

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS JATAÍ
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

JEAN LUCAS SOUZA DE OLIVEIRA

**PREVISÃO NUMÉRICA DOS RECALQUES EM FUNDAÇÕES
ESTAQUEADAS DE UM EDIFÍCIO LOCALIZADO NA CIDADE DE JATAÍ-
GO.**

JATAÍ
2018

JEAN LUCAS SOUZA DE OLIVEIRA

**PREVISÃO NUMÉRICA DOS RECALQUES EM FUNDAÇÕES
ESTAQUEADAS DE UM EDIFÍCIO LOCALIZADO NA CIDADE DE JATAÍ-
GO.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Bacharelado em Engenharia Civil do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí,
como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador(a): Ma. Tallyta da Silva
Curado.

JATAÍ
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

OLI/pre	Oliveira, Jean Lucas Souza de. Previsão numérica dos recalques em fundações estakeadas de um edifício localizado na cidade de Jataí-GO/ Jean Lucas Souza de Oliveira. -- Jataí: IFG, Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, 2018. 80; il. Orientadora: Prof^a. Ma. Tallyta da Silva Curado. Bibliografias. Apêndices. 1. Previsão de recalques. 2. Radier estakeado. 3. Recalque de fundações. 4. GARP. I. Curado, Tallyta da Silva Curado. II. IFG, Câmpus Jataí. III. Título. CDD 624.15
---------	--

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Téc.: Aquisição e Tratamento da Informação.
Bibliotecária ã Rosy Cristina Oliveira Barbosa ã CRB 1/2380 ã Câmpus Jataí. Cód. F025/18.

JEAN LUCAS SOUZA DE OLIVEIRA

**PREVISÃO NUMÉRICA DOS RECALQUES EM FUNDAÇÕES
ESTAQUEADAS DE UM EDIFÍCIO LOCALIZADO NA CIDADE DE JATAÍ-GO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás –
Câmpus Jataí, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado, em 19 de Fevereiro de 2018,
pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Tallyta da Silva Curado

Profa. Ma. Tallyta da Silva Curado
Presidente da banca / Orientador(a)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Caroline Duarte Alves Gentil

Profa. Dra. Caroline Duarte Alves Gentil
Membro interno

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Isabella Christine de P. Santos

Profa. Ma. Isabella Christine de Paula Santos
Membro externo

Universidade de Rio Verde

Prof. Dra. Mônica Maria Emerenciano Bueno
Suplente da Banca

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por sempre estar dirigindo os meus passos e ao senhor e salvador Jesus Cristo, pelas promessas que tem feito em minha vida

À professora Tallyta da Silva Curado, pela orientação, amizade, disponibilidade e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho.

À minha querida avó pelo apoio em todos os momentos da minha vida.

E, por fim, aos meus queridos amigos que adquiri durante a graduação, pelo companheirismo e momentos agradáveis.

RESUMO

Entre as classificações de tipos de fundações, existem na literatura as definições de fundações superficiais e profundas. Entretanto, nos últimos anos um novo conceito vem surgindo e ganhando cada vez mais atenção entre os projetistas estruturais, que é o conceito de fundação mista, onde há união de uma fundação superficial com uma profunda, sendo denominado o radier estaqueado. Neste tipo de fundação, parte dos esforços é distribuída pelo radier e outra pelas estacas. Foi feito um estudo de caso de um edifício residencial de 12 pavimentos localizado na cidade de Jataí, com as fundações projetadas do tipo estacas sobre blocos de coroamento. Para a análise de previsão de recalques, foi utilizado o software computacional GARP, que faz a previsão em fundações do tipo radier estaqueado. Na adoção desta metodologia, o sistema convencional de fundações foi substituído por um sistema equivalente de radier estaqueado. O principal objetivo deste trabalho foi mostrar que a previsão de recalques é uma possibilidade de aumentar a vida útil das edificações, pois sabendo numericamente quais recalques a edificação sofrerá ajudará a prevenir futuras manifestações patológicas. Os resultados obtidos pelo programa foram satisfatórios e evidenciaram que a utilização do software é uma forma de fazer previsões de recalques. Foram comparados os recalques encontrados pelo software com os calculados para o bloco de estacas, onde foi verificado que o bloco de estacas apresentou um recalque, em média, 100% maior que o do radier estaqueado. Também foi possível encontrar o valor da distorção angular da edificação que se apresentou dentro de limites aceitáveis para que não ocorressem problemas na edificação.

Palavras-chave: Previsão de Recalques. Radier Estaqueado. Recalque de Fundações. GARP.

ABSTRACT

Among the classifications of foundations types, there are in the literature definitions of superficial and deep foundations. However, in recent years a new concept has been emerging and gaining more and more attention among structural designers, that is the concept of mixed foundation, which there is union of a superficial foundation with a deep, being the raft with pile. In that type of foundation, part of the efforts is distributed by the raft and another by the piles. A case study was made of a residential building with 12 floors located in the city of Jataí, with designed foundations of the type piles on crowning blocks. For the analysis of predictions settlements, the computational software GARP was used, which predicts foundations of the type raft with pile. In adopting this methodology, the conventional foundations system was replaced by an equivalent raft with pile system. The main purpose of this paper is to show that the predictions settlements is a possibility to increase the useful life of the buildings because knowing numerically which settlements the buildings will be stressed it will help to prevent future pathological manifestations. The results obtained by the program were satisfactory and showed that the use of the software is a way of making predictions settlements. Settlements presented by the software were compared with those calculated for the block of piles, where it was verified that the block of piles presented a settlement on average 100% higher than that of the raft with pile. It was also possible to find the value of the angular distortion of the building that presented within acceptable limits to not problems occurred.

Keywords: Predictions Settlements. Raft with Pile. Foundation Settlement. GARP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Elementos constituintes de um solo.....	15
Figura 1.2 - Distribuição de tensões com a profundidade	20
Figura 1.3 - Bulbo de tensões	20
Figura 1.4 - Profundidade do bulbo de tensões	20
Figura 1.5 - Padronização da dimensão do peso e da altura a ser lançado	23
Figura 1.6 - Abertura do furo	23
Figura 1.7 - Cravação do amostrador no solo padronizadas em norma	23
Figura 1.8 - Equipamentos do cone	25
Figura 1.9 - Ensaio de palheta	25
Figura 1.10 - Equipamentos do ensaio pressiométrico.....	25
Figura 1.11 - (a) Bloco com estacas e (b) Radier estaqueado	28
Figura 1.12 - Efeito de uma estaca	29
Figura 1.13 - Efeito de um grupo de estacas	29
Figura 1.14 - Fatores de Interação apresentados por Hain e Lee	32
Figura 1.15 - Recalque diferencial	34
Figura 1.16 - Critérios de danos	35
Figura 1.17 - Integração em bulbos	36
Figura 1.18 - Trincas em muros extensos.....	38
Figura 1.19 - Fissuração em vigas de concreto armado solicitadas à flexão.....	38
Figura 1.20 - Fissuração em vigas de concreto armado solicitadas ao cisalhamento.....	38
Figura 1.21 - Fissuração acompanhando um pilar.....	40
Figura 1.22 - Fissuração devido à seção de corte e aterro	40
Figura 1.23 - Fissuração devido à interferência nos bulbos de construções vizinhas	40
Figura 1.24 - Fissuração devido a solos não homogêneos	41
Figura 1.25 - Fissuração devido a contração nos solos	41
Figura 2. 1 - Convenção do sentido dos momentos.....	50
Figura 2. 2 - Fluxograma de inserção de dados no GARP	51
Figura 2. 3 - Localização do estudo de caso.....	52
Figura 2. 4 - Localização do bloco no projeto de fundações	53
Figura 2. 5 - Propriedades do solo e do radier.....	55
Figura 2. 6 - Propriedades das estacas	56
Figura 2. 7- Aplicação dos momentos no GARP	57
Figura 3.1 - Carregamento das estacas (combinação 1)	59
Figura 3.2 - Carregamento das estacas (combinação 2)	60
Figura 3.3 - Carregamento das estacas (combinação 3)	60
Figura 3.4 - Distribuição de recalques.....	62
Figura 3.5 - Distribuição de recalques sem os momentos	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Quantidade de furos por projeção em m ² a construir	22
Tabela 1.2 - Resumo dos principais trabalhos correlatos apresentados	46
Tabela 2.1- Mudança de sentido dos momentos no programa.....	50
Tabela 2.2 - Dados do DEFPIG.....	54
Tabela 2.3 - Carregamentos.....	57
Tabela 3.1 - Esforço normal no projeto e nas estacas.....	61
Tabela 3.2 - Recalques.....	61
Tabela 3.3 - Recalque máximo e mínimo sem momento	63
Tabela 3.4 - Recalque das estacas isoladas.....	63
Tabela 3.5 - Recalque diferencial	64
Tabela 3.6 - Dados para o cálculo do recalque.....	65
Tabela 3.7 - Cálculo do recalque	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPT	Ensaio de Cone
CPTU	Ensaio de Cone-Piezocone
DIANA	<i>Displacement Analyser</i>
GARP	<i>General Analysis of Rafts with Piles</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MEC	Método dos Elementos de Contorno
MEF	Método dos Elementos Finitos
PMT	Ensaio Pressiométrico
SoFIA	<i>Soil-Foundation Interaction Analysis</i>
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Dimensão maior do bloco
A_c	Área do bloco
b	Dimensão menor do bloco
B	Comprimento total do carregamento
C_c	Índice de compressão
C_r	Índice de recompressão
D	Diâmetro da estaca
E	Módulo de elasticidade
E_s	Módulo de elasticidade do solo
e	Índice de vazios
e_1	Índice de vazios inicial
e_2	Índice de vazios final
G	Módulo cisalhante
h	Espessura da camada de solo
h_1	Altura inicial do solo
I	Fator de influência
I_s	Fator de forma.
K_0	Coeficiente de empuxo no repouso
K_c	Rigidez do bloco de coroamento.
K_f	Rigidez global entre estacas e o bloco
K_g	Rigidez de um grupo de estacas, obtida pela razão entre a carga total pelo recalque do grupo.
l	Distância entre dois elementos de fundação
m_v	Módulo de variação volumétrica
n	Número de estacas
N_{spt}	Índice de resistência à penetração
OCR	Razão de pré-adensamento
P	Carga na estaca
Q_i	Carga na estaca i .
Q_j	Carga na estaca j .
Q_k	Carga na estaca k .

R_s	Número de estacas
r_c	Raio efetivo do bloco associado a cada estaca
r_m	Raio de influência da estaca.
S_r	Grau de saturação
S_u	Resistência ao cisalhamento não drenada
u	Poropressão
V	Volume total do solo
V_s	Volume de sólidos
V_v	Volume de vazios
V_w	Volume de água
W	Peso total do solo
W_i	Recalque do grupo de estacas.
W_l	Recalque da estaca isolada sob carregamento unitário.
W_{lj}	Recalque da estaca isolada j sob carregamento unitário.
W_s	Peso dos sólidos
W_w	Peso da água
α	Fator de interação entre as fundações
α_{cp}	Fator de interação entre as estacas
α_{ij}	Fator de interação entre as estacas i e j.
α_{kj}	Fator de interação entre as estacas k e j.
Δ	Recalque diferencial
Δe	Variação de índices de vazios final e inicial
η	Porosidade
Φ'	Ângulo de atrito interno do solo
σ	Pressão total
σ'	Tensão efetiva
ρ	Recalque total
$\rho_{isolada}$	Recalque da estaca isolada
ρ_{grupo}	Recalque do grupo de estacas
ρ_i	Recalque imediato
ρ_p	Recalque por adensamento primário
ρ_s	Recalque por adensamento secundário

ν	Coeficiente de Poisson
ω	Umidade
γ	Peso específico das partículas do solo
γ^d	Peso específico seco
γ^s	Peso específico das partículas sólidas
γ_w	Peso específico da água

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
1.1 Geotecnia e principais propriedades dos solos.....	14
<i>1.1.1 Índices físicos</i>	<i>15</i>
<i>1.1.2 Tensões e deformações causadas por carregamentos verticais.....</i>	<i>17</i>
1.2 Investigações geotécnicas	21
1.3 Fundações	26
1.4 Interações entre as fundações	28
1.5 Recalques em fundações	32
1.6 Aspectos teóricos sobre patologias em edificações.....	37
1.7 Trabalhos correlatos.....	41
2 METODOLOGIA.....	49
2.1 O Programa GARP	49
2.2 Estudo de Caso	51
2.3 Considerações Para a Análise.....	53
2.4 Análises realizadas.....	58
3 ANÁLISE DOS RESULTADOS	59
3.1 Cargas nas estacas	59
3.2 Recalques nas estacas	60
3.3 Distorção angular.....	63
3.4 Cálculo do recalque (bloco de estacas).....	64
3.4 Comparação dos recalques	65
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
REFERÊNCIAS	69
APÊNDICES	73
ANEXOS	75

INTRODUÇÃO

Antes do início de qualquer obra, o comportamento do solo onde a construção será apoiada deve ser previsto, pois o mesmo é complexo devido às várias características que apresenta e pode se deformar com facilidade por possuir vazios em sua estrutura. Suas propriedades podem ser estimadas através de ensaios de campo, que permitem uma definição realista da estratigrafia do solo. Após um bom processo de investigação é possível projetar uma fundação que esteja de acordo com as características do local que será assente.

Ao longo do tempo, a vida útil das fundações pode ser comprometida por vários fatores, o que pode levar a manifestações patológicas na edificação. Manifestações que podem ter como origem em deficiências no projeto de fundações, na sua execução ou nos ensaios de reconhecimento dos solos, e trazer resultados na forma de trincas, esmagamento do concreto, recalque no solo e até a ruína. Como o solo é um material deformável, este está suscetível a se movimentar através de um fenômeno chamado de recalque, que ocorre quando uma carga é aplicada sobre o solo. A magnitude dos recalques pode impactar de forma negativa em toda a edificação se não houver um estudo preliminar.

Visando o que foi destacado, verifica-se a importância de se analisar como o solo se comporta quando uma carga é distribuída sobre ele, e este trabalho trata do problema de recalques em fundações. Prever recalques em fundações, sejam elas superficiais ou profundas, é justificável, pois permite verificar se esta movimentação pode impactar nas estruturas superiores e levar a manifestações patológicas. A execução de estudos de caso é uma possibilidade de prever estas eventualidades, pois nos permite analisar a ocorrência e prevenir a edificação deste problema.

O objetivo geral deste trabalho foi prever numericamente a ocorrência de recalques provocados por fundações estacadas no solo em uma edificação localizada na cidade de Jataí-GO. Mais especificamente, buscou-se analisar quais estacas estariam mais propensas a sofrerem recalques e o quanto esta movimentação poderia impactar no surgimento de manifestações patológicas.

A análise do estudo de caso foi feita através de dados coletados no projeto de fundações, onde verificou-se as cargas que chegam em cada estaca para prever quais destas estariam mais propensas a se movimentarem. A previsão foi realizada em estacas

associadas a um bloco de coroamento através da adoção de um software para a previsão dos recalques deste grupo de estacas.

O software utilizado para auxiliar no processo é o GARP, Geotechnical Analysis of Rath with Piles (Análise Geotécnica de Radier Estaqueado) (POULOS, 1994). O programa foi criado para prever recalques em fundações do tipo radier estaqueado, onde as estacas estão em contato com um radier. Portanto, para a adoção da metodologia do GARP nesta pesquisa, foi considerado o conjunto estaca e bloco como um radier estaqueado.

Neste trabalho calculou-se a distorção angular de parte da edificação através dos recalques produzidos, com o intuito de verificar se o recalque diferencial está dentro de limites aceitáveis para que não ocorram danos nas estruturas. Ainda se analisou as diferenças entre os recalques produzidos por um bloco de estacas e pela fundação equivalente de um radier estaqueado.

O capítulo 1 deste trabalho aborda como vem sendo apresentado por diferentes autores as temáticas de propriedades dos solos, investigações geotécnicas, fundações, interações entre as fundações, recalques e patologias. Isso, tendo a finalidade de interpretar e esclarecer os assuntos tratados na pesquisa.

No capítulo 2, é mostrado como a pesquisa foi desenvolvida, os dados necessários, as considerações feitas e são expostas as características do programa utilizado para a análise.

No capítulo 3, é descrita qual a análise alcançada pelo programa de previsão de recalques, a comparação do resultado apresentado pelo software com o recalque considerando cálculo de estacas sobre blocos. É mostrada, ainda, a distorção angular determinada pelos recalques no elemento da fundação estudado.

Finalmente são feitas as considerações finais que se chegou com o trabalho e a apresentação de sugestões para futuras pesquisas que abordem a temática.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar o que vem sendo tratado na literatura no que se refere a algumas propriedades e classificações dos solos que são importantes para evitar ou minimizar futuras movimentações na construção. É definido o conceito de geotecnia e a importância de seu estudo para a execução de qualquer obra. Os principais tipos de fundações e alguns métodos de execução são apresentados. A interação entre os elementos de fundação é explicada e a sua importância para a elaboração de um projeto de fundações. Algumas patologias encontradas em edificações. E por fim, é exposto como o tema proposto neste trabalho vem sendo abordado por outros autores.

1.1 Geotecnia e principais propriedades dos solos

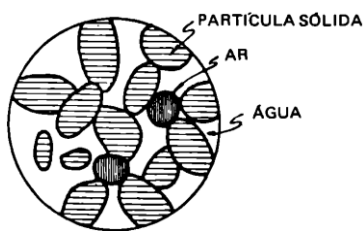
Geotecnia é a ciência da engenharia que considera o solo como um material que recebe ou que transmite esforços. Pode ser tratado como material de construção em barragens, túneis e muros de contenção ou como base de sustentação para estruturas em fundações e rodovias. Possui grande relevância na engenharia, pois assim como as estruturas de aço e em concreto armado, os solos também estão sujeitos a esforços que tendem a comprimi-lo ou cisalhá-lo e provocar deformações que podem levar à ruptura (ORTIGÃO, 2007). Portanto determinar o comportamento mecânico do maciço terroso é primordial para evitar futuros danos em construções.

A ciência da engenharia geotécnica compreende estudo do comportamento físico do solo quando ele é submetido a diversos tipos de tensões, através de ensaios de campo, identificações tátil-visuais, observações, análise e ensaios de laboratórios. O estudo possui a finalidade de identificar a origem de determinado solo, prever capacidades de carga, futuros recalques, verificar o formato dos grãos de determinado solo e determinar a capacidade de drenagem.

Os solos são originados da decomposição de rochas através de fenômenos físicos, químicos ou biológicos, que são representados principalmente pelo clima, água, vento e ação de organismos vivos. Os maciços terrosos se diferenciam pelo tamanho dos grãos e pela composição química da rocha mãe, o que varia de região para região (PINTO, 2006).

O solo é um material natural, heterogêneo e apresenta em sua composição um conjunto de partículas sólidas e espaços vazios que podem ser ocupados por água e/ou ar conforme a Figura 1.1 apresentada abaixo. A evaporação pode diminuir a quantidade de água no solo e a compressão provocar a redução dos vazios com a saída de ar e/ou água. Pelo fato de haver espaço entre as partículas, as mesmas podem se deslocar entre si, portanto ao se aplicar uma carga neste solo solto, este pode responder de tal forma que prejudique a construção que estiver assente sobre ele.

Figura 1.1 - Elementos constituintes de um solo



Fonte: Caputo (1988).

1.1.1 Índices físicos

Como afirma Hachich *et al.* (1998), os índices físicos são utilizados para representar a parcela de cada uma das três fases existentes no solo. O comportamento de um solo é determinado através das proporções encontradas no mesmo em um dado momento. Por exemplo, diz-se que um solo está em seu estado fofo quando há grande presença de ar em seus vazios e em estado compacto quando há eliminação de ar destes vazios.

