finitos, onde foi possível verificar o comportamento de uma fundação em radier estaqueado e estabelecer uma comparação com a mesma fundação, considerando apenas as estacas como elemento resistente. O autor utilizou o software *Plaxis 3D foundation* para realização do estudo, sendo utilizados parâmetros geotécnicos obtidos por meio de ensaios de campo e através de provas de carga, as quais foram realizadas durante o estaqueamento, a fim de se avaliar o desempenho da fundação executada, conforme preconiza a ABNT NBR 6122. O objeto deste estudo foi o Instituto do Cérebro, localizado na cidade de Natal/RN. A Figura 10 apresenta a geometria dos blocos utilizados na fundação.

Figura 10 – Geometria dos blocos tipo do sistema de fundação do Instituto do Cérebro



Fonte: Bittencourt (2018)

A fundação é composta por 253 estacas, com comprimentos variando entre 15 e 20 metros.

Através das análises realizadas, Bittencourt (2018) concluiu que a fundação em radier estaqueado apresenta maior resistência devido à contribuição do bloco, quando comparada ao sistema de fundação convencional, composto apenas por estacas, sendo a participação do radier em média de 11% podendo chegar a 21% da capacidade de suporte (caso do bloco de 5 estacas). O autor destaca também o desempenho satisfatório do software ao realizar a verificação de fundações previamente analisadas por outros autores. O programa demonstrou grande compatibilidade com os resultados obtidos. Outro ponto observado diz respeito à rigidez do sistema, diretamente proporcional ao diâmetro do estaqueamento. Quanto maior a rigidez, menor a influência do bloco. A influência do radier também varia com a área em contato com o solo: quanto maior essa área, maior a participação do elemento superficial na capacidade de carga da fundação.

Outro trabalho envolvendo a análise de radiers estaqueados foi feito por Silva (2021), o qual realizou um estudo de caso para definição do projeto de uma fundação em radier estaqueado para um edifício de 5 pavimentos, localizado na cidade de Jaboatão dos Guararapes/PE. Previamente à elaboração do trabalho, foi realizada no local uma prova de carga estática em uma estaca pré fabricada em concreto, quadrada, com 26,5cm de lado, furo central de 12,0cm de diâmetro e comprimento de 14,0m. Os resultados do ensaio foram utilizados na calibração dos parâmetros geotécnicos. O autor realizou análises numéricas através do software *Plaxis 2D Advanced* para encontrar os valores ótimos para a espessura do radier, dimensões e comprimento das estacas e comparou os resultados com os valores obtidos através de métodos semiempíricos, que considerariam no projeto que apenas as estacas absorvem a carga da superestrutura. As conclusões foram as seguintes:

- A utilização do radier estaqueado se mostrou eficaz na redução de recalques totais e diferenciais quando comparado ao método convencional.
- As análises numéricas mostraram que é possível obter recalques diferenciais e totais menores se aumentar o comprimento das estacas, sendo a redução da ordem de 7%;
- O radier, classificado como flexível, com espessura igual a 0,25m foi o que indicou menores valores de recalques, sendo os recalques no centro do radier mais acentuados.
- O aumento da área lateral das estacas foi fator determinante para a redução dos recalques a níveis aceitáveis.

Todos os estudos citados nesta seção apresentam resultados satisfatórios no emprego de radier estaqueado, com vantagens frente ao método tradicional, composto exclusivamente por estacas, desprezando a contribuição do bloco como sistema de fundação, e corroboram para a confiabilidade dos métodos detalhados, com destaque para o método dos elementos finitos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada neste trabalho consiste na verificação dos resultados obtidos por Pinto (2019) e Garcia (2015) quando comparados ao método simplificado PDR (Poulo – Davis – Randolph), sendo este o principal instrumento da pesquisa.

A sequência de cálculos é a seguinte:

1. Cálculo da capacidade de carga do radier e do grupo de estacas.
2. Cálculo do recalque do radier. Aqui será utilizada a metodologia proposta por Jambu (1956).
3. Definição da Rigidez do radier.
4. Cálculo do recalque de uma estaca isolada. Aqui será utilizada a metodologia proposta por Randolph (1985).
5. Cálculo do recalque de um grupo de estacas. Aqui será utilizada a metodologia proposta por Randolph & Worth (1979).
6. Definição da Rigidez do grupo de estacas.
7. Cálculo da capacidade de carga do radier estaqueado.
8. Cálculo do recalque do radier estaqueado através do método simplificado PDR.
9. Definição da curva tri linear de carga x deslocamento.

3.1 – Metodologia para previsão de carga e recalque – Radier

3.1.1 – Metodologia para previsão de carga

- Métodos Semi Empíricos

Segundo Mello (1975) a tensão admissível (σ_a) pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$\sigma_a = 0,1(\sqrt{N_s p t} - 1)(MPa)$$

Equação 16

Onde:

N_{spt} = valor médio do SPT no bulbo de tensões, sendo este duas vezes o lado da sapata segundo Schmertmann (1978)

De acordo com Teixeira e Godoy (1998), pode ser utilizada a expressão abaixo, que também considera a resistência à penetração:

$$\sigma_a = 20N_{spt} \text{ (kPa)}$$

Equação 17

3.1.2 – Metodologia para previsão de recalque

O método proposto por Janbu (1966 apud Cintra & Albiero, 1984) é um método alternativo para a previsão de recalques que leva em consideração a espessura da camada. Os recalques são calculados pela seguinte expressão:

$$\rho_i = \mu_0 \cdot \mu_1 \cdot \sigma \cdot B \cdot \left(\frac{1 - \nu^2}{E_s} \right)$$

Equação 18

Onde:

μ_0 e μ_1 = coeficientes variáveis que dependem do embutimento da fundação, da espessura da camada e da forma da fundação.

σ = intensidade da tensão de contato aplicada;

B = menor dimensão da sapata;

E_s = módulo de deformabilidade;

ν = coeficiente de Poisson do solo.

Os valores de μ_0 e μ_1 são obtidos dos ábacos abaixo, representados na Figura 12.

Quando não se dispõe de ensaios de laboratório, pode-se estimar os valores de E_s e ν através da seguinte correlação proposta por Teixeira e Godoy (1996):

$$E_s = \alpha \cdot K \cdot N_{SPT}$$

Equação 19

Os coeficiente K e α podem ser obtidos a partir das tabelas ilustradas na Figura 11.

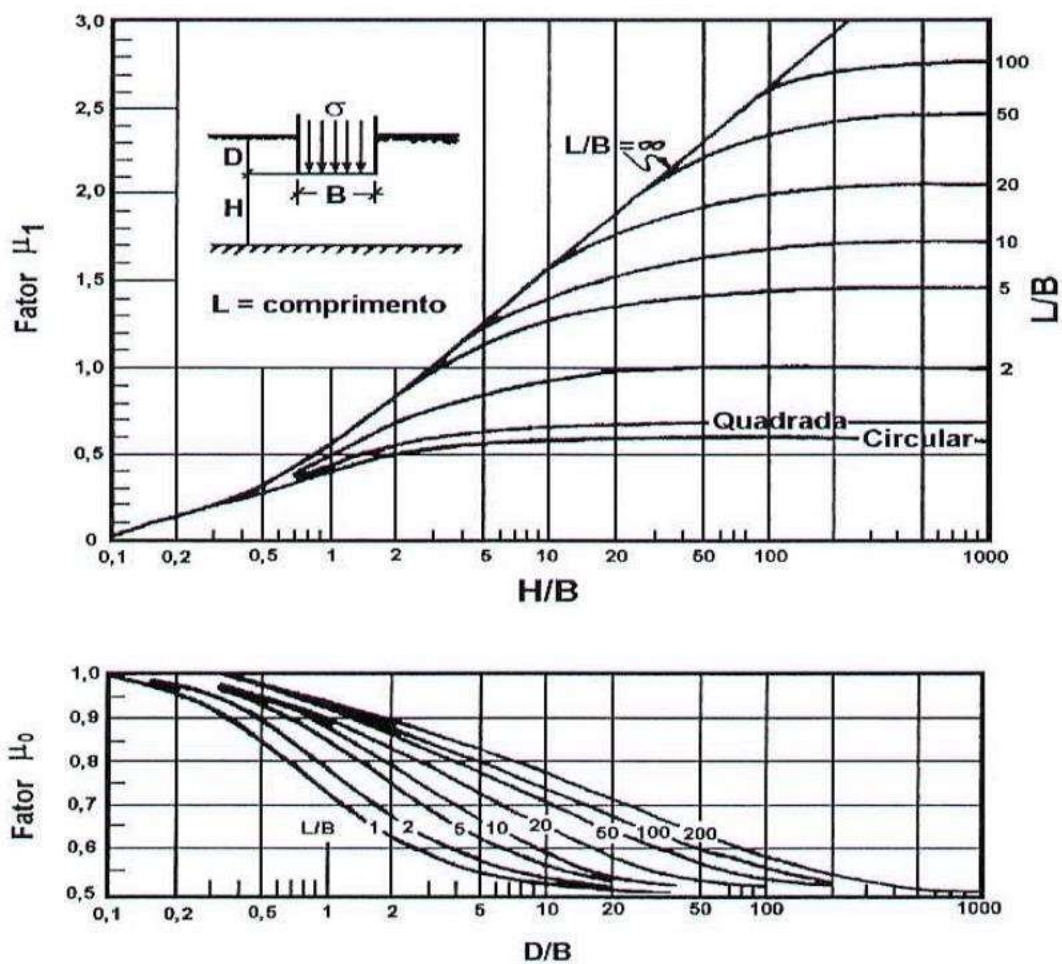
Figura 11 – Coeficientes de correlação K e α

Solo	K (MPa)
areia com pedregulhos	1,1
areia	0,9
areia silteosa	0,7
areia argilosa	0,55
silte arenoso	0,45
silte	0,35
argila arenosa	0,3
silte argiloso	0,25
argila silteosa	0,2

Solo	α
areia	3
silte	5
argila	7

Fonte: Teixeira e Godoy (1996) – modificado

Figura 12 – Fatores de Janbu



Fonte: Cintra & Albiero (1984)

Onde L = maior dimensão da sapata.

3.2 – Metodologia para previsão de carga e recalque – Grupo de estacas

3.2.1 – Metodologia para previsão de carga de uma estaca isolada

A capacidade de carga de uma estaca isolada é dada por:

$$Q_{ult} = Q_p \cdot Ab + U \cdot (Q_l \cdot \Delta_l)$$

Equação 20

Onde:

Q_p = resistência de ponta da estaca

Ab = área da base

Q_l = resistência lateral da estaca

U = perímetro

Δ_l = comprimento da estaca

Segundo Decourt e Quaresma (1978) $q_{p,ult}$ e $q_{l,ult}$ podem ser definidas da seguinte forma:

$$q_{p,ult} = KN_{p,spt}$$

Equação 21

$$q_{l,ult} = \frac{N_{l,spt}}{3} + 1$$

Equação 22

Onde:

$N_{p,spt}$ = média do SPT da ponta da estaca, 1m acima e 1m abaixo

$N_{l,spt}$ = média do SPT no fuste da estaca desconsiderando o valor obtido 1m acima da ponta.

