

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS CAJAZEIRAS

MARIA ISABEL FERREIRA DOS SANTOS

**ANÁLISE COMPARATIVA DA ESTIMATIVA DE RECALQUES EM ESTACAS
HÉLICE CONTÍNUA COM RESULTADOS DE PROVA DE CARGA ESTÁTICA**

Cajazeiras-PB
2021

MARIA ISABEL FERREIRA DOS SANTOS

**ANÁLISE COMPARATIVA DA ESTIMATIVA DE RECALQUES EM ESTACAS
HÉLICE CONTÍNUA COM RESULTADOS DE PROVA DE CARGA ESTÁTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil, sob Orientação da Profa. Anne Kelly de Souza Machado Borges.

Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Daniel Andrade CRB-15/593

S237a

Santos, Maria Isabel Ferreira dos

Análise comparativa da estimativa de recalques em estacas hélice contínua com resultados de prova de carga estática / Maria Isabel Ferreira dos Santos; orientadora Anne Kelly de Souza Machado Borges. .- 2021.

74 f.: il.

Orientadora: Anne Kelly de Souza Machado Borges.

TCC (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2021.

1. Estaca hélice contínua monitorada 2. prova de carga estática 3. Recalques – Engenharia civil I. Título

CDU 692(0.067)

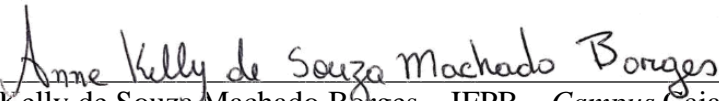
MARIA ISABEL FERREIRA DOS SANTOS

**ANÁLISE COMPARATIVA DA ESTIMATIVA DE RECALQUES EM ESTACAS
HÉLICE CONTÍNUA COM RESULTADOS DE PROVA DE CARGA ESTÁTICA**

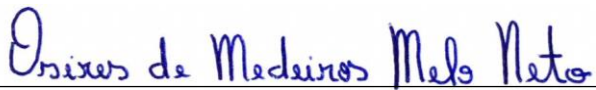
Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
Campus Cajazeiras, como parte dos
requisitos para a obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 17 de setembro de 2021.

BANCA EXAMINADORA


Anne Kelly de Souza Machado Borges – IFPB – *Campus* Cajazeiras
Orientadora


José Lucas Pessoa de Oliveira – FASC – *Campus* Iguatu/CE
Coorientador


Osires de Medeiros Melo Neto – UFCG – *Campus* Campina Grande
Examinador 1

Dedico este trabalho aos meus amados avós Luzinete e Severino (*in memoriam*), que fizeram tanto por mim e continuam sendo meus maiores exemplos de força, caráter e fé. Gratidão eterna.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus e a Nossa Senhora das Graças, por todo amor, misericórdia, pela luz da sabedoria, pelas bênçãos derramadas e por sustentar minha mão em todos os momentos. Quando achei que não seria possível, Ele me mostrava razões de manter minha esperança e fé vivas.

À minha vovó Luzinete que não pôde acompanhar toda essa trajetória, mas que no meu primeiro dia de aula, ao me deixar na porta do ônibus, chorando, pediu que Deus iluminasse meus passos, onde quer que eu estivesse. A meu avô Severino que sempre me incentivou a estudar e que mesmo não estando presente fisicamente, a sua história de vida e superação me mostraram que com determinação e fé podemos alcançar tudo o que sonhamos.

À toda minha família, em especial aos meu pais João e Socorro, minhas tias Maria de Fátima e Nubia, meus tios Antônio, Cícero e Francisco, por lutarem arduamente por cada conquista minha, sempre me auxiliando em tudo que precisei, fazendo o impossível para tornar possível o sonho da graduação.

À minhas amadas irmãs Maria Juliana e Maria Beatriz pelo carinho e apoio em todos os momentos, difíceis ou alegres, por cada ligação de consolo, comemoração ou preocupação, pelas noites viradas me fazendo companhia enquanto eu estudava, cada um desses gestos de amor me dava forças para continuar.

Aos amigos que a faculdade me presenteou: Lorena, Nayanne, Rafael, Vanessa e Millena, pela ajuda sempre que precisei, seja nos projetos ou nos estudos para provas, e também por todo auxílio na elaboração desse trabalho. Os momentos de companheirismo vividos com vocês nessa graduação nunca serão esquecidos.

À minha professora orientadora Anne Machado, por ter aceitado esse desafio e por tanto ter me ajudado. Gratidão pelo apoio, conhecimento transmitido e disponibilidade prestada durante a realização desse estudo, o meu muito obrigada.

Ao meu coorientador Lucas Pessoa pela orientação, confiança, paciência, exemplo de profissionalismo e por sempre estar presente indicando a direção certa que o trabalho deveria tomar.

A todos que compõem o IFPB – *Campus* Cajazeiras pelo ensino de qualidade, pela afetuosidade com todos os discentes e pelos programas de apoio ao estudante, que me permitiram permanecer em Cajazeiras e alcançar o sonho da graduação.

Por fim, a todos que contribuíram de maneira direta ou indireta para a concretização desse sonho, rezando, torcendo, compartilhando conhecimentos e me incentivando a não desistir. Gratidão.

RESUMO

As fundações são estruturas que recebem e transmitem ao solo subjacente os carregamentos atuantes na edificação. As normas brasileiras destacam que o desempenho adequado desses elementos está diretamente associado à sua capacidade de carga e aos recalques do solo. É importante que a previsão dos recalques seja realizada durante a fase de projeto das fundações, com o objetivo de evitar manifestações patológicas, comprometimento da segurança e estabilidade da estrutura. Portanto, o presente trabalho apresenta uma estimativa dos recalques de fundações em estacas hélice contínua monitorada, situadas na Região Metropolitana do Recife, a partir de métodos baseados na Teoria da Elasticidade e posteriormente uma comparação com resultados de provas de carga estática. Para tanto, utilizou-se os métodos elásticos de Cintra e Aoki, Poulos e Davis e Randolph e Wroth. Inicialmente procedeu-se uma revisão bibliográfica, abordando tópicos referentes as estacas hélice contínua, recalques e ensaios de prova de carga. Das 45 provas de carga encontradas, nessa pesquisa selecionou-se quatorze, sendo quatro realizadas em estacas com diâmetro de 40 cm, seis com diâmetro de 50 cm e quatro com diâmetro de 60 cm. Além da diversificação do diâmetro, buscou-se também a variação dos perfis de solo e do comprimento da estaca. Posteriormente realizou-se a organização dos dados geotécnicos e a elaboração das planilhas de estimativa dos recalques. Verificou-se que os métodos de Cintra e Aoki e Poulos e Davis apresentam, respectivamente, recalques estimados maiores e menores, em média, comparados aos recalques medidos nos ensaios de prova de carga. Quanto ao método de Randolph e Wroth percebe-se que os valores de recalques calculados se encontram intermediários aos valores dos recalques dos ensaios. Conclui-se então, que seria necessário realizar um estudo mais completo acerca do solo, para que os parâmetros adotados nos cálculos representem melhor a realidade física do problema. A realização das sondagens de reconhecimento (SPT) auxiliam na caracterização do maciço de solo, porém, outros ensaios complementares, como compressão triaxial, cisalhamento direto e CPT podem ser realizados para uma avaliação mais precisa, pois os valores adotados influenciam significativamente nos resultados dos cálculos dos recalques. A partir dos resultados encontrados nesse estudo, o método de Randolph e Wroth apresentou-se como o mais eficiente.

Palavras-Chave: estaca hélice contínua monitorada; estimativa; prova de carga estática; recalques.

ABSTRACT

Foundations are structures that receive and transmit loads acting in the building to the underlying ground. Brazilian standards emphasize that the proper performance of these elements is directly associated with their load capacity and soil settlement. It is important that the prediction of settlements is carried out during the foundation design phase, in order to avoid pathological manifestations, compromising the safety and stability of the structure. Therefore, the present work presents an estimate of foundation settlements in a continuous flight auger pile, located in the Metropolitan Region of Recife, from methods based on the Elasticity Theory and later a comparison with results of static load tests. Therefore, the elastic methods of Cintra and Aoki, Poulos and Davis, and Randolph and Wroth were used. Initially, a literature review was carried out, covering topics related to continuous flight auger pile, settlements, and load test tests. Of the 45 load tests found, fourteen were selected in this research, four of which were carried out in stakes with a diameter of 40 cm, six with a diameter of 50 cm, and four with a diameter of 60 cm. In addition to diversifying the diameter, it was also sought to vary the soil profiles and the length of the stake. Subsequently, the geotechnical data were organized and the settlement estimate spreadsheets were prepared. It was found that the methods of Cintra and Aoki and Poulos and Davis present, respectively, higher and lower estimated settlements, on average, compared to settlements measured in the load test tests. As for the Randolph and Wroth method, it can be seen that the calculated settlement values are intermediate to the test settlement values. It is concluded then, that it would be necessary to carry out a more complete study about the soil, so that the parameters adopted in the calculations better represent the physical reality of the problem. The realization of the reconnaissance probes (SPT) help in the characterization of the soil mass, however, other complementary tests, such as triaxial compression, direct shear and CPT can be carried out for a more precise evaluation, as the adopted values significantly influence the results of the calculations of repressions. Based on the results found in this study, the Randolph and Wroth method proved to be the most efficient.

Keywords: continuous flight auger pile; estimate; static load test; settlement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de fundações	18
Figura 2 - Tipos de fundações superficiais.....	19
Figura 3 - Tipos de fundações profundas	20
Figura 4 - Execução da estaca hélice contínua	22
Figura 5 - Disposição dos sensores na perfuratriz	24
Figura 6 - Ficha de controle da estaca.....	25
Figura 7 - Recalques de uma fundação sob a ótica do solo.....	26
Figura 8 - Recalque diferencial.....	27
Figura 9 - Distorções angulares e danos associados	28
Figura 10 - Massa de solo mobilizada pelo carregamento de uma estaca isolada (a) e de um grupo de estacas (b)	29
Figura 11 - Parcelas de recalque da estaca	30
Figura 12 - Diagrama de esforço normal na estaca.....	31
Figura 13 - Propagação de tensões devido à reação de ponta	32
Figura 14 - Propagação de tensões devido à resistência lateral.....	33
Figura 15 - Fatores para o cálculo de recalques em estacas	35
Figura 16 - Fatores para o cálculo de recalques em estacas	36
Figura 17 - Camada de solo superior e inferior	37
Figura 18 - Trajetória de equilíbrio do conjunto estaca-solo (“prova de carga”).....	38
Figura 19 - Sistemas de reação para prova de carga estática.....	40
Figura 20 - Exemplo de curva carga-recalque.....	41
Figura 21 - Fluxograma metodológico.....	43
Figura 22 - Mapa geral das PCEs	45
Figura 23 - Perfil de solo tipo 1	46
Figura 24 - Perfil de solo tipo 2	47
Figura 25 - Perfil de solo tipo 3	47
Figura 26 - Características dos perfis de solo.....	52
Figura 27 - Características das estacas	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das PCEs.....	44
Tabela 2 – Resumo das PCEs.....	45
Tabela 3 – Coeficiente K e razão de atrito α	48
Tabela 4 – Peso específico de solos argilosos.....	49
Tabela 5 – Peso específico de solos arenosos.....	49
Tabela 6 – Coeficiente K.....	50
Tabela 7 – Razão de atrito (α).....	50
Tabela 8 – Razão de atrito (α).....	50

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Recalque Cintra e Aoki x Recalque PCE	53
Gráfico 2 – Recalque Poulos e Davis x Recalque PCE	54
Gráfico 3 – Recalque Randolph e Wroth x Recalque PCE	55
Gráfico 4 – Recalque Cintra e Aoki, Poulos e Davis e Randolph e Wroth x Recalque PCE...	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1	FUNDAÇÕES	17
3.1.1	<i>Fundações Rasas</i>	18
3.1.2	<i>Fundações Profundas</i>	20
3.1.3	<i>Estaca Hélice Contínua</i>	21
3.2	RECALQUES.....	25
3.2.1	<i>Tipos de Recalque</i>	26
3.2.2	<i>Recalques Admissíveis</i>	27
3.2.3	<i>Efeito de Grupo</i>	28
3.2.4	<i>Métodos de Estimativa</i>	29
3.2.4.1	<i>Método de Cintra e Aoki (2010)</i>	30
3.2.4.2	<i>Método Poulos e Davis</i>	34
3.2.4.3	<i>Método Randolph e Wroth</i>	36
3.3	PROVA DE CARGA.....	38
3.3.1	<i>Prova de Carga Estática</i>	39
4	METODOLOGIA	42
4.1	COLETA E FILTRAGEM DOS DADOS	43
4.2	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DA ÁREA DE ESTUDO.....	45
4.3	CÁLCULO DAS ESTIMATIVAS DE RECALQUE	48
4.1.1	<i>Método de Cintra e Aoki</i>	48
4.1.2	<i>Método Poulos e Davis</i>	49

4.1.3 Método Randolph e Wroth	51
4.4 PLANILHAS DE CÁLCULO	51
5 RESULTADOS E ANÁLISES	53
6 CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS.....	59
APÊNDICES	63

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas estruturais de concreto, em geral, são constituídos da superestrutura (lajes, vigas e pilares) e da estrutura de fundação ou infraestrutura (sapatas, blocos, estacas, vigas de equilíbrio, etc.). Tem-se a superestrutura suportando os carregamentos, que por sua vez os transferem para as fundações, e estas descarregam no maciço de solos (MOTA, 2009). Ou seja, a fundação é a estrutura que recebe e distribui ao solo subjacente todas cargas atuantes na edificação, apresentando-se como o elemento que realiza a transição entre o solo e a superestrutura.

A norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 6122 (ABNT, 2019) que aborda o projeto e execução de fundações no Brasil, destaca dois tipos de fundações existentes: a fundação rasa (direta ou superficial), cuja base está apoiada em profundidade inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação, e a fundação profunda 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.

Dentre os vários tipos de fundações profundas existentes, destaca-se a Hélice Contínua Monitorada (HCM), que é uma fundação em concreto e moldada *in loco*, executada por meio da perfuração do solo através de um trado helicoidal contínuo que, simultaneamente à sua retirada tem-se a injeção do concreto e da armadura da estaca. Magalhães (2005) ressalta que obras que possuem carregamentos elevados e apresentam solos superficiais com características de baixa resistência, geralmente utilizam-se desse tipo de fundação profunda.

O comportamento apropriado dessas estacas é diretamente relacionado à sua capacidade de carga e aos recalques do solo associados aos carregamentos atuantes na estrutura. Esses recalques provocam alterações geométricas no solo que possibilitam seu deslocamento vertical e conseqüentemente a movimentação das fundações que, conforme outras condições, podem causar enormes danos à superestrutura (VELLOSO; LOPES, 2010).

O recalque varia conforme a camada de solo resistente formada pela ponta das estacas dentro do maciço geotécnico, camada essa pré-definida em projeto. No caso de estacas de hélice contínua, esse recalque varia de acordo com a deformabilidade do maciço de solo que envolve as estacas, a deformabilidade dos materiais que compõem o elemento estrutural das estacas, e as suas dimensões (SOUSA, 2019).

A previsão desses recalques é importante e deve ser realizada durante o projeto de fundações, com vista a evitar as manifestações patológicas, possível comprometimento da

segurança e estabilidade da estrutura, advindas do adensamento do solo. Visto que o recalque é um problema complexo, que apresenta muitas variáveis a serem determinadas, sua previsão na fase de projeto impede a ocorrências de diversos obstáculos e patologias nas edificações futuramente.

Veloso e Lopes (2010) destacam três categorias de métodos de previsão de recalques: métodos baseados na Teoria da Elasticidade, métodos numéricos (inclusive baseados em funções de transferência de carga) e métodos semiempíricos. No presente trabalho será utilizado para previsão dos recalques os métodos baseados na Teoria da Elasticidade, que são atualmente os mais utilizados na estimativa dos recalques.

Na prática, o desempenho das fundações pode ser avaliado por meio de provas de carga, que são ensaios que consistem na aplicação de carregamentos crescentes e registrados os deslocamentos correspondentes aos esforços. No Brasil esse procedimento é regularizado pela norma NBR 16903 (ABNT, 2020), que apresenta todos os procedimentos executivos necessários para a realização do teste.

Portanto, o presente trabalho tem como finalidade estimar os recalques em estacas hélice contínua, por meio de métodos elásticos: Cintra e Aoki (2010), Poulos e Davis (1980) e Randolph e Wroth (1978), e posteriormente compará-los com valores encontrados em Prova de Carga Estática (PCE).

Este documento está dividido em seis principais tópicos, sendo eles: introdução, objetivos, referencial teórico, metodologia, resultados e análises e conclusões.

O tópico 1 aborda a introdução do trabalho de conclusão de curso, exibindo de uma maneira geral a delimitação do tema, a justificativa e importância do estudo, bem como a estrutura do trabalho.

O tópico 2 refere-se aos objetivos do trabalho, citando o objetivo geral da pesquisa e os objetivos específicos que descrevem os resultados que se pretendem alcançar com o desenvolvimento do estudo.

No tópico 3 são expostas as revisões de literatura dos assuntos pertinentes à pesquisa. Inicialmente tem-se os conceitos de fundações, seus tipos e características, enfatizando a fundação do tipo hélice contínua, seus procedimentos de execução, vantagens e desvantagens. Na sequência são detalhados os tipos de recalques em fundações, apontado os valores limites admissíveis que a estrutura pode suportar. Nesse mesmo tema, são apresentados o efeito de grupo em estacas e os detalhamentos de cálculo dos métodos de estimativa de recalques abordados na pesquisa: Cintra e Aoki (2010), Poulos e Davis (1980) e Randolph e Wroth

(1978). Na sequência é explicado a importância do ensaio de prova de carga, destacando-se os procedimentos executivos da prova de carga estática.