Para relacionar com as informações apresentadas acima, alguns índices físicos são expressos a seguir (DAS, 2015):

- **Peso específico das partículas do solo (γ)**

É uma relação entre o peso total do solo (W) e seu volume total (V), incluindo presença de vazios (equação 1.1).

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1.1)$$

Pode-se utilizar a mesma relação apenas para as partículas sólidas, neste caso, é chamado de peso específico das partículas sólidas (γ_s).

- **Peso específico seco (γ_d)**

Razão entre peso dos sólidos (W_s) e volume total (V) de um solo quando apresenta umidade igual a zero (equação 1.2).

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (1.2)$$

- **Umidade (ω)**

É a relação entre o peso de água (W_w) e de sólidos (W_s) do solo. A umidade é dada em porcentagem (equação 1.3).

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \quad (1.3)$$

- **Porosidade (η)**

Determina a variação de porosidade no solo, podendo estar em um intervalo de 0 e 1. Quanto maior seu valor, mais poroso é o solo. É uma razão entre o volume de vazios (V_v) e o volume total (V) do solo (equação 1.4).

$$\eta = \frac{V_v}{V} \quad (1.4)$$

- **Grau de saturação (S_r)**

É a porcentagem de volume de água que está preenchendo os vazios do solo. Quanto mais o grau de saturação se aproxima de 100%, mais saturado o solo está. A razão entre o volume de água (V_w) e o volume de vazios (V_v) é apresentada pela equação 1.5.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (1.5)$$

- **Índice de vazios (e)**

Relação entre volume de vazios (V_v) e volume de partículas sólidas (V_s), conforme a equação 1.6.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1.6)$$

1.1.2 Tensões e deformações causadas por carregamentos verticais

Para Rebello (2008) o comportamento dos solos é compreendido através da consideração de que as forças são transmitidas diretamente pelo contato entre as partículas e também pela água que as envolvem. Pinto (2006) afirma que pelo fato do comportamento deste material depender do movimento das partículas sólidas, o fenômeno faz com que o solo se afaste do mecanismo dos sólidos idealizados na mecânica das estruturas.

A forma com que ocorre a transmissão de forças em um solo, depende do formato dos grãos e da maneira com que estes estão arranjados. Em um solo do tipo silteoso ou arenoso que possuem grãos maiores, a propagação de esforços ocorre pelo contato direto de elemento para elemento. Quanto mais finos forem os grãos de um solo, menor será o espaço entre os mesmos, podendo estar ocupados por água, a transferência de forças em um solos assim se dá em parte pelo contato entre as partículas e em parte pela própria água (PINTO, 2006).

Pelo fato do solo ser um material composto por partículas sólidas e vazios preenchidos por água e/ou ar, podemos definir tensões no solo como valores médios distribuídos pelas partículas e pelos vazios. A pressão total (σ) em um dado elemento de solo é calculada multiplicando-se a espessura da camada (h) acima deste elemento pelo peso específico deste (γ), conforme a equação 1.7. Se o elemento se encontrar abaixo do nível d'água, é considerado o peso específico saturado deste solo, que se refere ao peso específico do solo nesta condição de saturamento subtraída do peso específico da água (γ_w).

$$\sigma = \gamma * h \quad (1.7)$$

Em um solo saturado, onde seus vazios são totalmente preenchidos por água, há uma tensão atuante no fluido, que comprime as partículas sólidas e não altera o valor

das tensões no solo, pois há equilíbrio entre a pressão exercida na parte superior da partícula com a parte inferior e, por este motivo, a pressão na água é chamada de pressão neutra ou de sobrepressão hidrostática (REBELLO, 2008). A pressão neutra (u) é determinada sempre abaixo do nível d'água, e é calculada pela espessura da camada de solo saturado (h) multiplicado pelo peso específico da água (γ_w).

Todo comportamento do solo depende de uma combinação entre tensão total e pressão neutra. Ao analisar a transmissão das cargas no solo, o que nos interessa é apenas a tensão resistida pelas partículas sólidas. Terzaghi¹ (1943 apud PINTO, 2006) enunciou o chamado princípio das tensões efetivas que compões duas afirmativas:

- a) Todos os efeitos mensuráveis, decorrentes de uma variação de tensões, tais como, compressão, distorção e resistência ao cisalhamento são exclusivamente devidos à variação da tensão efetiva.
- b) Nos solos saturados, a tensão efetiva é definida pela expressão:

$$\sigma' = \sigma - u.$$

Para a solução de muitos problemas geotécnicos, tais como os relacionados à estabilidade de taludes, estudo de recalques, capacidade de carga nos solos, empuxos de terra e resistência de fundações, faz-se necessário o conhecimento da tensão total, neutra e efetiva existente no terreno em várias profundidades.

Tensão efetiva é aquela parcela de tensão que se refere apenas às forças transmitidas pelas partículas, logo ao se aplicar uma tensão sobre um solo saturado, a água tende a ser expulsa para regiões de menor pressão, tendo como consequência a variação de tensões efetivas e a aparição de espaços vazios que podem trazer o fenômeno de recalques. Quanto mais um solo permitir a passagem de água pelos vazios, ou seja, quanto maior a permeabilidade, maior é a velocidade com que essa água é expulsa (REBELLO, 2008).

Assim como as estruturas se deformam ao serem submetidas a um carregamento, o mesmo ocorre com os solos. Definimos que estes estão se deformando quando estão apresentando alterações nas partículas sólidas, deslizamento entre as partículas e eliminação de água ou de ar dos vazios do solo sob a ação de uma carga (DAS, 2015).

Quando essa deformação ocorrer devido a um carregamento vertical, chamamos de recalque. A deformação por recalque pode ocorrer rapidamente após a aplicação da carga em solos arenosos e em solos argilosos não saturados devido à alta porosidade destes, ou pode ocorrer de forma lenta após a aplicação de uma tensão em

¹ Terzaghi, K. *Theorectical Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1943.

² POULOS, H.G. *The Pile-Enhanced Raft na Economical Foundation System*. Keynote Lecture at XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Brasília, 1998.

depósitos de solos argilosos por ser necessária a eliminação de água dos vazios (PINTO, 2006).

Recalques representam um deslocamento vertical na camada de solo e ocorrem quando há variação de índice de vazios, podendo ser calculados pela expressão 1.8.

$$\rho = h_1 * \left[\frac{(e_1 - e_2)}{(1 + e_1)} \right] \quad (1.8)$$

Onde h_1 é a altura inicial em que o solo se encontrava, e_1 o índice de vazios inicial antes do fenômeno e e_2 o índice de vazios final (PINTO, 2006).

A ocorrência de adensamento em solos se deve à eliminação de água de seus vazios, fenômeno típico em solos argilosos saturados, que por possuírem baixa permeabilidade, retêm muita água. O recalque por adensamento ocorre lentamente em solos argilosos e imediatamente em solos arenosos permeáveis.

Assim que há aumento de tensão em um solo saturado, a poropressão da água é elevada também, o que faz com que a água tenda a desocupar os vazios do solo, conseqüentemente reduzindo o volume de sua massa e ocasionando recalque (DAS, 2015).

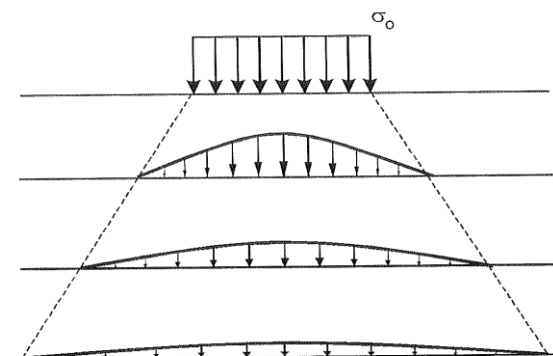
Para compreender como ocorre o efeito das cargas sobre um terreno e como este se deforma, algumas teorias foram criadas para entender o fenômeno. As mais conhecidas na mecânica dos solos, segundo Pinto (2006), são: a solução de Boussinesq, que considera determinar qual tensão chega a uma determinada profundidade a partir de uma carga pontual Q e a solução de Newmark que busca apontar como ocorre a distribuição de pressão em um ponto vertical abaixo de um vértice em uma área retangular carregada.

As fundações são bases de sustentação para qualquer construção que se apoie no solo, e ao se apoiarem, estas aumentam a tensão pré-existente do solo até certa profundidade que não se limita à projeção da área carregada na magnitude da carga que está sendo distribuída, conforme ilustrado na Figura 1.2.

As regiões no subsolo onde houve determinado acréscimo de tensões, devido ao carregamento aplicado na sua superfície, formam o que se denomina bulbo de tensões. Pinto (2006) considera que “existem tantos bulbos de tensões quantos níveis de acréscimo de tensão se queira considerar.”. A Figura 1.3 representa que as tensões se espalham segundo áreas crescentes e se mantêm uniformemente distribuídas.

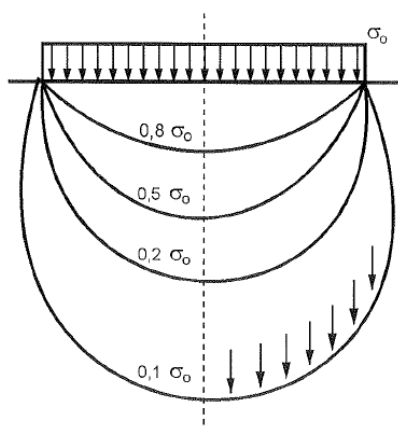
Ortigão (2007) ilustra na Figura 1.4 que bulbo de tensões atinge uma profundidade de 2 vezes o valor do diâmetro ou do comprimento total (B) do carregamento aplicado. O autor declara que quanto mais compressível for um solo, maior será a possibilidade de ocorrer recalques, portanto verificar as camadas em que o bulbo atingirá é importante para elaborar um projeto de fundações.

Figura 1.2 - Distribuição de tensões com a profundidade



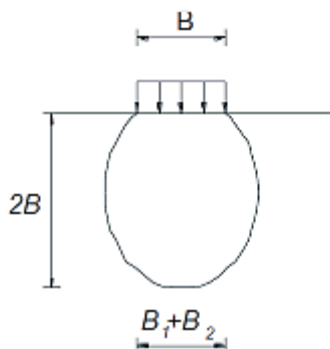
Fonte: Pinto (2006).

Figura 1.3 - Bulbo de tensões



Fonte: Pinto (2006).

Figura 1.4 - Profundidade do bulbo de tensões



Fonte: Ortigão (2007).

1.2 Investigações geotécnicas

A norma brasileira NBR 6122 (ABNT, 2010) especifica que antes do início de qualquer construção, deve ser executado o reconhecimento geotécnico do subsolo, no mínimo por sondagens a percussão do tipo SPT (*Standard Penetration Test*), onde será determinada a classificação do solo, o nível do lençol freático e o índice de resistência à penetração N_{spt} .

As sondagens podem ser executadas através de métodos diretos ou indiretos. Os métodos diretos são aqueles em que é possível observar o solo a partir de amostras obtidas em perfuração que são realizadas por meio de poços, trincheiras, sondagens manuais e à percussão. Nos métodos indiretos, as propriedades das camadas de solo são determinadas pela resistividade elétrica ou pela velocidade de propagação de ondas no meio, por exemplo, por meio de métodos geofísicos.

As técnicas empregadas na determinação da estratigrafia do solo consistem em cravar no terreno um equipamento que meça a resistência à penetração ou um equipamento equipado com sensores elétricos que podem medir grandezas de força e poropressão (ODEBRECHT e SCHNAID, 2012).

Os ensaios mais utilizados mundialmente são os ensaios SPT, cone, piezocone, pressiómetro palheta e dilatômetro. Podem-se determinar os seguintes parâmetros dependendo do tipo de ensaio: ângulo de atrito interno do solo (Φ'), resistência ao cisalhamento não drenada (S_u), módulo de variação volumétrica (m_v), módulo cisalhante (G), coeficiente de empuxo no repouso (K_0), módulo de elasticidade (E_s) (ODEBRECHT e SCHNAID, 2012).

Odebrecht e Schnaid (2012) afirmam que a escolha do tipo de sondagem a ser executada depende das práticas mais empregadas regionalmente, de equipe especializada com familiaridade com equipamentos, técnicas e procedimentos de ensaios e, deve ser compatível com as características do subsolo e às propriedades a serem medidas.

A norma brasileira NBR 8036 (ABNT, 1983) mostra a quantidade de furos de sondagens que devem ser executados conforme a área de projeção da planta indicados na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Quantidade de furos por projeção em m² a construir

Áreas	Sondagens/ número de furos
< 200 m ²	Duas sondagens.
Entre 200 e 400 m ²	Três sondagens.
< 1200 m ²	1 furo a cada 200 m ² .
Entre 1200 e 2400 m ²	1 furo a cada 400 m ² que excederem 1200 m ² .
> que 1200 m ²	De acordo com o plano da obra.

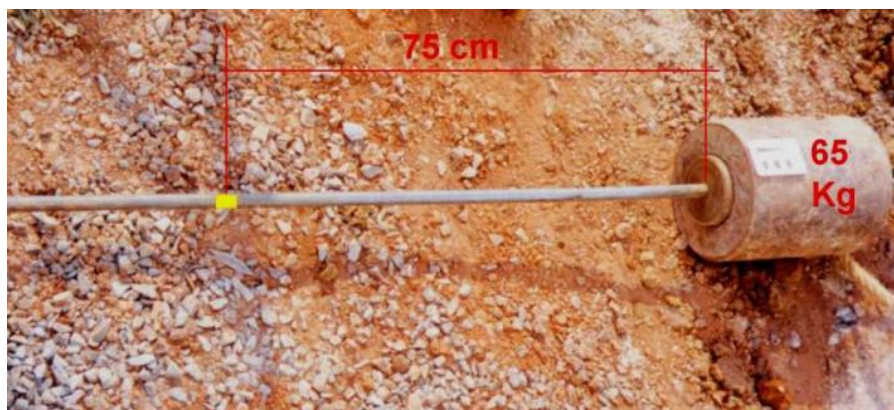
Fonte: Modificada de NBR 8036 (ABNT, 1983).

A NBR 9604 (ABNT, 1986) apresenta como deve ser a abertura de poços e trincheiras. Estas duas formas de investigação são executadas de forma manual e apresentam limitação quanto à presença do nível d'água, por isso são consideradas em edificações de menor porte e são pouco utilizadas.

Pelo fato de a investigação ser popular e econômica, a sondagem denominada SPT é a forma mais utilizada no Brasil e no mundo. Esta apresenta fácil execução, baixo custo, pode ser efetuada em solos relativamente compactos ou duros e em locais de difícil acesso, não há a necessidade de mão de obra muito especializada e identifica a profundidade do lençol freático. Esta prática apresenta como desvantagem a não determinação da resistência não drenada das argilas (REBELLO, 2008).

A NBR 6484 (ABNT, 2001) determina como deve ocorrer o ensaio de simples reconhecimento com SPT. O processo consiste na cravação no solo de um amostrador padrão a cada metro de profundidade. A cravação é feita com o auxílio de um peso de aproximadamente 65 kg lançado de uma altura de 75 cm (Figura 1.5). O furo de sondagem é escavado inicialmente a 1 metro, podendo ser escavado de forma manual com o auxílio de um trado helicoidal ou por circulação de água (Figura 1.6). O amostrador padrão é riscado em três trechos iguais de 15 cm com um giz, em seguida, é cravado no solo com auxílio do peso padrão (Figura 1.7). O ensaio visa determinar o N_{spt} , que é o índice de resistência à penetração no solo, obtido pela soma do número de golpes necessários para cravar o solo em seus 30 cm finais (o número de golpes dos primeiros 15 cm é descartado), quando o resultado se apresentar na forma de fração, por exemplo, 30/20 significa que foram necessários 30 golpes para cravar 20 cm do amostrador no solo. As amostras são colhidas e levadas para laboratório.

Figura 1.5 - Padronização da dimensão do peso e da altura a ser lançado



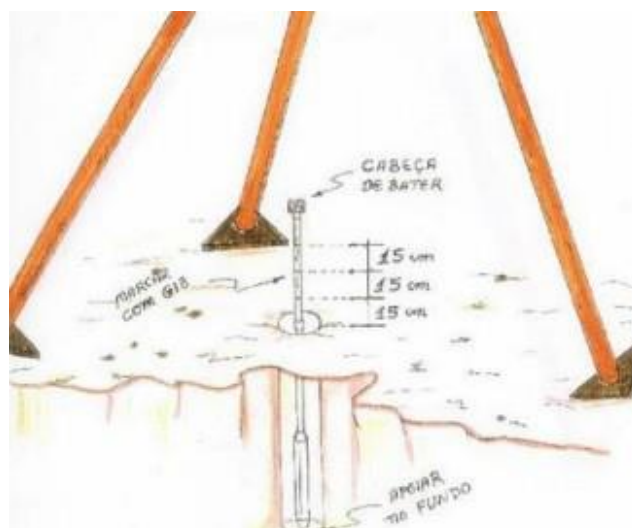
Fonte: Moura (2017).

Figura 1.6 - Abertura do furo



Fonte: Moura (2017).

Figura 1.7 - Cravação do amostrador no solo padronizadas em norma



Fonte: Moura (2017).

A mesma norma, NBR 6484 (ABNT, 2001), apresenta os critérios de parada do ensaio que são os seguintes: quando se obtiver 30 golpes para penetração dos 15 cm iniciais em 3 metros sucessivos, ou se obtiver 50 golpes para penetração dos 30 cm iniciais em 4 metros sucessivos, ou se obtiver 50 golpes para penetração dos 45 cm em 5 metros sucessivos. Quando o ensaio estiver sendo realizado com avanço por perfuração por circulação de água, ocorrerá a parada quando forem obtidos avanços inferiores a 50 mm em cada período de 10 minutos ou quando, após a realização de quatro ensaios consecutivos, não for alcançada a profundidade de execução do SPT.

Com o valor do N_{spt} é possível encontrar empiricamente o módulo de elasticidade através da expressão proposta por Magalhães (2005), onde se multiplica o N_{spt} por um valor empírico que pode variar entre 3 e 4, podendo-se considerar o valor de 3,5, que foi calibrado para as regiões de Goiânia e Brasília (equação 1.9). Pode-se determinar a melhor fundação para aquele tipo de solo, a previsão da capacidade de carga de fundações profundas e encontrar a tensão admissível do solo, em MPa, dividindo o valor de N_{spt} por um fator que depende do tipo de solo que a fundação estará assente. Bittencourt (2018) apresenta que se utiliza esse fator igual a 3 para pedregulhos, 4 para areias e siltes e 5 para argilas.

$$E_s = 3,5 * N_{spt} \quad (1.9)$$

Os ensaios de cone (CPT) e piezocone (CPTU) são utilizados, principalmente, em depósitos de solos argilosos, determinam a estratigrafia do solo e preveem capacidade de carga em fundações. O ensaio consiste em cravar uma ponteira cônica no solo como apresentada na Figura 1.8. Como afirmam Odebrecht e Schnaid (2012), os equipamentos podem ser classificados em três categorias: cone mecânico, cone elétrico e piezocone. Os cones do tipo mecânico e elétrico medem resistências de ponta e laterais do solo, enquanto que o piezocone, além destas medidas, mede também as pressões neutras geradas no processo de cravação (ODEBRECHT e SCHNAID, 2012).