K = Fator característico do solo, conforme a Tabela 2

Tabela 2 – Fator característico do solo

Tipo de Solo	K (kPa)
Argilas	120
Siltes Argilosos	200
Siltes Arenosos	250
Areias	400

Fonte: Décourt e Quaresma (1978)

3.2.2 – Metodologia para previsão de carga do grupo de estacas

$$Q_P = Q_{ult} \cdot n$$

Equação 23

Onde:

n = número de estacas do grupo

3.2.3 – Metodologia para previsão de recalque

O método proposto por Randolph e Wroth (1978) prevê a variação do módulo cisalhante (G) de acordo com a profundidade. A solução é apresentada para uma estaca isolada carregada axialmente e pode ser expressa em termos da sua rigidez (K_p):

$$K_p = \frac{P_T}{w_T} = G_L \cdot r_0 \left[\frac{\frac{4\eta}{(1-v)\xi} + \rho \frac{2\pi}{\zeta} \cdot \frac{tgh(\mu L)}{\mu L} \cdot \frac{L}{r_0}}{1 + \frac{1}{\pi\lambda} \cdot \frac{4\eta}{(1-v)\xi} \cdot \frac{tgh(\mu L)}{\mu L} \cdot \frac{L}{r_0}} \right]$$

Equação 24

Onde:

P_T = carga no topo da estaca;

w_T = recalque no topo da estaca;

G_L = módulo cisalhante do solo a uma profundidade $Z=L$;

r_0 = raio da estaca;

L = comprimento da estaca;

$$\eta = r_b/r_0$$

r_b = raio da ponta da estaca;

$\zeta = \ln(r_m/r_0)$ = parâmetro de transferência de carga;

$r_m = L\{0,25 + \xi[2,5\rho(1 - \nu) - 0,25]\}$ = máximo raio de influência;

$\xi = G_L/G_b$ = parâmetro de rigidez da estaca

G_b = módulo cisalhante abaixo da ponta da estaca

$$\rho = \bar{G}/G_L$$

\bar{G} = módulo cisalhante médio do solo no trecho penetrado pela estaca;

$$\lambda = E_p/G_L$$

E_p = módulo de Young do material da estaca;

$$\mu L = \frac{L}{r_0} \sqrt{\frac{2}{\lambda \zeta}}$$

Randolph e Wroth (1979) alteraram os parâmetros de transferência de carga (ζ) e de rigidez da estaca (ξ) ao considerar as interações existentes em um grupo de estacas, reescrevendo as equações da seguinte forma:

$$\zeta^* = n\zeta - \sum_{i=2}^n \ln\left(\frac{S_i}{r_0}\right)$$

Equação 25

$$\xi^* = \xi \left[1 + \frac{2}{\pi} \sum_{i=2}^n \frac{r_b}{S_i} \right]$$

Equação 26

Onde:

S_i = espaçamento entre duas estacas;

n = número de estacas.

Os novos parâmetros podem ser substituídos na Equação 24 para o cálculo da rigidez de um grupo de estacas.

Randolph (1994) propôs o seguinte sistema de equações para o radier estaqueado:

$$\begin{Bmatrix} W_{pg} \\ W_r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/K_{pg} & \alpha_{pr}/K_r \\ \alpha_{rp}/K_{pg} & 1/K_r \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_{pg} \\ P_r \end{Bmatrix}$$

Equação 27

Onde:

W_{pg} = recalque do grupo de estacas;

W_r = recalque do radier;

P_{pg} = carga absorvida pelas estacas;

P_r = carga absorvida pelo radier;

K_{pg} = rigidez do grupo de estacas;

K_r = rigidez do radier;

α_{pr} e α_{rp} = fatores de interação

$$\alpha_{pr} = \alpha_{rp} \frac{K_r}{K_{pg}}$$

Equação 28

Estabelecendo a igualdade entre os recalques do radier e das estacas define-se a rigidez do sistema, expressa por:

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

Equação 29

e também a carga absorvida pelo radier (P_r):

$$\frac{P_r}{P_r + P_{pg}} = \frac{(1 - \alpha_{rp})K_r}{K_{pg} + K_r(2\alpha_{rp} - 1)}$$

Equação 30

Os valores de α_{rp} podem ser considerados como 0,8 independente do espaçamento, comprimento ou rigidez da estaca, segundo Clancy e Randolph (1992). Desta forma, tem-se as seguintes equações:

$$K_{pr} = \frac{1 + 0,6 \left(\frac{K_r}{K_{pg}} \right)}{1 - 0,64 \left(\frac{K_r}{K_{pg}} \right)} K_{pg}$$

Equação 31

$$\frac{P_r}{P_{pg}} = \frac{0,2}{1 - 0,8 \left(\frac{K_r}{K_{pg}} \right)} \frac{K_r}{K_{pg}}$$

Equação 32

3.3 – Metodologia para previsão de carga e recalque – Radier estaqueado

3.3.1 – Metodologia para previsão de carga

De Sanctis e Mandolini (2006) propuseram a seguinte aproximação para estimativa da capacidade final de carga (Q_{upr}):

$$Q_{upr} = Q_{up} + \alpha_{uR} Q_{ur}$$

Equação 33

Onde:

Q_{up} = capacidade última do grupo de estacas

Q_{ur} = capacidade última do radier

α_{uR} = proporção da capacidade do radier mobilizada na ruptura (valor entre 0 e 1) que pode ser estimado da seguinte forma:

$$\alpha_{uR} = 1 - 3 \cdot \left(\frac{A_g}{A}\right) \left(\frac{d}{s}\right)$$

Equação 34

$$A_g = [(\sqrt{n} - 1)s]^2$$

Equação 35

Onde:

A_g = área ocupada pelas estacas

A = área total do radier

d = diâmetro das estacas

s = média do espaçamento centro a centro das estacas

n = número de estacas

3.3.2 – Metodologia para previsão de recalque

Poulos e Davis (1980) estabeleceram um método simplificado para caracterização da curva de recalque de um radier estaqueado. Segundo eles, inicialmente as estacas suportariam todo o carregamento, até atingirem sua capacidade limite de suporte. A partir de então, as cargas adicionais do sistema passariam a ser suportadas pelo radier e o recalque adicional seria apenas o do radier. A curva carga x recalque seria, então, composta por duas seções lineares (Figura 13).

Na seção entre o início do carregamento e o ponto A o recalque pode ser estimado através da seguinte equação:

$$\delta = R_G P_G \delta_1$$

Equação 36

$$R_G = R_C \overline{R_G}$$

Equação 37

Onde:

δ = recalque do sistema radier estaqueado;

P_G = carga sobre o radier;

δ_1 = recalque de uma estaca independente sob carga unitária;

R_G = relação entre o recalque médio da fundação e o recalque de uma estaca isolada submetida ao carregamento atuante no grupo;

R_C = razão entre o recalque de uma estaca com bloco e outra semelhante sem o bloco;

\overline{R}_G = razão entre o recalque médio da fundação e o recalque de uma estaca com bloco submetida ao carregamento atuante no grupo.

Na seção entre o ponto A e o ponto B, o recalque é o do radier, dado por:

$$\delta_w = P_l R_G \delta_1 + \frac{0,947(P - P_l)(1 - \nu^2)}{BE}$$

Equação 38

Onde:

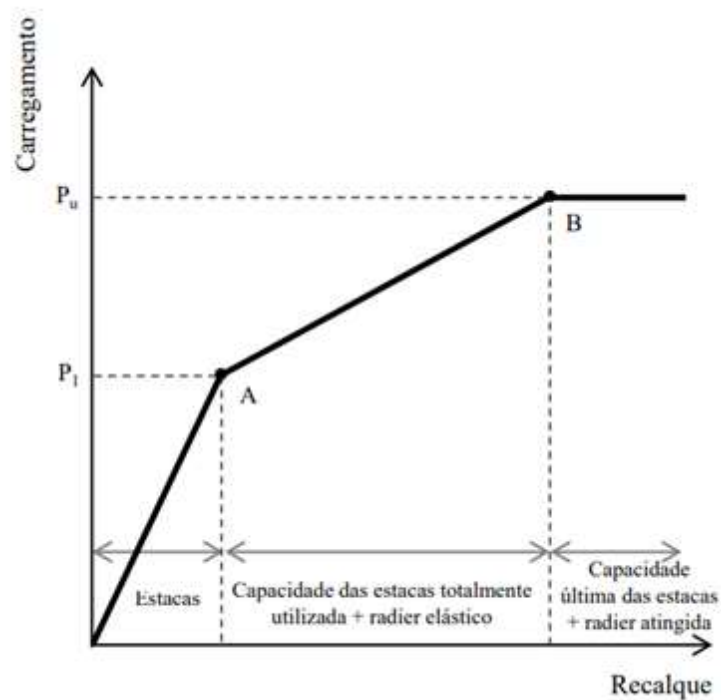
δ_w = recalque do sistema radier estaqueado;

P = carga entre os valores P_l e P_u ;

ν = coeficiente de Poisson do solo;

E = módulo de elasticidade do solo.

Figura 13 – Curva carga x recalque de acordo com o método de Poulos e Davis (1980)



Fonte: Poulos & Davis (1980 apud Carvalho 2015) - modificado

Na nova versão de seu método, Poulos (2001) considerou que o radier também absorve uma parcela da carga mesmo no estágio inicial do carregamento, sendo o recalque do sistema dado por:

$$\delta = \frac{P_t}{K_{pr}} \text{ para } P \leq P_t$$

Equação 39

$$\delta = \frac{P_t}{K_{pr}} + \frac{(P - P_t)}{K_r} \text{ para } P_t < P < P_u$$

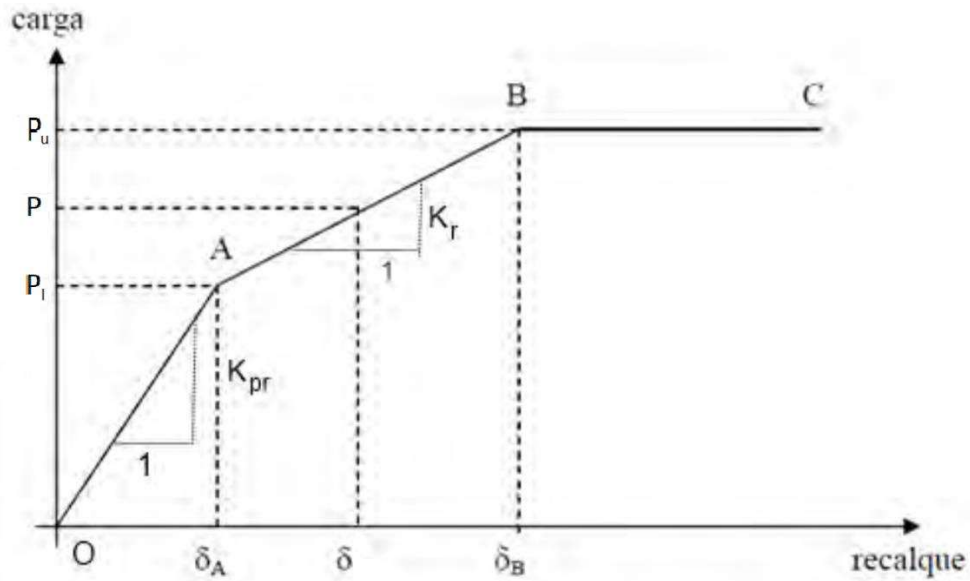
Equação 40

Onde:

P_t = carga total aplicada;

Na seção entre o ponto A e B o comportamento seria semelhante ao modelo anterior, considerando a rigidez K_r , sendo o acréscimo de carga suportado apenas pelo radier, conforme representado na Figura 14.