No tópico 4 são expostos os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa que abordam a coleta e filtragem dos dados, caracterização geotécnica da área de estudo e as considerações feitas nos cálculos de recalques.

No tópico 5 são apresentados os resultados da estimativa dos recalques e a análise comparativa com os resultados da prova de carga estática, avaliando-se a eficiência dos métodos utilizados.

O tópico 6 aborda as conclusões do estudo, explicitando-se os objetivos alcançados e sugestões para pesquisas futuras.

2 OBJETIVOS

Nesse tópico são exibidos o objetivo geral do trabalho, bem como os objetivos específicos que serão desenvolvidos para alcançar o objetivo principal dessa pesquisa.

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral realizar uma análise dos recalques de fundações em estacas hélice contínua monitorada a partir de métodos baseados na Teoria da Elasticidade e compará-los a resultados de provas de carga estática.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O presente trabalho tem como objetivos específicos:

- Estimar os recalques nas estacas hélice contínua a partir de métodos elásticos;
- Confrontar os resultados calculados com os obtidos na prova de carga estática;
- Avaliar a eficiência dos métodos de previsão de recalques baseados na Teoria da Elasticidade;
- Identificar o método que possui melhor desempenho na previsão de recalques.

3 REVISÃO DE LITERATURA

A seguir, são apresentados os estudos bibliográficos considerados importantes para o desenvolvimento e entendimento do tema abordado neste trabalho. Selecionou-se, preferencialmente, estudos relacionados à área de fundações e geotecnia. A princípio, foi introduzido o conceito de fundação, sua classificação quanto aos tipos, além de tratar, de forma mais específica, sobre a estaca hélice contínua. No segundo tópico, é exibido o conceito de recalque, suas formas de apresentação e os métodos de estimativa. Por último é apresentada a prova de carga em elementos de fundação.

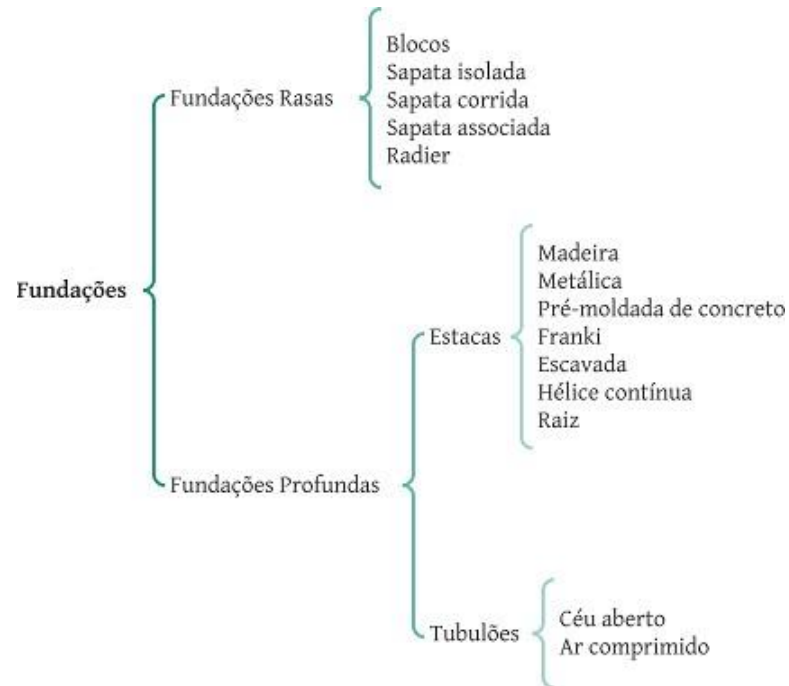
3.1 FUNDAÇÕES

As fundações são os elementos estruturais responsáveis por transmitir ao solo os carregamentos atuantes na edificação. Knappett e Craig (2018) destacam que as fundações devem ser dimensionadas de forma que sua capacidade de carga seja suficiente para suportar as ações atuantes na estrutura e evitem deformações excessivas sob essas cargas aplicadas, o que poderia danificar a estrutura, ou acarretar um colapso.

No Brasil a norma NBR 6122 (ABNT, 2019) especifica os requisitos a serem observados no projeto e execução de fundações de todas as estruturas da engenharia civil, não contemplando aqueles tipos de fundação que têm aplicação restrita (sapatas estaqueadas, radier estaqueados, estacas de compactação, melhoramento do solo etc.) e aqueles que estão em desuso (caixões pneumáticos etc.).

Quanto ao projeto de fundações, Veloso e Lopes (2010) apontam que alguns elementos são imprescindíveis para a elaboração deste, tais como a topografia da área, dados geológicos-geotécnicos, informações sobre as construções vizinhas e da estrutura a construir. A norma NBR 6122 (ABNT, 2019) destaca ainda que o projeto de fundações deve apresentar memorial de cálculo e desenhos executivos, com as informações técnicas necessárias para o perfeito entendimento e execução da obra, sendo suas elaborações obrigatórias, devendo estar disponível quando solicitado.

De acordo com Moura (2016) pode-se classificar as fundações, quanto à profundidade da cota de apoio, em dois grupos: rasas (diretas ou superficiais) e profundas (indiretas), conforme exibido na Figura 1. Nos subtópicos seguintes são explicadas suas definições e características.

Figura 1 - Tipos de fundações

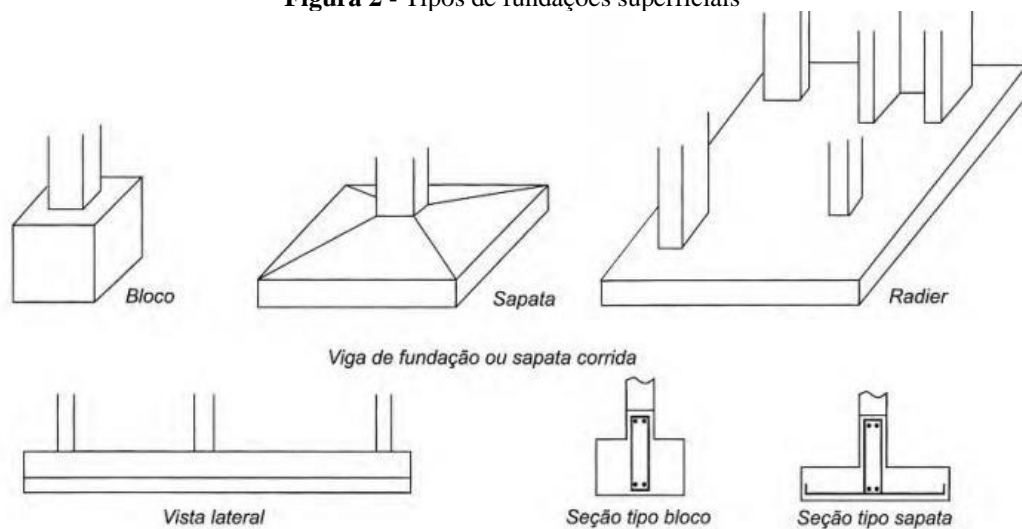
Fonte: Autora, 2021.

3.1.1 Fundações Rasas

As fundações superficiais são aquelas em que a transferência de carga ao solo se dá pela sua base, cujo assentamento se dá em profundidade inferior a duas vezes a menor dimensão da fundação; para esta definição adota-se a menor profundidade, caso esta não seja constante em todo o perímetro da fundação conforme define a norma NBR 6122 (ABNT, 2019).

Ainda de acordo com essa norma, a variável principal para o projeto de fundações rasas é a tensão admissível, se o projeto for feito considerando o fator de segurança global e valores característicos, ou a tensão resistente de cálculo, quando for feito considerando coeficientes de ponderação e valores de cálculo. Tais tensões devem satisfazer simultaneamente aos estados limites últimos (ELU) e de serviço (ELS), para cada elemento isolado de fundação, bem como para o conjunto.

Os tipos mais comuns de fundações rasas são blocos, sapatas e radier (Figura 2). Essas fundações necessitam ter dimensões superiores, ou igual, a 60 cm, bem como devem ser concretadas sobre um lastro de concreto não estrutural com no mínimo 5 cm de espessura, a ser lançado sobre toda a superfície de contato solo-fundação, como é especificado no tópico 7.7 da norma NBR 6122 (ABNT, 2019).

Figura 2 - Tipos de fundações superficiais

Fonte: Veloso e Lopes, 2010.

A fundação tipo bloco configura-se como um componente de concreto simples, calculado para que tensões de tração nele atuantes possam ser resistidas pelo concreto, sem necessidade do uso de armadura (VELOSO; LOPES, 2010).

A norma NBR 6122 (ABNT, 2019) define sapata como o elemento de fundação rasa, constituída com o uso do concreto armado e dimensionado de modo que as tensões de tração, nele resultantes, sejam resistidas pelo emprego de armadura. Comumente, são encontrados três tipos de sapatas, sendo estas, isolada, corrida e associada. Almeida (2004), define que uma fundação é dita como sapata isolada quando a mesma não tem associação com nenhuma outra sapata e é dimensionada em função dos esforços de um só pilar.

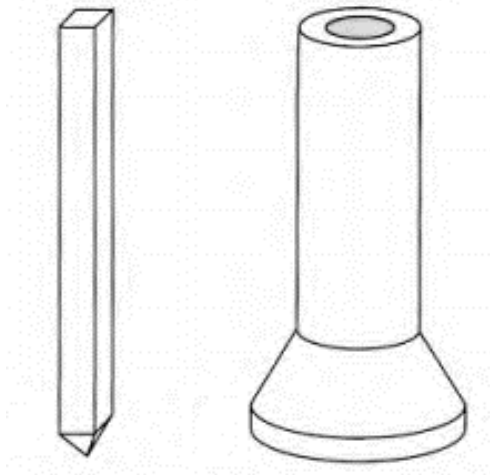
A sapata corrida é aquela sujeita à ação de uma carga distribuída linearmente ou de pilares em um mesmo alinhamento (VELOSO; LOPES, 2010). Já a sapata associada é utilizada quando se apresenta comum a dois ou mais pilares, situados próximos, mesmo quando não alinhados, devendo apenas possuir o centro de gravidade da sapata coincidente com o centro de gravidade das cargas atuantes.

O radier é caracterizado como sendo o elemento de fundação rasa dotado de rigidez para receber e distribuir mais do que 70 % das cargas da estrutura, conforme a norma NBR 6122 (ABNT, 2019). Rebello (2008) também define essa fundação como uma placa de concreto armado que abrange todas as áreas de fundação, recebendo a carga dos pilares da estrutura e transmitindo-as ao solo.

3.1.2 Fundações Profundas

De acordo com a norma NBR 6122 (ABNT, 2019) as fundações profundas são aquelas que transmitem as cargas ao solo ou pela base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma junção das duas, sendo sua ponta ou base apoiada em uma profundidade superior a oito vezes a sua menor dimensão em planta e no mínimo 3,0 m. Neste tipo de fundação incluem-se as estacas e os tubulões (Figura 3).

Figura 3 - Tipos de fundações profundas



Fonte: Veloso e Lopes, 2010.

A estaca pode ser definida como o elemento de fundação profunda executado por ferramentas ou equipamentos, sendo sua execução por cravação, escavação ou mista (VELOSO; LOPES, 2010). Quanto a seus materiais constituintes, podem ser madeira, aço, concreto, argamassa, calda de cimento, e etc. Existem diversos tipos de estacas, dentre as quais, podemos citar as mais utilizadas, como a de madeira, metálica, pré-moldada de concreto, moldada *in loco* de concreto, tipo Franki, mega e a hélice contínua.

Com relação à estaca de madeira, estas são classificadas como de deslocamento, uma vez que sua introdução no solo se dá por meio da cravação de troncos de árvores, de maneira reta. As estacas de deslocamento são aquelas que possuem como principal característica no processo de instalação a não retirada do solo, e, sim, deslocamento vertical e lateral do mesmo, em um volume igual ao que ocupará a estaca (ALVES; LOPES, 2004). A metálica, por sua vez, é produzida industrialmente, podendo apresentar diferentes formatos de seções transversais, sendo esta, introduzida no solo também pelo método de cravação, como é apresentado na norma NBR 6122 (ABNT, 2019).

Os tipos de estacas moldadas *in loco* são executados a partir de escavações no solo e posterior introdução do seu material constituinte, que pode ser concreto, calda de cimento ou argamassa. A fundação do tipo Franki é um exemplo desse tipo estaca, é moldada *in loco* e executada pela cravação, através de sucessivos golpes de um pilão, de um tubo de ponta fechada por uma bucha seca constituída de pedra e areia, anteriormente inserida na extremidade inferior do tubo por atrito (NBR 6122, ABNT 2019). Já a fundação do tipo raiz é moldada *in loco* e armada, preenchida com argamassa de cimento e areia, executada por perfuração rotativa ou rotopercussiva, revestida integralmente, no trecho em solo, por um conjunto de tubos metálicos recuperáveis (NBR 6122, ABNT 2019).

No que se refere ao tubulão, este é um elemento de fundação profunda em que, pelo menos na etapa final da escavação do terreno, faz-se necessário o trabalho manual de um operador em profundidade para executar o alargamento de base ou para a limpeza do fundo da escavação, uma vez que neste tipo de fundação as cargas são resistidas preponderantemente pela ponta (NBR 6122, ABNT 2019). Existem dois tipos de tubulões, a céu aberto e a ar comprimido. Os tubulões a céu aberto podem ou não, possuir contenção lateral contínua ou parcial, tendo sua profundidade de execução restringida pela presença do lençol freático. Já os tubulões a ar comprimido podem ser executados abaixo do lençol freático, visto que são utilizados dispositivos que balanceiam a pressão interna com a pressão da água, impedindo sua entrada no local de trabalho (NBR 6122, ABNT 2019).

3.1.3 Estaca Hélice Contínua

A norma NBR 6122 (ABNT, 2019) define estaca Hélice Contínua Monitorada (HCM) como sendo uma estaca de concreto moldada *in loco*, cuja perfuração no solo se dá por meio de um trado helicoidal contínuo, que simultaneamente à sua retirada, tem-se a injeção de concreto e posteriormente a introdução da armadura.

De acordo com Albuquerque *et al.* (2001) o surgimento dessa fundação ocorreu em meados da década de 50 nos Estados Unidos; após a década de 70, na Europa; e, na década de 80 chegou ao Brasil, alcançando significativo crescimento e disseminação da solução no meio geotécnico. No Brasil, por volta de 1987, a execução se dava com a utilização de mesas giratórias adaptadas a guindastes, reproduzindo a experiência da década de 50 nos Estados Unidos (GEOFIX, 2015).

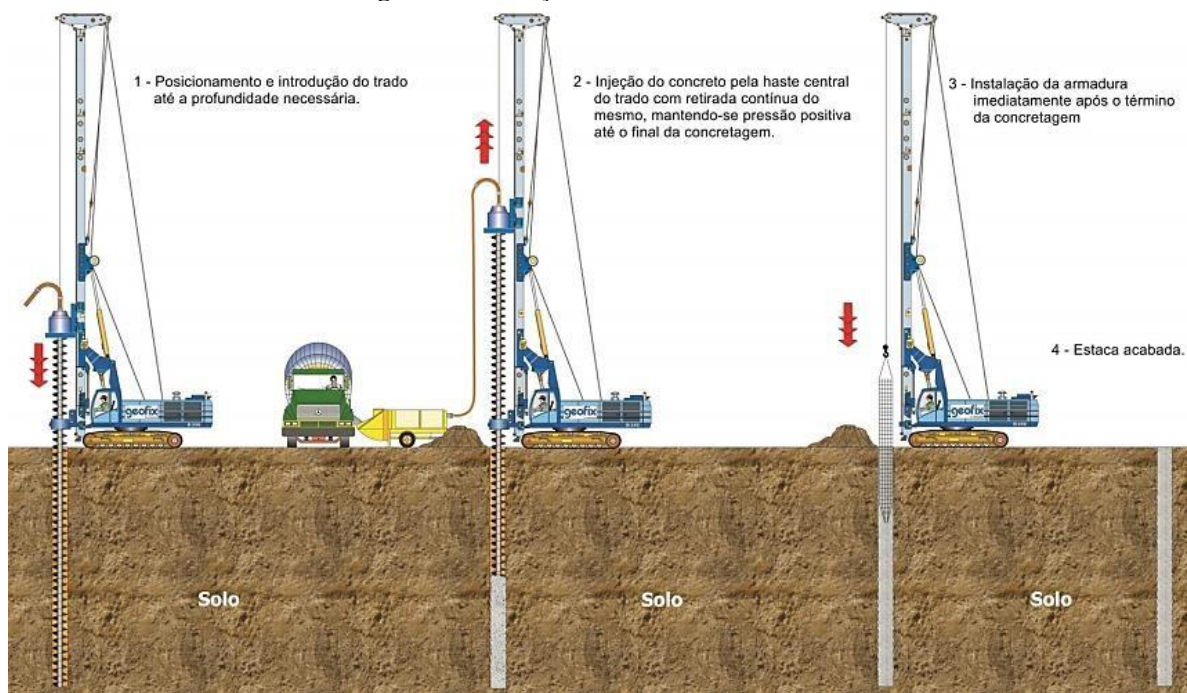
O aparecimento desse tipo de estaca se deu utilizando equipamentos de baixo torque e executando pequenos diâmetros. Devido a essas limitações, os equipamentos não tinham

capacidade de introduzir o trado em grandes profundidades e, para penetração em solos mais resistentes, a perfuração era procedida de retirada de solo por ascensão vertical. Este processo causava descompressão do solo e, conseqüentemente, baixa capacidade de carga. Além disso, utilizava-se argamassa para preenchimento da estaca, o que onerava, demasiadamente, o custo dessa estaca (GEOFIX, 2015).