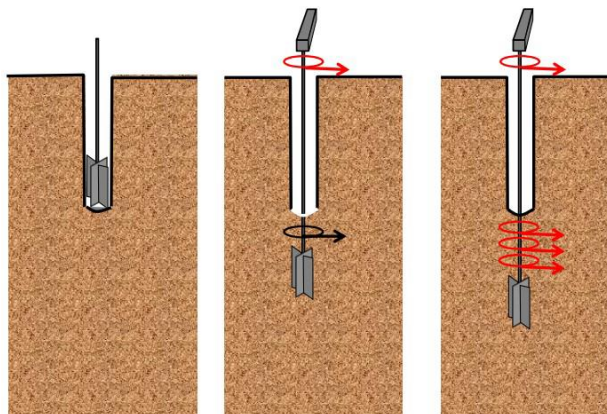
O ensaio de palheta é específico para determinação da resistência não drenada (S_u) em depósitos de argila mole, e o seu reconhecimento é determinado utilizando uma palheta como mostra a Figura 1.9. Ao entrar em contato com o solo, este é sujeito a um torque com a intenção de cisalhá-lo, com base no torque medido é determinada a resistência (S_u). Já o ensaio pressiométrico é executado introduzindo uma sonda dentro de um furo de sondagem, em seguida, essa sonda é expandida a pressões controladas por um manômetro (Figura 1.10), sendo o ensaio útil para determinar o comportamento tensão-deformação do solo (ODEBRECHT e SCHNAID, 2012).

Figura 1.8 - Equipamentos do cone



Fonte: Moura (2017).

Figura 1.9 - Ensaio de palheta



Fonte: Moura (2017).

Figura 1.10 - Equipamentos do ensaio pressiométrico



Fonte: Moura (2017).

Para determinar características como ângulo de atrito interno do solo (Φ'), módulo de elasticidade (E), coeficiente de empuxo no repouso (K_0), razão de pré-adensamento (OCR) é utilizado o ensaio dilatométrico, que consiste em introduzir uma lâmina no solo, medindo o esforço para penetração, em seguida, uma pressão de gás é usada para expandir a membrana circular de aço (ODEBRECHT e SCHNAID, 2012).

1.3 Fundações

Fundações são elementos estruturais responsáveis pela distribuição das cargas provenientes das estruturas no solo que pode ocorrer de forma direta, através da base de fundações superficiais e de tubulões, indiretamente, com predominância pelas laterais de fundações profundas, ou de ambas as formas, pelas fundações mistas.

A norma brasileira NBR 6122 (ABNT, 2010) define fundações superficiais como: “elemento de fundação em que a carga é transmitida ao terreno pelas tensões distribuídas sob a base da fundação, e a profundidade de assentamento em relação ao terreno adjacente à fundação é inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação”. São representadas pelas sapatas isoladas, associadas e corridas; radiers e blocos.

As sapatas podem ser classificadas como isoladas, quando estão recebendo a carga de um único pilar, associadas quando recebem mais de um pilar e corridas quando recebem um carregamento distribuído (REBELLO, 2008).

O radier isolado é uma laje armada que recebe as cargas de todos os pilares e paredes da obra ou carregamentos distribuídos e os transmite ao solo, são indicados quando o solo apresentar boa resistência. O uso desse tipo de fundação permite uniformizar possíveis recalques totais e diferenciais em toda a extensão da placa, é uma vantagem comparada às outras formas que concentram recalques em uma fundação isolada. Na execução deste tipo de fundação, primeiramente são montadas as formas, em seguida é instalada a armação na parte inferior e depois é feita a concretagem (CASTILLO, 2013).

São incluídas em fundações profundas as estacas e os tubulões. A norma brasileira NBR 6122 (ABNT, 2010) define fundações profundas como:

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, devendo sua ponta ou base estar assente em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo 3,0 m.

As estacas são fundações profundas em que por prescrição normativa, não deve haver descida de operário durante a execução, as cargas das estruturas são distribuídas predominantemente no solo por sua superfície lateral, também chamada de resistência de fuste. Este tipo de fundação pode ser do tipo moldada in loco, caracterizadas pelas estacas Broca, Strauss, Franki, Raiz e Hélice contínua, ou pré-moldada onde temos as estacas em concreto armado, metálicas e de madeira.

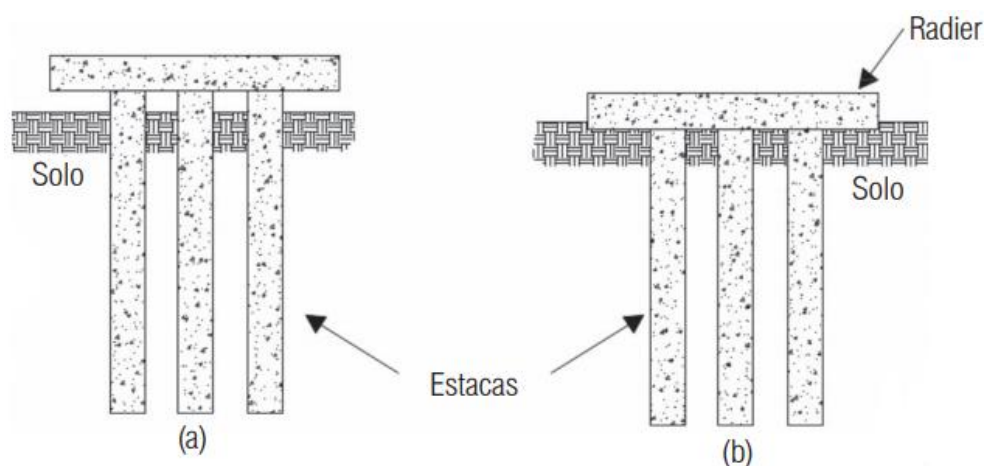
As estacas pré-moldadas são aquelas que não são produzidas na obra, já chegam prontas e precisam ser cravadas no terreno com o auxílio de um bate estaca, que é composto por um martelo que comprime a fundação no solo ocasionando muita vibração e ruído, por este motivo não são indicadas para centros urbanos. Possuem a vantagem de resistir a grandes esforços. Também são chamadas de estacas de deslocamento por deslocarem o solo para as laterais ao serem cravadas. São executados os blocos de coroamento para transferir os esforços do pilar para a estaca (YAZIGI, 2009).

Nos últimos anos tem surgido o conceito de fundação mista, que une uma fundação superficial e profunda, como exemplo, o radier estaqueado apresentado na Figura 1.11. Como os prédios estão cada vez mais altos e, conseqüentemente, com cargas mais elevadas, estão exigindo blocos cada vez maiores. Nestas situações, surgem os radiers estaqueados, uma solução mais econômica e mais viável estruturalmente. É definido como uma extensa laje que ocupa toda a área construída onde se apoiam estacas com distâncias previamente estabelecidas. Considera-se neste tipo de fundação que parte dos esforços da estrutura é distribuída pelo radier e parte pelas estacas, pois o radier está em contato direto com o solo. A vantagem de se utilizar estacas no radier é de que as mesmas entram como redutoras de recalque (SOUZA, 2010).

O radier estaqueado pode ser utilizado quando um radier isolado não satisfazer os critérios de projeto, a fundação mista entra em ação se tornando mais econômica, melhorando a capacidade de carga última da fundação, o recalque total, diferencial e reduzindo a espessura do radier, já que ele sozinho não será responsável por distribuir os esforços no solo (CASTILLO, 2013).

Poulos (1991) considera que o radier estaqueado é desfavorável em solos expansíveis, com presença de argila mole e areias fofas próximas à superfície. E se apresenta muito favorável em areias relativamente densas e argilas relativamente rígidas.

Figura 1.11 - (a) Bloco com estacas e (b) Radier estaqueado



Fonte: Garcia (2017).

Poulos² (1998 apud CASTILLO, 2013) considera que algumas verificações são necessárias para elaborar o projeto de um radier estaqueado: capacidade de carga última para cargas verticais, horizontais e momentos; recalque máximo; recalque diferencial; esforços no radier e nas estacas. O autor diz que o projeto deste tipo de fundação segue três fases: o estágio preliminar, segundo estágio e o estágio final. No estágio preliminar, é feita a verificação da viabilidade do radier estaqueado, no segundo estágio, será avaliado onde as estacas serão mais exigidas e o terceiro estágio, determina-se a localização das estacas, detalhamento do projeto, das estacas, dos recalques e dos esforços.

Algumas questões devem ser analisadas para a escolha do tipo de fundação: custo, tempo de execução, presença do nível d'água, tipo de solo, conhecimento das cargas atuantes, construções vizinhas e a topografia do terreno (HACHICH *et al.*, 1998). Todos estes tópicos devem ser avaliados para a escolha correta do tipo de fundação, sabendo que uma escolha inadequada pode levar a deficiências no projeto e comprometer toda a construção.

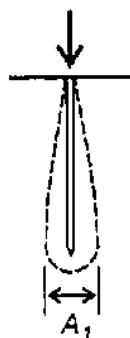
1.4 Interações entre as fundações

As fundações profundas correntemente trabalham em conjunto, por exemplo, as estacas são ligadas através de um bloco de coroamento que transfere os esforços do pilar para a fundação. O efeito de grupo, como definem Velloso e Lopes (2004) é o

² POULOS, H.G. *The Pile-Enhanced Raft na Economical Foundation System*. Keynote Lecture at XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Brasília, 1998.

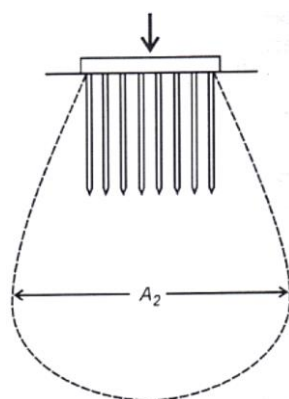
efeito que um grupo de estacas ou de tubulões provocam ao distribuírem as cargas no solo, por exemplo, o efeito que uma estaca provoca é diferente do efeito de um grupo conforme ilustrado nas Figuras 1.12 e 1.13.

Figura 1.12 - Efeito de uma estaca



Fonte: Ortigão (2007).

Figura 1.13 - Efeito de um grupo de estacas



Fonte: Ortigão (2007).

Velloso e Lopes (2014) afirmam que quando estacas estão distantes em um grupo, o recalque desta associação ocorre de forma relativamente uniforme e pode ser estimado através do recalque produzido por uma estaca isolada, multiplicando pela quantidade existente. Porém se o espaço entre essas fundações é pequeno, as estacas mais externas absorvem mais cargas que as internas, o que pode levar a um recalque desigual na edificação, assim, busca-se evitar este tipo de configuração de estacas em um projeto de fundações.

Os métodos elásticos utilizados para a previsão de recalques em um grupo de estacas relativamente espaçadas entre si são apresentados por Velloso e Lopes (2004). Estes métodos foram apresentados por: Poulos e Davis (1980) e Randolph (1983).

Poulos e Davis (1980) definem o recalque entre duas estacas iguais e igualmente carregadas pelo fator de interação α (equação 1.10).

$$\alpha = \frac{\text{recalque adicional provocado por uma estaca adjacente}}{\text{recalque de uma estaca sob sua própria carga}} \quad (1.10)$$

Velloso e Lopes (2014) apresentam a equação 1.11 para o cálculo do recalque desenvolvido por um grupo de estacas iguais:

$$W_i = W_1 * \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (Q_j * \alpha_{ij}) + Q_i \right] \quad (1.11)$$

Onde:

α_{ij} = fator de interação entre as estacas i e j.

Q_i = carga na estaca i.

Q_j = carga na estaca j.

W_i = recalque do grupo de estacas.

W_1 = recalque da estaca isolada sob carregamento unitário.

Os mesmos autores afirmam que para um grupo de estacas diferentes, o recalque da estaca k será dado pela equação 1.12.

$$W_k = \left[\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n (W_{1j} * Q_j * \alpha_{kj}) + W_{1k} * Q_k \right] \quad (1.12)$$

Onde:

α_{kj} = fator de interação entre as estacas k e j.

Q_j = carga na estaca j.

Q_k = carga na estaca k.

W_{1j} = recalque da estaca isolada j sob carregamento unitário.

A contribuição do bloco segundo Randolph (1983 apud³ VELLOSO E LOPES, 2004) consiste em um método que considera um radier estaqueado como a substituição do bloco de coroamento na redução do recalque em um grupo de estacas. O método considera uma interação entre as estacas e o bloco a partir da rigidez global (K_f) entre as estacas e o bloco (equação 1.13).

³ Randolph, M.F. (1983), *Design of piled raft foundation*, Research report – soils TR 163, Engineering Department, University of Cambridge.

$$K_f = \frac{K_g + K_c * (1 - 2 * \alpha_{cp})}{1 - \frac{\alpha_{cp}^2 * K_c}{K_g}} \quad (1.13)$$

Onde:

K_g = rigidez de um grupo de estacas, obtida pela razão entre a carga total pelo recalque do grupo.

K_c = rigidez do bloco de coroamento, obtida pela equação 1.14.

$$K_c = \frac{2 * G}{I_s * (1 - \nu)} * \sqrt{a * b} \quad (1.14)$$

Onde: G é o módulo cisalhante, ν é o coeficiente de Poisson, a e b são as dimensões do bloco, I_s é o fator de forma.

α_{cp} é o fator de interação entre as estacas, e pode ser determinado pela equação 1.15.

$$\alpha_{cp} = \frac{\ln(r_m * r_c)}{\ln\left(\frac{r_m}{r_c}\right)} \quad (1.15)$$

Onde: r_m = raio de influência da estaca. r_c = raio efetivo do bloco associado a cada estaca pela fórmula apresentada na equação 1.16. Nesta equação, A_c é a área de cada estaca e n a quantidade de estacas.

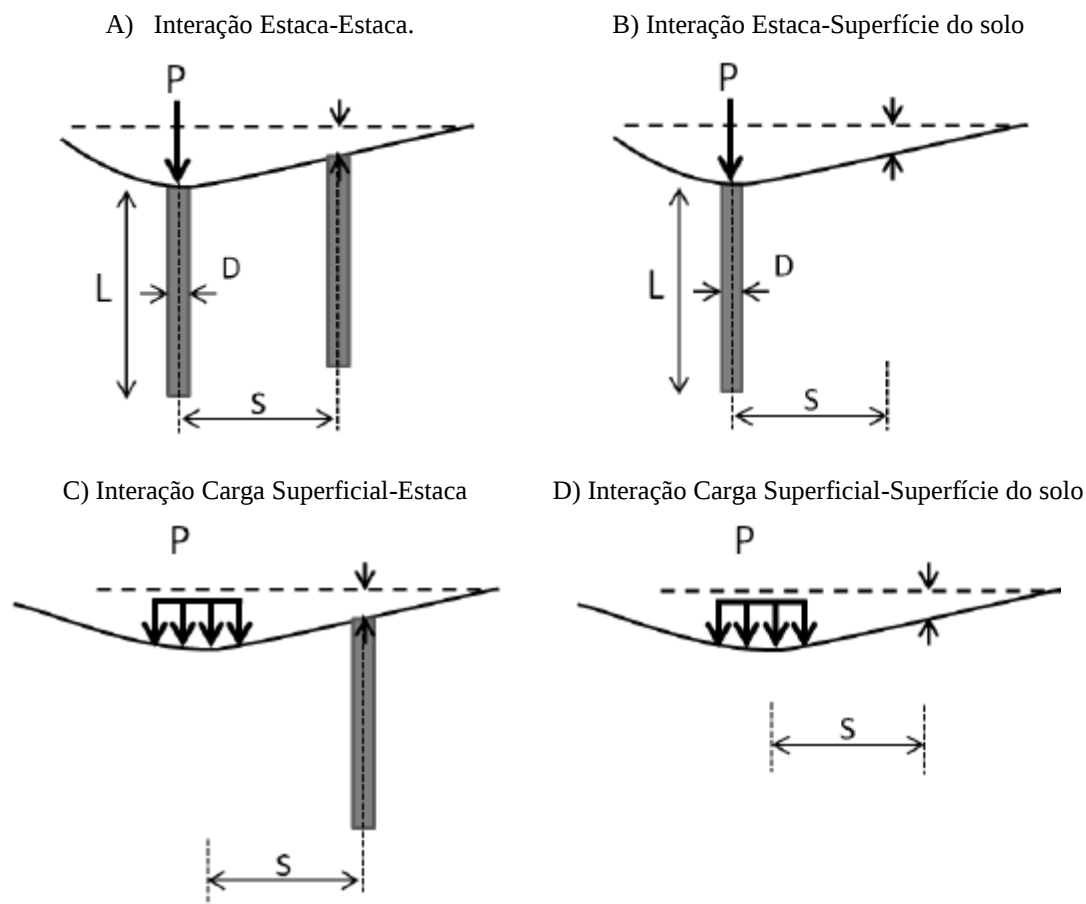
$$r_c = \sqrt{\frac{A_c}{n * \pi}} \quad (1.16)$$

No que se refere ao comportamento da interação entre um radier estaqueado, Hain e Lee⁴ (1978 apud SALES, 2000) apresentaram quatro tipos de interações entre as fundações ilustradas na Figura 1.14 e apontam:

- A inclusão de poucas estacas sob o radier, em geral, produz uma importante redução do recalque do conjunto.
- Quanto mais compressível for o grupo de estacas, menor será a carga absorvida por este grupo.
- Para uma dada fundação, maior será a carga absorvida pelo grupo de estacas quanto mais flexível for o radier.
- Quanto mais rígido o radier, maior o momento gerado e maior a desigualdade de cargas entre as estacas.

⁴ Hain, S.J. e Lee, I. K. (1978). *The analysis of flexible raft-pile systems*. **Geotechnique**. 28(1): 65-83.

Figura 1.14 - Fatores de Interação apresentados por Hain e Lee



Fonte: Modificado de HAIN e LEE (1978 *apud* SALES, 2000).

1.5 Recalques em fundações

Pode-se definir recalque como uma deformação sofrida no solo através de um deslocamento vertical descendente das fundações por eliminação de água ou ar dos vazios abaixo destas. É considerado como um dos maiores problemas que pode ocorrer em uma edificação e a deformação provocada pode causar a movimentação das fundações, acarretando danos nas superestruturas que podem iniciar como uma fissura e levar a construção ao colapso, em casos extremos de recalques excessivos.

Alonso (2003) apresenta os principais fatores que podem levar ao surgimento de recalques excessivos: “avaliação inadequada dos parâmetros do solo, investigação insuficiente, presença de solos colapsíveis ou expansíveis, existência de camadas compressíveis, rebaixamento de lençol freático, obras vizinhas alterando o estado de tensões e danos durante a execução da obra”.

Rebello (2008) afirma que os solos estão propícios a sofrerem três tipos de deformações: elásticas, por escoamento lateral e por adensamento. Estas se diferenciam em função da forma e intensidade das cargas aplicadas e do tipo de solo

A deformação elástica também chamada de recalque imediato (ρ_i) ocorre principalmente em solos não argilosos e se desenvolve em poucos segundos após a aplicação da carga (REBELLO, 2008).

A deformação por escoamento lateral também denominada de recalque por adensamento primário (ρ_p) se sucede, predominantemente, como ocorre na deformação elástica, em solos não argilosos. Apresenta como resultado a diminuição de volume e de índices de vazios pela eliminação de água e/ou ar dos vazios. Leva de meses a anos para ocorrer (REBELLO, 2008).

A deformação por adensamento secundário (ρ_s) se desenrola predominantemente em solos argilosos, que por possuírem pouco espaço entre os grãos, retêm muita água, aumentando assim o volume do solo. Portanto, quando se dá o desenvolvimento desta deformação, a água é eliminada dos vazios do solo pela pressão exercida pela fundação, é o tipo de deformação mais comum encontrada e pode levar anos para ocorrer (REBELLO, 2008).