Figura 14 – Modelo para estimativa de recalque de radier estaqueado com estacas totalmente mobilizadas



Fonte: Poulos (2001 apud Duarte 2012) - modificado

3.3.3 – Definição do Fator de Segurança

A condição para determinação do fator de segurança foi proposta por Sanctis e Mandolini (2006) da seguinte forma:

$$0,82(FS_R + FS_P) \leq FS_{PR} \leq (FS_R + FS_P)$$

Equação 41

$$FS_R = \frac{Q_{ur}}{Q} \quad FS_P = \frac{Q_{up}}{Q}$$

Equações 42 e 43

Onde:

FS_R = fator de segurança do radier

FS_P = fator de segurança do grupo de estacas

FS_{PR} = fator de segurança do radier estaqueado

Q = carga total atuante na fundação

3.4 – Descrição das fundações analisadas

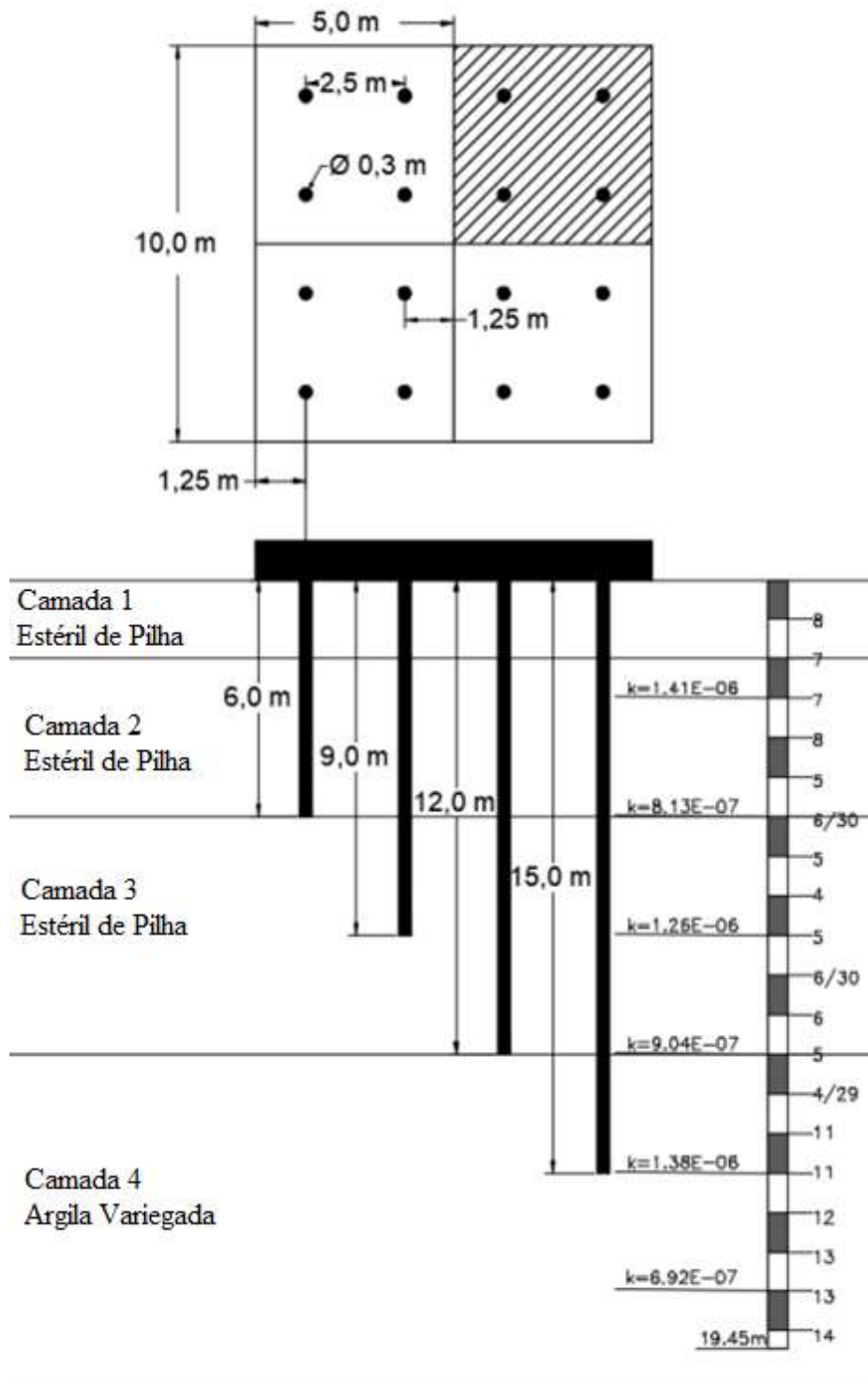
3.4.1 – Radier estaqueado trabalho Pinto (2019) – Análise Numérica

A autora analisou através do software Plaxis 3D uma fundação em radier estaqueado de 5 x 5 metros, composta por 4 estacas pré-moldadas em concreto com diâmetro de 0,3 metros. A fundação corresponde à fração de $\frac{1}{4}$ do radier proposto inicialmente, o qual teria 10 x 10 metros e 16 estacas. A redução foi feita pelo fato do radier ser simétrico com o objetivo de reduzir o tempo de processamento dos dados. Foram analisadas 3 espessuras para o radier a fim de definir a mais adequada para o ambiente e finalidade propostas, sendo elas: $t=0,1\text{m}$; $t=0,5\text{m}$ e $t=1,0\text{m}$. Para cada espessura a autora variou o comprimento das estacas, realizando as análises para os comprimentos: 6m, 9m, 12m e 15m.

Foi considerado um carregamento de 1250 kN distribuído uniformemente sobre este radier, correspondente a um tanque de água.

A Figura 15 representa a configuração da fundação analisada com a representação do ensaio SPT típico do solo, sendo que o solo é basicamente constituído por estéril de pilha, material argilo arenoso.

Figura 15 – Configuração geométrica e geotécnica do modelo analisado



Fonte: Pinto (2019) – modificado

A capacidade resistente das estacas foi obtida através do método de Cálculo de Decóurt-Quaresma pela autora e os resultados constam na Tabela 3. Os parâmetros do concreto utilizado nas estacas e no radier estão especificados na Tabela 4.

Tabela 3 – Parâmetros de resistência drenada das estacas

Método de Cálculo	Estaca	Atrito Lateral (kN)	Resistência de Ponta (kN)	Capacidade de Carga (kN)	Q_{adm} (kN)
Decóurt-Quaresma	6 m	264	204	468	234
Decóurt-Quaresma	9 m	450	216	666	333
Decóurt-Quaresma	12 m	633	191	824	412
Decóurt-Quaresma	15 m	891	178	1069	534,5

Fonte: Pinto (2019) – modificado

Tabela 4 – Parâmetros do concreto

Elementos de Fundação	γ (kN/m³)	E (GPa)	ν
Estacas	24	25	0,15
Radier	25	25	0,15

Fonte: Pinto (2019)

A autora concluiu que a configuração de radier estaqueado flexível foi a que apresentou melhores resultados, portanto, as verificações através do método simplificado PDR serão realizadas apenas para os diferentes comprimentos de estacas nesta fundação. A Tabela 5 apresenta os valores de recalques obtidos.

Tabela 5 – Recalques totais obtidos nas simulações numéricas do Radier Estaqueado Flexível

Radier Estaqueado Flexível (t=0,1m)					
Etapas de Carregamento (kN/m ²)	Carga Aplicada (kN)	Recalque Total			
		L (m)			
		6	9	12	15
Peso Radier Estaqueado	62,5	2,2	2,0	0,9	0,7
10	312,5	8,1	6,3	3,4	2,7
20	562,5	15,3	11,5	6,3	4,6
30	812,5	22,4	17,5	9,2	6,5
40	1062,5	30,6	23,7	12,3	8,4
50	1312,5	39,6	30,4	15,5	10,5
60	1562,5	50,0	37,9	19,0	12,8
70	1812,5	60,5	46,0	22,8	15,4

Fonte: Pinto (2019) - modificado

3.4.2 – Radier estaqueado trabalho Garcia (2015) – Análise Experimental

Neste trabalho foram feitas avaliações por meio de provas de carga em fundações do tipo radier estaqueado. Para efeito de comparação através do método simplificado PDR foi escolhida a configuração composta por 4 estacas de 0,25 metros de diâmetro, tendo o radier o formato quadrado com 1,85 x 1,85 metros, espessura de 0,65 metros, espaçamento entre as estacas de 1,25 metros e comprimento das estacas de 5 metros. As estacas são do tipo escavadas mecanicamente por trado. Na Tabela 6 estão os parâmetros do concreto utilizado nas estacas e no radier.