Devido ao avanço tecnológico, a execução desta estaca apresentou diferentes mudanças. Algumas das mais importantes alterações foram a substituição do seu material constituinte, que inicialmente era a argamassa e passou a ser o concreto, a elaboração de equipamentos que permitiram o monitoramento de sua execução, aumento nos diâmetros e comprimento das estacas, bem como o avanço na qualidade desses equipamentos que passaram a permitir sua execução nos mais variados tipos de solos (CAPUTO; MANRUBIA, 1996).

Atualmente, sua execução acontece em três etapas: posicionamento do equipamento e perfuração do solo, concretagem, que acontece simultaneamente à retirada do trado, e inserção da armadura (Figura 4). A norma NBR 6122 (ABNT, 2019) detalha que o equipamento deve apresentar características mínimas, estabelecidas pelo projetista e pelo executor, de modo a assegurar que seja atingida a profundidade especificada no projeto, com torque e força de arranque compatíveis com o diâmetro da estaca e com a resistência do solo a ser perfurado.

Figura 4 - Execução da estaca hélice contínua



Fonte: GEOFIX, 2016.

Inicialmente, para a execução dessas estacas, é necessário que o terreno seja nivelado, de modo a permitir a movimentação da perfuratriz, devendo apresentar a locação topográfica

das estacas. O equipamento de escavação deve ser posicionado e nivelado para assegurar a centralização e verticalidade da estaca, verificando-se o diâmetro do trado para assegurar que está de acordo com as premissas de projeto (GEOFIX, 2015).

A perfuração consiste na introdução da hélice no terreno, por meio de movimento rotacional transmitido por motores hidráulicos acoplados na extremidade superior da hélice, até a cota de projeto sem que a hélice seja retirada da perfuração em nenhum momento (VELOSO; LOPES, 2010). Durante a retirada do trado, um limpador mecânico remove o solo aderido entre as hélices (em trados de pequenos diâmetros, essa limpeza pode ser manual).

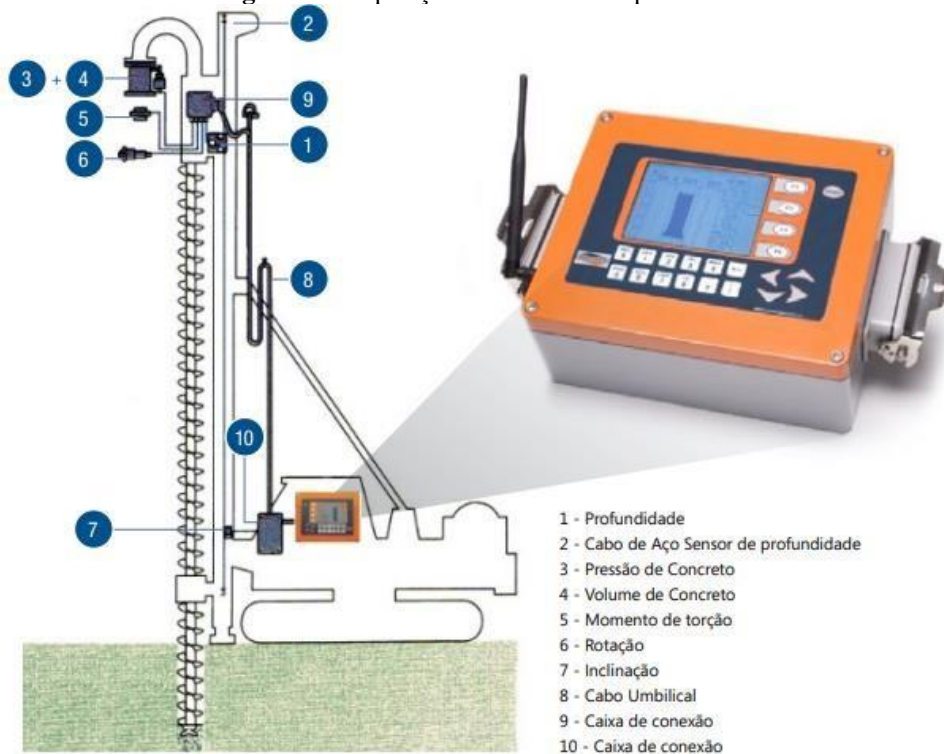
Alcançada a profundidade determinada no projeto, inicia-se a fase de concretagem. Nessa fase inicialmente, a tampa metálica do trado é aberta, por meio do peso do concreto, e ao mesmo tempo a hélice é retirada. Para bloquear a entrada de solo ou água por meio do tubo central, é colocado na extremidade do trado essa tampa metálica, que só é aberta na concretagem. A partir desse momento, à medida que o concreto é bombeado, controla-se a velocidade do trado, de maneira que a pressão no concreto seja sempre mantida positiva, garantido o preenchimento adequado da estaca.

A norma NBR 6122 (ABNT, 2019) especifica que o concreto deve observar as seguintes características: para o concreto com resistência de 30 MPa (C30), abatimento entre 220 mm e 260 mm, diâmetro de agregado de 4,75 mm a 12,5 mm; consumo mínimo de cimento de 400 kg/m³ e fator a/c ≤ 0,6; para o concreto com resistência de 40 MPa (C40), abatimento entre 220 mm e 260 mm, diâmetro de agregado de 4,75 mm a 12,5 mm, consumo mínimo de cimento de 400 kg/m³ e fator a/c ≤ 0,45. Em ambos os casos o teor de exsudação deve ser inferior a 4%.

Após a concretagem, a armadura é colocada com cuidado para não contaminar o concreto. É desejável que se tenha uma armadura suficientemente rígida e pesada para facilitar a instalação (FALCONI, *et al.*, 2014). A colocação da armadura em forma de gaiola deve ser feita imediatamente após a concretagem e limpeza das impurezas do topo da estaca, sendo sua descida auxiliada por peso ou vibrador (NBR 6122, ABNT 2019).

É denominada como monitorada, pois, esta possui equipamentos eletrônicos que monitoram e garantem um elevado controle na execução e na segurança desse elemento. Esse equipamento é um computador de bordo acoplado no comando da perfuratriz, que é comandada pelo operador, e possui sensores eletrônicos de profundidade, torque, velocidade, pressão e volume de concreto, emitindo posteriormente um relatório gráfico de monitoramento para cada estaca executada. A posição desses sensores é exibida na Figuras 5.

Figura 5 - Disposição dos sensores na perfuratriz

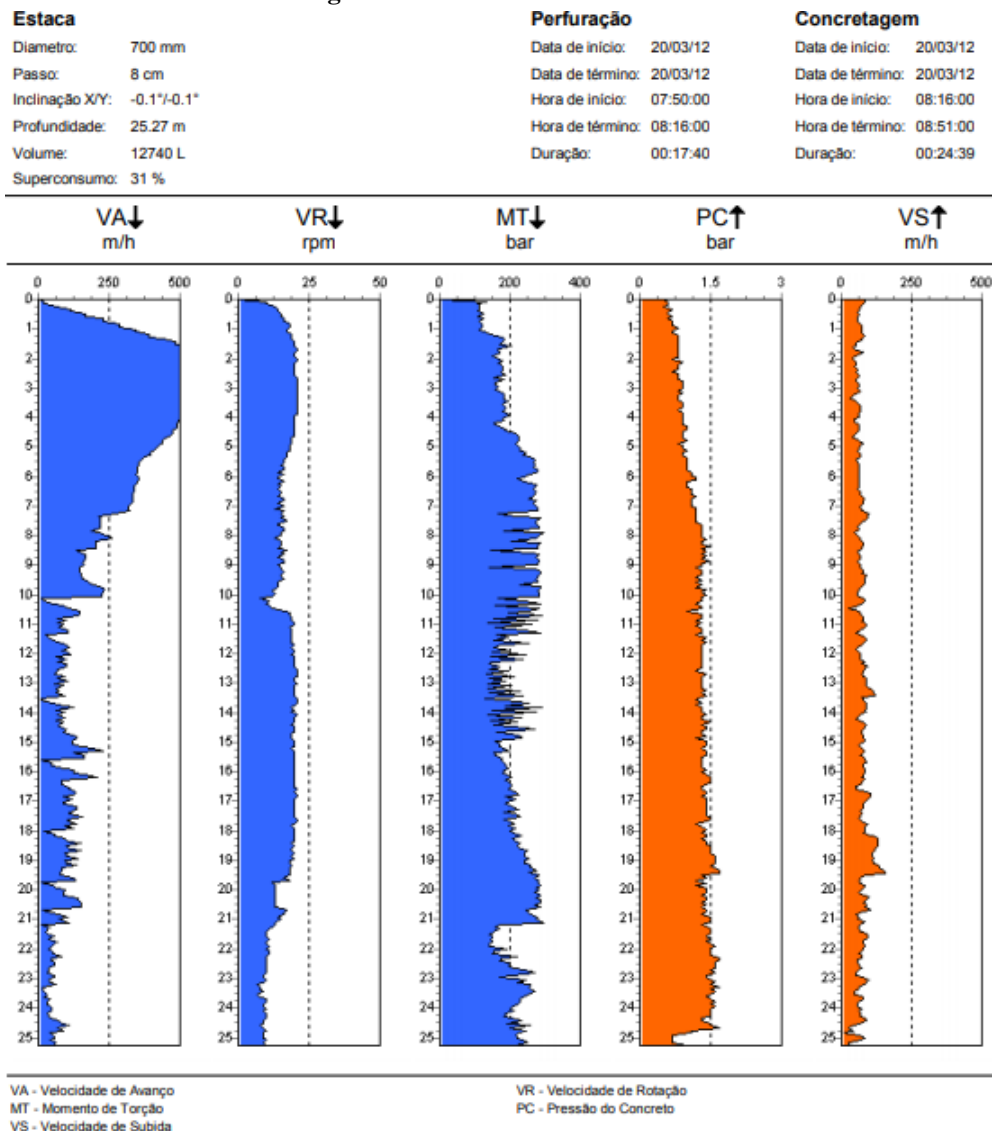


Fonte: GEOFIX, 2016.

A norma NBR 6122 (ABNT, 2019) determina que todas as fases de execução dessa fundação devem ser monitoradas eletronicamente a partir desses sensores instalados na perfuratriz, registrando-se: nivelamento do equipamento e prumo do trado; pressão no torque; velocidade de avanço do trado; rotação do trado; cota de ponta do trado; pressão de concreto durante a concretagem; sobreconsumo de concreto; velocidade de extração do trado.

A norma ainda solicita o preenchimento do boletim de controle de execução diariamente para cada estaca, devendo constar as seguintes informações: identificações gerais; características do equipamento; identificação da estaca; cota do terreno na posição da estaca; comprimento executado da estaca; comprimento concretado da estaca; data e horário de início e fim da execução da estaca; data e horário de início e fim da concretagem; desvio de locação (se houver); inclinação do trado; volume de concreto real e teórico por estaca; pressão de torque durante perfuração; rotação do trado; velocidade de avanço do trado; pressão de injeção do concreto; velocidade de extração do trado; posicionamento da armação; observações relevantes; nome e assinatura do executor; nome e assinatura da fiscalização e do contratante. O gráfico de registro da execução da estaca é exibido na Figura 6.

Figura 6 - Ficha de controle da estaca



Fonte: GEOFIX, 2016.

As principais vantagens dessa estaca são: alta produtividade, ausência de vibrações, monitoramento eletrônico de profundidade, inclinação do trado, velocidade de avanço e de rotação do trado na perfuração, pressão do motor, velocidade de subida do trado e pressão de concretagem na retirada do trado, penetração em camadas resistentes (até o limite do trado), estacas com elevada capacidade de carga, podem possuir diâmetros de até 1,5 m (GEOFIX, 2016).

3.2 RECALQUES

O desempenho de uma obra de engenharia civil, ao longo de sua vida útil, especialmente da sua fundação, é consequência do grau de alteração do maciço do solo durante a fase de

execução desta última (AOKI; CINTRA, 2000). Essa alteração do maciço de solo pode ser ascendente (levantamento) ou descendente (recalque).

A norma NBR 6122 (ABNT, 2019) denomina recalques como sendo deslocamentos verticais descendentes, que podem ser absolutos ou relativos. Sendo assim, o recalque pode ser definido como o rebaixamento do solo, ocasionado por um carregamento nele imposto. Essa deformação pode acarretar diversos danos à estrutura, sendo os mais comuns as fissuras e trincas.

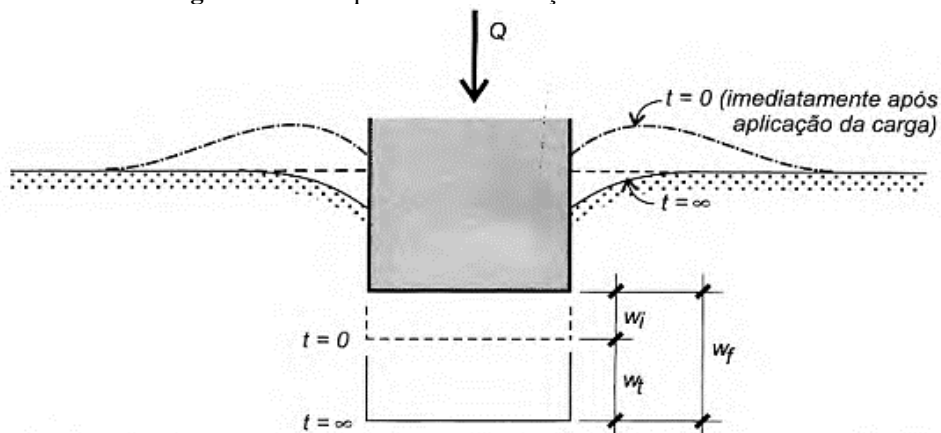
Esse recalque em fundações acontece quando a interação solo-estrutura se rompe, fazendo assim com que a fundação afunde mais do que o previsto em projeto. Toda estrutura apresenta recalques, porém, é importante que apresente limites dentro dos recalques admissíveis, sendo esta limitação parte imprescindível nas análises e projetos de fundações, definindo então um valor a partir do qual se considera problemática a segurança ou o desempenho da estrutura (MILITITSKY; CONSOLI; SHCNAID, 2015).

A seguir são apresentados os tipos de recalques, os valores admissíveis para o bom funcionamento da estrutura, o efeito grupo e os métodos de estimativa para fundações profundas.

3.2.1 Tipos de Recalque

Conforme apontam Veloso e Lopes (2010), uma fundação, ao ser carregada, sofre recalques que se processam, em parte, imediatamente após o carregamento e, em parte, após algum tempo. O recalque que ocorre imediatamente após o carregamento é chamado de imediato ou elástico (w_i), e a outra parcela que ocorre com o tempo, de recalque por adensamento (w_t), ambos representados na Figura 7. O recalque final (w_f) é definido como sendo a soma dessas duas parcelas ($w_f = w_i + w_t$).

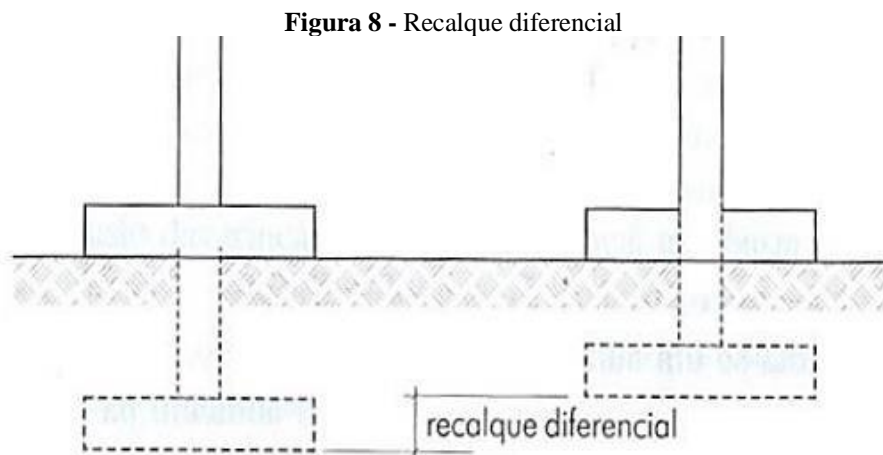
Figura 7 - Recalques de uma fundação sob a ótica do solo



Fonte: Veloso; Lopes, 2010.

Magalhães (2005) afirma que se pode identificar considerável diferença nos valores do recalque absoluto, principalmente no que se refere a diferentes tipos de solo e fundações. Quanto ao tipo de solo, pode-se observar que, ao comparar uma argila dura e outra mole, o recalque imediato é mínimo para a argila dura e valores consideravelmente maiores para argila mole. No tocante ao tipo de fundação, é possível verificar que nas do tipo rasa, os recalques são, em geral, mais significantes que os calculados em fundações profundas.

Tratando-se da classificação dos recalques, Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) apontam que esses são classificados em dois tipos: o recalque absoluto e o diferencial. O primeiro é o que ocorre em um elemento de fundação isolado. Já o segundo ocorre quando um elemento de fundação desloca e outro não, ou quando ambos são deslocados, mas com intensidades diferentes (Figura 8). Este último deve ser sempre impedido, uma vez que sua aparição pode ocasionar o aparecimento de diversas patologias e, em casos mais graves, pode causar danos difíceis e onerosos de serem reparados.



Fonte: Rebello, 2008.