Carvalho e Curado (2012) afirmam que a soma destas três deformações representam o recalque absoluto sofrido por um solo (equação 1.17).

$$\rho = \rho_i + \rho_p + \rho_s \quad (1.17)$$

Em um solo qualquer, seja argiloso ou arenoso, o recalque pode ser calculado através de sua variação de vazios inicial e final pela equação 1.18, onde H_0 é a altura inicial; Δe a variação do índice de vazios inicial e final; e e_0 o índice de vazios inicial do solo (PINTO, 2006).

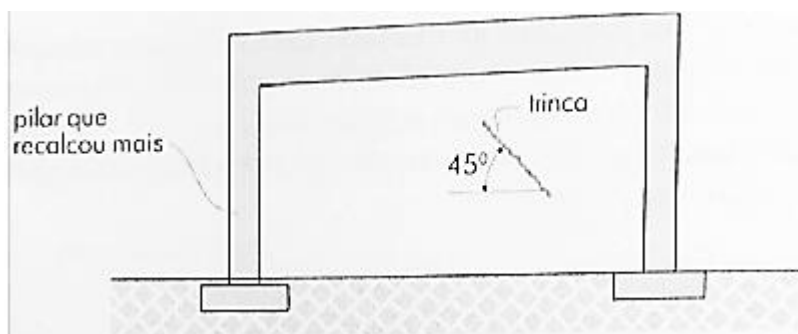
$$\rho = H_0 * \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (1.18)$$

Em solos sobreadensados, ou seja, solos que já estiveram sujeitos a tensões maiores anteriormente, o recalque pode ser calculado pela equação 1.19, onde C_r é o índice de recompressão do solo; C_c , o índice de compressão; σ'_p , a tensão de pré-adensamento que o solo esteve sujeito anteriormente; σ'_i , a tensão efetiva inicial e σ'_f , a tensão efetiva final (PINTO, 2006).

$$\rho = \frac{H}{1 + e_1} * \left(C_r * \log \frac{\sigma'_p}{\sigma'_i} + C_c * \log \frac{\sigma'_f}{\sigma'_p} \right) \quad (1.19)$$

Quando a fundação se desloca verticalmente, o fenômeno é denominado de recalque absoluto, e quando o recalque ocorre com intensidade diferente entre dois apoios, este é chamado de recalque diferencial ou distorção angular, como ilustrado na Figura 1.15. Este tipo de recalque provoca distorções angulares na estrutura. É a forma de recalque que mais impacta na formação de patologias, a primeira manifestação visível da ocorrência aparece com trincas inclinadas a 45 graus em alvenarias de vedação por serem mais frágeis que a estrutura (Figura 1.15).

Figura 1.15 - Recalque diferencial



Fonte: Rebello (2008).

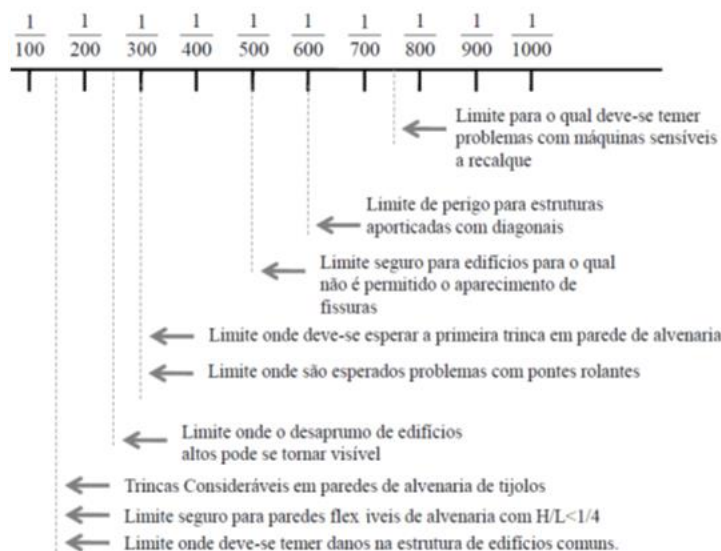
Alonso (2003) apresenta que a distorção angular (δ) pode ser calculada através da equação 1.20, onde Δ é o recalque diferencial e l a distância entre dois elementos. O recalque diferencial é calculado subtraindo o recalque encontrado entre duas extremidades e l seria a distância dos pontos em que apresentam esses recalques.

$$\delta = \frac{\Delta}{l} \quad (1.20)$$

Milititsky *et al.* (2008) consideram que para que haja um bom funcionamento de uma fundação e que esta traga segurança aos usuários é necessário que apresente um fator de segurança à ruptura e ao recalque que esteja de acordo com as cargas a serem suportadas.

Hachich *et al.* (1998) apresentam valores limites admissíveis para a distorção angular que apresentam boa segurança e bom desempenho à uma construção como mostrado na Figura 1.16. Estes valores representam o momento em que a fissura passa a ser visível em um caso de recalque diferencial. Entre os apresentados, os autores destacam os valores de 1/500 que é o limite para o qual não é permitido o aparecimento de fissuras.

Figura 1.16 - Critérios de danos



Fonte: Bjerrum⁵ (1963 apud HACHICH ET AL., 1998).

O recalque entre as estacas pode ser determinado considerando uma estaca isolada ou por um grupo. Ortigão (2007) considera que um conjunto de estacas produz um recalque maior no solo quando comparado com apenas uma.

Poulos e Davis (1980) demonstram em seu trabalho a partir da teoria da elasticidade como estimar o recalque produzido por uma estaca através da equação 1.21.

$$\rho = \frac{P * I}{E_s * D} \quad (1.21)$$

Onde: ρ é o recalque produzido por uma estaca, I o fator de influência obtido por gráficos, E_s é o módulo de elasticidade do solo presente ao longo da estaca e D o diâmetro da estaca.

Curado (2017) apresenta que para encontrar recalques produzidos por um conjunto de estacas, quatro formas são empregadas: método empírico, por fundações equivalentes, pela teoria da elasticidade e por métodos numéricos. Bittencourt (2017) destaca a equação 1.22 para o método empírico.

$$\rho_{\text{grupo}} = R_s * \rho_{\text{isolada}} \quad (1.22)$$

Onde: R_s é o número de estacas elevado à 0,5.

Entre os métodos de fundações equivalentes, o mais conhecido é o radier estaqueado, onde o recalque é calculado considerando o bloco de coroamento como um

⁵ Bjerrum, L. (1963) *Allowable settlement of structures. Proceedings European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Wiesbaden. Germany. Vol. III, pg. 13*5-137.*

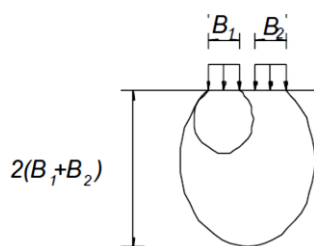
radier equivalente, é o caso mais indicado para grandes grupos de estacas e apresenta resultados bem próximos ao da fundação original (CURADO, 2017).

Os métodos de encontrar recalques através da teoria da elasticidade e por métodos numéricos envolvem soluções não muito práticas e são difíceis de serem aplicadas. A solução por métodos numéricos é a aplicação do Método dos Elementos Finitos, que consiste em simular o conjunto solo e fundação através de malhas tridimensionais por softwares computacionais.

Os recalques podem se apresentar mais uniformes ao longo de uma fundação ou concentrada em apenas uma região, isso dependerá da rigidez da fundação, fala-se que quanto mais rígido for o elemento de fundação, mais distribuído será o recalque. Denominamos pressões de contato como a pressão que age no contato de uma base da fundação com o solo. Em uma placa flexível apoiada no solo o recalque se apresenta em forma de sela em solos argilosos, sendo que o recalque maior se localiza no centro da placa. Em placas rígidas, a distribuição da pressão de contato depende do solo de apoio e os recalques se mostram mais uniformes em placa rígidas (HACHICH, *et al.*, 1998)

Ortigão (2007) afirma que ao elaborar um projeto de fundações, devem-se analisar as fundações de prédios vizinhos, pois nesses casos, há interação entre os bulbos destas. O bulbo resultante nestas situações pode levar a recalques, trazer graves problemas à edificação e será igual a $2(B_1 + B_2)$, onde B_1 e B_2 são os comprimentos do carregamento conforme exemplificado na Figura 1.17.

Figura 1.17 - Integração em bulbos



Fonte: Ortigão (2007).

Para Caputo (1988), prever os recalques que podem ocorrer no solo de uma edificação é importante, pois é possível avaliar o impacto que estes provocarão no andamento e na ocupação de uma obra. Tendo determinado os possíveis recalques, é possível ainda encontrar o tipo certo de fundação e, até mesmo, o sistema estrutural que será adotado. O autor ainda afirma que o que interessa na prática é determinar o recalque total que uma construção estará sujeita e como ocorre a evolução deste com o tempo.

1.6 Aspectos teóricos sobre patologias em edificações

O termo patologia se refere ao estudo de doenças, quando levamos ao contexto da engenharia estamos nos referindo ao estudo de sintomas, causas e origens de defeitos que ocorrem nas edificações, ou seja, é o estudo das partes que compõem o diagnóstico do problema.

Os defeitos que surgirem pode ter como origem em alguma das fases do processo de construção: do projeto ou da execução. As patologias podem aparecer logo após a ocupação de uma construção ou ocorrer após anos do fim da obra.

De acordo com o professor Kopschitz (2011), as patologias mais encontradas em edifícios são: descascamento de pinturas, mofo, corrosão de armaduras de concreto armado, deslocamento de pisos cerâmicos e azulejos, desgaste excessivo de pisos, apodrecimento de estruturas de madeira e trincas em paredes, pisos e fachadas.

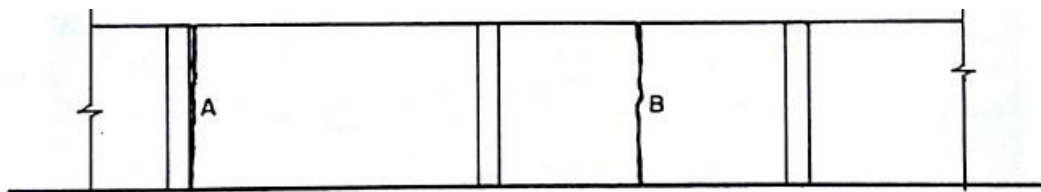
O mesmo autor afirma que as principais causas para o aparecimento de trincas em parede, pisos e fachadas são: procedimento inadequado na aplicação de argamassa, deformabilidade excessiva em estruturas de concreto armado, movimentações térmicas, atuação de sobrecargas, retração de produtos à base de cimento e recalque em fundações.

A maior parte das manifestações patológicas apresentam sintomas externos característicos em que é possível descrever e classificar a provável origem do problema a partir de minuciosas e experientes observações visuais. Os sintomas mais comuns em estruturas de concreto armado se referem às: fissuras, eflorescências e flechas excessivas (KOPSCHITZ, 2011).

Segundo Milititsky *et al.* (2008) quando a resistência de algum elemento construtivo for superada por alguma tensão externa, há a aparição de fissuras.

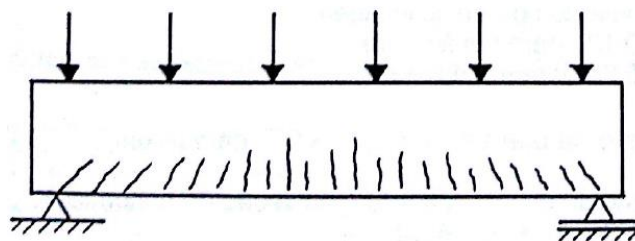
Algumas manifestações típicas apresentadas por Thomaz (1989) são apresentadas:

- Muros muito extensos apresentam fissuras conforme a Figura 1.18, isso ocorre devidas a movimentações térmicas dos próprios materiais de construção empregados, sendo essas fissuras, tipicamente verticais. Recomenda-se para estes casos, a criação de juntas de dilatação (THOMAZ, 1989).

Figura 1.18 - Trincas em muros extensos

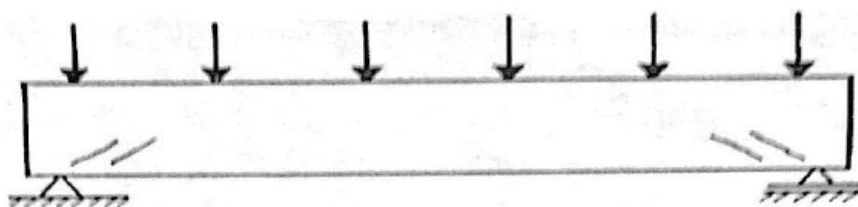
Fonte: Thomaz, (1989).

Fissuração em vigas de concreto armado solicitadas à flexão: ocorrem de forma vertical no meio do vão e tendem a ficar mais inclinadas próximas aos apoios conforme a Figura 1.19, o fenômeno ocorre devido à sobrecargas não previstas ou ao mal posicionamento das armaduras (THOMAZ, 1989).

Figura 1.19 - Fissuração em vigas de concreto armado solicitadas à flexão

Fonte: Thomaz, (1989).

Fissuração em vigas de concreto armado solicitadas ao cisalhamento: ocorrem de forma exclusivamente inclinadas próximas aos apoios conforme a Figura 1.20 e podem ter como diagnóstico, sobrecargas não previstas ou por estribos insuficientes ou mal posicionados (THOMAZ, 1989).

Figura 1.20 - Fissuração em vigas de concreto armado solicitadas ao cisalhamento

Fonte: Thomaz, (1989).

Fissuras inclinadas em paredes de alvenaria indicam que pode ter ocorrido recalque em fundações ou em apoios. Como diagnóstico para este tipo de patologia temos a ausência ou a má interpretação na investigação do solo, insuficiências em

projetos de fundações, erros executivos ou a própria degradação dos materiais envolvidos no apoio (MILITITSKY *et al.*, 2008).

As fundações são assentadas sobre o solo, portanto, determinar as características desse meio através de uma investigação geotécnica é essencial para evitar problemas futuros. Em muitas obras menores é comum que haja ausência na investigação por motivos econômicos, mas essa prática não é aceitável, segundo os autores Milititsky *et al.* (2008).

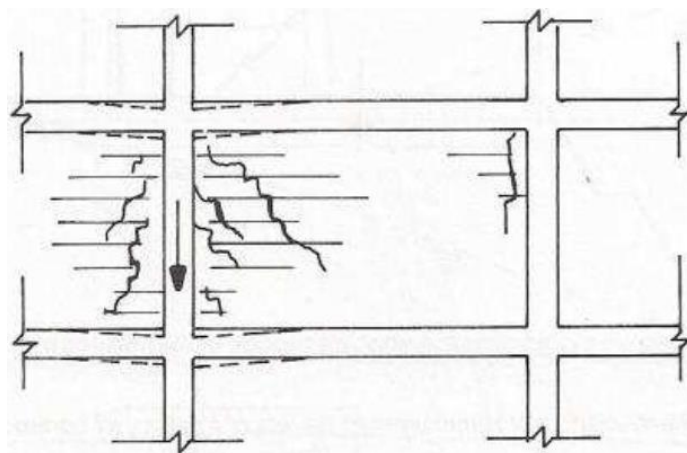
Tendo as informações das características do solo a partir dos relatórios de sondagem e das solicitações especificadas em projeto estrutural é a hora de elaborar o projeto de fundações. A desconsideração de cargas provenientes das superestruturas, como por exemplo, momentos fletores e esforços horizontais, podem levar ao rompimento da fundação (MILITITSKY *et al.*, 2008). O mesmo autor afirma que as maiores falhas nesta etapa construtiva estão relacionadas ao não entendimento do comportamento do solo, a má interpretação de projetos estruturais e o desconhecimento do comportamento de fundações.

A execução de fundações é uma das fases mais importantes do processo construtivo, em que falhas nesta etapa podem levar à ruptura das mesmas e ao processo de recalque nos solos. Os materiais que serão empregados precisam ser especificados de forma precisa e estarem em boas condições de uso no momento da construção, sendo necessário ainda o emprego de mão de obra especializada e a supervisão durante todo o procedimento (MILITITSKY *et al.*, 2008).

As fundações podem ser executadas em concreto armado (aço e concreto), madeira ou por perfis laminados. Se qualquer um desses materiais, porventura, estiver em contato com a água ou com o solo, é necessária a verificação de como se dará o seu armazenamento e se o mesmo terá durabilidade neste local. Portanto, é na fase da investigação geotécnica que será verificada a existência de algum material agressivo ou contaminante ao material da fundação (MILITITSKY *et al.*, 2008).

Pode ocorrer que apenas um pilar sofra recalque, portanto a fissura vai acompanhar este pilar como mostra a Figura 1.21.

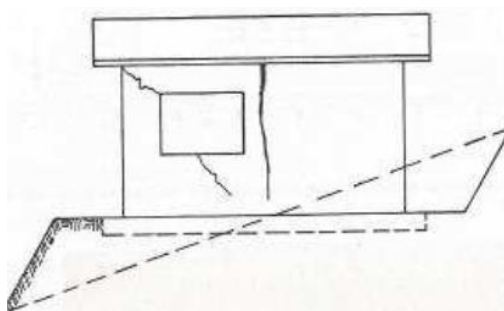
Figura 1.21 - Fissuração acompanhando um pilar



Fonte: Thomaz (1989).

Pode ocorrer quando fundações estão assentadas sobre seções de corte e aterro conforme a Figura 1.22.

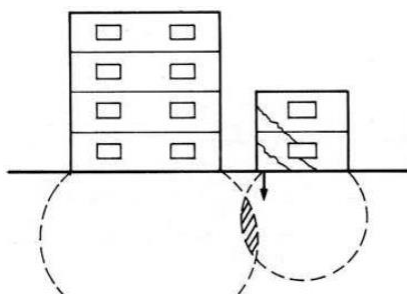
Figura 1.22 - Fissuração devido à seção de corte e aterro



Fonte: Thomaz (1989).

Quando há interferências nos bulbos de tensões devidas à construções vizinhas (Figura 1.23).

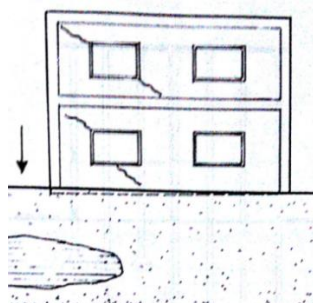
Figura 1.23 - Fissuração devido à interferência nos bulbos de construções vizinhas



Fonte: Thomaz (1989).

A Figura 1.24 apresenta o que ocorre quando uma fundação está assentada sobre um solo não homogêneo.

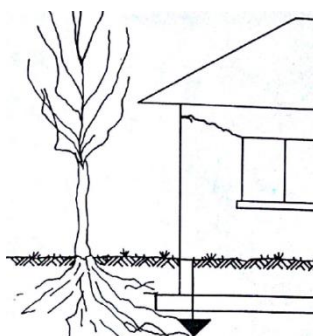
Figura 1.24 - Fissuração devido a solos não homogêneos



Fonte: Thomaz (1989).

Quando há contração no solo devido à retirada de água por uma vegetação (Figura 1.25).

Figura 1.25 - Fissuração devido a contração nos solos



Fonte: Thomaz (1989).

1.7 Trabalhos correlatos

Visando apresentar como a temática de previsão e ocorrência de recalques em um solo é tratada por diferentes autores e metodologias, alguns trabalhos são citados a seguir. Cada uma das pesquisas apresentadas trata o assunto com diferentes abordagens: concentração em estudo de caso, estudos teóricos, um determinado tipo de fundação, de solo ou de região, entre outras.