Tabela 6 – Parâmetros do Concreto

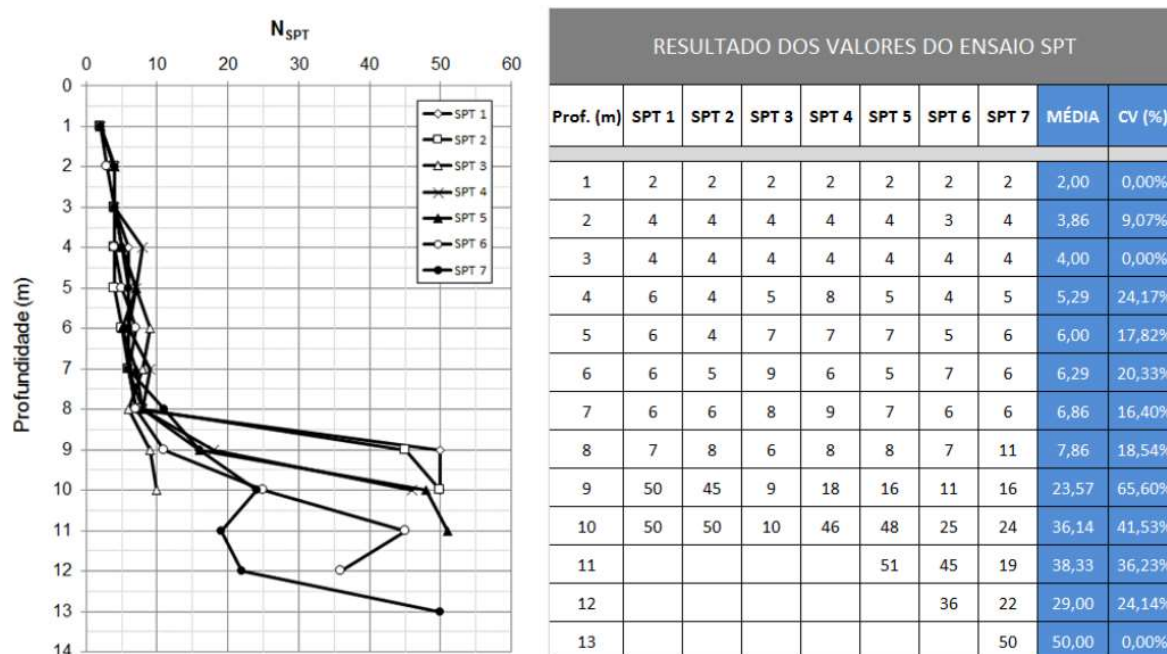
Elementos de Fundação	γ (kN/m ³)	E (GPa)	ν
Estacas	25	29	0,20
Radier	25	29	0,20

Fonte: Garcia (2015) – modificado

A carga de ruptura de uma estaca isolada foi obtida por meio de prova de carga realizada por Schulze (2013 apud Garcia 2015), admitida como sendo o valor correspondente ao recalque de 10% do diâmetro nominal da estaca, ou seja, 25mm. O valor obtido foi de 174 kN, sendo, portanto, a carga admissível de **87 kN**.

A Figura 16 apresenta os valores de N_{SPT} de acordo com a profundidade, obtidos através de ensaios realizados por Rodriguez (2013 apud Garcia 2015).

Figura 16 – Valores de N_{SPT} em profundidade



Fonte: Rodriguez (2013 apud Garcia 2015)

O perfil geológico do solo está representado na Figura 17.

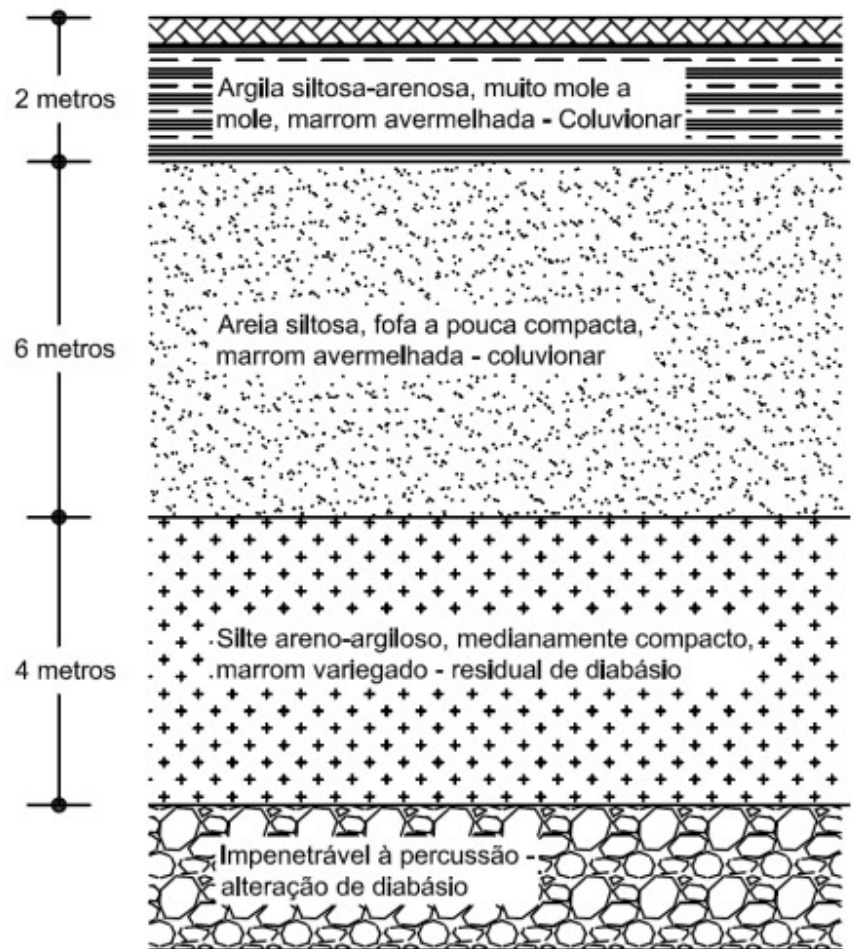
Os valores de carga e recalque obtidos constam na Tabela 7.

Tabela 7 – Recalques totais obtidos na análise experimental por prova de carga do radier estaqueado

Q(kN)	w exp (mm)
60	0,03
120	0,12
180	0,29
245	0,73
310	1,30
375	2,12
440	3,08
505	4,70
570	8,38
635	16,90
700	40,14

Fonte: Garcia (2015) – modificado

Figura 17 – Perfil geológico do solo



Fonte: Garcia (2015) – modificado

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos após a aplicação do método simplificado PDR nas fundações previamente analisadas através de simulações numéricas e provas de carga por outros autores.

Após a definição da rigidez do radier (K_r), da rigidez do conjunto radier-estacas (K_{pr}), da carga correspondente à total mobilização do grupo de estacas (P_1) e da carga final resistente do conjunto radier estaqueado (P_u) foram arbitrados valores a fim de delinear a curva trilinear proposta por Poulos, Davis e Randolph em seu método. Tais valores foram sendo aumentados até atingir os valores citados acima para cada uma das fundações analisadas.

Posteriormente foi plotado nos respectivos gráficos os valores utilizados pela autora das simulações numéricas, tanto para a carga quanto para os recalques obtidos, assim como os valores obtidos pelo autor das provas de carga.

4.1 – Trabalho Pinto (2019) – Análises Numéricas

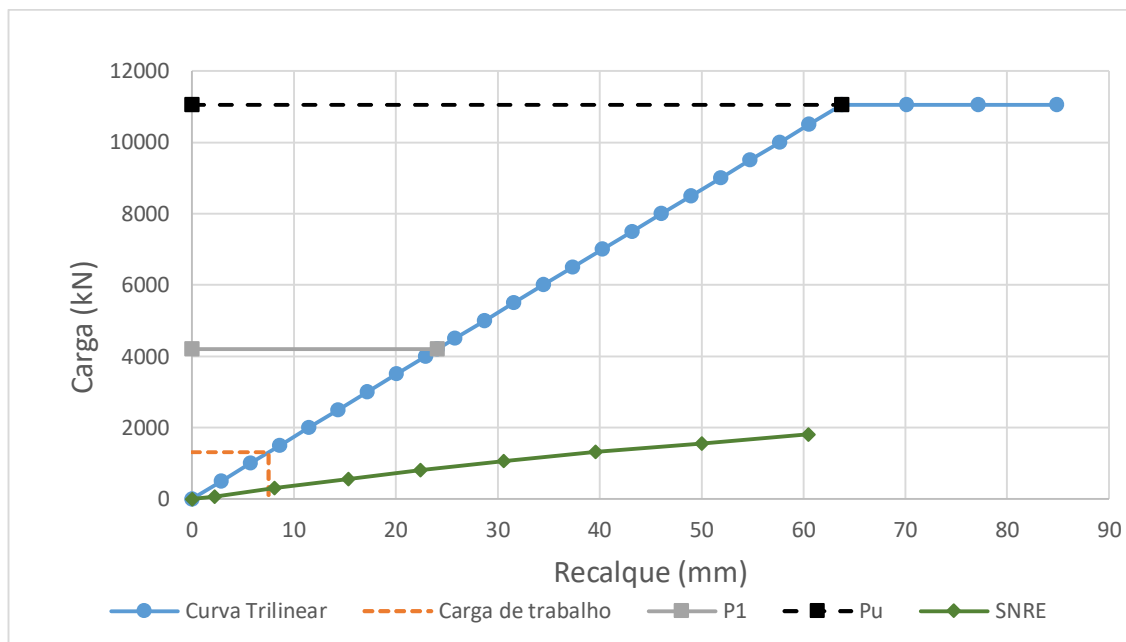
A seguir serão demonstrados os resultados obtidos na comparação entre o método simplificado PDR e as análises numéricas realizadas por Pinto (2019) para o radier estaqueado classificado como flexível, com espessura de 0,1 metro em cada um dos comprimentos de estacas analisados. Os incrementos de carga foram da ordem de 500 kN.

- Radier Flexível – Estacas de 6 metros

O modelo trilinear (Figura 18) apresenta duas seções, cuja inclinação é governada pela rigidez do radier estaqueado, no trecho compreendido entre o ponto 0 e a carga P_1 e pela rigidez do radier, entre os pontos correspondentes à carga P_1 e P_u . Pode-se observar que houve pouca variação nestes valores, sendo $K_{pr} = 174,6$ e $K_r = 172,55$. A carga de trabalho, de 1250 kN, acrescida do peso do radier, se encontra na primeira seção, indicando que o grupo de estacas não teve sua capacidade resistente totalmente mobilizada. O recalque produzido por este carregamento foi da ordem de 7,52mm. Considerando o critério de ruptura definido por Pinto (2019) de 10% do diâmetro nominal

da estaca, ou seja, 30mm, o método PDR estimou uma carga de aproximadamente 5250 kN.

Figura 18 – Modelo Trilinear Radier Flexível – Estacas de 6m



Fonte: Elaborado pela autora

Pela simulação numérica, percebe-se que os recalques obtidos para esta configuração de radier estaqueado foram bem maior do que os resultados obtidos através do método simplificado, tendo a fundação “rompido” com um carregamento de cerca de 1062 kN, ou seja, abaixo da carga de trabalho.