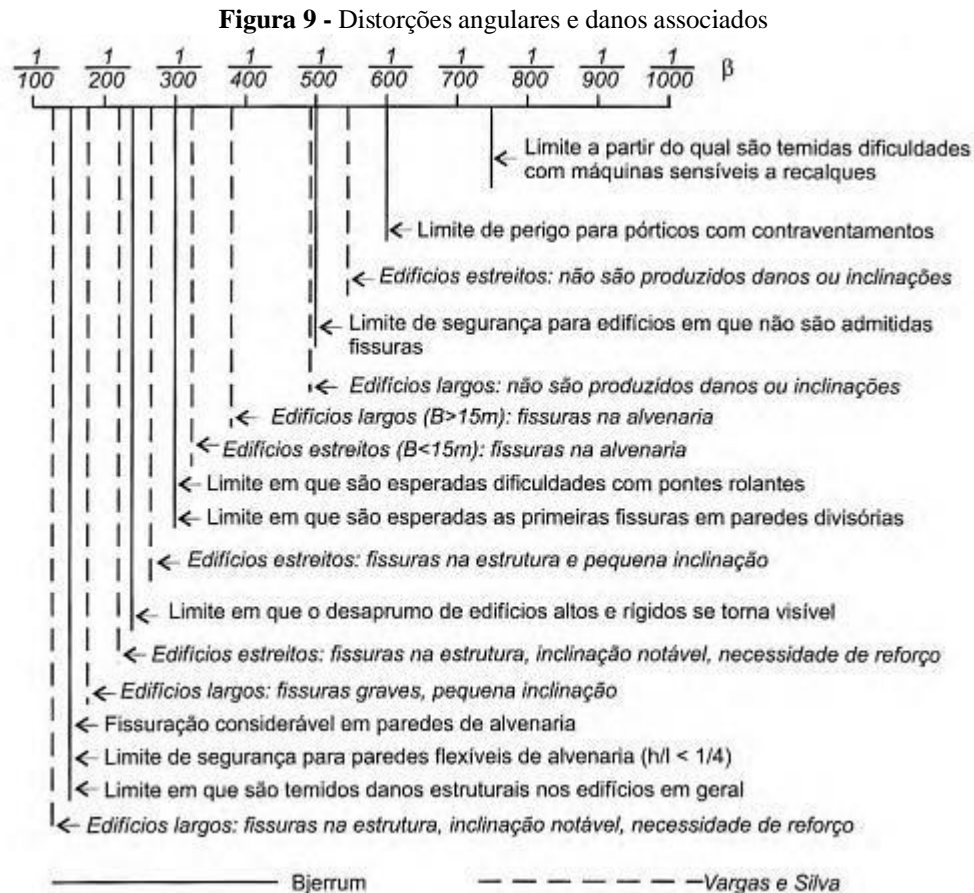
3.2.2 *Recalques Admissíveis*

Os valores de recalques admissíveis estão correlacionados com as deformações limites que uma estrutura pode ser submetida. A norma NBR 6122 (ABNT, 2019) define como tensão admissível a máxima tensão que, aplicada ao terreno pela fundação, atende, com fatores de segurança predeterminados, aos estados limites últimos de serviço.

A norma acrescenta ainda que a definição dos valores limites para deslocamentos e deformações deve considerar: a confiabilidade com a qual os valores de deslocamentos aceitáveis podem ser estabelecidos; velocidade dos recalques e movimentos do terreno de fundação; tipo de estrutura e material de construção; tipo de fundação; natureza do solo;

finalidade da obra; influência nas estruturas, utilidades e edificações vizinhas. Teixeira e Godoy (1998) afirmam que vários estudos foram realizados objetivando a obtenção desses limites de segurança, porém, nem todas essas pesquisas possuíam informações completas sobre o comportamento geotécnico da fundação e seus efeitos.

Veloso e Lopes (2010) apresentam os valores de distorções angulares associados a suas consequências na estrutura, conforme Figura 9.



Fonte: Veloso; Lopes, 2010.

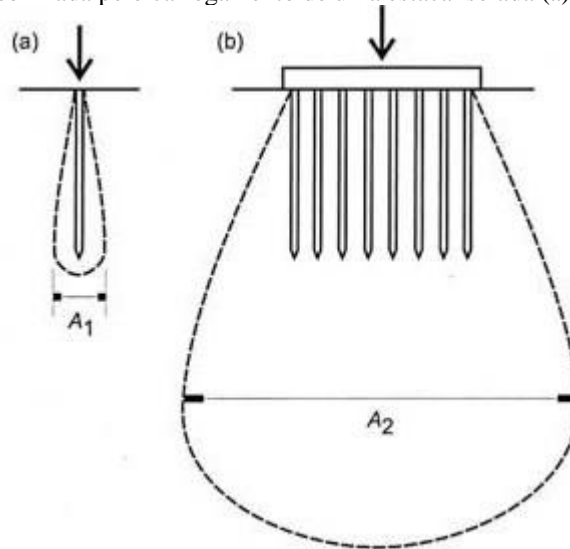
É importante que esses valores sejam utilizados com cautela, pois tais contribuições foram estudadas há muito tempo e desde então, diversas mudanças estruturais e construtivas ocorreram. Ou seja, o limite que separa o admissível do inadmissível, ao se tratar de recalques, mostra-se como uma questão subjetiva, a ser determinado pelos projetistas (SANTOS, 2014; SOARES, 2005).

3.2.3 Efeito de Grupo

A norma NBR 6122 (ABNT, 2019) define efeito de grupo como sendo a interação entre as diversas estacas ou tubulões constituintes de uma fundação, no processo de transmissão ao terreno das cargas que lhes são aplicadas, acarretando uma superposição de tensões, de tal sorte

que o recalque do grupo resulta, em geral, diferente daquele do elemento isolado (Figura 10).

Figura 10 - Massa de solo mobilizada pelo carregamento de uma estaca isolada (a) e de um grupo de estacas (b)



Fonte: Veloso; Lopes, 2010.

Geralmente, o efeito de grupo é estudado separadamente em termos de capacidade de carga e em termos de recalques. Quando as estacas estão relativamente distantes num grupo, o modo de transferência de carga não é afetado, e o recalque do grupo pode ser estimado pela superposição de efeitos das várias estacas analisadas como isoladas (submetidas a uma carga equivalente a carga do grupo dividida pelo número de estacas). Quando o espaçamento é pequeno, as estacas têm seu modo de transferência afetado, e as estacas periféricas absorvem mais carga do que as estacas internas (VELOSO; LOPES, 2010).

3.2.4 Métodos de Estimativa

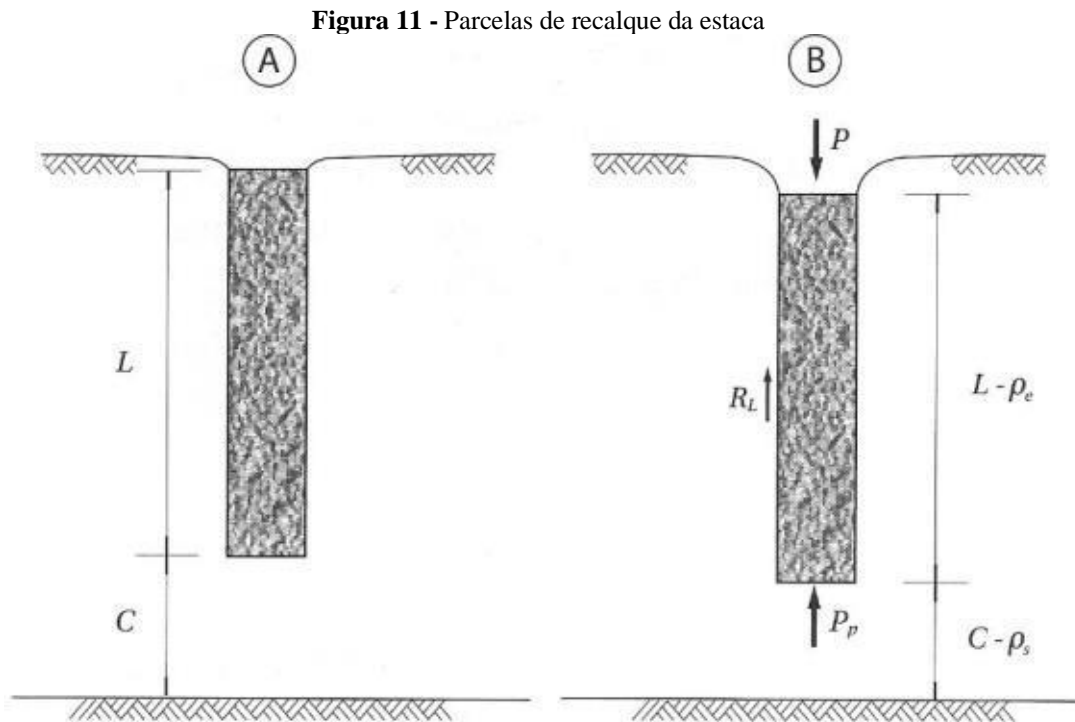
Na estimativa dos recalques em estacas isoladas, é possível utilizar diversos métodos, dentre eles os elásticos. A previsão por meio da teoria da elasticidade assume que o solo transmite as cargas como um material sólido, elástico, homogêneo e isotrópico, definido por dois parâmetros de deformação, o seu módulo de elasticidade e seu coeficiente de Poisson. Sendo assim, os efeitos das cargas transmitidas são considerados acima e abaixo do ponto de aplicação. Este enfoque também permite que os deslocamentos da estaca sejam diferentes dos deslocamentos do solo adjacente, ou seja, permite a consideração da não linearidade, fenômeno que ocorre com frequência em estacas reais. Estas duas características, acima citadas, constituem-se em vantagens da aproximação elástica em relação à aproximação por funções de transferência de carga (OLIVEIRA, 1991).

De acordo com Souza (2018), mesmo que o solo não se comporte como um material elástico, homogêneo e isotrópico, geralmente ocorre a utilização da teoria da elasticidade para a análise de recalques, pois os métodos simplificam os cálculos e apresentam razoáveis aproximações com a realidade.

A seguir são demonstrados os procedimentos de cálculo e as considerações a serem feitas para se estimar recalques pelos métodos de Cintra e Aoki (2010), Poulos e Davis (1980) e Randolph e Wroth (1978).

3.2.4.1 Método de Cintra e Aoki (2010)

De acordo com os autores, ao se analisar uma estaca qualquer, de comprimento L , embutida no terreno, e com a sua base a uma distância C da superfície do maciço considerado indeslocável, submetida à aplicação de uma carga P no seu topo (Figura 11), surgirão dois tipos de deformações: as de encurtamento elástico da estaca (ρ_e) e as verticais de compressão do solo.



Fonte: Cintra e Aoki, 2010.

O encurtamento elástico da própria estaca (ρ_e), é equivalente ao recalque de igual magnitude da cabeça da estaca, mantida sua base imóvel, considerando-a como peça estrutural submetida à compressão. Além disso, as deformações verticais de compressão ocorrem nos estratos de solo abaixo da base da estaca até o indeslocável, o que resulta em um recalque (ρ_s) da base. Desse modo, observa-se que o recalque total (ρ), vertical, da estaca é dado pela

somatória dos dois efeitos, conforme Equação 1.

$$\rho = \rho_e + \rho_s \quad (1)$$

Para calcular o encurtamento elástico da estaca devemos construir o diagrama de esforço normal ao longo da fundação, por meio de uma metodologia adaptada por Aoki (1979). Para tal, é adotada uma suposta estaca, cilíndrica, maciça, de concreto, que atravessa três camadas diferentes de solo, e considera-se que seja conhecida sua capacidade de carga (R), a qual pode ser determinada a partir da Equação 2:

$$R = R_p + R_L \quad (2)$$

Em que:

R_p é a resistência de ponta da estaca;

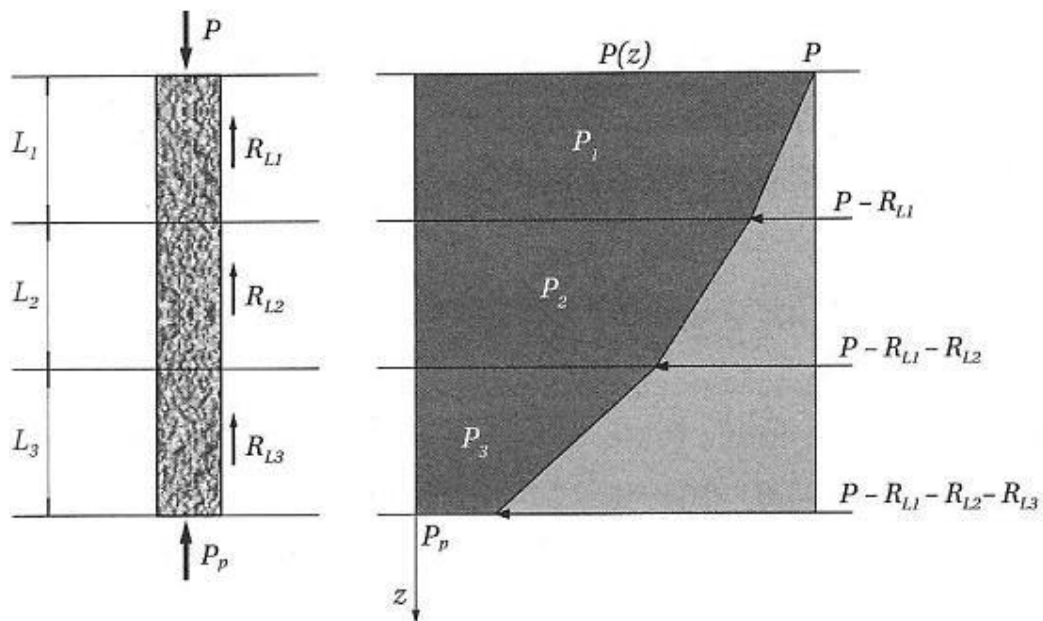
R_L é a resistência lateral da estaca.

Além disso, admite-se que a carga vertical (P) aplicada na cabeça da estaca seja superior à sua resistência lateral (R_L) e inferior à sua capacidade de carga (R). Considera-se ainda que todo atrito lateral (R_L) esteja mobilizado e que a reação na ponta (P_p) seja inferior à resistência de ponta na ruptura (R_p) e suficiente para o equilíbrio das forças, conforme a Equação 3:

$$P_p = P - R_L < R_p \quad (3)$$

A partir da análise dessa estaca, é possível esboçar um digrama simplificado para o esforço normal, tal como exibido na Figura 12, em que P_1 , P_2 e P_3 são os valores médios desses esforços nos segmentos L_1 , L_2 e L_3 .

Figura 12 - Diagrama de esforço normal na estaca



Fonte: Cintra e Aoki, 2010.

Temos então P_1 , P_2 e P_3 definidos de acordo com as Equações 4, 5 e 6:

$$P_1 = P - \frac{\kappa_{L1}}{2} \quad (4)$$

$$P_2 = P - R_{L1} - \frac{R_{L2}}{2} \quad (5)$$

$$P_3 = P - R_{L1} - R_{L2} - \frac{R_{L3}}{2} \quad (6)$$

Aplicando a Lei de Hooke, Cintra e Aoki (2010) definem o encurtamento elástico (ρ_e) da estaca como a Equação 7:

$$\rho_e = \frac{1}{A \cdot E_c} \sum (P_i \cdot L_i) \quad (7)$$

Em que:

A : área da seção transversal do fuste da estaca;

E_c : módulo de elasticidade do concreto, suposto constante ($E_c = 21$ GPa para hélice contínua).

Para o recalque do solo (ρ_s), Vesic (1975) define que esse deslocamento pode ser subdividido em duas parcelas, tal como é exibido na Equação 8:

$$\rho_s = \rho_{s,p} + \rho_{s,L} \quad (8)$$

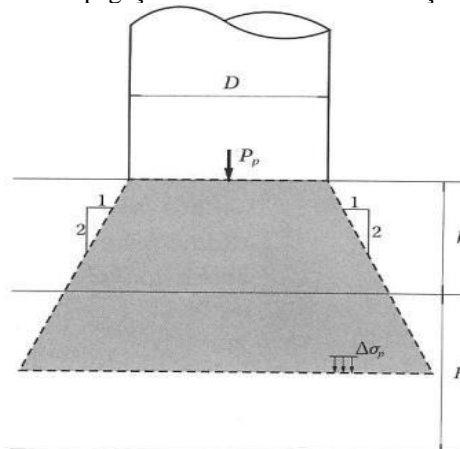
Em que:

$\rho_{s,p}$: recalque devido à reação de ponta;

$\rho_{s,L}$: parcela relativa à resistência lateral.

Para estimar o recalque (ρ_s), Aoki (1984) deduziu uma expressão. Na formulação, inicialmente, é considerada a força P_p vertical para baixo, aplicada ao solo, provocando um acréscimo de tensões numa camada abaixo qualquer, de espessura (H), e que (h) seja a distância vertical do ponto de aplicação da força ao topo dessa camada, de acordo com a Figura 13.

Figura 13 - Propagação de tensões devido à reação de ponta



Fonte: Cintra e Aoki, 2010.

Supondo a propagação de tensões 1:2, o acréscimo de tensões devido a reação de ponta ($\Delta\sigma_p$) na linha média dessa camada é dado pela Equação 9. A proporção 1:2 indica que para cada metro de solo adjacente na horizontal são acrescidos dois na vertical, ou seja, o espraiamento das tensões ocorre formando um ângulo de 60° com a horizontal.