Melo (2003) se concentrou na geotecnia ambiental, onde em seu estudo, ele analisou a evolução, a magnitude e a velocidade de recalques em um aterro sanitário localizado em Recife-PE. Foram feitas previsões por meio de processos físicos e mecânicos decorrentes da degradação biológica em um aterro chamado Muribeca para 5 anos a partir do início da pesquisa. Verificou-se com a pesquisa que as condições

climáticas são favoráveis ao processo degradativo de matéria orgânica, o que faz acelerar os recalques nestes ambientes.

Com o emprego de ferramentas numéricas, Souza (2010) estudou como ocorre o efeito da interação entre as estacas. Para prever o comportamento, foram empregados dois softwares, o GARP e o DIANA (*Displacement Analyser*) onde os blocos de estacas foram calculados como radier estaqueado. O GARP analisa o radier através de Métodos de Elementos de Contorno (M.E.C.), enquanto que as estacas são analisadas por Métodos dos Elementos Finitos (M.E.F.), o programa considera a influência de estacas intermediárias na análise. O programa DIANA considera apenas M.E.F. como solução e por este motivo apresenta resultados mais exatos porque o método considera diversas propriedades do solo e das estruturas. O autor buscou em sua pesquisa comparar a eficácia dos dois softwares e para a previsão de recalques e avaliar formas de melhorá-los. No final da avaliação, foi concluído que em solos homogêneos, o DIANA prevê mais carga suportada pelo radier que o GARP. O autor observou que o fato de um solo ser heterogêneo interfere no processo de interação entre as estacas. Para a previsão de carga nas estacas, o resultado foi distinto da previsão de recalques e observou-se que a não limitação da distância máxima de interação entre estacas foi o que resultou em melhores previsões.

Das Chagas e López (2011) consideraram um estudo de caso em uma obra na cidade de Goiânia-GO, sobre um edifício em alvenaria estrutural assente em blocos sobre estacas. O programa computacional GARP, que faz análises de radiers estaqueados considerando a interação entre solo, estaca e radier, foi utilizado para determinar qual bloco de coroamento estaria mais crítico a sofrer recalque. Para o estudo, foram selecionadas algumas estacas para a análise, e no final da pesquisa foi possível ver quais blocos necessitariam de maiores cuidados durante a execução.

Barros (2012) avaliou o comportamento de estacas hélice contínua no que se refere à capacidade de carga, recalques, segurança e confiabilidade a partir de 58 provas de carga estáticas, realizadas em 13 obras distintas. Em cada obra, o autor previu a possibilidade de ruína da fundação e da ocorrência de recalques superiores ao valor limite apresentado por norma. Para o autor, uma previsão de recalques é completa quando são avaliadas as fases de projeto e execução de uma fundação. Como conclusão para o conjunto de obras estudadas, o autor chegou a resultados satisfatórios, confirmando que a capacidade de carga é maior em estacas solicitadas com cargas

maiores e para a previsão de recalques foi verificado que a maioria das estacas que trabalham em grupo apresentam confiabilidade adequada.

Bahia (2013) analisou resultados de provas de carga e medições de recalques em dois edifícios residenciais em construção localizados no Distrito Federal, os resultados são comparados pelos métodos propostos por Randolph e Wroth (1979) e Poulos (1993). Para a autora, a prática de monitoramento de recalques e provas de carga são formas de prevenção de futuras patologias. Na análise do projeto de fundações, foi verificado que cada uma das duas torres possui dois blocos centrais que recebem cinco pilares e são compostos por 33 estacas, por serem os blocos mais críticos da obra, estes foram analisados na pesquisa. Para a previsão de recalques, foi utilizado o programa GARP, considerando o bloco como radier estaqueado. Pode-se confirmar com os métodos citados acima que o recalque produzido por um grupo de estacas é maior que o de uma estaca isolada.

A região de Brasília-DF se caracteriza pela má qualidade geotécnica, apresentando solos com camadas de argila porosa, caracterizada também como um solo colapsível. Poulos (1998) afirmou que o radier estaqueado não é indicado para solos colapsíveis, mas como na região de Brasília, este é o tipo de solo que predomina, Castillo (2013) buscou inovar propondo validar numericamente a aplicação de um sistema de radier estaqueado neste tipo de solo. O autor utilizou um estudo de caso de uma edificação real de quatro pavimentos, executado através da metodologia convencional de fundações em um solo típico da região de Brasília. Para que a análise numérica pudesse ser feita, o autor modificou o sistema convencional executado, idealizando-o numericamente para o sistema do tipo radier estaqueado. Entre os critérios realizados numericamente, pode-se destacar o recalque admissível, a distorção angular e as tensões máximas de projeto. Foi proposto no trabalho o emprego de uma camada de solo reforçada (solo argiloso, por exemplo) abaixo da fundação, pois segundo o autor, um solo com boas características geotécnicas proporciona uma melhor transferência de tensões entre as estacas e o radier. Pelo fato de empregar essa camada de solo reforçada, o autor chegou a conclusão que o sistema se torna inviável devido ao custo em edificações de grande porte, mas em uma edificação de pequeno porte, essa seria uma opção para o emprego de radier estaqueado como fundação em solos colapsíveis.

Medeiros (2013), a partir de métodos semi-empíricos com base em sondagens Nspt, se preocupou em prever recalques em fundações superficiais localizadas na cidade

de Fortaleza-CE, onde o solo é bastante arenoso e apresenta baixa compactação. Inicialmente foram realizados estudos em relatórios de sondagens de algumas obras, usualmente desenvolvidos pelo ensaio à percussão SPT. Chegou-se a conclusão que os ensaios empregados não eram apropriados por norma para determinar o comportamento deste tipo de solo, que os mais corretos são os ensaios de cone (CPT) e o pressiométrico (PMT). A autora concluiu em sua pesquisa que em casos de solos arenosos os resultados da sondagem à percussão SPT não são os mais indicados para a previsão de recalques, o método semi empírico de Décourt para reconhecimento do solo apresentaria maior desempenho.

Pezo (2013) abordou análises numéricas de provas de carga utilizando o M.E.F. em radier estaqueado assente sobre depósito de solos arenosos. Segundo o autor, os resultados de ensaios de provas de carga permitem analisar o mecanismo de transferência de carga no solo diretamente pelo sistema de fundação adotado e obter maior conhecimento do comportamento de um radier estaqueado, pois permite alterar a espessura do radier, o diâmetro, espaçamento e comprimento das estacas no solo. O autor chegou à conclusão de que neste tipo de solo estudado, mais da metade dos esforços são distribuídos pelo radier e que quanto maior o comprimento das estacas, menos o radier transmite esforços ao solo.

Mundim *et al.* (2014) desenvolveram um programa no software MATLAB (*Matrix Laboratory*) com o auxílio de uma planilha no excel para estimar recalques em sapatas de grandes edifícios baseados na Teoria da Elasticidade. Foi estimado o recalque em fundações isoladas e o recalque devido a interferências de outras sapatas. No trabalho, foi montado um quadro comparativo entre os recalques que levam em conta a interação e a não interação entre as fundações.

Souza (2014) analisou diversas construções ao redor do mundo que empregaram a metodologia de radier estaqueado. Ele mostrou que a escolha do radier estaqueado foi feita com sucesso em edifícios altos, tais como: Petronas Tower (Malásia) e o Burj Dubai Tower (Emirados Árabes Unidos) e monumentos como a Torre da Televisão Central da China e o Monumento à Revolução (México). O autor ainda apresentou um estudo de caso para o projeto de um edifício residencial de trinta e três pavimentos, localizado na cidade de Manaus – AM, e foi mostrada uma análise estrutural do radier estaqueado, onde chegou-se à conclusão que neste estudo de caso, o radier isolado foi projetado para absorver 30 % da carga total e as estacas 70 % . Ele relata que a escolha deste tipo de fundação na edificação estudada se deveu

principalmente à sobreposição que estava ocorrendo dos blocos com estacas e pelo fato destes blocos estarem ocupando mais de 50 % da área de projeção do projeto.

Carvalho (2015) desenvolve um software para analisar o comportamento de radiers estaqueados denominado SoFIA (*Soil-Foundation Interaction Analysis*). Segundo a autora, o sistema de fundação radier estaqueado vem sendo cada vez mais utilizado por apresentarem boa capacidade de suporte, e por isso é essencial que seja feita uma análise neste tipo de fundação para prever futuras movimentações no solo. O programa permite analisar a integração de radier, estacas e solo. Os resultados apresentados pelo programa foram bem satisfatórios em relação aos recalques, pois apresentaram resultados próximos aos obtidos por programas semelhantes.

Garcia (2015) afirmou que em grandes centros urbanos do Brasil, o uso de fundações profundas é muito comum e que o uso de fundações mistas é uma metodologia pouco empregada devido ao pouco conhecimento que se tem. O autor diz que é muito importante conhecer o comportamento que as fundações mistas possuem, para que estas sejam mais utilizadas em obras, e é o que ele faz em sua pesquisa. Em seu trabalho, ele definiu as características do radier estaqueado, como ocorre a transferência de esforços neste tipo de fundação, determinou o comportamento experimental e teórico, e como os recalques se apresentaram.

Rincon (2016) abordou em sua pesquisa a avaliação do comportamento de fundações do tipo radier estaqueado quando estes estão assentes em argilas, em processo de adensamento. O autor usou dois equipamentos em ensaios de laboratório, para determinar diferentes respostas de recalque nesta situação, a poropressão no interior do solo e como as cargas se distribuem em condições de presença de água. Ele observou a influência do espaçamento entre as estacas e chegou a conclusão de que estacas mais espaçadas em um radier estaqueado distribuem melhor os recalques e que existe um número de estacas além do qual os controles de recalque se apresentaram insignificantes. Fez-se a comparação entre o recalque produzido por um radier isolado e por um radier estaqueado, o radier isolado apresentou maiores recalques como esperado.

Collantes (2017) analisou a influência da posição das estacas quando estas estão em contato com o radier. Foram testadas as interações entre o solo e as estacas em diferentes configurações de radier estaqueado. A autora informou que a perda da capacidade de carga das estacas centrais foram pouco estudadas, e foi algo que ela propôs em seu trabalho. Utilizou-se uma ferramenta numérica que utiliza simulação numérica em elementos finitos chamada ABAQUS 3D para compreender melhor a

interação entre a fundação e o solo. Chegou-se à conclusão de que a influência no número de estacas na capacidade de carga é maior nos solos menos rígidos e dependerá do comprimento e do diâmetro das mesmas.

Macedo (2017) estudou o comportamento de radiers estaqueados em solos arenosos. A avaliação foi feita através da comparação entre o comportamento apresentado por métodos numéricos (M.E.F.) e por provas estáticas. O autor quis quantificar em porcentagem a quantidade de carga que é transmitida ao solo pelo elemento superficial, chegando à conclusão que o radier contribui significativamente para a distribuição dos esforços no solo, cerca de 41 % do carregamento total.

Rebêlo (2017) apresentou em sua pesquisa, um caso de obra localizada na cidade do Rio de Janeiro RJ em que as fundações construídas sob uma espessa camada de solo mole precisaram ser reforçadas e as estruturas, reniveladas. Pela abordagem da autora, foi possível concluir que se não houver previsões de recalques durante o dimensionamento de fundações as construções podem estar sujeitas a futuras movimentações e levar a manifestações patológicas. As estacas raiz são muito utilizadas como reforço por alcançarem grandes profundidades e serem capazes de atravessar rocha e concreto sem provocar grandes choques e vibrações. Como a construção analisada apresentou grandes recalques diferenciais, foi necessário renivelar as fundações com o uso de estacas raiz até que os pilares atingissem seus níveis originais.

A análise dos trabalhos comentados apresentaram diferentes abordagens do problema de recalques em fundações. Com o intuito de sintetizar as informações relacionadas à temática e facilitar o acesso aos trabalhos, a tabela 2.1 resume as principais pesquisas citadas.

Tabela 1.2 - Resumo dos principais trabalhos correlatos apresentados

Autor (ano)	Título	Estu do de caso	Escopo	Uso do GARP	R.E.
Melo (2003)	Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca.	Sim.	• Previsão de recalques em um aterro sanitário. • As condições climáticas aumentam o processo de degradação de matéria orgânica e acelera os recalques nestes ambientes.	Não.	Não.

Souza (2010)	Análise dos fatores de interação entre estacas em radier estaqueado: comparação entre duas ferramentas numéricas.	Não.	• Estudo comparativo do efeito de interação entre as estacas utilizando dois softwares: GARP e DIANA.	Sim.	Sim.
Das Chagas e López (2011)	Previsão numérica de recalques de edifícios em alvenaria estrutural: um caso de obra em Goiânia.	Sim.	• Prever recalques de um edifício em alvenaria estrutural. • Seleção de algumas estacas no projeto de fundações para análise. • Verificaram-se quais blocos exigiriam maiores cuidados durante a execução.	Sim.	Sim.
Barros (2012)	Previsão de recalques e análise de confiabilidade de fundações em estacas hélice contínua.	Sim.	• Determinar o comportamento de estacas hélice contínua. • Os comportamentos analisados se referem à capacidade de carga, recalques, segurança e confiabilidade. • Estudo feito a partir de 58 provas de carga estáticas, realizadas em 13 obras distintas.	Não.	Não.
Bahia (2013)	Análise do desempenho de fundações durante a construção de edifício localizado no DF.	Sim.	• Análise de provas de carga e medições de recalques em dois edifícios residenciais. • A previsão de recalques foi feita com auxílio do software GARP.	Sim.	Sim.
Castillo (2013)	Uso da técnica de radier estaqueado para pequenos edifícios assentes sobre solo colapsível.	Sim.	• Validar numericamente um sistema de radier estaqueado em solos colapsíveis na região de Brasília. • Modificação do sistema convencional de fundações para um sistema do tipo radier estaqueado.	Não.	Sim.
Medeiros (2013)	Avaliação da previsão do comportamento geotécnico de fundações superficiais assentes em solos arenosos de baixa compactidade em Fortaleza a partir de ensaios de placa.	Sim.	• Previsão de recalques em locais onde o solo é bastante arenoso.	Não.	Não.
Pezo (2013)	Análises numéricas de provas de carga em radier estaqueado utilizando o método dos elementos finitos	Não.	• Ensaios de provas de carga em fundações assentes sobre solos arenosos. • Mais da metade dos esforços são distribuídos pelo radier. • Quanto maior o comprimento das estacas, menos o radier transmite esforços ao solo.	Não.	Sim.
Mundim <i>et al.</i>	Implementação de uma ferramenta numérica	Não.	• Desenvolvimento de um programa no software MATLAB,	Não.	Não.

(2014)	para previsão de recalques em sapatas.		visando prever recalques em sapatas de grandes edifícios. • Recalques estimados em fundações isoladas e em conjunto.		
Souza (2014)	Utilização de radier estaqueado em obras especiais e edifícios altos.	Sim.	• Apresentação das principais construções ao redor do mundo que utilizaram o radier estaqueado. • Estudo de caso, analisando o comportamento estrutural da fundação.	Não.	Sim.
Carvalho (2015)	Metodologia híbrida aplicada em uma ferramenta numérica para análise de radier estaqueado.	Não.	• Desenvolvimento de um software denominado de SoFIA. • O software visa determinar o comportamento de radiers estaqueados.	Não.	Sim.
Garcia (2015)	Análise experimental e numérica de radiers estaqueados executados em solo da região de Campinas/SP.	Não.	• Compreender o funcionamento dos radiers estaqueados para que sejam mais implantados nas obras.	Não.	Sim.
Rincon (2016)	Análise experimental do comportamento de sistemas radier estaqueado em solos moles em processos de adensamento.	Sim.	• A partir de um estudo de caso, foi feito um estudo de radiers estaqueados assentes em solos em processos de adensamento.	Não.	Sim.
Collantes (2017)	Avaliação da influência da posição da estaca integrando um radier estaqueado em sua capacidade de carga lateral.	Não.	• Estudou a influência do espaçamento entre as estacas quando estas estão em contato com o radier. • Estudo da capacidade de carga em estacas centrais de radiers estaqueados.	Não.	Sim.
Macedo (2017)	Modelagem numérica de radier estaqueado em solo arenoso	Sim.	• Comportamento estrutural de radiers estaqueados assentes em solos arenosos.	Não.	Sim.
Rebêlo (2017)	Estudo de caso de uma obra de reforço de fundações e renivelamento de edifícios.	Sim.	• Apresentação de um caso de obra localizada na cidade do Rio de Janeiro. • As fundações foram construídas sob uma espessa camada de solo mole e precisaram ser reforçadas e as estruturas, reniveladas.	Não.	Não.

*RE = Radier Estaqueado

Fonte: elaboração do autor, 2018.

Verificou-se em alguns dos trabalhos citados que a execução de estudos de caso se torna uma possibilidade de prever e monitorar futuros recalques e que a substituição do sistema convencional de fundações por fundações equivalentes é uma forma de fazer essa previsão. Estimulado pelos autores que utilizaram estudos de caso e fundações equivalentes para o desenvolvimento da pesquisa, o mesmo foi feito nesta.

2 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado o programa GARP (*General Analysis of Rafts with Piles*), como é seu funcionamento e quais dados devem ser inseridos. Em seguida, é feita a descrição do estudo de caso que ajudou a desenvolver este trabalho. Apresentam-se também as considerações que foram empregadas para a análise e as informações lançadas no software.

2.1 O Programa GARP

O programa GARP é utilizado para a previsão de recalques em fundações do tipo radier estaqueado. Para ser empregado, deve-se considerar o conjunto bloco-estacas como um radier estaqueado, levando em consideração de que o radier terá a mesma espessura que o bloco, o que será feito neste trabalho.

Foi apresentado primeiramente por Poulos em 1994, onde o radier era analisado através do método das diferenças finitas e as estacas eram substituídas por molas equivalentes considerando suas interações através do método de superposição de campos de deformação. O programa foi revisado e melhorado por Small e Poulos (1998), onde o radier passou a ser analisado pelo método dos elementos finitos (M.E.F.) (SALES, 2000).

Foi empregado nesta pesquisa o GARP em sua versão atual (8.0) para a análise do recalque total e do máximo recalque diferencial que a fundação poderia sofrer. O software utiliza dois mecanismos distintos para a análise nesta versão, o radier é analisado pelo Método dos Elementos Finitos (M.E.F.) e o conjunto estaca-solo através do Método dos Elementos de Contorno (M.E.C.) que utiliza a teoria da elasticidade. Cada estaca é modelada considerando-as como molas de rigidez através das teorias de recalque (DAS CHAGAS E LÓPEZ, 2011).

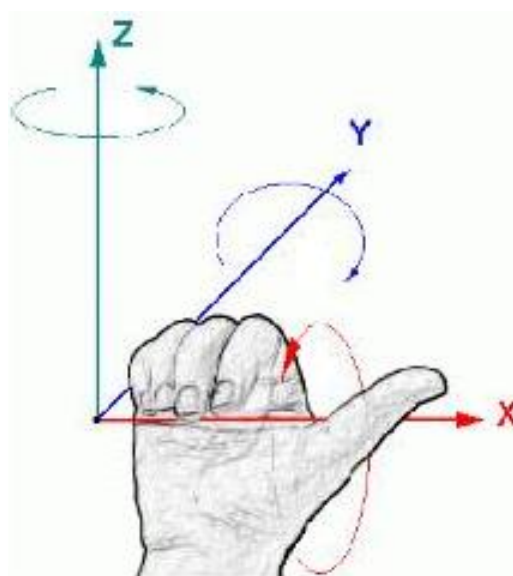
Os fatores de interação entre as estacas podem ser obtidos pelo programa DEFPIG, que utiliza para análise o Método dos Elementos de Contorno (M.E.C.). Esses fatores representam a influência que uma estaca provoca em outra, ou que uma estaca provoca num elemento de radier. Estes devem ser informados ao GARP no campo de propriedades das estacas (CARVALHO e CURADO, 2012).