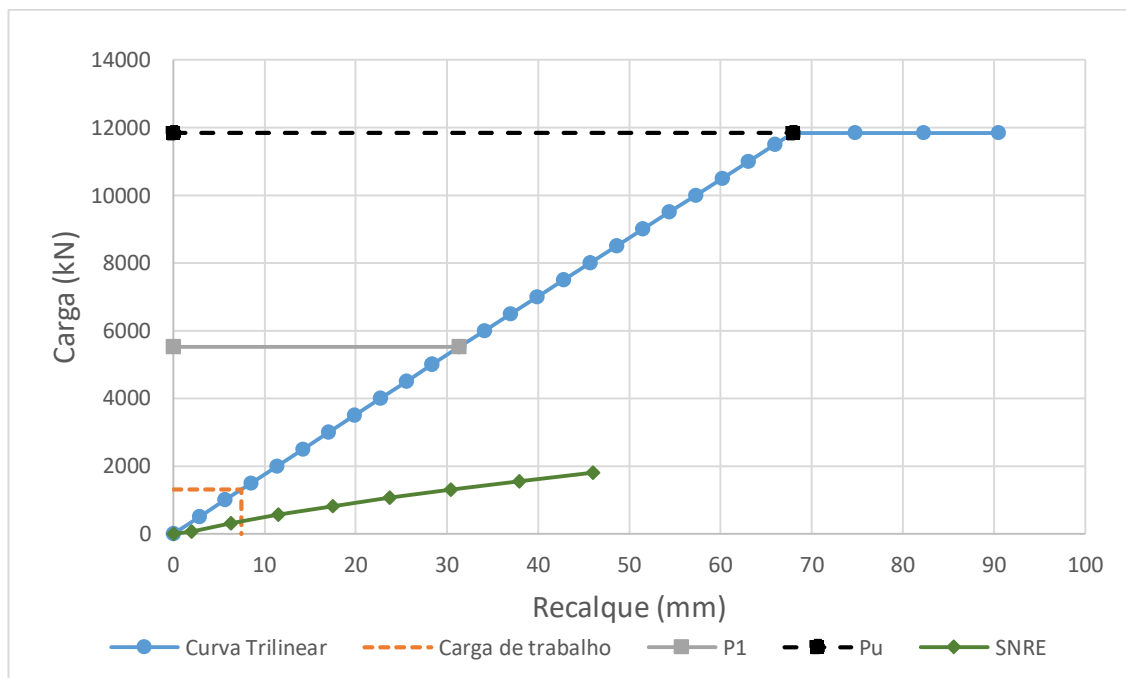
Considerando o método simplificado, não seria necessário aumentar o comprimento das estacas a fim de se reduzir os recalques, porém, a análise numérica indicou o contrário.

- Radier Flexível – Estacas de 9 metros

Assim como no modelo anterior, na fundação composta por estacas de 9m os valores de K_r e K_{pr} não tiveram grande variação, sendo alterado apenas a rigidez do conjunto devido o aumento no comprimento das estacas, ficando K_{pr} igual a 176,18 nesta configuração. O método simplificado apresentou um recalque de 7,45 mm para a carga de trabalho, estando ainda localizada na primeira seção da curva trilinear. A variação no comprimento das estacas também elevou a carga de mobilização total das mesmas (Q_1) para 5522,82 kN e a carga última do conjunto (Q_u) para 11843,0 kN. O recalque de 30mm foi definido,

nesta configuração, para uma carga de 5285,4 kN, ficando, neste caso, abaixo do valor de Q_1 . A Figura 19 apresenta a curva obtida.

Figura 19 – Modelo Trilinear Radier Flexível – Estacas de 9m



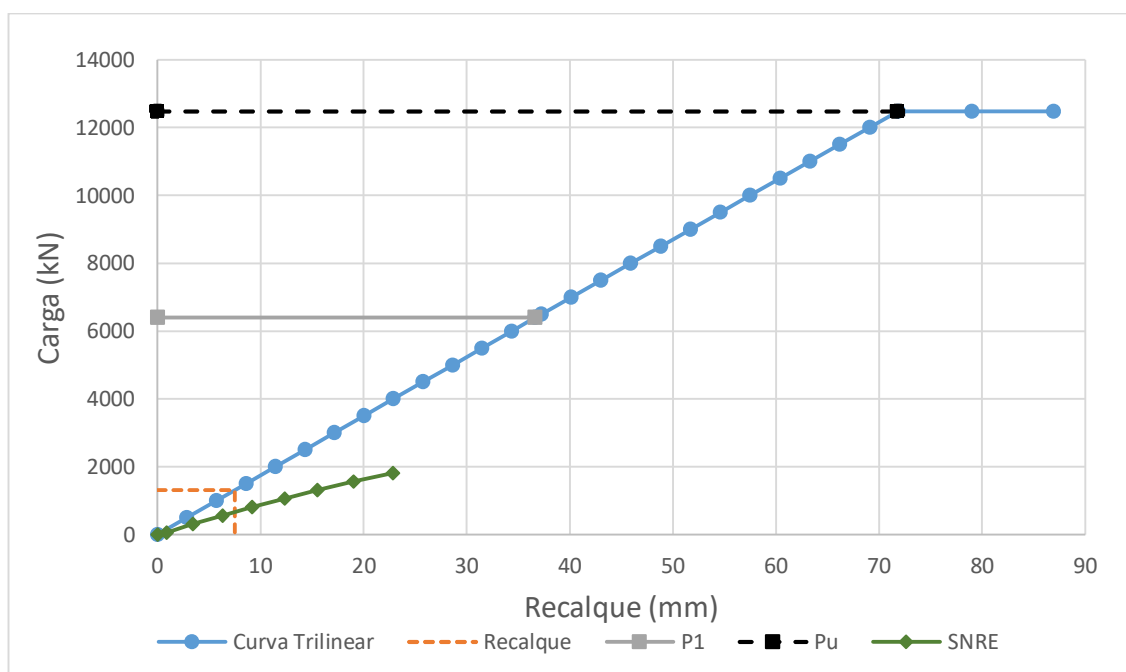
Fonte: Elaborado pela autora

A simulação numérica novamente apresentou valores de recalques muito acima dos estimados pelo método simplificado e novamente o recalque máximo ocorreu com um carregamento inferior à carga de serviço.

- Radier Flexível – Estacas de 12 metros

Nesta simulação, o valor de K_{pr} foi de 174,66. Foi obtido um recalque de 7,51 para o carregamento de trabalho da fundação. Fica evidenciada a tendência no aumento da carga de mobilização total das estacas e da carga última do conjunto radier estaqueado à medida em que se aumenta o comprimento das mesmas, passando neste caso para 6401,03 kN e 12475,0 kN, respectivamente. Para o recalque de 30mm o método apresentou uma carga de 5239,8 kN. A Figura 20 representa o modelo trilinear para a configuração composta por estacas de 12 metros.

Figura 20 - Modelo Trilinear Radier Flexível – Estacas de 12m



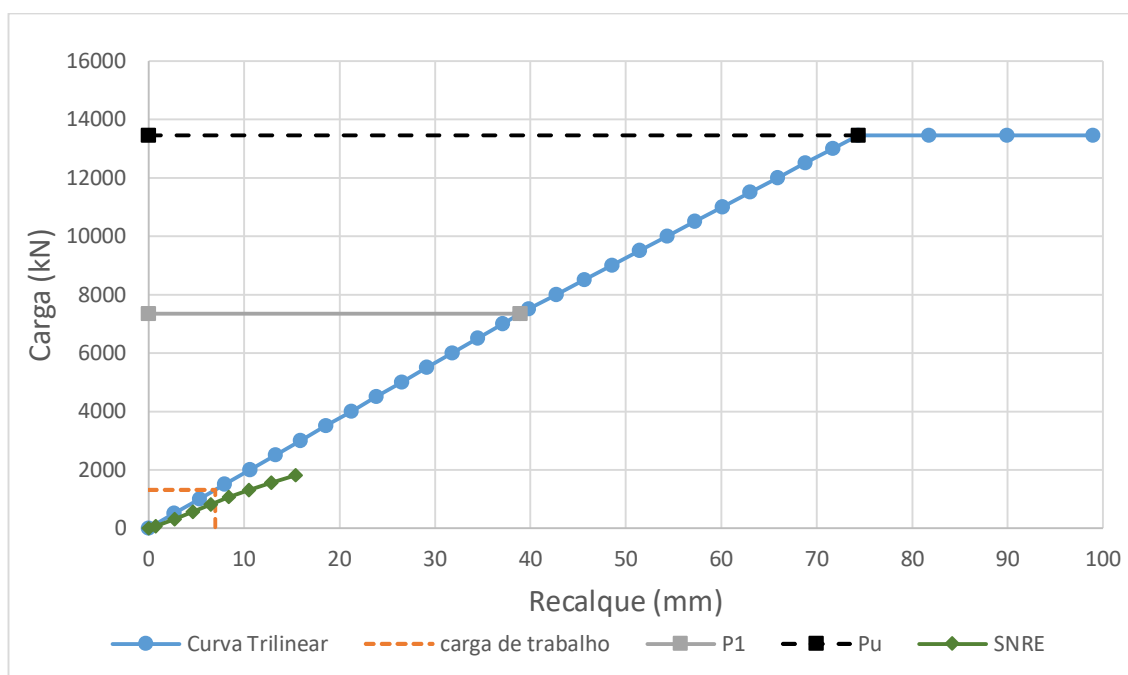
Fonte: Elaborado pela autora

A curva obtida por simulação numérica apresenta uma tendência de aproximação dos valores obtidos pelo método simplificado, mas ainda mostra discrepâncias relativamente altas entre os valores obtidos pelos dois métodos. Nesta configuração, porém, não se atinge o recalque de 30mm com o carregamento de trabalho aplicado. A autora das análises numérica define esta como a configuração ideal para a finalidade proposta.

- Radier Flexível – Estacas de 15 metros

A curva obtida pelo método simplificado apresenta, nesta configuração, valor de rigidez K_{pr} igual a 188,67. A carga de mobilização total das estacas aumenta para 7347,13 kN com o aumento do comprimento das estacas, elevando, também, a capacidade final de carga do conjunto radier estaqueado para 13455,0 kN. O recalque de 30mm seria atingido com um carregamento de 5660,1 kN enquanto a carga de trabalho produziria um deslocamento de 6,96mm. Tais resultados estão apresentados na Figura 21.

Figura 21 - Modelo Trilinear Radier Flexível – Estacas de 15m



Fonte: Elaborado pela autora

Com esta configuração, a curva obtida por simulação numérica se encontra ainda mais próxima da curva obtida pelo método simplificado, indicando recalques menores para o carregamento analisado. O recalque obtido para a carga máxima aplicada, de 1812,5 kN, foi de 15,4mm. Pelo método simplificado, o recalque seria de 9,6mm para o mesmo carregamento.

- Considerações Finais

O solo da região estudada é constituído por material oriundo do processo de extração mineral, depositado sob a forma de aterros soltos ou compactados. Este material, entretanto, não apresenta uniformidade nos parâmetros de resistência, não sendo possível definir um comportamento característico para o mesmo. As análises numéricas contemplaram os piores cenários.

Outro ponto importante diz respeito ao modelo simulado, que não representa uma condição real e sim uma situação hipotética estabelecida pela autora para analisar uma possível utilização do espaço.