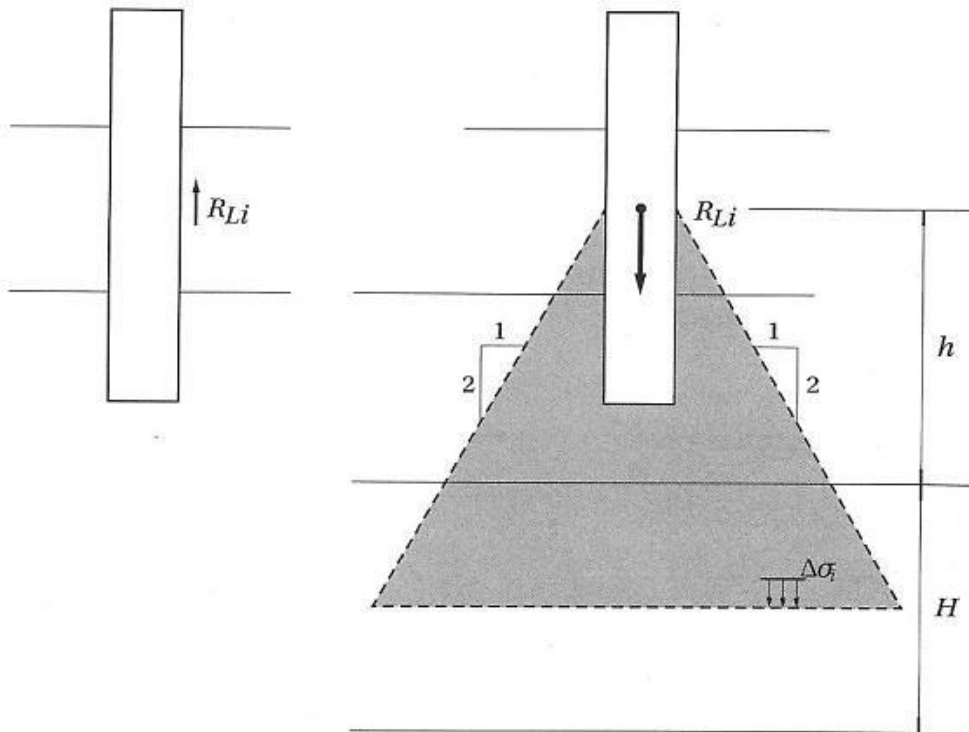
$$\Delta\sigma_p = \frac{4P_p}{\pi \left(D + h + \frac{H}{2}\right)^2} \quad (9)$$

Em que:

D é o diâmetro da base da estaca.

De maneira semelhante, as reações das parcelas de resistência lateral constituem forças aplicadas pela estaca ao solo, verticais para baixo, as quais também provocam acréscimo de tensões naquela mesma camada, tal como exibido na Figura 14.

Figura 14 - Propagação de tensões devido à resistência lateral



Fonte: Cintra e Aoki, 2010.

Nessas condições, a Equação 10 define o acréscimo de tensões devido às cargas laterais:

$$\Delta\sigma_i = \frac{4R_{Li}}{\pi \left(D + h + \frac{H}{2}\right)^2} \quad (10)$$

Em que:

D é o diâmetro do fuste da estaca.

Assim, levando em consideração todas as parcelas R_{Li} mais a força P_p , o acréscimo total de tensões ($\Delta\sigma$) na camada é dado pela Equação 11:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_p + \sum\Delta\sigma_i \quad (11)$$

Repetindo esse processo, é possível estimar o acréscimo de tensões para cada uma das camadas subjacentes, a partir da base da estaca, até o indeslocável. Finalmente, Cintra e Aoki (2010) definem o recalque devido ao solo (ρ_s) de acordo com a Equação 12.

$$\rho_s = \sum \left(\frac{\Delta\sigma}{E_s} \cdot H \right) \quad (12)$$

Em que E_s é o módulo de deformabilidade da camada de solo, cujo valor pode ser obtido pela Equação 13:

$$E_s = E_0 \left(\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (13)$$

Em que:

E_0 é o módulo de deformabilidade do solo antes da execução da estaca ($E_0 = 4 \cdot K \cdot N_{SPT}$ para estacas hélice contínua, em que K é o coeficiente empírico do método Aoki-Velloso (1975));

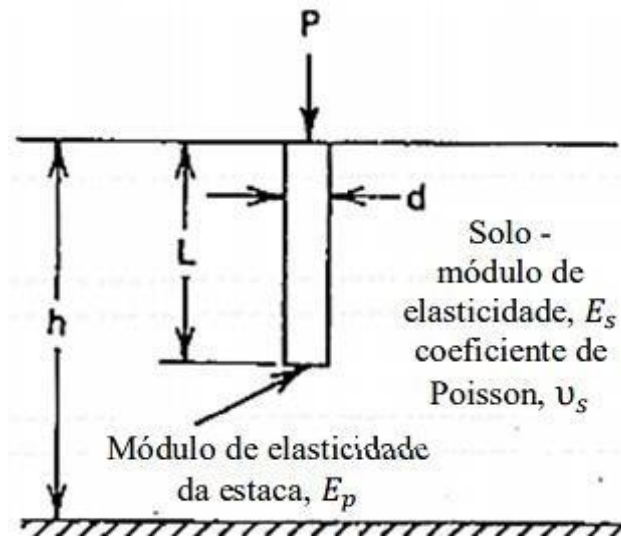
σ_0 é a tensão geostática no centro da camada;

n é o expoente que depende da natureza do solo: $n = 0,5$ para materiais granulares e $n = 0$ para argilas duras e rijas.

3.2.4.2 Método Poulos e Davis

No método proposto por Poulos e Davis (1980), baseado na solução de Mindlin (1936) admite-se que a estaca é fracionada em elementos uniformemente carregados e os esforços atuam na superfície dos elementos das estacas. Magalhães (2005), afirma que inicialmente a solução era aplicada apenas em estacas incompressíveis, em meio elástico semi-infinito, com coeficiente de Poisson igual a 0,5. Após um tempo obtiveram-se soluções que permitiram sua aplicação em estacas compressíveis, em solo de espessura finita, com ponta em material resistente, com coeficiente de Poisson diferente de 0,5. Na Figura 15 são exibidas as variáveis utilizadas no método.

Figura 15 - Fatores para o cálculo de recalques em estacas



Fonte: Adaptado de Poulos e Davis, 1980.

Para estacas flutuantes, que são aquelas que se encontram situadas dentro da massa de solo, o recalque (ρ) é obtido a partir da Equação 14:

$$\rho = \frac{P * I_F}{D * E_s} \quad (14)$$

Em que:

P é a carga aplicada na estaca;

E_s o módulo de deformabilidade do solo;

D é o diâmetro da estaca;

$I_F = I_0 \cdot R_k \cdot R_h \cdot R_v$, onde I_0 é o fator de influência para deformações; R_k é o fator de correção para a compressibilidade da estaca, R_h é a espessura h (finita) de solo compressível; R_v é a correção para o coeficiente de Poisson do solo. Os valores de I_0 , R_k , R_h e R_v são obtidos por meio dos ábacos apresentados por Poulos e Davis (1980), exibidos na Figura 16. Considerando que:

L é o comprimento da estaca;

h é a espessura da camada de solo;

B é o diâmetro do fuste da estaca;

B_b é o diâmetro da base da estaca;

E_p é o módulo de elasticidade do material da estaca;

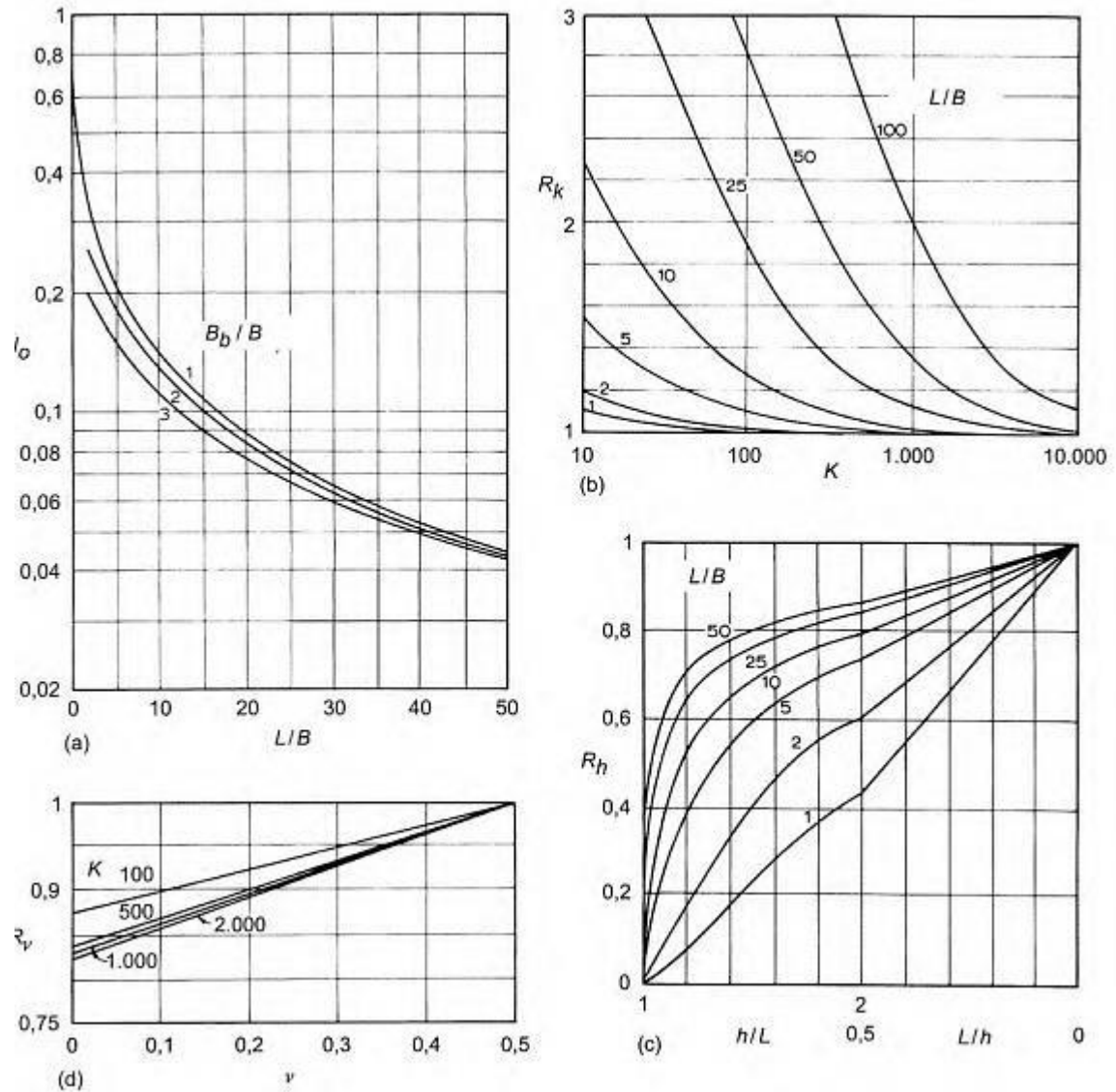
E_b é o módulo de elasticidade da camada resistente de solo;

ν é o coeficiente de Poisson do solo;

$K = \frac{E_p}{E_s} \cdot R$ sendo R a relação entre a área da estaca e sua área circunscrita, sendo 1 para

estacas maciças.

Figura 16 - Fatores para o cálculo de recalques em estacas

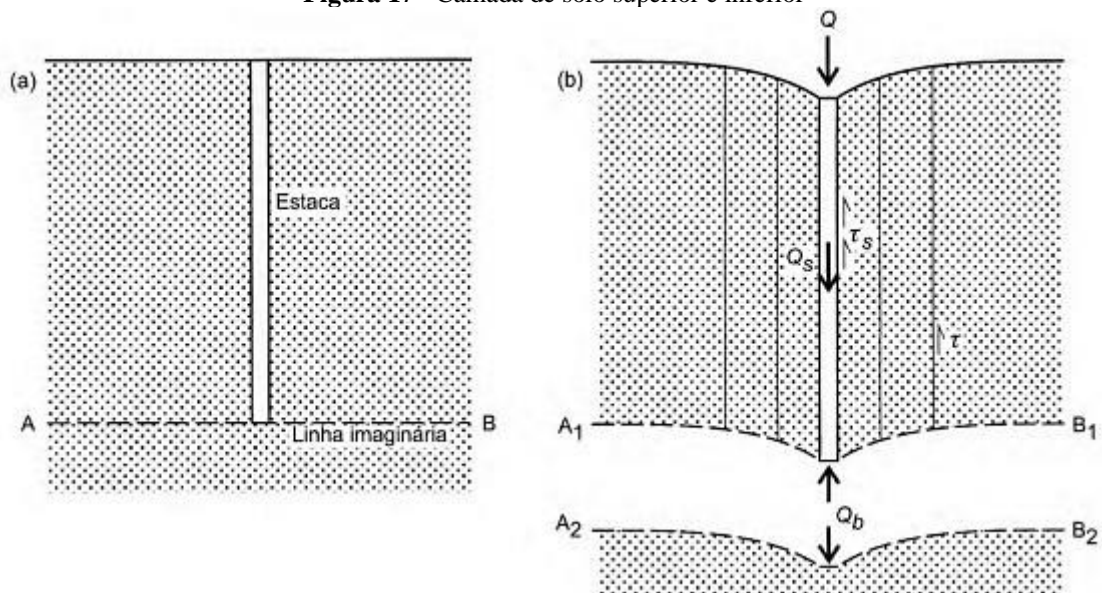


Fonte: Veloso e Lopes, 2010.

3.2.4.3 Método Randolph e Wroth

O método definido por Randolph e Wroth (1978) divide o solo em duas camadas, a camada superior, que se deforma devido à carga transferida pelo fuste e a camada inferior, que se deforma devido à carga transferida pela base da estaca (Figura 17).

Figura 17 - Camada de solo superior e inferior



Fonte: Veloso e Lopes, 2010.

A solução completa que fornece o recalque (w_t) é exibido na Equação 15:

$$\frac{P}{G_L \cdot r \cdot w_t} = \frac{\frac{4\eta}{(1-\nu) \cdot \xi} + \rho \frac{2\pi \cdot tg(\mu L) \cdot L}{\zeta \cdot \mu L \cdot r_0}}{1 + \frac{1}{\pi\lambda} \cdot \frac{4\eta}{(1-\nu) \cdot \xi} \cdot \frac{tg(\mu L)}{\mu L} \cdot \frac{L}{r_0}} \quad (15)$$

Em que:

P é a carga aplicada na estaca;

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

ν é o coeficiente de Poisson do solo;

L é o comprimento da estaca;

r_0 é o raio da estaca.

As demais variáveis são dadas por:

$\eta = \frac{r_b}{b}$, onde r é o raio da ponta da estaca;

$\xi = \frac{r_0}{G_b}$, onde G é o módulo cisalhante abaixo da ponta da estaca;

$\rho = \frac{G_m}{r \cdot G_L}$, onde G é o módulo cisalhante médio do solo no trecho penetrado pela estaca;

$\lambda = \frac{E_p}{G_L}$, onde E é o módulo de elasticidade do material da estaca.

$$\zeta = \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right)$$

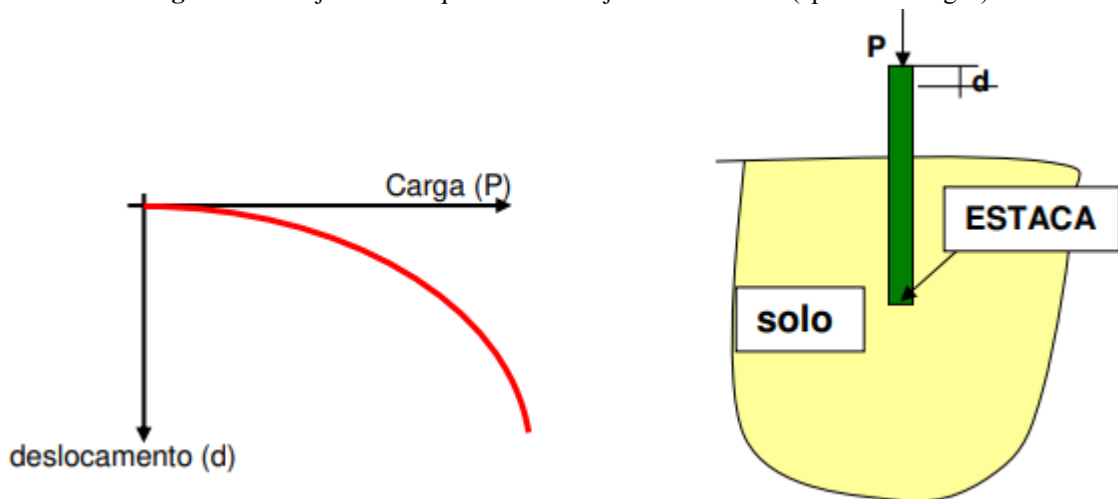
$$r_m = L\{0,25 + \xi[2,5\rho(1-\nu) - 0,25]\}$$

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

3.3 PROVA DE CARGA

O ensaio de prova de carga consiste em se carregar uma estaca (à compressão, à tração ou horizontalmente) com incrementos progressivos de carga (P) e simultaneamente medir os deslocamentos correspondentes (d), resultando um gráfico carga x deslocamento conforme apresentado na Figura 18 (ALONSO, 2018).

Figura 18 - Trajetória de equilíbrio do conjunto estaca-solo (“prova de carga”)



Fonte: Alonso, 2018.

De acordo com Milititsky (1991), a prova de carga é o ensaio mais eficiente para a determinação do comportamento de fundações profundas sob carga, sendo o único realmente confiável. Este ensaio possui grande importância quando utilizado de maneira prévia nos projetos de fundações e demais obras geotécnicas, pois a partir dele é possível reduzir o fator de segurança, garantido que a fundação possua desempenho conforme especificado em projeto e, por conseguinte, diminuindo os custos da obra, especialmente as de grande porte.

A prova de carga pode ser estática ou dinâmica. A primeira consiste, basicamente, em aplicar esforços estáticos à estaca e registrar os deslocamentos correspondentes. Já a dinâmica difere da anterior devido ao carregamento ser aplicado dinamicamente, ou seja, por meio de golpes de um sistema de percussão adequado, que compreende os conjuntos de impacto e amortecimento. Como a prova de carga estática é o foco deste trabalho, seus detalhes são exibidos no tópico seguinte.