Algumas das vantagens da utilização do programa em relação às formas comuns do cálculo de recalque encontrados na literatura são: a consideração da

espessura do radier (bloco), estacas com diferentes comprimentos e diâmetros e dos fatores de interação entre as mesmas, solos com propriedades distintas (incluindo o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson) e de diferentes espessuras, aplicação de cargas concentradas, distribuídas e de momentos nas duas direções.

Para a aplicação dos momentos em direções diferentes, geralmente emprega-se a regra da mão direita como mostra a Figura 2.1. O sistema cartesiano comumente utilizado para a aplicação de momentos é diferente quando aplicado no software. Portanto, para a aplicação das cargas momento no programa, fez-se necessário uma mudança do sentido nas duas direções como mostra a Tabela 2.1.

Figura 2. 1 - Convenção do sentido dos momentos



Fonte: Mundo CNC (2018).

Tabela 2.1- Mudança de sentido dos momentos no programa

Convencional	GARP
Mx positivo	My negativo
My positivo	Mx positivo

Fonte: elaboração do autor, 2018.

O primeiro passo para a utilização do programa é a criação de uma malha formada por linhas horizontais e verticais. É feita através de coordenadas dos elementos estruturais (pilares, bloco, estacas) que são representados no programa através de quadrados, retângulos e círculos. Estes elementos são dotados de nós que é onde os carregamentos serão aplicados.

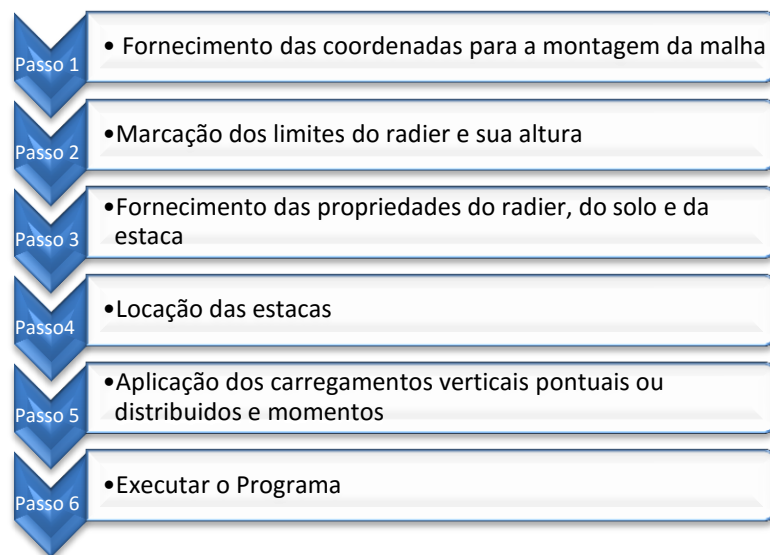
Em seguida, de forma resumida, aplica-se o momento nas direções x e y distribuindo-o ao longo dos eixos e o carregamento distribuído nas áreas dos pilares. Informa-se a espessura do radier, a locação das estacas no bloco e por último, coloca-se as propriedades dos solos e das estacas.

O software ao ser executado obtém os recalques em cada nó e gera um gráfico de distribuição de recalques ao longo da malha, que é dividido em cores, onde cada cor representa o valor do recalque. Pode ser feita comparação do efeito de interação entre as estacas considerando para efeito de análise, uma estaca isolada ou um grupo de estacas (DAS CHAGAS e LÓPEZ, 2011).

A versão 8 do GARP apresenta limitações por não considerar carregamentos horizontais, a necessidade de fornecer valores da rigidez da estaca e seus fatores de interação. Além disso, o programa “disponibiliza em sua saída de dados, valores superiores ao limite de carregamento permitido por estaca, quando na verdade depois desse limite ela já não seria mais uma estaca portante” (CARVALHO e CURADO, 2012).

De forma a simplificar a ordem da inserção de dados no programa, apresenta-se na Figura 2.2 um fluxograma dos dados que são lançados no GARP.

Figura 2. 3 - Fluxograma de inserção de dados no GARP



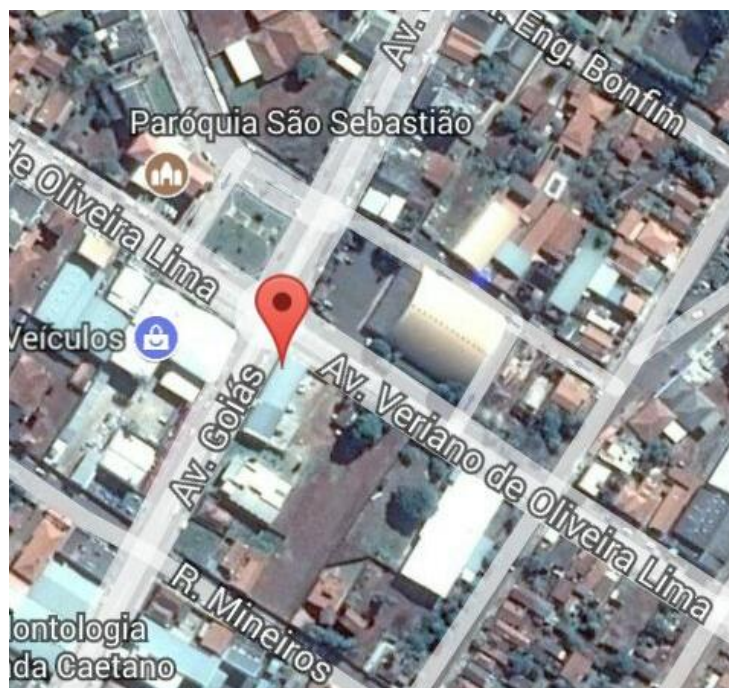
Fonte: Modificado de Carvalho e Curado (2012).

2.2 Estudo de Caso

O edifício do estudo de caso para a previsão de recalques está localizado na Avenida Goiás, quadra 07, Vila Progresso, na cidade de Jataí, Goiás, conforme ilustrado

na Figura 2.3. Compreende um edifício comercial com 12 pavimentos tipo, 6 lojas comerciais por pavimento, um auditório e um estacionamento.

Figura 2. 4 - Localização do estudo de caso



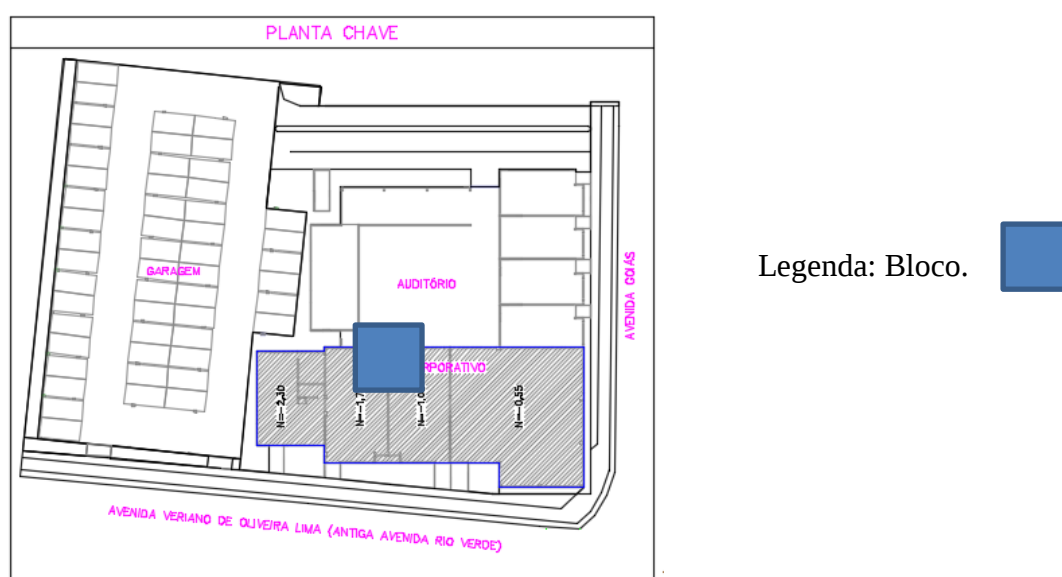
Fonte: GoogleMaps (2017)

Foram realizadas sondagens do tipo SPT (*Standard Penetration Test*) para obter o perfil geológico do solo abaixo de cada bloco de fundação, onde foram executados 5 furos perfurados por trado de concha no primeiro metro e nos metros seguintes por trado helicoidal. Nas primeiras camadas, foram encontrados solos classificados como silte arenoso marrom fofo e silte arenoso com pedregulho marrom pouco compacto e nas ultimas camadas, solo do tipo argila arenosa marrom escuro, rija. O nível da água se encontrava entre 13 e 15 metros. No Anexo A, encontra-se uma figura representando a locação dos furos de sondagem, onde o bloco analisado nesta pesquisa se encontra mais próximo do furo 4. Apresenta-se no Anexo B, o perfil geológico do furo 4.

As fundações executadas no terreno do edifício foram do tipo pré-moldadas de concreto com diâmetros variando entre 24 e 42 cm, possui blocos de coroamento para transferir os esforços do pilar mais uniformemente e $f_{ck} = 30$ MPa. As profundidades das estacas variam entre 16 e 19 metros. Foi escolhido um bloco para ser analisado na presente dissertação pelo fato dele conter a maior quantidade de estacas, este possui altura de 1,30 m e transmite os esforços de três pilares para 9 estacas de 27 cm.

Para o projeto estrutural de fundações, foram feitos dois relatórios de combinações de carregamento, um para o edifício e outro para o auditório. No bloco analisado nesta pesquisa, um dos pilares faz parte da área do auditório e, na Figura 2.4, pode-se verificar que o bloco está entre a área do auditório e da edificação. Foram realizadas 99 combinações para as fundações do edifício e 56 para o auditório, considerando carregamentos do peso próprio, do solo, carga accidental, da água, vento e desaprumo nas duas direções e sobrepressões.

Figura 2. 5 - Localização do bloco no projeto de fundações



Fonte: elaboração do autor, 2018.

2.3 Considerações Para a Análise

Algumas considerações precisaram ser feitas para um bom andamento do trabalho, pois não haviam todas as informações necessárias a serem apresentadas no programa, tais como o módulo de elasticidade do concreto, os fatores de interação entre as estacas e a tensão de compressão do solo.

A primeira escolha a ser feita no trabalho, foi a de considerar o conjunto bloco e estacas como um radier estaqueado para a análise no programa GARP, pois, como já foi falado anteriormente, este software somente faz previsões em fundações do tipo radier estaqueado, portanto no programa foi usada a espessura do radier estaqueado igual a do bloco: 1,3 m. As estacas podem ser executadas com diferentes formatos, neste trabalho adotou-se a forma circular, para a simplificação do problema, sendo que no projeto ela consta como hexagonal.

Como afirma Sales (2000) os fatores de interação (α) e a rigidez (K) de cada estaca isoladamente podem ser calculados através do software DEFPIG que considera o solo como um meio contínuo. Na Tabela 2.2 são apresentados os dados que o programa retornou para esta análise, onde S/D são os diferentes valores de espaçamento relativos aos diâmetros das estacas e α é o fator de interação entre as mesmas.

Tabela 3.2 - Dados do DEFPIG

Comprimento das estacas = 18m.	Diâmetro das Estacas = 27cm.	
Ponto	S/D	α
1	1,5	0,2280
2	2	0,2090
3	2,5	0,1940
4	3	0,1820
5	4	0,1640
6	5	0,1490
7	6	0,1380
8	7	0,1280
9	8	0,1200
10	9	0,1130
11	10	0,1060
12	12	0,0950
13	15	0,0820
K = 137757 kN/m		

Fonte: elaboração do autor, 2018.

O Nspt é o número de golpes necessário para o amostrador padrão penetrar no solo e é determinado a cada metro de camada perfurada, considerou-se a camada de solo dividida em cada metro também para a análise deste trabalho, agrupou-se os valores de Nspt com valores mais próximos e encontrou-se um Nspt médio. O módulo de elasticidade do solo (E_s) pode ser calculado através do Nspt multiplicado por um valor médio encontrado em alguns solos do Brasil, conforme a equação: $E_s = 3,5 * Nspt$. Foi encontrado um módulo de elasticidade (E_s) para cada espessura de solo, através do Nspt médio de cada camada.

A resistência à compressão do solo, em kPa, pode ser determinada empiricamente através da equação 2.1 dividindo o valor do Nspt por 5 que indica um solo argiloso como apresentado no Anexo B. O Nspt a ser considerado foi o da ultima camada = 45.

$$\sigma_{adm} = \frac{N_{spt}}{5} * 100 \quad (2.1)$$

Esta tensão nos dá como resultado um valor de 900 kPa, mas devemos considerar no máximo 500 kPa, e é o que foi adotado neste trabalho (BITTENCOURT, 2018). Foi considerada profundidade do solo até o impenetrável igual a 40 m, pois nas sondagens realizadas não houve a determinação precisa dessa profundidade. O coeficiente de Poisson (ν) adotado em todas as camadas foi igual a 0,3.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), quando não houver ensaios para determinação do módulo de elasticidade do concreto, o mesmo pode ser determinado pela equação 2.2.

$$E_c = \alpha_e * 5600 * \sqrt{F_{ck}} \quad (2.2)$$

Como especificado em projeto, o fck do concreto é igual a 30 MPa e considerando o uso do granito como agregado graúdo, temos $\alpha_e = 1,0$.

Estes foram os dados lançados no programa nas propriedades do solo e do radier, nas propriedades do radier, considerou-se as propriedades do concreto e o numero de *layers* equivale ao número de camadas a que o solo foi dividido, 9 camadas. Na Figura 2.5, é mostrado o campo onde as propriedades dos solos e do radier são lançadas, e na Figura 2.6, apresenta-se as propriedades das estacas.

Figura 2.6 - Propriedades do solo e do radier

Properties of Soil and Raft

Raft Properties

Modulus: 3.06725E+

Poisson's Ratio: 0.3

Soil Properties

Compressive strength: 500

Uplift strength: 0

No. of layers: 9

Enter number of layers in the text box above and press 'Enter' to activate grid to the right.

Layer	Thickness	No. sublayers	Modulus	Poisson's Ratio
1	6	10	11655	0.3
2	3	10	33845	0.3
3	1	10	17500	0.3
4	3	10	29155	0.3
5	1	10	63000	0.3
6	2	10	133000	0.3
7	1	10	91000	0.3
8	1	10	38500	0.3
9	1	10	157500	0.3

Cancel Return

Fonte: elaboração do autor, 2018.

Figura 2.7 - Propriedades das estacas

The screenshot shows the 'Pile data' window with the following settings:

- Type of analysis:** Randolph (selected), Poulos
- G/GI = rho:** 0
- Omega:** 0
- Hyperbolic factor Rf:** 0
- Depth of inf = Beta:** 0.333
- No. of alpha factors:** 13
- PuRef:** 1

Pile Type	Pile Length	Pile diameter	Pile head stiffness	Compression capacity	Tension capacity	Soil Movement
1	18	0.27	137757	2600	1000	0

Point	s/D ratio	Alpha factor 1
1	1.5	0.2280
2	2	0.2090
3	2.5	0.1940
4	3	0.1820
5	4	0.1640
6	5	0.1490
7	6	0.1380
8	7	0.1280

NOTE: Tensile capacities are entered as positive numbers, as are compression capacities of piles.

Buttons: Assign to all, Insert, Delete, Calculate, Accept

Fonte: elaboração do autor, 2018.

Com relação à construção da malha no software, cada elemento possui oito nós, quatro nas extremidades e quatro intermediários, e procurou-se reduzir a quantidade de linhas para que a mesma ficasse menos carregada. Nos elementos que recebem os momentos, referente à posição de cada pilar, procurou-se colocar uma maior quantidade de nós para se aproximar de um carregamento distribuído ao longo do eixo. Atentou-se para que os nós dos elementos passassem nos cantos e no ponto intermediário destes.

Os carregamentos que foram lançados no software vieram das combinações do projeto estrutural. Dos três pilares que chegam ao bloco analisado, um faz parte do auditório, consideraram-se primeiramente as combinações do pilar P-32, pelo fato deste se situar em uma região mais próxima ao centro do bloco, ou seja, este pilar transmite carregamentos que geram maior influência no bloco. Foram utilizadas três combinações de carregamentos deste pilar, numeradas de 1 a 3, com cada uma representando os valores do esforço normal, momentos nas direções x e y máximos, respectivamente. Para os demais pilares, consideraram-se os esforços gerados pelas mesmas combinações com características próximas às analisadas para o pilar P-32. A Tabela 2.3 mostra quais foram os carregamentos utilizados de cada uma das três combinações e quantas divisões foram necessárias para a apresentação no programa. O esforço normal (N) é dado em kN/m² e momentos em x (Mx) e y (My) em kN*m.

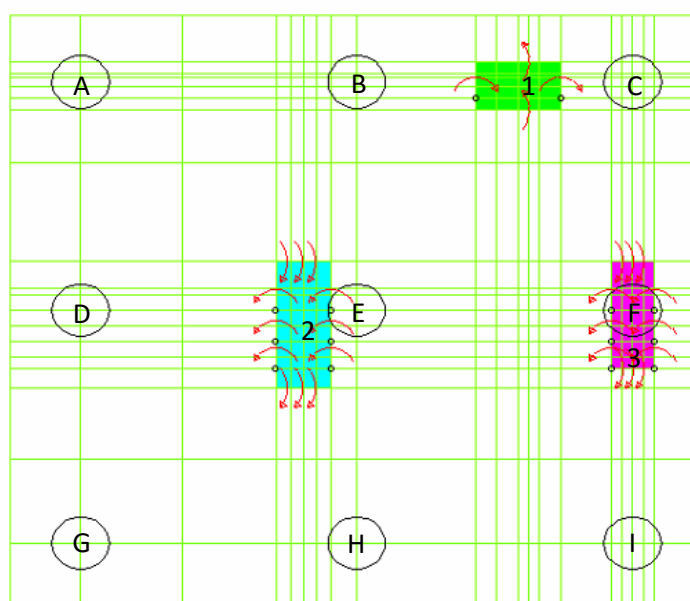
Tabela 3.3 - Carregamentos

Combinação	Pilar	N	Mx	My	Divisões em X		Divisões em Y	
					X	Mx	Y	My
1	P-28	324,67	-28,55	15,25	6	-4,76	6	2,54
	P-32	2230,77	-83,78	20,91	6	-13,96	6	3,48
	P-55	167,58	-1,54	0,17	2	-0,77	2	0,08
2	P-28	174,34	27,29	19,96	6	4,55	6	3,33
	P-32	1696,28	96,01	28,83	6	16,00	6	4,81
	P-55	172,28	-1,95	-0,15	2	-0,98	2	-0,07
3	P-28	329,87	-27,94	-21,16	6	-4,66	6	-3,53
	P-32	1786,64	-86,4	-35,71	6	-14,4	6	-5,95
	P-55	170,23	0,20	0,12	2	0,10	2	0,06

Fonte: elaboração do autor, 2018.

A Figura 2.7 apresenta os momentos que foram lançados e como foi feita a divisão da malha. Pode-se ver na imagem a malha formada por linhas horizontais e verticais, a locação de cada uma das estacas por letra indo de A até I e dos pilares numerados de 1 a 3, nota-se que o momento não é lançado de forma pontual como no carregamento. Os momentos nas duas direções são lançados em nós ao longo do perímetro do pilar. A direção dos momentos apresentados na Figura 2.7 é válida para a combinação 1, para as demais combinações o que vai mudar é o valor e o sentido do momento, pois a malha é a mesma.