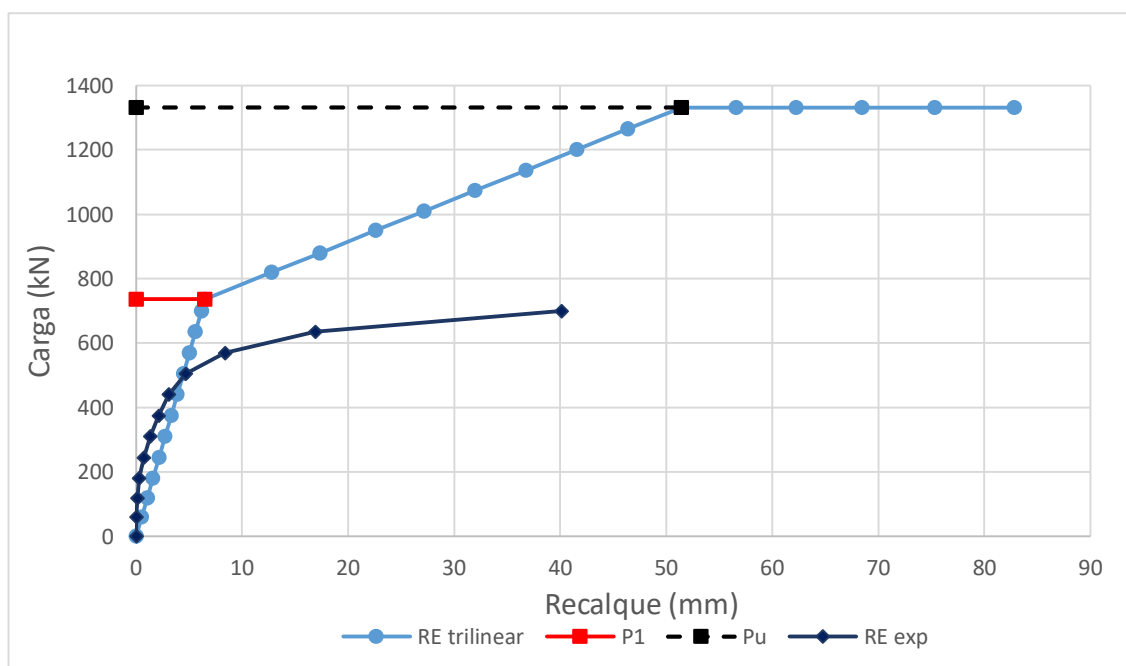
O método simplificado PDR é diretamente influenciado pela resistência à penetração do solo, SPT, sendo que as amostras obtidas em campo apresentaram grande variação nestes valores.

4.2 – Trabalho Garcia (2015) – Análise Experimental

Nesta análise foram feitos incrementos de carga de aproximadamente 60 kN até atingir o valor da capacidade de carga última do radier estaqueado (P_u). A curva trilinear (RE trilinear) de Carga x Recalque obtida a partir dos parâmetros definidos por Garcia (2015) apresenta dois trechos bem definidos, sendo o primeiro, entre o ponto 0 e o ponto correspondente à carga P_1 , governado pela rigidez do conjunto radier estaqueado (K_{pr}), sendo esta igual a 113,36. O segundo trecho é definido pela rigidez do radier (K_r) cujo valor é de 13,24.

O critério de ruptura estabelecido foi de 10% do diâmetro nominal das estacas, ou seja, 25mm. Pelo método simplificado este valor é atingido para um carregamento de aproximadamente 980 kN. Já a carga última resistente do radier estaqueado é de 1331,46 e produz um recalque de 51,45 mm. A Figura 22 apresenta os resultados obtidos.

Figura 22 – Modelo Trilinear e Experimental



Fonte: Elaborado pela autora

Observa-se que, na análise experimental, a ruptura ocorreu com um carregamento inferior ao previsto pelo método simplificado, mas nos estágios iniciais de carregamento, até cerca de 500 kN, o comportamento foi condizente com o esperado.

5. CONCLUSÕES

O objetivo proposto para o trabalho em questão era verificar a resposta de um método simplificado de cálculo frente a métodos detalhados e prova de carga. O método PDR constitui uma análise preliminar, realizada na etapa de anteprojeto a fim de estimar a viabilidade da fundação pretendida. Posto isto, conclui-se que o método apresentou resposta satisfatória, quando utilizados parâmetros que representem verdadeiramente a condição do solo, radier e estacas, como ocorreu na análise envolvendo prova de carga. Contudo, por se tratar de um método simplificado, não é o mais adequado para fins de dimensionamento uma vez que apresentou valores mais altos para a resistência do grupo de estacas do que os valores observados experimentalmente.

Nas análises envolvendo simulações numéricas a resposta do método não apresentou uma correspondência adequada aos resultados esperados, principalmente nas composições com estacas menores, podendo-se atribuir as causas à diversos fatores, como por exemplo, à resistência e características do solo estudado, que apresenta grande variação nos parâmetros. Neste caso, seria necessário realizar um estudo mais específico no local onde seria implementada a estrutura, para então poder inferir se o método PDR apresenta ou não comportamento similar ao esperado. Outro fator relevante para uma boa resposta do método PDR está relacionada aos parâmetros de entrada dos cálculos, os quais foram obtidos através de outros métodos, como o de Janbu, que podem não ser os mais adequados para os solos e/ou fundação analisados, necessitando, talvez, de uma calibração melhor para aplicação no trabalho proposto.

Por fim, conclui-se que os objetivos principais e específicos do trabalho foram atingidos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akinmusuru, J. O. (1973). *The Influence of a Pile Cap on Bearing Capacity of Piles in Sand*. Dissertação de Mestrado, University of Zaria - Nigéria.
- Albuquerque, P. J., & Garcia, J. R. (2020). *Engenharia de Fundações*. Rio de Janeiro: LTC.
- Alonso, U. R. (2019). *Exercícios de fundações* (3ª ed.). São Paulo: Blucher.
- Alonso, U. R. (2019). *Previsão e controle das fundações: uma introdução ao controle da qualidade em fundações* (3ª ed.). São Paulo: Blucher.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2019). *ABNT NBR 6122 - Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Bezerra, J. E. (2003). *Estudo do Comportamento de Fundações em Radier Estaqueado: Conceitos e Aplicações*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília.
- Bittencourt, D. M. (2012). *Construção de Uma Ferramenta Numérica para Análise de Radiers Estaqueados*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- Bittencourt, E. d. (2018). *Comportamento de Radiers Estaqueados Assentes em Solos Arenosos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Botelho, M. H. (2015). *Princípios da Mecânica dos Solos e Fundações para a Construção Civil*. São Paulo : Blucher.
- Butterfield, R., & Banerjee, P. K. (1971). The Problem of Pile Group - Pile Cap Interaction. *Geotechnique*, 135-142.
- Cândido, E. S. (fevereiro de 2016). *Análise inversa do ensaio pressiométrico utilizando o modelo hiperbólico*. Viçosa, Minas Gerais, Brasil: Universidade Federal de Viçosa.
- Carvalho, S. L. (2015). *Metodologia Híbrida Aplicada em uma Ferramenta Numérica para Análise de Radier Estaqueado*. Dissertação de Pós-Graduação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- Cintra, J. A., Aoki, N., Tsuha, C. d., & Giacheti, H. L. (2014). *Fundações: Ensaios Estáticos e Dinâmicos*. Oficina de Textos.
- Cintra, J. C., & Albiero, J. H. (1984). *Capacidade de carga e recalques de fundações diretas*. Universidade de São Paulo, Departamento de Geotecnia, São Carlos.

- Clancy, P., & Randolph, M. F. (1992). *Analysis and Design of Piled Raft Foundations*. University of Western Australia, Perth.
- Cunha, P. D. (2016). *Capacidade de Carga em Estacas de Fundação: Comparação entre Métodos de Dimensionamento e Resultados de Provas de Carga*. Projeto de Pesquisa do Trabalho de Diplomação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Civil, Porto Alegre.
- Danziger, B. R., & Lopes, F. d. (2021). *Fundações em Estacas*. Rio de Janeiro: LTC.
- Décourt, L. (1994). Uma aplicação prática da teoria radier estaqueado: a estaca-T. *10º CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES*. Foz do Iguaçu.
- Décourt, L., & Quaresma, A. R. (1978). Capacidade de carga de estacas a partir de valores SPT. *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*. Rio de Janeiro.
- Duarte, L. N. (2011). *Avaliação do Comportamento Solo-Estrutura de Elementos de Fundação Tipo Sapata Estaqueada*. Tese de Pós-Graduação, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Ferreira, B. B. (2012). *Avaliação de Fundações Mistas Através de Modelos Físicos de Laboratório em Escala Reduzida*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, Campos dos Goytacazes.
- Floriano, C. (2016). *Mecânica dos Solos*. Porto Alegre: SAGAH.
- Garcia, J. R. (2015). Análise experimental e numérica de radiers estaqueados executados em solo da região de Campinas/SP. Campinas, São Paulo, Brasil: Unicamp.
- Guimarães, D., & Peter, E. A. (2018). *Fundações*. Porto Alegre: SAGAH.
- Hachich, W., Falconi, F. F., Saes, J. L., Frota, R. G., Carvalho, C. S., & Niyama, S. (1998). *Fundações: teoria e prática*. São Paulo: Pini.
- Kishida, H., & Meyerhof, G. G. (1965). *Bearing capacity of piles groups under eccentric loads in*. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Halifax, Canadá.
- Knappett, J. A., & Craig, R. F. (2018). *Craig Mecânica dos Solos*. Rio de Janeiro: LTC.
- Lima, B. S. (2007). *Otimização de Fundações Estaqueadas*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília.

- Liu, J. L., Yuan, Z. L., & Zhang, K. P. (1985). Cap-Pile-Soil Interaction of Bored Pile Groups. *ISSMGE*, 1433-1436.
- Mello, V. F. (fev/mar de 1975). Deformações como base fundamental de escolha da fundação. *Geotecnia*, pp. 55-75.
- Meyerhof, G. G. (1959). Compaction of Sands and Bearing Capacity of Piles. *Journal of Geot. Eng. Div.*, 1-29.
- Miranda, G. S. (2019). *Otimização do Projeto de Fundações para Melhoramento do Desempenho de Construções Populares*. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Nazário, G. F., Silva, V. C., & Bertequini, A. B. (2019). Análise teórica sobre a fundação tipo radier. *Revista Engenharia em Ação UniToledo*, 35-51.
- Neto, L. R. (2005). *Interpretação de Deformação e Recalque na Fase de Montagem de Estrutura de Concreto com Fundação em Estaca Cravada*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.
- Neto, O. d. (2013). *Avaliação Experimental e Numérica de Radiers Estaqueados com Estacas Defeituosas em Solo Tropical do Brasil*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília.
- Phung, D. L. (1993). *Footings with settlement-reducing piles in non-cohesive soil*. Ph. D. Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- Pinto, V. Q. (Novembro de 2019). *Comportamento Geotécnico de Estéril de Bauxita e seu Potencial uso como Estrato de Fundação*. Brasília, Distrito Federal, Brasil.
- Poulos, H. G. (1968). Analysis of the settlement of Pile Group. *Géotechnique*, 449-471.
- Poulos, H. G. (1968). The influence of a rigid pile cap on the settlement behaviour of an axially loaded. *Trans Inst. Civil Engrs Aust Vol. C. E.*
- Poulos, H. G. (1993). Settlement Predictions for Bored Pile Groups. Em *Deep Foundations on Bored and Auger Piles* (pp. 103-117). Sydney, N.S.W., Australia: W.F. Van Impe.
- Poulos, H. G. (2001). Piled raft foundations: design and applications. *Géotechnique*, 95-113.
- Poulos, H. G. (2017). *Tall building foundation design*. Sydney, Australia: CRC Press.
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). *Pile Foudation Analysis and Design*. Rainbow-Bridge Book Co.