3.3.1 Prova de Carga Estática

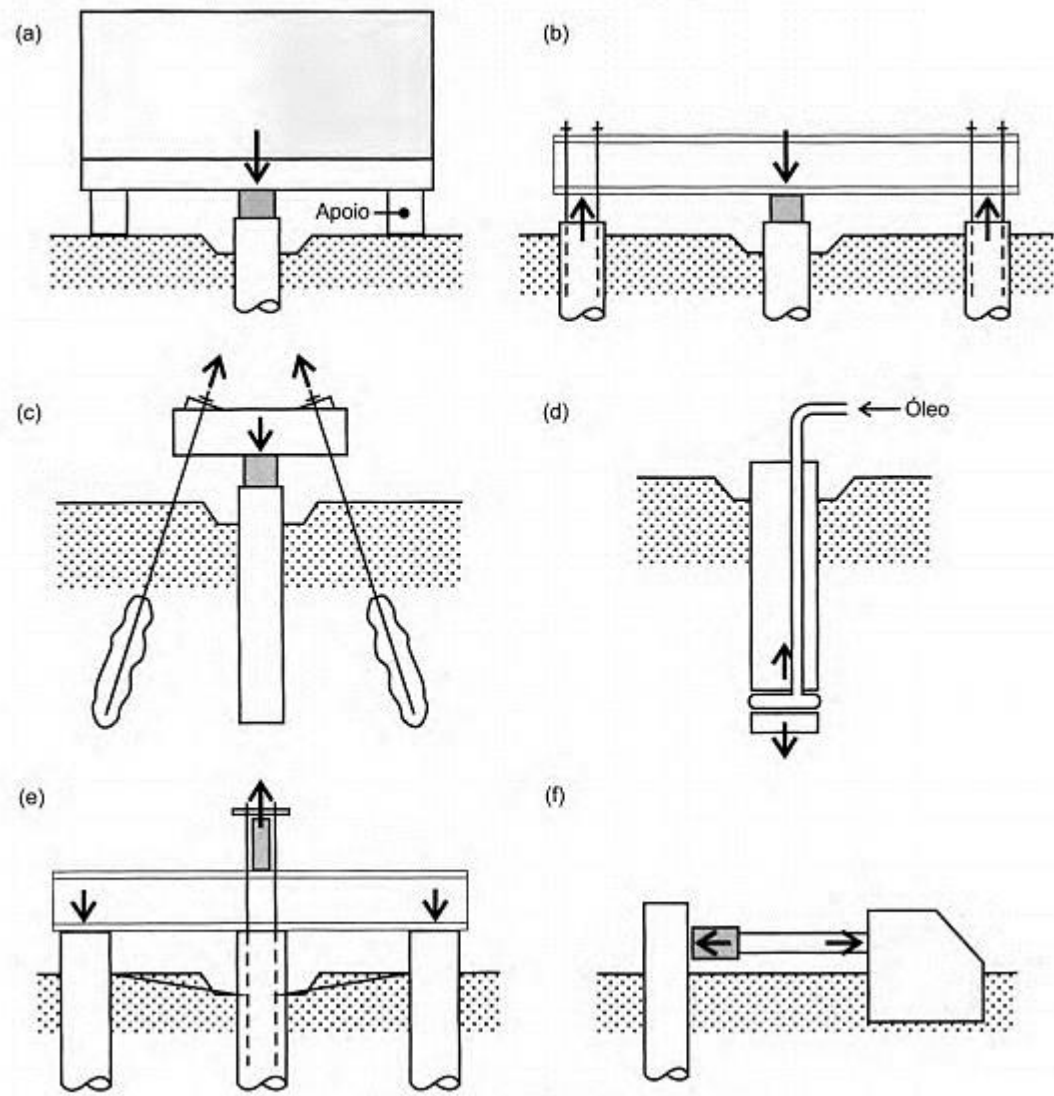
De acordo com a norma NBR 6122 (ABNT, 2019), é obrigatória a execução de provas de carga estática de desempenho no decorrer do estaqueamento, em obras que tiverem um número de estacas superior à 75 estacas, para o caso de estacas tipo hélice, hélice de deslocamento, hélice com trado segmentado (monitoradas). O procedimento de execução desse ensaio é determinado pela norma NBR 16903 (ABNT, 2020) intitulada “Solo — Prova de carga estática em fundação profunda”.

Segundo a norma NBR 16903 (ABNT, 2020) a execução do ensaio se dá em duas etapas, o carregamento e descarregamento e o monitoramento do sistema de reação. Na primeira etapa, a estaca é carregada até a carga de ensaio, atendendo aos requisitos dos fatores de segurança dos carregamentos de acordo com a norma NBR 6122 (ABNT, 2019). A carga de cada estágio de carregamento deve ser mantida dentro de uma tolerância de $\pm 25\%$ do valor do incremento de carga. Na segunda etapa, que compreende o monitoramento dos deslocamentos do sistema de reação, constituído por estacas de reação, ancoragens ou cargueiras, deve ser realizado com a finalidade de prevenção de acidentes, não sendo válido como uma prova de carga independente.

Veloso e Lopes (2010), afirmam que nas provas de carga de compressão, o carregamento é feito por um macaco hidráulico que reage contra um sistema de reação, que pode ser: uma plataforma com peso (dado por areia, ferro, água ou mesmo estacas ainda não cravadas), chamada cargueira (a); de vigas presas a estacas vizinhas a de prova, que serão tracionadas (b); de vigas ou capacete ancorados no terreno (c), conforme exibido na Figura 19.

Os mesmos autores ainda citam um método desenvolvido por um brasileiro (Silva, 1996), que consiste numa célula expansora introduzida no fuste da estaca, em geral próximo da ponta que, ao ser acionada, carrega a ponta da estaca em compressão e o fuste em tração (d). Nas provas de carga de tração, o macaco hidráulico pode reagir contra vigas ligadas a estacas vizinhas, neste caso comprimidas (e). Já nas provas de carga horizontal, o macaco hidráulico pode reagir contra uma estaca vizinha ou um bloco de reação (f), ainda conforme é ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Sistemas de reação para prova de carga estática



Fonte: Veloso e Lopes, 2010.

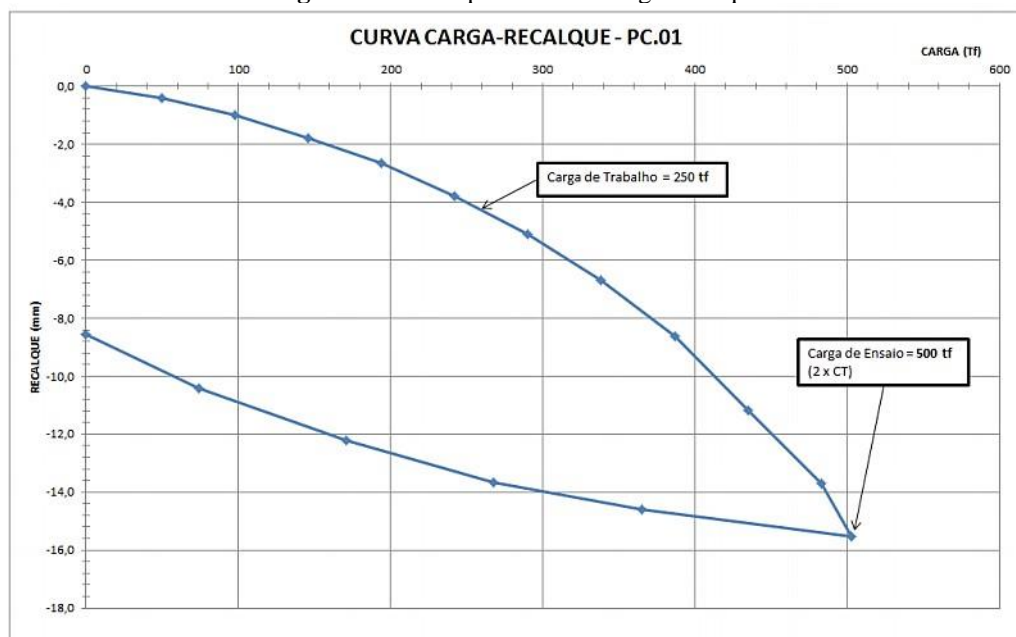
Para execução das provas de carga estática são necessários uma série de equipamentos, que de acordo com Dantas (2018) são um conjunto de vigas (referenciais dos deflectômetros e composições do sistema de reação); materiais que integram o sistema de reação, que são as luvas, porcas, barras e chapas; conjunto bomba e macaco hidráulico; relógios comparadores (deflectômetros); célula de carga e visor digital e ferramentas para montagem.

O ensaio consiste na aplicação de carregamentos estáticos-crescentes nas estacas, por meio de um ou mais macacos hidráulicos, utilizando-se de um sistema de reação firme. O objetivo é a atingir a aplicação de uma carga até duas vezes a carga de projeto da estaca ou até a ruptura, de acordo com o definido em projeto. O ensaio deve ser monitorado, de acordo com a deformação da estaca, sendo o seu tempo de realização variável, dependendo do tipo de carregamento (lento, misto ou rápido).

No tipo de carregamento lento, deve ser executado em estágios iguais e sucessivos, observando-se que a carga em cada estágio não deve ultrapassar 20% da carga de trabalho prevista, e deve ser mantida até a estabilização dos deslocamentos e no mínimo por 30 minutos. Já no carregamento rápido, o carregamento deve ser executado em estágios iguais e sucessivos, observando-se que a carga em cada estágio não deve ultrapassar 10% da carga de trabalho prevista e deve ser mantida durante 10 minutos, independente da estabilização. Quanto ao carregamento misto, este é realizado com carregamento lento até a carga 1,2 vez a carga de trabalho, e posteriormente, executa-se o ensaio com carregamento rápido (GEOFIX, 2016).

Após a realização do ensaio, ocorre a análise dos dados obtidos, que apresenta informações relevantes, como capacidade de carga da estaca, curva carga x deslocamento (Figura 20), resistência de ponta e atrito lateral, recalque associado à carga de trabalho e coeficiente de segurança da estaca. A norma NBR 16903 (ABNT, 2020) também destaca que a estaca ensaiada deve estar documentada, incluindo nesse registro informações sobre: geometria, método de execução, propriedades dos materiais constitutivos e controles realizados durante a execução.

Figura 20 - Exemplo de curva carga-recalque



Fonte: GEOFIX, 2016.

Quando a prova de carga não alcança a carga de ruptura, ou até um nível de recalque que caracterize a ruptura, pode-se tentar realizar uma extrapolação dessa curva carga-recalque, baseada numa equação matemática ajustada ao trecho que se dispõe da curva carga-recalque.

4 METODOLOGIA

A presente pesquisa é de natureza aplicada e exhibe um estudo de caso, que segundo Gil (2008), é definido como sendo o estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos de maneira que se permita o seu amplo e detalhado conhecimento, tarefa praticamente impossível mediante os outros tipos de delineamentos considerados.

Do ponto de vista de seus objetivos, a pesquisa é considerada como exploratória, visto que objetiva proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito através de uma visão geral, do tipo aproximativo, acerca de determinado fato (GIL, 2008).

Quanto à abordagem é considerada quantitativa, pois considera que seus parâmetros podem ser quantificáveis, ou seja, é possível traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las, necessitando assim o uso de recursos e de técnicas estatísticas (SILVA; MENEZES, 2005).

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica objetivando fundamentar o presente trabalho em pesquisas já realizadas, livros, dissertações, teses e demais textos acadêmicos. Foi abordado na revisão bibliográfica os tipos de fundações, à estaca hélice contínua, o conceito de recalque, seus tipos e métodos de estimativa, bem como o ensaio de prova de carga estática.

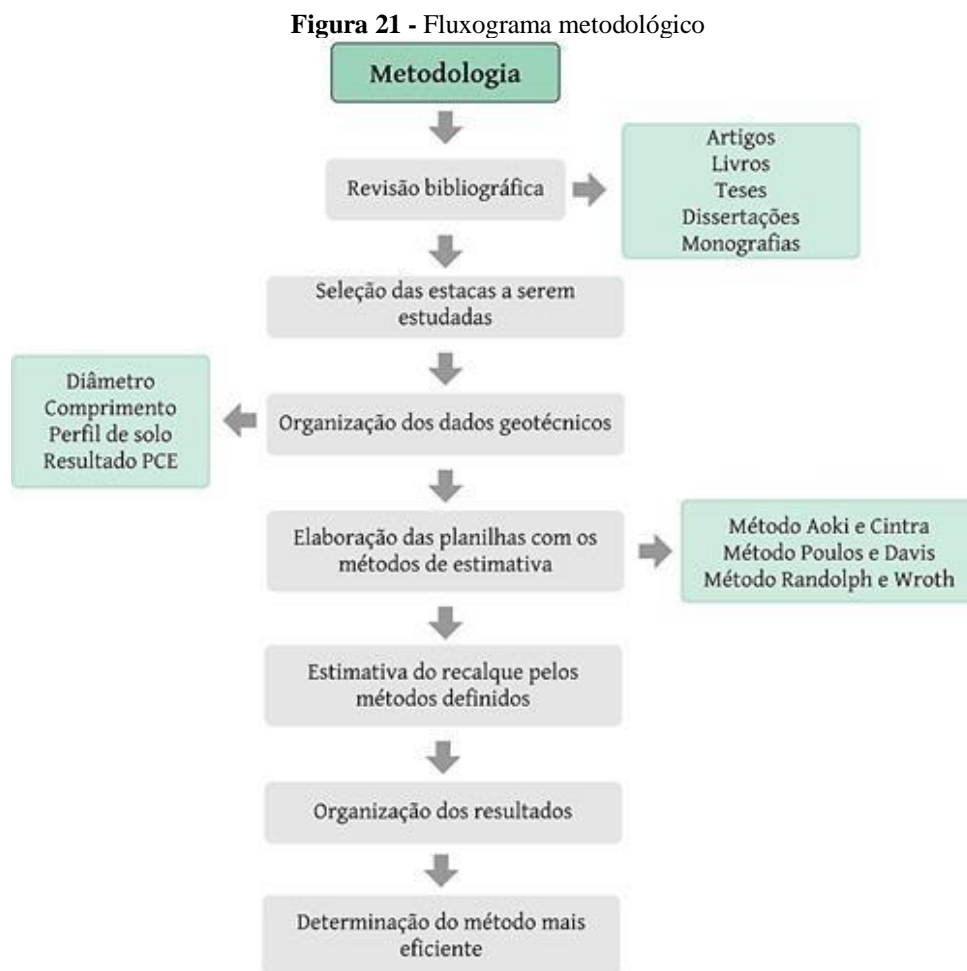
Além da revisão da literatura, o presente trabalho apresenta uma análise da previsão dos recalques de fundações em estacas HCM, localizadas na Região Metropolitana do Recife (RMR), a partir de métodos baseados na Teoria da Elasticidade e compará-los a resultados de provas de carga estática.

Os resultados da prova de carga utilizados no presente trabalho foram elaborados pelo Msc. Pedro Daniel Uchôa Dantas, advindos do banco de dados de sua dissertação de mestrado intitulada por “Análise de provas de carga estática em estacas do tipo hélice contínua executadas na Região Metropolitana do Recife” no ano de 2018. Os bairros incluídos no estudo de Dantas (2018) são: Cabo de Santo Agostinho, Reserva do Paiva, Barra de Jangada, Candeias, Piedade, Boa Viagem, Pina, Centro do Recife, Torre, Graças, Poço da Panela, Casa Forte, Parnamirim, Tamarineira, Rosarinho, Encruzilhada, Boa Vista e Igarassu.

Para este estudo, foram selecionadas 14 estacas HCM das 45 estudadas por Dantas (2018), sendo fornecidas as características geométricas, resultados da PCE para cada estaca e sondagens tipo SPT (*Standard Penetration Test*) com os perfis de camada do subsolo próximo ao local do ensaio. A escolha dessas estacas objetivou a diversificação dos diâmetros e do comprimento das estacas, bem como dos perfis de solo onde estão situadas.

Os recalques foram estimados a partir dos métodos elásticos de Cintra e Aoki (2010), Poulos e Davis (1980) e Randolph e Wroth (1978). Exibe-se também gráficos comparativos individuais para cada método. Por fim, houve a determinação do método que possui maior eficiência, verificando as diferenças relativas entre os valores obtidos da estimativa e os valores de recalques reais obtidos nas provas de carga estática.

A Figura 21 exibe um fluxograma com todas as etapas realizadas no presente trabalho que compreende a revisão bibliográfica, seleção das estacas a serem estudadas, organização dos dados geotécnicos, elaboração das planilhas e cálculo da estimativa dos recalques, organização e análise dos resultados, bem como a determinação do método mais eficiente.



Autor: Autora, 2021.

4.1 COLETA E FILTRAGEM DOS DADOS

O conjunto de dados iniciais do autor Dantas (2018) era composto por 103 Provas de Carga Estática (PCE) em estacas espalhadas em 62 obras distribuídas na Região Metropolitana do Recife (RMR). O mesmo autor realiza uma filtragem de dados, objetivando a exclusão dos

resultados inconsistentes que causariam perturbação na análise estatística. Inicialmente, foram excluídas as PCEs que sofreram alguma interferência externa, como complicações na execução do ensaio ou problemas estruturais no bloco de coroamento.