Figura 2.8 - Aplicação dos momentos no GARP



Fonte: elaboração do autor, 2018.

2.4 Análises realizadas

Este trabalho se procedeu da seguinte forma:

- Análise do projeto de fundações, sondagens e combinações de carregamento.
- Modelagem no software GARP.
- Verificação das cargas que chegam em cada estaca.
- Análise dos recalques no radier estaqueado.
- Estudo do recalque diferencial apresentado pelo radier estaqueado.
- Cálculo dos recalques conforme a bibliografia.
- Comparação entre o recalque apresentado pelo software e pelo cálculo.

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

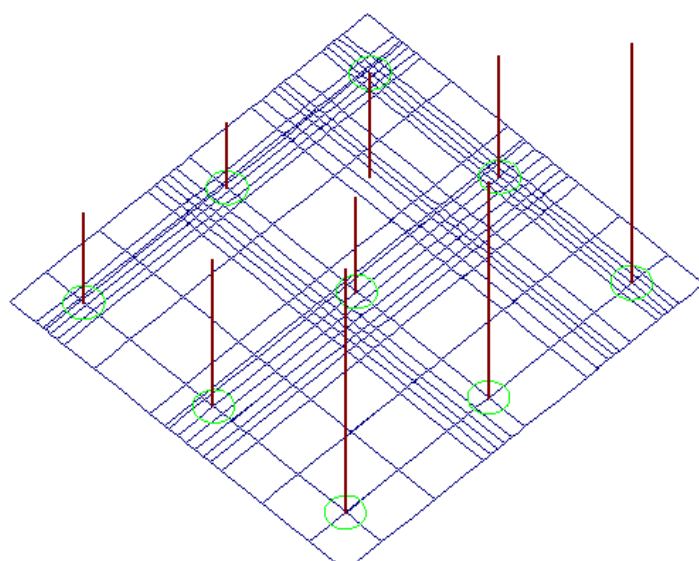
Neste capítulo é feita uma análise do comportamento da fundação estudada no que se refere aos carregamentos nas estacas, aos recalques absolutos e diferenciais a partir dos resultados obtidos pelo programa GARP. Em seguida, apresenta-se o cálculo do recalque absoluto que o elemento da fundação sofreria através de método encontrado na literatura, e depois é feita a comparação entre o recalque obtido pelo software e pelo cálculo para ver se estão próximos.

3.1 Cargas nas estacas

No software, cada estaca se encontra em um nó, como foi apresentado na Figura 2.7 do capítulo anterior. Nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 são mostradas a locação de cada uma das estacas para cada combinação com seus respectivos esforços normais obtidos no GARP. Vale ressaltar que a ordem de numeração no software é feita por nó, de baixo para cima e da esquerda para a direita.

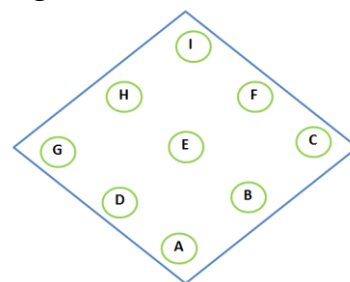
É possível verificar nas Figuras isométricas o carregamento que chega a cada estaca e quais destas estão sendo mais solicitadas. As estacas que possuem maior carregamento são aquelas que sofrem maior recalque. Uma estaca que possui carregamento negativo está sendo tracionada, ou seja, estas estão recalcando menos.

Figura 3.1 - Carregamento das estacas (combinação 1)

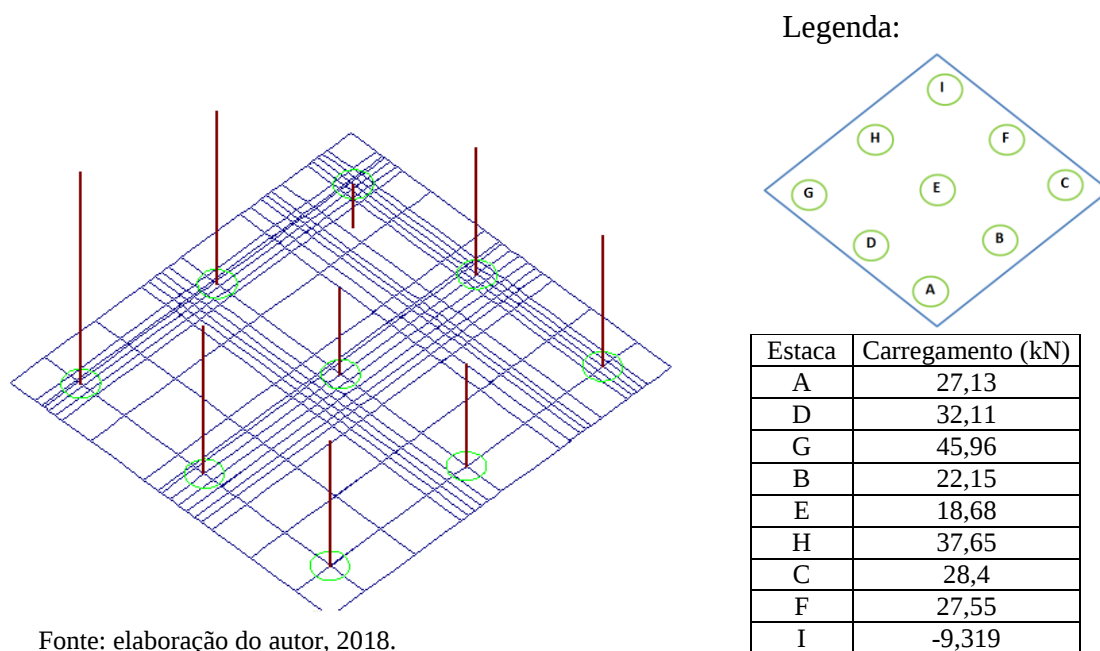


Fonte: elaboração do autor, 2018.

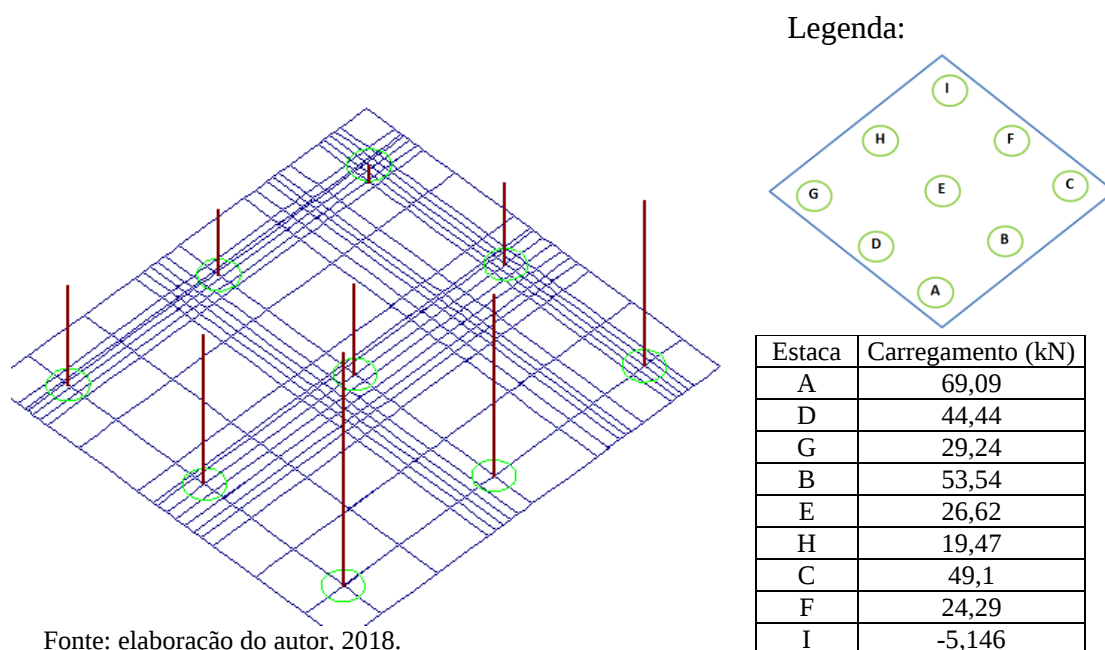
Legenda:



Estaca	Carregamento (kN)
A	73,12
D	44,15
G	26,86
B	64,74
E	28,43
H	19,3
C	71,9
F	36,4
I	-31,22

Figura 3.2 - Carregamento das estacas (combinação 2)

Fonte: elaboração do autor, 2018.

Figura 3.3 - Carregamento das estacas (combinação 3)

Fonte: elaboração do autor, 2018.

Na Tabela 3.1 é apresentado um comparativo entre a soma de todos os esforços de cada uma das combinações como os esforços que realmente chegam às estacas. Verifica-se que as estacas estão recebendo um carregamento inferior ao que está chegando na fundação, isto se deve ao fato do radier estar distribuindo os esforços restantes, ou seja, o radier distribui a maior parte do carregamento que está chegando no elemento de fundação.

Tabela 3.1 - Esforço normal no projeto e nas estacas

	Esforço Normal (N) em kN	
	No projeto	Chega nas estacas
Combinação 1	2723,03	396,12
Combinação 2	2042,9	248,95
Combinação 3	2286,74	320,94

Fonte: elaboração do autor, 2018.

3.2 Recalques nas estacas

Após a elaboração da malha em elementos finitos com todas as propriedades das fundações e do solo, é possível encontrar o recalque absoluto em qualquer ponto da malha que se queira analisar. O software nos retorna um gráfico de distribuição de recalque dividido em cores, onde cada cor representa um valor de recalque.

Foi encontrado um gráfico de distribuição de recalque para cada uma das combinações analisadas que foram apresentadas na Tabela 2.3 do capítulo anterior. Os recalques máximos e mínimos que o grupo de estacas apresentou em cada uma das combinações são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Recalques

Combinação	Recalque Máximo (mm)	Recalque Mínimo (mm)
1	1,10230	0,73218
2	0,93007	0,54784
3	0,90558	0,44041

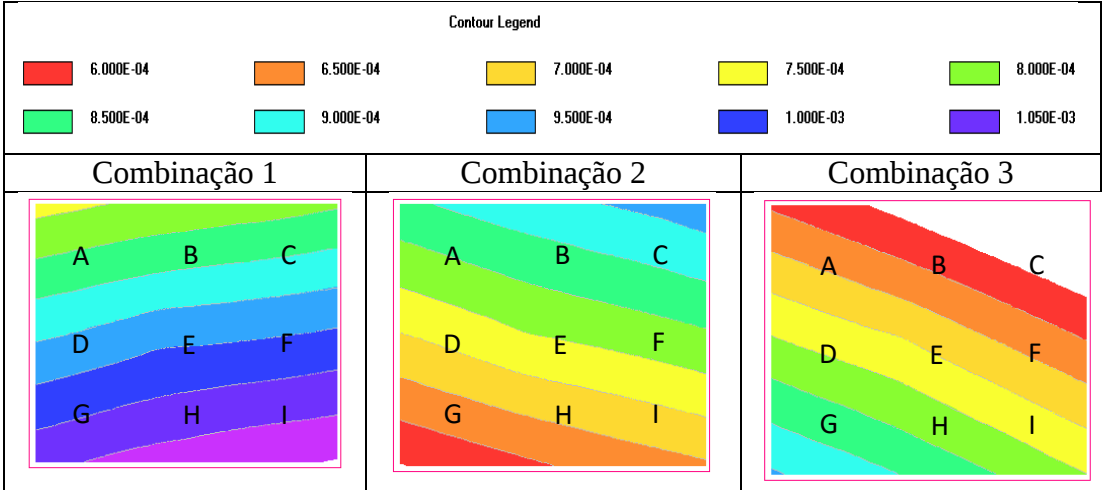
Fonte: elaboração do autor, 2018.

O gráfico de distribuição de recalque que mostra o recalque em cada ponto da malha é apresentado por cada uma das combinações na Figura 3.4. Sendo a unidade de medida usada para os recalques no programa em metros.

Observou-se que o recalque está ocorrendo de forma distribuída gradualmente ao longo do bloco e não de forma concentrada onde o mesmo está sendo mais solicitado, analisando o esforço normal de maior magnitude que é recebido pelo P-32. Quanto maior a rigidez do bloco maior a distribuição uniforme dos recalques, portanto, este apresenta características de um bloco rígido.

Cita-se que a direção do vento pode ser algo que influencia no recalque, pois, dependendo da consideração da direção do vento no cálculo, o recalque pode ser maior em um local e em outro não.

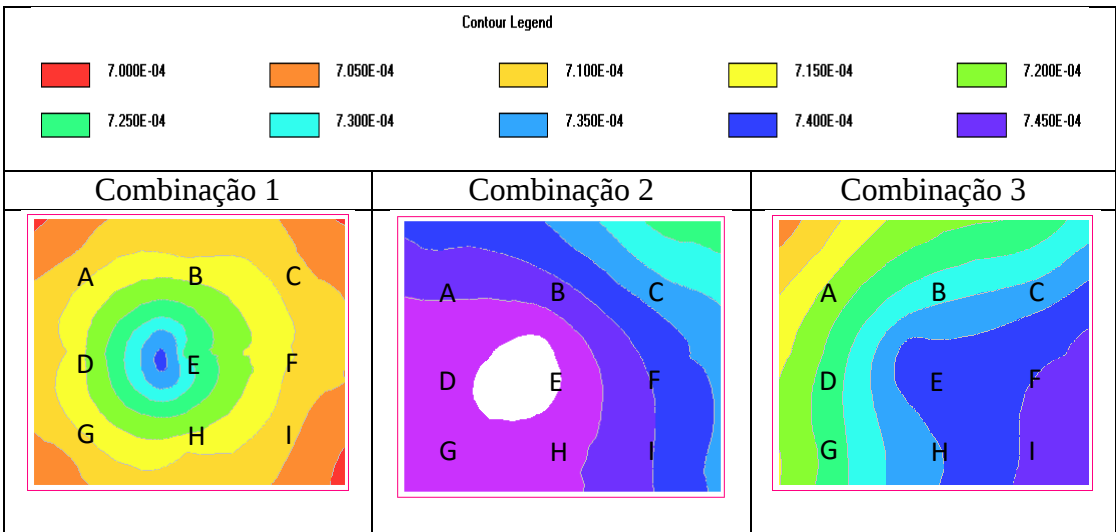
Figura 4.4 - Distribuição de recalques



Fonte: elaborado pelo autor (2018).

Apresenta-se na Figura 3.5 uma suposição de como ocorreria os recalques caso não houvesse momentos. Essa suposição possui o objetivo de mostrar o quanto o momento influencia no recalque. Podemos perceber que na ausência de momento, o recalque tende a se concentrar na região do pilar com maior carregamento, portanto, conclui-se que o recalque é melhor distribuído pelo bloco na presença de carga momento. Em termos de recalques máximos e mínimos, observou-se que estes se apresentaram inferiores nas combinações 2 e 3 e o dobro no recalque máximo da combinação 1 (Tabela 3.3).

Figura 5.5 - Distribuição de recalques sem os momentos



Fonte: elaborado pelo autor (2018).

Tabela 3.3 - Recalque máximo e mínimo sem momento

Combinação	Recalque Máximo (mm)	Recalque Mínimo (mm)
1	2,1333	0,6508
2	0,7534	0,7225
3	0,8134	0,7723

Fonte: elaboração do autor, 2018.

A posição de cada estaca foi mostrada na Figura 2.7 do capítulo anterior e os recalques apresentados por cada estaca, considerando análise de momentos aplicados, são ilustrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Recalque das estacas isoladas

Estaca	Nó	Recalque Absoluto (mm)		
		Combinação 1	Combinação 2	Combinação 3
A	92	0,76686	0,81990	0,61091
B	505	0,79569	0,86135	0,54998
C	1036	0,81831	0,89601	0,48352
D	76	0,89527	0,70505	0,74184
E	489	0,93263	0,75218	0,68617
F	1020	0,94959	0,78328	0,61383
G	62	1,01480	0,58285	0,86537
H	475	1,04840	0,62594	0,80659
I	1006	1,06740	0,66136	0,73588

Fonte: elaboração do autor, 2018.

Podemos verificar nos recalques apresentados pelas estacas quais estão deformando mais e fazer uma comparação entre o recalque produzido pelo grupo e pela estaca individual. A forma como se dá o carregamento nas estacas influencia na maneira em que o bloco recalca, logo, no local onde as estacas estão mais carregadas, o elemento de fundação tende a apresentar recalque maior nesta região.

A rigidez das estacas é algo que influencia no recalque, mas para este problema não foi algo a se analisar, pois foi considerado que todas as estacas possuem a mesma rigidez.

3.3 Distorção angular

Como já foi apresentado no capítulo 1, o recalque diferencial também chamado de distorção angular ocorre quando há diferença de recalques absolutos entre dois

elementos de fundação. O cálculo da distorção angular foi feito através da razão entre a diferença dos recalques das extremidades do bloco (recalques máximos e mínimos apresentados pela Tabela 3.2) pela diagonal do bloco, já que esta distância representa espaços entre os pontos com recalque máximo e mínimo (Figura 3.4). Como o bloco apresenta lados iguais a 3,05 e 3,25 m, temos uma diagonal igual a 4,46 m. As diferenças entre os recalques de cada uma das combinações são apresentados na Tabela 3.5.

Percebe-se que mesmo tendo um recalque absoluto maior conforme apresentado na Tabela 3.2, tem-se um recalque diferencial menor. Comparando-se os recalques diferenciais apresentados na Tabela 3.5 com os critérios de danos mostrados na Figura 1.16 do capítulo 1, verifica-se que os recalques diferenciais deste estudo de caso apresentaram limites inferiores aos aceitáveis para que haja boa segurança e bom desempenho da edificação, pois o limite máximo apresentado pela Figura é o de 1/750, que é o limite para o qual deve-se temer problemas com máquinas sensíveis a recalque.

Tabela 3.5 - Recalque diferencial

Combinação	Diferença entre os recalques (ρ) máximos e mínimos (mm)	Diagonal (m)	Recalque Diferencial
1	0,37012	4,46	1/12050
2	0,38223	4,46	1/11668
3	0,46517	4,46	1/9588

Fonte: elaboração do autor, 2018.

A análise apresentada mostrou bons resultados do ponto de vista local (em um bloco), porém, seria melhor apresentar o comportamento global (da fundação toda) a fim de obter uma resposta mais realista do estudo.

3.4 Cálculo do recalque (bloco de estacas)

Foram feitos três cálculos de recalques além dos realizados no GARP, sendo um para cada combinação de carregamento a partir da expressão 3.1 apresentada por Poulos e Davis (1980). Nesta equação considera-se o recalque apenas de uma estaca carregada com esforço normal. Onde ρ é o recalque produzido por uma estaca, P é o esforço normal que chega na estaca, I o fator de influência obtido por meio dos gráficos apresentados no Apêndice A, Es é o módulo de elasticidade do solo presente ao longo da estaca e D o diâmetro da estaca.

$$\rho = \frac{P * I}{E_s * D} \quad (3.1)$$

O recalque produzido pelo grupo de estacas foi encontrado empiricamente a partir da expressão 3.2, multiplicando-se o recalque de uma estaca pelo fator R_s , que é encontrado através do número de estacas elevado a um fator utilizado por muitos autores de 0,5.

$$\rho_{grupo} = R_s * \rho_{isolada} \quad (3.2)$$

O esforço normal P que chega às estacas foi encontrado pela soma dos esforços de cada um dos três pilares que chegam no bloco analisado dividido pela quantidade de estacas. Foi obtido um esforço normal total para cada uma das três combinações analisadas considerando que esses esforços são transmitidos para as estacas, enquanto que, momentos são resistidos pelo bloco de estacas. Foi encontrado um módulo de elasticidade (E_s) de cada camada de solo e depois foi feita uma média ponderada para encontrar o valor total do módulo do solo, porque é necessário isso no uso da teoria. O diâmetro das estacas (D) foi obtido através do projeto estrutural. Estes dados são mostrados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Dados para o cálculo do recalque

Combinação	Esforço Normal P (kN)	I	E_s (kN/m ²)	D (m)
1	2723,02	0,0317	46970	0,27
2	2042,90			
3	2286,74			

Fonte: elaboração do autor, 2018.