- Randolph, M. F. (1994). Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts . *XIII ICSMFE*, 61-82.
- Randolph, M. F., & Wrot, C. P. (1978). Analysis of Deformation of Vertically Loaded Pile Groups. *J. Geot. Eng. Div. ASCE*, *104*, 1465-1488.
- Randolph, M. F., & Wroth, C. P. (1979). Analysis of Deformation of Vertically Loaded Pile Groups. *Géotechniques*, *29*, 423-439.
- Sales, M. M. (2000). *Análises do Comportamento de Sapatas Estaqueadas*. Universidade Federal de Brasília, Brasília.
- Sanctis, L. d., & Mandolini, A. (2006). Bearing Capacity of Piled Rafts on Soft Clay Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* *132(12)*, 1600-1610.
- Santos, P. R., & Daibert, J. D. (2014). *Análise dos Solos*. São Paulo: Érica.
- Schmertmann, J. H. (1978). *Guidelines for Cone Penetration Test – Performance and Design*. Florida.
- Schneider, N. (08 de Abril de 2020). *Fundação Radier: o que é? Projeto e execução*. Acesso em 21 de Março de 2021, disponível em NELSOSCHNEIDER.com.br: <https://nelsoschneider.com.br/fundacao-radier/>
- Silva, J. P. (2021). *Previsão de Comportamento de Fundação em Radier Estaqueado Utilizando o Método dos Elementos Finitos e Análise de Prova de Carga: estudo de caso*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru.
- Skempton, A. W. (1953). Discussion contribution: piles and piles foundations, settlement of pile foundations. *Proc. 3th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation*. Zurich.
- Teixeira, A. H., & Godoy, N. S. (1996). Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas. Em W. Hachich, F. F. Falconi, J. L. Saes, R. G. Frota, C. S. Carvalho, & S. Niyama, *Fundações: Teoria e Prática* (pp. 227-264). São Paulo: Pini.
- Teixeira, A. H., & Godoy, N. S. (1998). *Análise, projeto e execução de fundações rasas. Fundações: teoria e Prática* (2ª ed.). São Paulo: PINI.
- Teixeira, R. S. (1996). *Resistência ao cisalhamento de um solo compactado não saturado*. Departamento de Geotecnia. São Carlos: EESC/USP.
- Terres, L. (21 de julho de 2020). *Estaca Raiz – Definição, Execução e Preço*. Acesso em 22 de maio de 2021, disponível em Carluc: <https://carluc.com.br/projeto-de-fundacao/estaca-raiz/>

- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. New York: John Wiley and Sons.
- Val, E. C. (1995). Design of a safe and economic piled footing foundation. 10 °
PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION.
Guadalajara.
- Velloso, D. d., & Lopes, F. d. (2010). *Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações rasas, fundações profundas*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Vesic, A. S. (1969). Experiments with instrumented pile groups in sand. Performance of deep foundations. *ASTM Special Tech. Publications. n. 444*, 177-222.
- Zeevaert, L. (1957). *Compensated friction-pile to reduce the settlement of the highly compressible*. Proceedings of the fourth International Conference on Soil, Mexico City.

**APÊNDICE A – PARÂMETROS DE CÁLCULO RADIER ESTAQUEADO –
ANÁLISE NUMÉRICA**

Radier Flexível

Dados do Radier					
γ_c (kN/m ³)	t(m)	L(m)	B(m)	Área (m ²)	Volume(m ³)
25	0,1	5,0	5,0	25,000	2,50
$\Delta\sigma$ (kPa)	Fck	Er(kPa)	ν_r	Krs	
2,5	25	28000000	0,15	0,015265	
Dados da Solicitação					
Qw(kN)	1250,00	Qra(kN)	62,5	Q(kN)	1312,50
Método Semi-empírico					
Nspt (médio)		Mello(1975)		Teixeira & Godoy (1998)	
6,1		σ_{adm} (kPa)	146,98	σ_{adm} (kPa)	122,00
Badotado(m)	5,0	σ_{adm} (média) (kPa)	134,49	$\sigma_{adotada}$ (kPa)	52,50

Estacas de 6m

Recalque de uma estaca isolada										
Concreto			Fuste		Ponta		Dados da Estaca			
fck(MPa)	Ep(MPa)	Ep(KPa)	k (Kpa)	Nspt	k (Kpa)	Nspt	L(m)	Qk(kN)	D(m)	
25	28000	28000000	300	7,5	300	5,33	6,00	1	0,3	
ν	η	GL(Kpa)	Gb(Kpa)	rm(m)	r0(m)	rb(m)	Ω	λ	ζ	n
0,15	3	6750	4797	8,360	0,150	0,150	1,407	4148,148	4,021	1,000
μ_L	ρ	w(mm)								
0,438	0,500	0,030455								

Recalque do grupo de estacas						Randolph (1984)	Método de Fleming			
Dados do grupo										
Si(m)	n° de estacas	rm(m)	Ω^*	ζ^*	μ_L	w(mm)	n	η	ξ	w(mm)
2,5	4	9,146	1,568	8,001	0,311	0,054692	4	0,5	2	0,061

Radier Estaqueado – Estacas de 6m

Distribuição das cargas entre o bloco e as estacas (valores admissíveis)						Dados da Solicitação		FS _R	FS _P
Q _p (kN)	n° de estacas	Q _{pg} (kN)	Q _r (kN)	Q (kN)	α _{pr}	Q(kN)	1312,50	3,0	2,0
234	4	936	3362,27	1312,497	0,713	Q_{pr adm} (kN)		4298,27	

Cálculo da capacidade de carga (valores de ruptura)							
Ag(m ²)	A(m ²)	d (m)	s(m)	α _{uR}	Q _{ur} (kN)	Q _{up} (kN)	Q _{upr} (kN)
6,25	25,00	0,3	2,5	0,91000	10086,82	1872	11051,00

Verificação do Fator de Segurança						
FS _R	FS _P	0,82 (FS _R +FS _P)	FS _{PR}	(FS _R +FS _P)	Q _{pr} (kN)	FS _{PR} (trab)
7,685	1,42629	7,471	8,4198313	9,1115	1312,50	8,420

Cálculo dos Coeficientes de Rigidez e da Carga de Mobilização Total das Estacas								
r ₀ (m)	r _c (m)	ζ	α _{rp}	K _r	K _p	K _{pr}	X	Q ₁ (kN)
0,15	1,25	4,020549237	0,47	172,55	73,136811	174,5966369	0,5544009	4201,0856

Estacas de 9m

Recalque de uma estaca isolada										
Concreto			Fuste		Ponta		Dados da Estaca			
f _{ck} (MPa)	E _p (MPa)	E _p (KPa)	k (Kpa)	N _{spt}	k (Kpa)	N _{spt}	L(m)	Q _k (kN)	D(m)	
25	28000	28000000	300	6,57	300	5,0	9,00	1	0,3	
v	η	GL(Kpa)	G _b (Kpa)	r _m (m)	r ₀ (m)	r _b (m)	Ω	λ	ζ	n
0,15	3	5913	4500	11,859	0,150	0,150	1,314	4735,329	4,370	1,000
μ _L	ρ	w(mm)								
0,590	0,500	0,026986								

Recalque do grupo de estacas						Randolph (1984)	Método de Fleming			
Dados do grupo										
S _i (m)	n° de estacas	r _m (m)	Ω*	ζ*	μ _L	w(mm)	n	η	ξ	w(mm)
2,5	4	12,960	1,465	9,396	0,402	0,055	4	0,5	2	0,061

Radier Estaqueado – Estacas de 9m

Distribuição das cargas entre o bloco e as estacas (valores admissíveis)						Dados da Solicitação		FS _R	FS _P
Q _p (kN)	n° de estacas	Q _{pg} (kN)	Q _r (kN)	Q (kN)	α _{pr}	Q(kN)	1312,50	3,0	2,0
333	4	1332	3362,27	1312,50	1,015	Q_{pr adm} (kN)		4694,27	

Cálculo da capacidade de carga (valores de ruptura)							
Ag(m ²)	A(m ²)	d (m)	s(m)	α _{uR}	Q _{ur} (kN)	Q _{up} (kN)	Q _{upr} (kN)
6,25	25,0	0,3	2,5	0,91	10086,82	2664	11843

Verificação do Fator de Segurança						
FS _R	FS _P	0,82 (FS _R +FS _P)	FS _{PR}	(FS _R +FS _P)	Q _{pr} (kN)	FS _{PR} (trab)
7,685	2,02972	7,966	9,023	9,7149	1312,50	9,023

Cálculo dos Coeficientes de Rigidez e da Carga de Mobilização Total das Estacas								
r ₀ (m)	r _c (m)	ζ	α _{rp}	K _r	K _p	K _{pr}	X	Q ₁ (kN)
0,15	1,25	4,370175	0,514833	172,55	78,01	176,1784	0,517638	5522,822

Estacas de 12m

Recalque de uma estaca isolada										
Concreto			Fuste		Ponta		Dados da Estaca			
f _{ck} (MPa)	E _p (MPa)	E _p (KPa)	k (Kpa)	N _{spt}	k (Kpa)	N _{spt}	L(m)	Q _k (kN)	D(m)	
25	28000	28000000	300	6,1	300	5,0	12,0	1	0,3	
v	η	GL(Kpa)	G _b (Kpa)	r _m (m)	r ₀ (m)	r _b (m)	Ω	λ	ζ	n
0,15	3	5490	4500	14,895	0,150	0,150	1,220	5100,182	4,598	1,0
μ _L	ρ	w(mm)								
0,739	0,500	0,024513								

Recalque do grupo de estacas						Randolph (1984)	Método de Fleming			
Dados do grupo										
S _i (m)	n° de estacas	r _m (m)	Ω*	ζ*	μ _L	w(mm)	n	η	ξ	w(mm)
2,5	4	16,258	1,360	10,303	0,494	0,047361	4	0,5	2	0,049