Dantas (2018) adotou como segundo critério de exclusão das PCEs, a eliminação das quais o valor de recalque mostrou inferior a 1,5% do diâmetro nominal da estaca. Dessa forma, o recalque mínimo para estacas de 400 mm é de 6,0 mm, nas estacas de 500 mm é de 7,5 mm e nas estacas de 600 mm é de 9,0 mm. Esse critério baseia-se nas experiências de Velloso e Lopes (2010) e Gusmão e Oliveira (2013). A triagem foi complementada pela exclusão de outras 3 provas de carga, a PCE-72 e PCE-89 por falta de informações geotécnicas suficientes para análise, e a PCE-103, pela identificação do rompimento estrutural do bloco de coroamento durante o ensaio.

Sendo assim, restaram 45 provas de carga enquadradas como aceitáveis para a avaliação pretendida na pesquisa de Dantas (2018), sendo 14 nas estacas de 40 cm de diâmetro, 19 nas estacas de 50 cm e 12 nas estacas de 60 cm. Para essa pesquisa selecionou-se quatro estacas com diâmetro de 40 cm, seis com diâmetro de 50 cm e quatro com diâmetro de 60 cm. Considerou-se além do diâmetro, a diversificação dos perfis de solo e do comprimento da estaca. Portanto, após o procedimento de filtragem dos dados, obteve-se as PCEs da Tabela 1, que são analisadas no presente trabalho.

Tabela 1– Resumo das PCEs

PCE	Diâmetro (cm)	Comprimento (m)
PCE-7	40	15,0
PCE-10	40	13,2
PCE-17	40	17,5
PCE-24	40	19,0
PCE-32	50	18,0
PCE-45	50	20,0
PCE-48	50	15,0
PCE-52	50	11,6
PCE-57	50	12,0
PCE-65	50	26,0
PCE-80	60	20,8
PCE-81	60	18,5
PCE-91	60	15,0
PCE-93	60	25,5

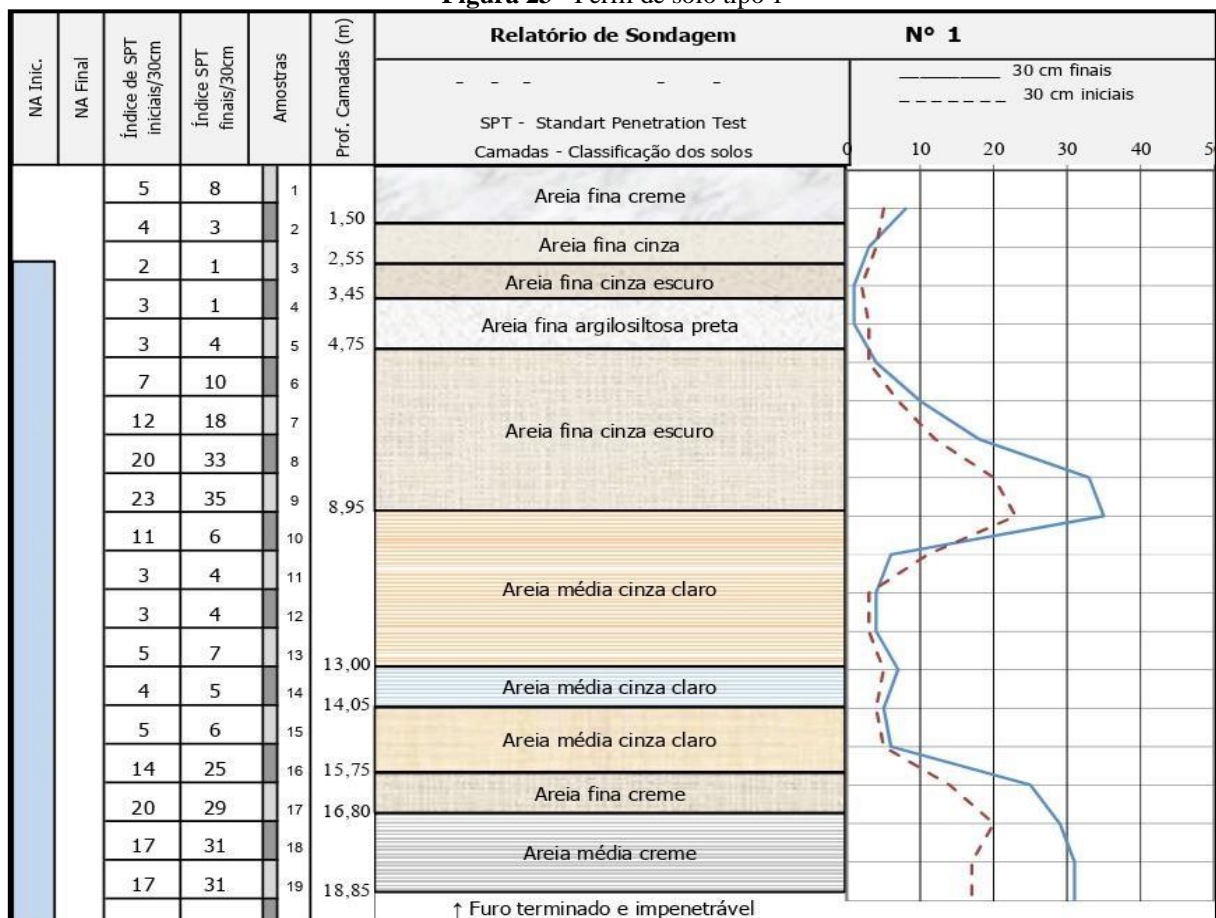
Fonte: Adaptado de Dantas, 2018.

PCE	Perfil de solo	Bairro
PCE-45	P2	Graças
PCE-48	P1	Reserva do Paiva
PCE-52	P3	Reserva do Paiva
PCE-57	P3	Cabo de Stº Agostinho
PCE-65	P1	Reserva do Paiva
PCE-80	P2	Torre
PCE-81	P1	Casa Forte
PCE-91	P1	Reserva do Paiva
PCE-93	P2	Reserva do Paiva

Fonte: Adaptado de Dantas, 2018.

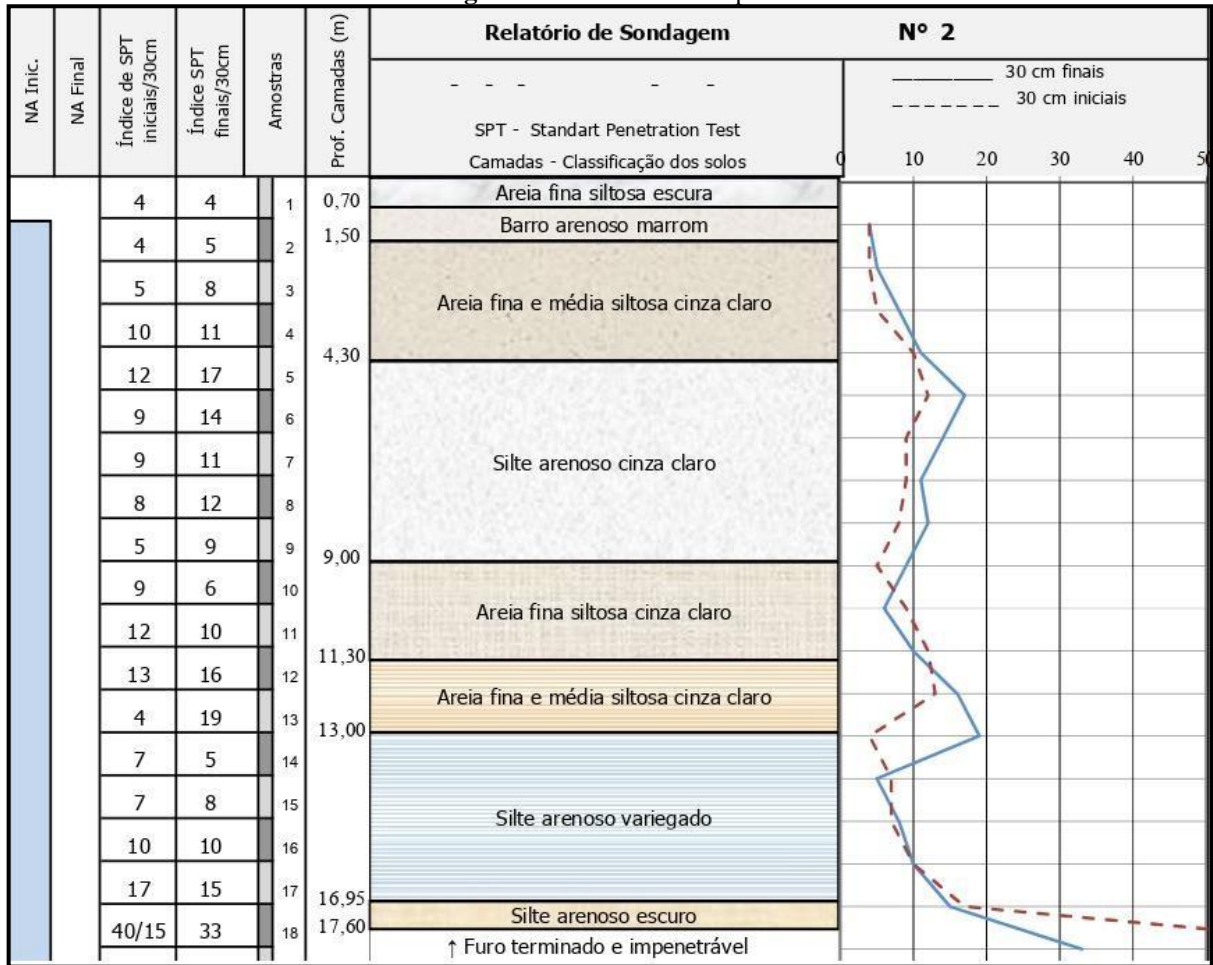
De acordo com o observado nas Figuras 23, 24 e 25, Dantas (2018) cita que o perfil do tipo “P1” é caracterizado pela predominância de solos arenosos, podendo conter, ou não, camadas insignificantes de outros materiais, enquanto o perfil tipo “P2” é identificado pela intercalação entre camadas de areias, siltes, argilas, etc., cujas espessuras são aproximadamente iguais. Já o perfil do tipo “P3” é composto por camadas de solos argilosos ou siltosos com maior espessura e significância em relação a outros materiais.

Figura 23 - Perfil de solo tipo 1



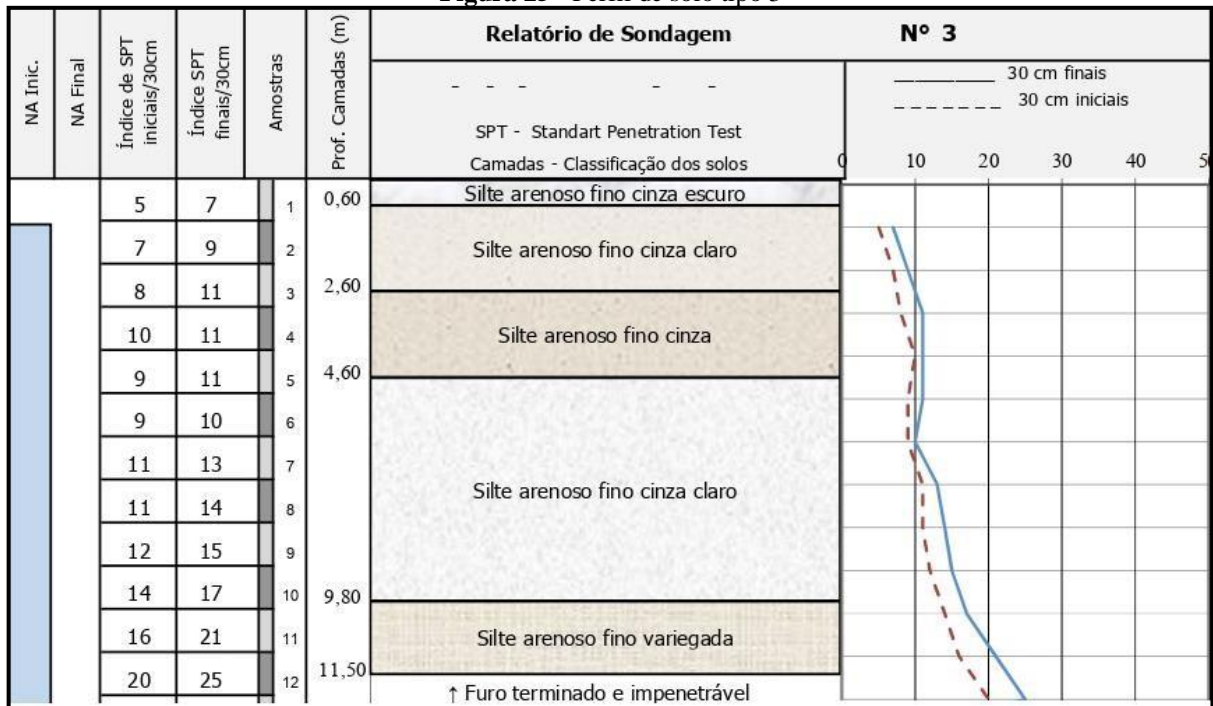
Fonte: Adaptado de Dantas, 2018.

Figura 24 - Perfil de solo tipo 2



Fonte: Adaptado de Dantas, 2018.

Figura 25 - Perfil de solo tipo 3



Fonte: Adaptado de Dantas, 2018.

4.3 CÁLCULO DAS ESTIMATIVAS DE RECALQUE

Os cálculos realizados em cada um dos três métodos utilizam variáveis distintas em suas fórmulas, sendo os dados extraídos dos relatórios do ensaio SPT do perfil de solo correspondente à cada estaca, além de outras informações extraídas da literatura. Esses valores estão detalhados nos tópicos seguintes:

4.1.1 Método de Cintra e Aoki

Para o cálculo da capacidade de carga das estacas, nesse método, utilizou-se uma formulação semiempírica brasileira, proposta por Aoki-Velloso (1975), na qual a capacidade de carga (R) é definida de acordo com a Equação 22:

$$R = R_L + R_p \quad (22)$$

Onde:

R_L é a parcela de resistência lateral;

R_p é a parcela de resistência de ponta.

Pelo método Aoki-Velloso no desenvolvimento dos cálculos das resistências laterais e de ponta usa-se fatores de correção (F_1 e F_2) que levam em conta o efeito de escala, ou seja, a diferença de comportamento entre a estaca (protótipo) e o índice de resistência à penetração (NSPT). Para estacas hélice contínua, os autores propuseram os valores de $F_1 = 2,0$ e $F_2 = 4,0$. Emprega-se também coeficientes para os tipos de solo existentes, como coeficiente K e razão de atrito (α), definidos de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficiente K e razão de atrito α

Tipo de solo	K (kPa)	α
Areia	1000	1,4%
Areia argilosiltosa	500	2,8%
Areia argilosa	600	3,0%
Areia siltosa	800	2,0%
Areia siltoargilosa	700	2,4%
Silte	400	3,0%
Silte arenoso	550	2,2%
Silte arenoargiloso	450	2,8%
Silte argiloso	230	3,4%
Silte argiloarenoso	250	3,0%
Argila	200	6,0%
Argila arenosa	350	2,4%
Argila arenosiltosa	300	2,8%

Tipo de solo	K (kPa)	α
Argila siltosa	220	4,0%
Argila siltoarenosa	330	3,0%

Fonte: Adaptado de Aoki e Velloso, 1975.

Para a determinação do N_{SPT} médio e da ponta, considerou-se o comprimento do fuste da estaca e três metros abaixo da ponta, respectivamente. É importante ressaltar que no cálculo do N_{SPT} médio desconsiderou-se o primeiro metro de solo, visto que há grande presença de matéria orgânica. Para calcular a tensão geostática, foi necessário a adoção de alguns valores referentes aos pesos específicos dos solos encontrados na literatura, pois não houve a possibilidade de realizar ensaios laboratoriais para obter tais características. Sendo assim, conforme especificado por Cintra e Aoki (2010) tais valores podem ser obtidos a partir das aproximações da Tabela 4 e Tabela 5, em função da consistência da argila e da compactidade da areia, respectivamente. Os estados de consistência de solos finos e de compactidade de solos grossos, por sua vez, são dados em função do índice de resistência à penetração (NSPT) de acordo com a norma NBR 6484 (ABNT, 2020).

Tabela 4 – Peso específico de solos argilosos

N_{SPT}	Consistência	γ (kN/mt)
≤ 2	Muito mole	13
3 – 5	Mole	15
6 – 10	Média	17
11 – 19	Rija	19
≥ 20	Dura	21

Fonte: Adaptado de Godoy, 1983.

Tabela 5 – Peso específico de solos arenosos

N_{SPT}	Compactidade	γ (kN/mt)		
		Areia seca	Areia úmida	Areia saturada
< 5	Fofa	16	18	19
5 – 8	Pouco compacta			
9 – 18	Medianamente compacta	17	19	20
19 – 40	Compacta	18	20	21
> 40	Muito compacta			

Fonte: Adaptado de Godoy, 1983.

4.1.2 Método Poulos e Davis

No método de Poulos e Davis é considerada uma espessura (h) de solo homogêneo, porém algumas estacas analisadas nesse trabalho possuem mais de um tipo de solo ao longo do

fuste. Para tanto, adotou-se como solo da estaca, aquele que é predominante ao longo do perfil geotécnico. Considerou-se então, para os perfis de solo 1, 2 e 3, uma predominância de areia, areia siltosa e silte arenoso, respectivamente. Já para o cálculo do recalque nesse método é necessário a utilização de alguns coeficientes para o solo e para a estaca. O coeficiente K e a razão de atrito (α) foram definidos de acordo com a Tabela 6 e Tabela 7, respectivamente, de acordo com Teixeira e Godoy (1998).

Tabela 6 – Coeficiente K

Solo	K (MPa)
Areia com pedregulhos	1,1
Areia	0,9
Areia siltosa	0,7
Areia argilosa	0,55
Silte arenoso	0,45
Silte	0,35
Argila arenosa	0,3
Silte argiloso	0,25
Argila siltosa	0,2

Fonte: Adaptado de Teixeira e Godoy, 1998.