O cálculo dos recalques considerando uma estaca isolada e um grupo de estacas é apresentado na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Cálculo do recalque

Combinação	$\rho_{isolada}$ (mm)	ρ_{grupo} (mm)
1	0,756	2,268
2	0,567	1,701
3	0,634	1,902

Fonte: elaboração do autor, 2018.

3.4 Comparação dos recalques

O recalque mostrado pelo grupo de estacas apresentou-se maior que o produzido pelo software, ou seja, pelo radier estaqueado. Verifica-se que o recalque

apresentado pelo cálculo de bloco de estacas foi, em média, 100% maior que o resultado do software. Cita-se que o fator de influência I pode levar a imprecisões no cálculo do recalque pelo fato de ser obtido por meio de gráficos.

O fato do recalque se apresentar maior no bloco de estacas já era esperado, pois como foi dito no capítulo 1, o radier isolado tem a tendência de uniformizar os recalques em toda a sua extensão, e quando este se encontra em conjunto com as estacas, o radier estaqueado, tende a ser uma boa opção como tipo de fundação redutora de recalques, já que os esforços serão distribuídos pelas duas fundações, ao contrário do bloco de estacas, onde os esforços são considerados distribuídos apenas pelas estacas.

Outro fato a ser considerado é que na determinação dos recalques considerando o bloco com estacas, é considerado que apenas o esforço normal é transmitido para as estacas, considerando que os momentos são resistidos pelo próprio bloco, diferentemente do que se dá na análise do radier estaqueado apresentada.

Um projetista de fundações, tendo o conhecimento da análise do recalque apresentado pela edificação poderia rever seus cálculos ou até mesmo o tipo de fundação escolhida e propor melhorias no projeto visando um bom desempenho.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento de fundações no que se refere a previsões numéricas da ocorrência de recalques em fundações do tipo radier estaqueado, que ocorreu a partir de um estudo de caso de um edifício comercial de 12 pavimentos localizado na cidade de Jataí-GO.

Foi utilizado o software GARP para a previsão de recalques, que se mostrou muito útil para o objetivo que se esperava. Com o programa, foi possível encontrar o carregamento e o recalque absoluto que chegou em cada estaca, o recalque do radier estaqueado e o recalque diferencial do bloco analisado.

Na análise das estacas, podemos verificar que as mesmas possuem maior carregamento são aquelas que apresentam maior recalque. Os recalques diferenciais puderam ser encontrados a partir dos recalques absolutos máximos e mínimos apresentados no software. Encontrou-se uma distorção angular bem abaixo dos limites aceitáveis para que não houvesse danos na estrutura.

Percebeu-se que o recalque produzido pelo cálculo do bloco de estacas se apresentou em média de 100% maior que o do software, pois como foi sinalizada na literatura, a fundação do tipo radier estaqueado é uma boa opção como redutora de recalque, pois os esforços são distribuídos, neste caso, parte pelas estacas e parte pelo radier, e é o que ajuda na distribuição de recalques.

O bloco analisado foi aquele que possui a maior quantidade de estacas e maior carregamento chegando nele, portanto, foi possível verificar que os recalques apresentados não mostraram magnitudes suficientes que impactassem negativamente na edificação. Os resultados obtidos neste trabalho se mostraram satisfatórios e foi possível verificar a importância de se prever recalques numericamente, pois nos ajudaria a evitar algum problema na construção. Como foi tratado na revisão da literatura do capítulo 1, o surgimento de recalques é uma das formas que mais contribui para a aparição de manifestações patológicas .

Os recalques apresentados são considerados pequenos para que ocorressem problemas na edificação. Menciona-se que se a análise fosse feita em um bloco de dimensões maiores, com superior quantidade de estacas e diâmetros mais elevados, os recalques aumentariam, considerando nível de carregamentos com maior magnitude também. Esperava-se que o recalque apresentasse de forma mais concentrada na região que está sendo mais solicitada, mas o que ocorreu é que este apresentou distribuído ao

longo do bloco, principalmente, pelo fato da existência de momentos nas direções x e y aplicados no elemento da fundação pelos pilares.

Cabe ressaltar que a análise feita foi apenas para um caso isolado da fundação, não foi analisada a fundação como um todo, e sim apenas um bloco de estacas. Para uma investigação mais realista na previsão de recalques, necessitaria um estudo de toda a fundação, pois o solo pode apresentar diferenças nas regiões que não foram analisadas.

Sugere-se para futuros trabalhos:

- Consideração de mais de um bloco para a análise do recalque.
- Consideração de estacas com propriedades diferentes.
- Análise do processo executivo para saber se o mesmo afeta na produção de recalques.
- Avaliação da interação entre as estacas em um bloco com muitas estacas.
- Implementação de uma ferramenta atualizada para previsões de recalques.
- Realizar o monitoramento dos recalques no local estudado.
- A partir dos resultados do recalque encontrados, propor um projeto de fundações otimizado, de forma que reduza os recalques apresentados.
- Analisar se o espaçamento entre as estacas em um bloco de fundações influencia na produção de recalques.

REFERÊNCIAS

- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604: Abertura de poços e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas**, Rio de Janeiro, 1986.
- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**, Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**, Rio de Janeiro, 2010.
- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8036: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios**, Rio de Janeiro, 1983.
- ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**, Rio de Janeiro, 2001.
- ALONSO, U. B. **Previsão e controle das fundações**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.
- BAHIA, G.A.D. **Análise do desempenho de fundações durante a construção de edifício localizado no DF**. 2013. 95 f. Dissertação (Engenharia Civil) – Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2013.
- BARROS, N. B.F. **Previsão de recalque e análise de confiabilidade de fundações em estacas hélice contínua**. 2012. 252 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- BITTENCOURT, D. M. A. **Métodos semiempíricos de previsão de carga admissível**. 2018. Notas de aula.
- BITTENCOURT, D. M. A. **Recalques de fundações em estacas**. 2017. Notas de aula.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações - fundamentos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.
- CARVALHO, S. F. **Metodologia híbrida aplicada em uma ferramenta numérica para análise de radier estaqueado**. 2015. 144 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e construção civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.
- CARVALHO, S.F.; CURADO, T.S. **Otimização de fundações em radier estaqueado na cidade de Goiânia**. 2012. 64 f. Dissertação (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

CASTILLO, D.J.A. **Uso da técnica de radier estaqueado para pequenos edifícios assentes sobre solo colapsível**. 2013. 181 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

COLLANTES, C.A.P. **Avaliação da influência da posição da estaca integrando um radier estaqueado em sua capacidade de carga lateral**. 2017. 116 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

CURADO, T. S. **Cálculo de recalques**. 2017. Notas de aula.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. Tradução. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

DAS CHAGAS, J. V. R. e LÓPEZ, T. P. **Previsão numérica de recalques de edifícios em alvenaria estrutural: um caso de obra em Goiânia**. 2011. 60 f. Dissertação (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

GARCIA, J.R. **Análise experimental e numérica de radiers estaqueados executados em solo da região de campinas/sp**. 2015. 359 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Campinas, Campinas, 2015.

GARCIA, J.R. *Jornal da Unicamp*. Estudo Analisa o uso de Radiers Estaqueados em Solos Tropicais. Disponível em: <http://www.unicamp.br/unicamp/ju/634/estudo-analisa-o-uso-de-radiers-estaqueados-em-solos-tropicais>. Acesso em: 18 de dezembro de 2017.

GOOGLEMAPS. Disponível em:
https://www.google.com.br/maps?q=jatai&um=1&ie=UTF-8&sa=X&ved=0ahUKEwjRxdG4zc_VAhWIJCyKHStEBa4Q_AUICigB. Acesso em: 18 de dezembro de 2017.

HACHICH, W.; *et al.* **Fundações - teoria e prática**. São Paulo: Pini, 1998.

[HTTP://WWW.MUNDOCNC.COM.BR/BASIC3.PHP](http://www.mundocnc.com.br/basic3.php). **Mundo CNC**. Acesso em: 02 de fevereiro de 2018.

KOPSCHITZ, P. **Construção de edifícios**. 2011. Notas de aula.

MACEDO, J.W.N. **Modelagem numérica de radier estaqueado em solo arenoso**. 2017. 83 f. Dissertação (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

MAGALHÃES, P.H.L. **Avaliação dos métodos de capacidade de carga e recalque de estacas hélice contínua via provas de carga**. 2005. 270 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

MEDEIROS, P.M. **Avaliação da previsão do comportamento geotécnico de fundações superficiais assentes em subsolos arenosos de baixa compacidade em Fortaleza a partir de ensaios de placa**. 2013. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

MELO, M. C. **Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de resíduos sólidos em Muribeca**. 2003. 141 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

MILITITSKY, J.; CONSOLI, N.; SCHNAID, F. **Patologia das fundações**. Tradução. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

MOURA, A. P. **Investigações do subsolo**. 2017. Notas de aula.

MUNDIM, D. P. R.; CRUVINEL, E. E CAVALCANTI, M. **Implementação de uma ferramenta numérica para previsão de recalques em sapatas**. 2014. 61 f. Dissertação (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

ODEBRECHT, E.; SCHNAID, F. **Ensaio de campo**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Terratek, 2007.

PEZO, O.B. **Análises numéricas de provas de carga em radier estaqueado utilizando o método dos elementos finitos**. 2013. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

POULOS, H. G. **GARP**, 1994.

POULOS, H. G.; DAVIS, E. H. **Pile Foundation Analysis and Design**. New York: Wiley, 1980.

POULOS, H.G. (1991). **Foundation Economy via Piled Raft Systems. Keynote Paper of Pile talk International' 91**. Kuala Lumpur, 1991.

POULOS, H.G. **The Pile-Enhanced Raft as an Economical Foundation System. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. 1998.

REBELLO, Y. **Fundações Guia prático de projeto, execução e dimensionamento**. Tradução. 1. ed. São Paulo (SP): Zigurate, 2008.

REBÊLO, T.S. **Estudo de caso de uma obra de reforço de fundações e renivelamento de edifícios**. 2017. 87 f. Dissertação (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

RINCON, E.R. **Análise experimental do comportamento de sistemas radier estaqueado em solos moles em processos de adensamento**. 2016. 262 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SALES, M. S. **Análise do comportamento de sapatas estaqueadas**. 2000. 257 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, 2000.

SMALL, J. C. e POULOS, H.G. (1998). **User's Manual of GARP. Centre for Geotechnical Researches**. Univ. of Sydney. Australia. SMALL, J.C. e ZHANG, H. (1999). Comunicação Pessoal.

SOUZA, S. S. **Análise dos fatores de interação entre estacas e radier estaqueado: comparação entre duas ferramentas numéricas**. 2010. 170 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

SOUZA, F.A. (2014). **Utilização de Radier Estaqueado em Obras Especiais e Edifícios Altos**. VI Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. 10 f. Rio de Janeiro.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1989.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F.R. **Fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

YAZIGI, W. **A técnica de edificar**. 10. ed. São Paulo: Pini, 2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Tabelas para encontrar o fator de Influência (I)

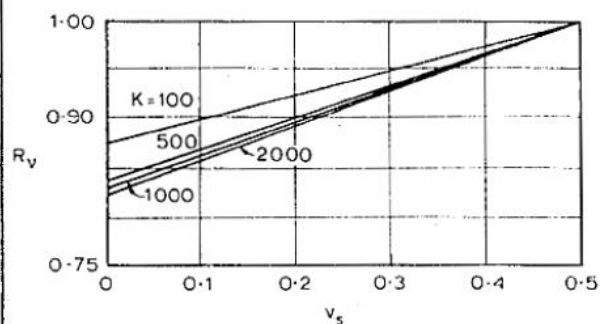
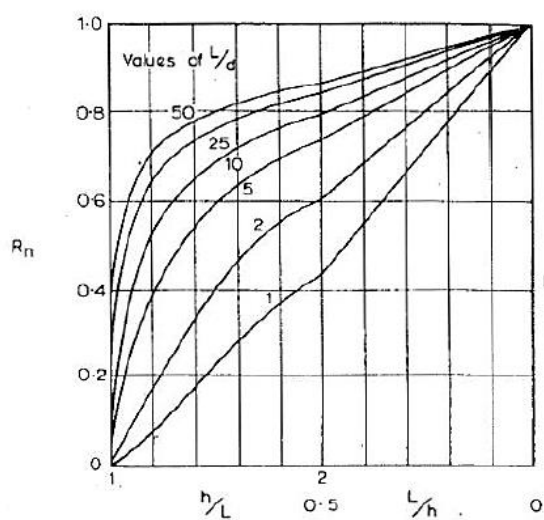
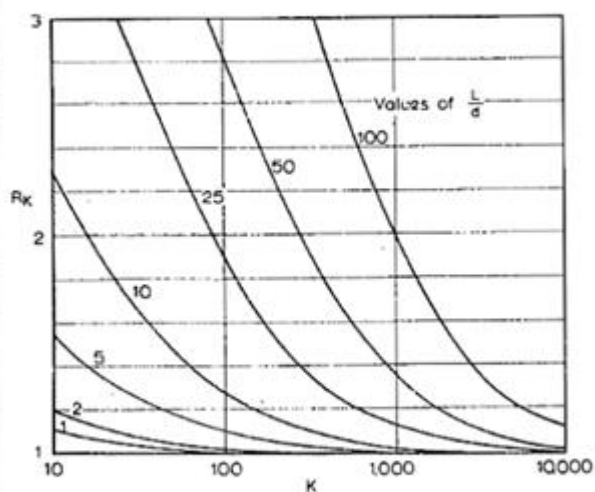
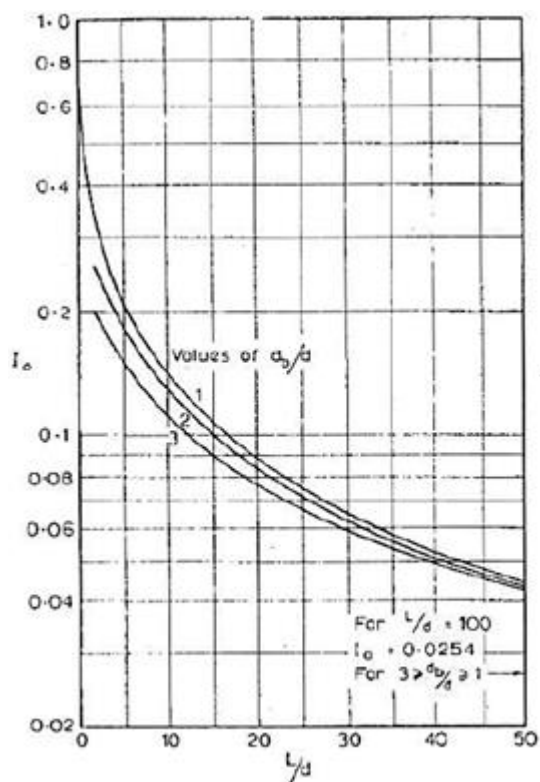
$$I = I_0 * R_k * R_u * R_h$$

I_0 = Fator de Influência para uma estaca ($\nu=0,5$).

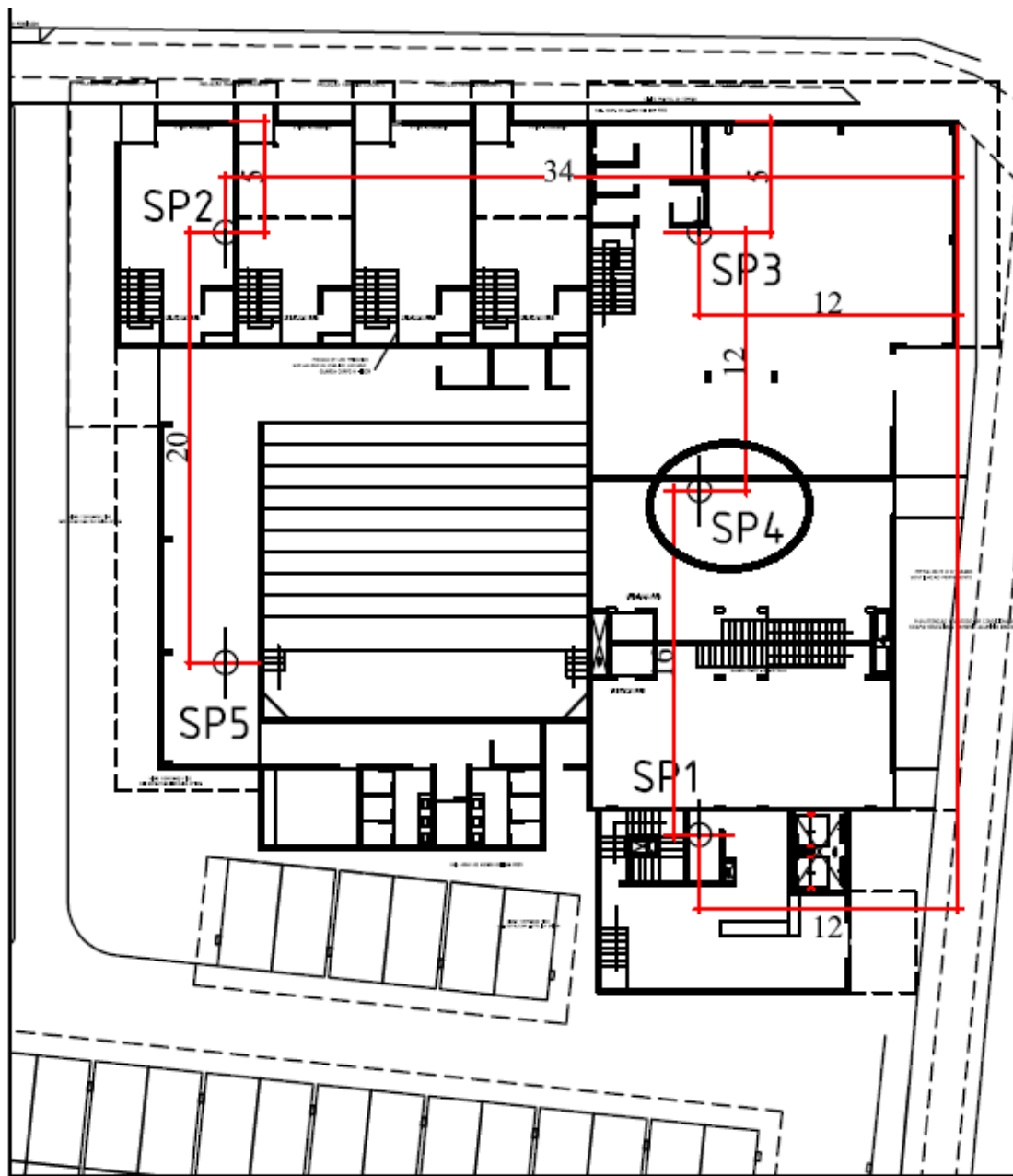
R_k = Correção pela compressibilidade da estaca.

R_u = Correção pelo coeficiente de Poisson.

R_h = Correção pela presença de camada indeformável de solo (camada infinita).



ANEXOS

ANEXO A - Localização do furo da sondagem SPT realizada

ANEXO B – Relatório de sondagem