Radier Estaqueado – Estacas de 12m

Distribuição das cargas entre o bloco e as estacas (valores admissíveis)						Dados da Solicitação		FS _R	FS _P
Q _p (kN)	n° de estacas	Q _{pg} (kN)	Q _r (kN)	Q (kN)	α _{pr}	Q(kN)	1312,50	3,0	2,0
412	4	1648	3362,3	1312,50	1,256	Q_{pr adm} (kN)		5010,27	

Cálculo da capacidade de carga (valores de ruptura)							
Ag(m ²)	A(m ²)	d (m)	s(m)	α _{uR}	Q _{ur} (kN)	Q _{up} (kN)	Q _{upr} (kN)
6,25	25,0	0,3	2,5	0,91	10087	3296	12475

Verificação do Fator de Segurança						
FS _R	FS _P	0,82 (FS _R +FS _P)	FS _{PR}	(FS _R +FS _P)	Q _{pr} (kN)	FS _{PR} (trab)
7,685	2,51124	8,361	9,505	10,1965	1312,50	9,505

Cálculo dos Coeficientes de Rigidez e da Carga de Mobilização Total das Estacas								
r ₀ (m)	r _c (m)	ζ	α _{rp}	K _r	K _p	K _{pr}	X	Q ₁ (kN)
0,15	1,25	4,5981	0,5389	172,55	84,46	174,66	0,4851	6401

Estacas de 15m

Recalque de uma estaca isolada										
Concreto			Fuste		Ponta		Dados da Estaca			
f _{ck} (MPa)	E _p (MPa)	E _p (KPa)	k (Kpa)	N _{spt}	k (Kpa)	N _{spt}	L(m)	Q _k (kN)	D(m)	
25	28000	28000000	300	5,85	300	11,33	15,00	1	0,3	
v	η	GL(Kpa)	G _b (Kpa)	r _m (m)	r ₀ (m)	r _b (m)	Ω	λ	ζ	n
0,15	3	5265	10197	10,043	0,150	0,150	0,516	5318,139	4,204	1,000
μ _L	ρ	w(mm)								
0,946	0,500	0,019582								

Recalque do grupo de estacas						Randolph (1984)	Método de Fleming			
Dados do grupo										
S _i (m)	n° de estacas	r _m (m)	Ω*	ζ*	μ _L	w(mm)	n	η	ξ	w(mm)
2,5	4	10,764	0,575	8,653	0,659	0,033	4	0,5	2	0,0392

Radier Estaqueado – Estacas de 15m

Distribuição das cargas entre o bloco e as estacas (valores admissíveis)						Dados da Solicitação		FS _R	FS _P
Q _p (kN)	n° de estacas	Q _{pg} (kN)	Q _r (kN)	Q (kN)	α _{pr}	Q(kN)	1312,50	3,0	2,0
534,5	4	2138	3362,27	1312,50	1,629	Q_{pr adm} (kN)		5500,27	

Cálculo da capacidade de carga (valores de ruptura)							
Ag(m ²)	A(m ²)	d (m)	s(m)	α _{uR}	Q _{ur} (kN)	Q _{up} (kN)	Q _{upr} (kN)
6,25	25,0	0,3	2,5	0,91	10086,82	4276	13455

Verificação do Fator de Segurança						
FS _R	FS _P	0,82 (FS _R +FS _P)	FS _{PR}	(FS _R +FS _P)	Q _{pr} (kN)	FS_{PR} (trab)
7,685	3,25791	8,973	10,251	10,9431	1312,50	10,251

Cálculo dos Coeficientes de Rigidez e da Carga de Mobilização Total das Estacas								
r ₀ (m)	r _c (m)	ζ	α _{rp}	K _r	K _p	K _{pr}	X	Q ₁ (kN)
0,15	1,25	4,204	0,4957	172,55	121,17	188,67	0,418	7347,1

**APÊNDICE B – PARÂMETROS DE CÁLCULO RADIER ESTAQUEADO –
ANÁLISE EXPERIMENTAL**

Radier

Dados do Radier					
γ_c (kN/m ³)	t(m)	L(m)	B(m)	Área (m ²)	Volume(m ³)
25	0,65	1,85	1,85	3,423	2,22
$\Delta\sigma$ (kPa)	Fck	Er(kPa)	ν_r	Krs	
16,25	25	28000000	0,2	380,28	
Dados da Solicitação					
Qw(kN)	644,38	Qra(kN)	55,62	Q(kN)	700,00
Método Semi-empírico					
Nspt (médio)	Mello(1975)			Teixeira & Godoy (1998)	
3,79	σ_{adm} (kPa)		94,68	σ_{adm} (kPa)	75,8
Badotado(m)	1,85	σ_{adm} (média) (kPa)	85,24	$\sigma_{adotada}$ (kPa)	204,53

Estacas

Recalque de uma estaca isolada										
Concreto			Fuste		Ponta		Dados da Estaca			
fck(MPa)	Ep(MPa)	Ep(KPa)	k (Kpa)	Nspt	k (Kpa)	Nspt	L(m)	Qk(kN)	D(m)	
25	28000	28000000	700	3,75	700	6,38	5,00	1	0,25	
ν	η	GL(Kpa)	Gb(Kpa)	rm(m)	r0(m)	rb(m)	Ω	λ	ζ	n
0,2	3,5	9187,5	15631	3,454	0,125	0,125	0,588	3047,619	3,319	1,000
μ_L	ρ	w(mm)								
0,562	0,500	0,020988								

Recalque do grupo de estacas						Randolph (1984)	Método de Fleming			
Dados do grupo										
Si(m)	n° de estacas	rm(m)	Ω^*	ζ^*	μ_L	w(mm)	n	η	ξ	w(mm)
1,25	4	3,875	0,700031	6,82831321	0,392	0,036	4	0,5	2	0,042

Radier Estaqueado

Distribuição das cargas entre o bloco e as estacas (valores admissíveis)						Dados da Solicitação		FS _R	FS _P
Q _p (kN)	n° de estacas	Q _{pg} (kN)	Q _r (kN)	Q (kN)	α _{pr}	Q(kN)	700,00	3,0	2,0
87	4	348	291,73	700,00	0,497	Q_{pr adm} (kN)		639,73	

Cálculo da capacidade de carga (valores de ruptura)							
Ag(m ²)	A(m ²)	d (m)	s(m)	α _{uR}	Q _{ur} (kN)	Q _{up} (kN)	Q _{upr} (kN)
1,5625	3,42	0,25	1,25	0,72608	875,2	696	1331,46

Verificação do Fator de Segurança						
FS _R	FS _P	0,82 (FS _R +FS _P)	FS _{PR}	(FS _R +FS _P)	Q _{pr} (kN)	FS_{PR} (trab)
1,250	0,99429	1,841	1,902	2,2446	700,00	1,902

Cálculo dos Coeficientes de Rigidez e da Carga de Mobilização Total das Estacas								
r ₀ (m)	r _c (m)	ζ	α _{rp}	K _r	K _p	K _{pr}	X	Q ₁ (kN)
0,125	0,625	3,319019	0,51508626	13,24	110,14	113,35564	0,05506105	736,556

**APÊNDICE C – VALORES DE CARGA E RECALQUE PARA O RADIER
ESTAQUEADO NUMÉRICO (MÉTODO SIMPLIFICADO)**

Q(kN)	6 metros		9 metros		12 metros		15 metros	
	K	w(mm)	K	w(mm)	K	w(mm)	K	w(mm)
0,00	0	0	0	0	0	0	0	0
500,00	174,60	2,86	176,18	2,84	174,66	2,86	188,67	2,65
1000,00	174,60	5,73	176,18	5,68	174,66	5,73	188,67	5,30
1500,00	174,60	8,59	176,18	8,51	174,66	8,59	188,67	7,95
2000,00	174,60	11,45	176,18	11,35	174,66	11,45	188,67	10,60
2500,00	174,60	14,32	176,18	14,19	174,66	14,31	188,67	13,25
3000,00	174,60	17,18	176,18	17,03	174,66	17,18	188,67	15,90
3500,00	174,60	20,05	176,18	19,87	174,66	20,04	188,67	18,55
4000,00	174,60	22,91	176,18	22,70	174,66	22,90	188,67	21,20
4500,00	172,55	25,79	176,18	25,54	174,66	25,76	188,67	23,85
5000,00	172,55	28,69	176,18	28,38	174,66	28,63	188,67	26,50
5500,00	172,55	31,59	176,18	28,38	174,66	31,49	188,67	29,15
6000,00	172,55	34,49	172,55	34,11	174,66	34,35	188,67	31,80
6500,00	172,55	37,38	172,55	37,01	172,55	37,22	188,67	34,45
7000,00	172,55	40,28	172,55	39,91	172,55	40,12	188,67	37,10
7500,00	172,55	43,18	172,55	42,81	172,55	43,02	172,55	39,83
8000,00	172,55	46,08	172,55	45,70	172,55	45,91	172,55	42,72
8500,00	172,55	48,98	172,55	48,60	172,55	48,81	172,55	45,62
9000,00	172,55	51,87	172,55	51,50	172,55	51,71	172,55	48,52
9500,00	172,55	54,77	172,55	54,40	172,55	54,61	172,55	51,42
10000,00	172,55	57,67	172,55	57,30	172,55	57,51	172,55	54,32
10500,00	172,55	60,57	172,55	60,19	172,55	60,40	172,55	57,21
11000,00	-	-	172,55	63,09	172,55	63,30	172,55	60,11
11500,00	-	-	172,55	65,99	172,55	66,20	172,55	63,01
12000,00	-	-	-	-	172,55	69,10	172,55	65,91
12500,00	-	-	-	-	-	-	172,55	68,80
13000,00	-	-	-	-	-	-	172,55	71,70
13500,00	-	-	-	-	-	-	-	-

**APÊNDICE D – VALORES DE CARGA E RECALQUE PARA O RADIER
ESTAQUEADO EXPERIMENTAL (MÉTODO SIMPLIFICADO)**

Q(kN)	K	w(mm)
0,00	0,00	0,00
60,00	113,36	0,53
120,00	113,36	1,06
180,00	113,36	1,59
245,00	113,36	2,16
310,00	113,36	2,73
375,00	113,36	3,31
440,00	113,36	3,88
501,43	113,36	4,42
565,00	113,36	4,98
628,57	113,36	5,55
692,14	113,36	6,11
736,56	113,36	6,50
820,00	13,24	12,80
880,00	13,24	17,34
950,00	13,24	22,62
1010,00	13,24	27,16
1073,57	13,24	31,96
1137,14	13,24	36,76
1200,71	13,24	41,57
1264,29	13,24	46,37
1331,46	13,24	51,45
1331,46	13,24	56,59
1331,46	13,24	62,25
1331,46	13,24	68,48
1331,46	13,24	75,32
1331,46	13,24	82,86