Tabela 7 – Razão de atrito (α)

Solo	α
Areia	3
Silte	5
Argila	7

Fonte: Adaptado de Teixeira e Godoy, 1998.

Determinou-se o coeficiente de Poisson (ν), de acordo com o tipo de solo, conforme as aproximações realizadas por Teixeira e Godoy (1998), especificadas na Tabela 8. Para o tipo de solo areia considerou-se um coeficiente de Poisson de 0,3.

Tabela 8 – Razão de atrito (α)

Solo	ν
Areia pouco compacta	0,2
Areia compacta	0,4
Silte	0,35
Argila saturada	0,4 – 0,5
Argila não saturada	0,1 – 0,3

Fonte: Adaptado de Teixeira e Godoy, 1998.

Determinou-se o N_{SPT} do fuste considerando o comprimento da estaca e o N_{SPT} da ponta considerando três metros abaixo da ponta da estaca, assim como no método anteriormente exposto. Calculou-se o módulo de elasticidade da ponta (E_b) e do solo ao longo do fuste (E_s),

de acordo com a Equação 23, proposta por Teixeira e Godoy (1998).

$$E_b = E_s = \alpha \cdot K \cdot N_{SPT} \quad (23)$$

Para o módulo de elasticidade da estaca (E_P), a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) determina que o módulo de elasticidade inicial (E_{ci}) a 28 dias pode ser calculado pela Equação 24. Foi considerando que a resistência característica à compressão do concreto a 28 dias (f_{ck}) é 32 Mpa.

$$E_{ci} = 5600\sqrt{f_{ck}} \quad (24)$$

O módulo de elasticidade secante (E_{cs}) a ser utilizado nas análises elástica de projeto, especialmente para determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço, deve ser calculado pela Equação 25, conforme especifica a norma NBR 6118 (ABNT, 2014).

$$E_{cs} = 0,85 \cdot E_{ci} \quad (25)$$

4.1.3 Método Randolph e Wroth

Nesse método é considerado as parcelas de solo da ponta da estaca, abaixo da ponta e ao longo do fuste da camada. Para o cálculo na ponta, é considerado exatamente a camada a qual está assentada. Já a parte abaixo da ponta, adota-se os três metros subjacentes a ela. As variáveis que envolvem o fuste da estaca, são determinadas a partir do comprimento da mesma.

Sendo assim, o coeficiente K, o coeficiente de Poisson (ν), a razão de atrito (α), o módulo de elasticidade do solo e do concreto foram determinados seguindo a metodologia do método de Poulos e Davis. Para a determinação do módulo de cisalhamento do solo (G_s), utilizou-se a formulação proposta por Rocha e Giacheti (2016), descrita na Equação 26:

$$G_s = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (26)$$

4.4 PLANILHAS DE CÁLCULO

Utilizou-se o *software* Excel para elaboração das planilhas de cálculo, empregando fórmulas que otimizam e aprimoram as estimativas. De acordo com Júnior, *et al.*, (2001) O Excel é uma das melhores planilhas existentes no mercado, são programas que se assemelham a uma folha de trabalho, na qual podemos colocar dados ou valores em forma de tabela e aproveitar a grande capacidade de cálculo e armazenamento do computador para conseguir efetuar trabalhos que, normalmente, seriam resolvidos com uma calculadora, lápis e papel. A

tela do computador se transforma numa janela onde podemos observar uma série de linhas e colunas. A cada cruzamento de uma linha com uma coluna temos uma célula onde podemos armazenar um texto, um valor ou uma fórmula para o cálculo.

Foi realizada a inserção do banco de dados geotécnicos no *software*, objetivando a caracterização dos perfis de solo e conseqüentemente a definição dos parâmetros de cada estaca, conforme exibem as Figuras 26 e 27.

Figura 26 - Características dos perfis de solo

Características dos perfis de solo									
Perfil de solo	Camada	Início da camada	Fim da camada	Li (m)	Nspt(médio)	Tipo de solo	Densidade (kN/m ³)	K(kPa)	N.A
P1	1	1,00	1,50	0,5	5	Areia	18	1000	2,50
P1	2	1,50	2,55	1,05	2	Areia	19	1000	2,50
P1	3	2,55	3,45	0,90	1	Areia argilosiltosa	19	500	2,50
P1	4	3,45	4,75	1,30	4	Areia	19	1000	2,50
P1	5	4,75	8,95	4,20	16	Areia	20	1000	2,50
P1	6	8,95	13,00	4,05	12	Areia	20	1000	2,50
P1	7	13,00	14,05	1,05	7	Areia	19	1000	2,50
P1	8	14,05	15,75	1,70	5	Areia	19	1000	2,50
P1	9	15,75	16,80	1,05	25	Areia	21	1000	2,50
P1	10	16,80	18,85	2,05	30	Areia	21	1000	2,50
P2	1	1,00	1,50	0,50	4	Areia siltosa	19	800	1,04
P2	2	1,50	4,30	2,80	8	Areia siltosa	19	800	1,04
P2	3	4,30	9,00	4,70	12	Silte arenoargiloso	20	450	1,04
P2	4	9,00	11,30	2,30	8	Areia siltosa	19	800	1,04
P2	5	11,30	13,00	1,70	17	Areia siltosa	20	800	1,04
P2	6	13,00	16,95	3,95	9	Areia siltosa	20	800	1,04
P2	7	16,95	17,60	0,65	33	Silte arenoso	21	550	1,04
P2	8	17,60	19,00	1,40	60	Silte arenoso	21	550	1,04
P3	1	1,00	2,60	1,60	10	Silte arenoso	20	550	1,06
P3	2	2,60	4,60	2,00	11	Silte arenoso	20	550	1,06
P3	3	4,60	9,80	5,20	14	Silte arenoso	20	550	1,06
P3	4	9,80	11,50	1,70	23	Silte arenoso	21	550	1,06

Fonte: Autora, 2021.

Figura 27 - Características das estacas

Características das estacas										
PCE	Diâmetro (m)	Comprimento (m)	Perfil de solo	Ec (kPa)	Pa (kN)	Última camada	Espessura (perfil)	Li da última camada	Nspt(médi)	Recalque total na PCE
PCE07	0,4	15	P2	2,10E+07	1200,00	6	19,00	2,00	6	6,47
PCE10	0,4	13,2	P2	2,10E+07	1600,00	6	19,00	0,20	5	7,95
PCE17	0,4	17,5	P1	2,10E+07	1000,00	10	18,85	0,70	31	8,28
PCE24	0,4	19	P1	2,10E+07	1206,00	10	18,85	2,20	31	7,12
PCE32	0,5	18	P2	2,10E+07	1600,00	8	19,00	0,40	60	18,79
PCE45	0,5	20	P2	2,10E+07	2600,00	8	19,00	2,40	60	11,76
PCE48	0,5	15	P1	2,10E+07	2520,00	8	18,85	0,95	5	8,10
PCE52	0,5	11,6	P3	2,10E+07	1400,00	4	11,50	1,80	25	10,01
PCE57	0,5	12	P3	2,10E+07	2600,00	4	11,50	2,20	25	18,59
PCE65	0,5	26	P1	2,10E+07	2600,00	10	18,85	9,20	31	8,29
PCE80	0,6	20,8	P2	2,10E+07	3240,00	8	19,00	3,20	60	14,68
PCE81	0,6	18,5	P1	2,10E+07	3600,00	10	18,85	1,70	31	11,92
PCE91	0,6	15	P1	2,10E+07	2800,00	8	18,85	0,95	5	10,14
PCE93	0,6	25,5	P2	2,10E+07	3600,00	8	19,00	7,90	60	11,45

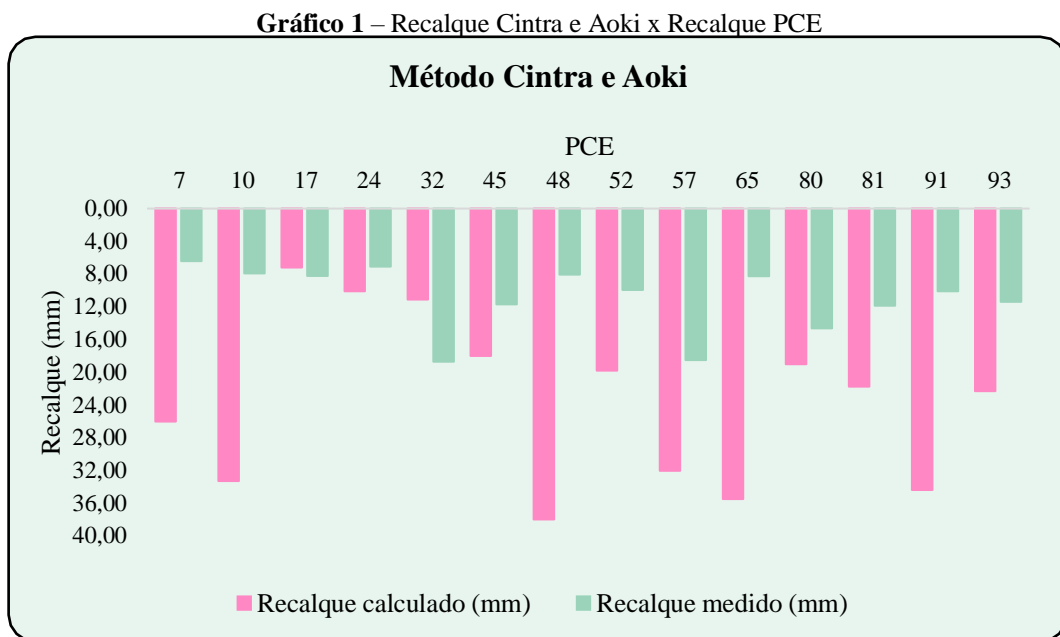
Fonte: Autora, 2021.

As planilhas elaboradas para cada método são exibidas nos Apêndices A, B, C e D do presente trabalho.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

A seguir são exibidos os gráficos para as estacas analisadas, obtidos a partir da estimativa dos recalques pelos métodos de Cintra e Aoki, Poulos e Davis e Randolph e Wroth comparando-os aos valores medidos nos ensaios de provas de carga estática.

O método de Cintra e Aoki propõe que o recalque final no topo da estaca é a soma da deformação da estaca com a deformação do solo. Sendo assim, no Gráfico 1 são exibidos os resultados dos recalques calculados por este método e os medidos nas PCEs. No Apêndice E é exibida a Tabela com todos os valores de recalques calculados e medidos, bem como a diferença relativa entre esses valores.

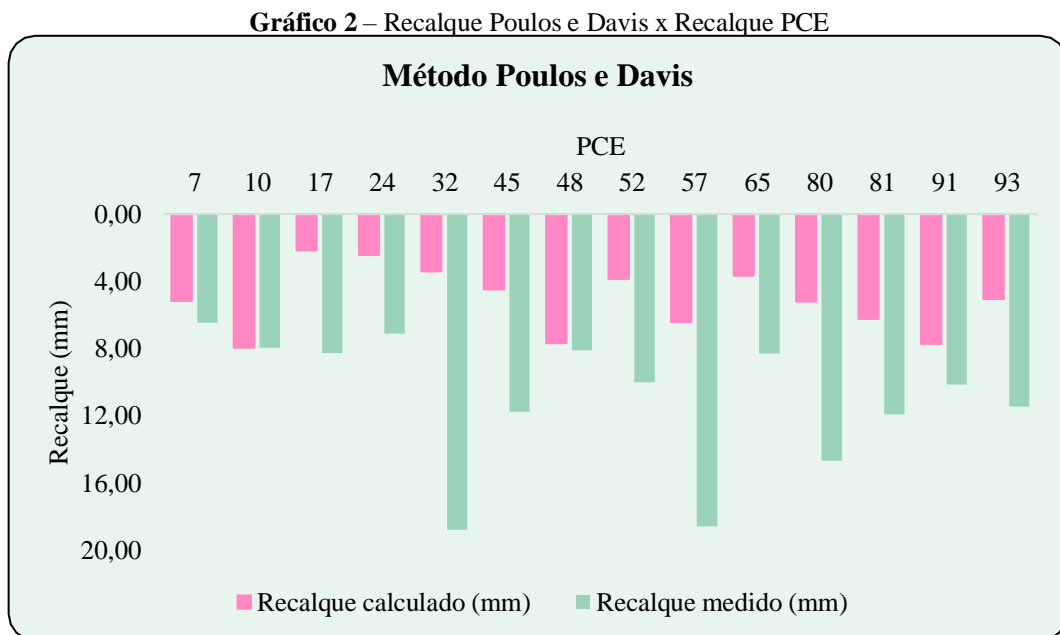


Este método apresentou, para a maioria das estacas, valores de recalques estimados superiores aos medidos nas PCEs, exceto para as PCEs 17 e 32, nas quais os valores calculados foram inferiores aos medidos nos ensaios, exibindo diferenças relativas de -12,63% e -40,51%, respectivamente. Já para as PCEs que exibem recalques calculados superiores aos medidos, a PCE-80 apresentou a menor diferença relativa, que corresponde a aproximadamente 30,04%.

Esse método mostrou-se conservador, pois exibe que 86% das estacas analisadas apresentaram os recalques calculados superiores aos medidos. Isso pode ser explicado pelo fato de ser o único método estudado que apresenta, separadamente, os cálculos do encurtamento elástico da estaca e da deformação do solo, bem como o fracionamento do solo heterogêneo ao longo da estaca. Nesse método é considerado um maior número de fatores de correção, que são simplificações e que podem ter negligenciado pontos consideráveis nos resultados. Outro ponto

importante refere-se à utilização das resistências laterais e de ponta da estaca, que são consideradas nos cálculos da deformação da estaca e do solo.

Já no método de Poulos e Davis o recalque é calculado a partir da carga aplicada no topo da estaca, do seu diâmetro e de alguns fatores de influência extraídos de ábacos propostos pelos autores. Esse método, diferente do anterior, não divide a estaca camada a camada, ou seja, é considerado um solo homogêneo ao longo do seu fuste. No Gráfico 2 são exibidos os resultados dos recalques calculados pelo método de Poulos e Davis e os recalques medidos na PCEs. No Apêndice F é exibida a Tabela com todos os valores de recalques calculados e medidos, bem como a diferença relativa entre esses valores.



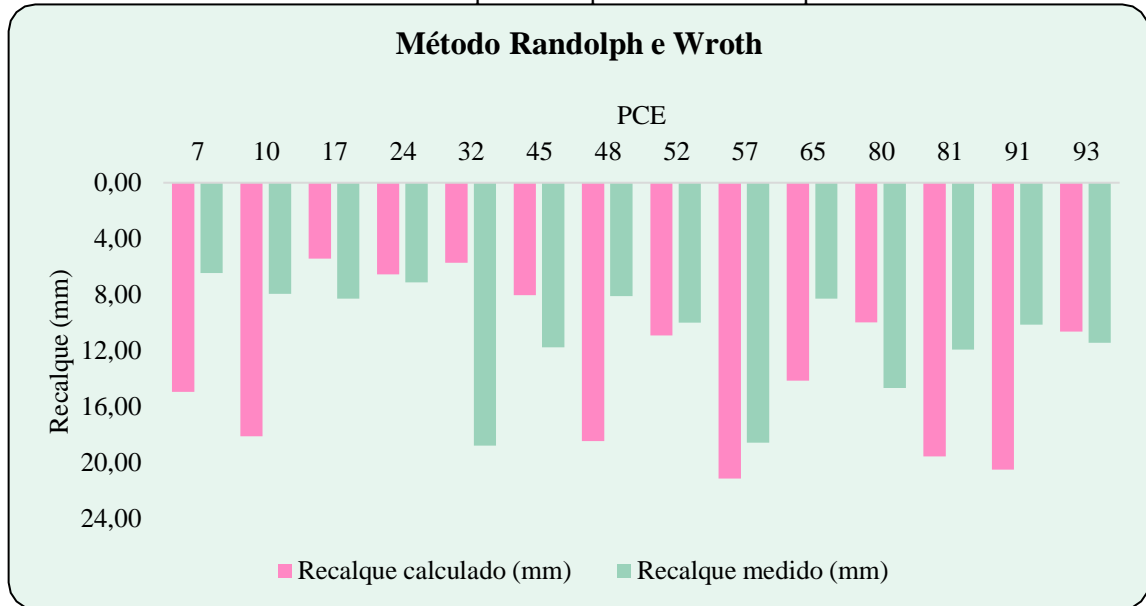
Fonte: Autora, 2021.

O método de Poulos e Davis apresentou para a maioria das estacas valores de recalques calculados inferiores aos recalques medidos na PCEs. A PCE-10 foi a que exibiu o valor de recalque estimado mais próximo ao medido no ensaio, apresentando assim uma diferença relativa de -0,06%. Tais valores de recalque estimados, inferiores aos recalques medidos, exibem que o método de Poulos e Davis não demonstra uma precisão em sua estimativa. Isso pode ser justificado devido às aproximações subjetivas que são adotadas no uso dos ábacos, assim como, pela não consideração da heterogeneidade do solo ao longo do comprimento da estaca.

O método de Randolph e Wroth propõe que o recalque no topo da estaca é calculado a partir de parâmetros que envolvem três solos diferentes: do fuste da estaca, de assentamento da ponta da estaca e o abaixo da ponta. O Gráfico 3 exhibe os resultados dos recalques calculados pelo método de Randolph e Wroth e os recalques medidos na PCEs. No Apêndice G é exibida

a Tabela com todos os valores de recalques calculados e medidos, bem como a diferença relativa entre esses valores.

Gráfico 3 – Recalque Randolph e Wroth x Recalque PCE



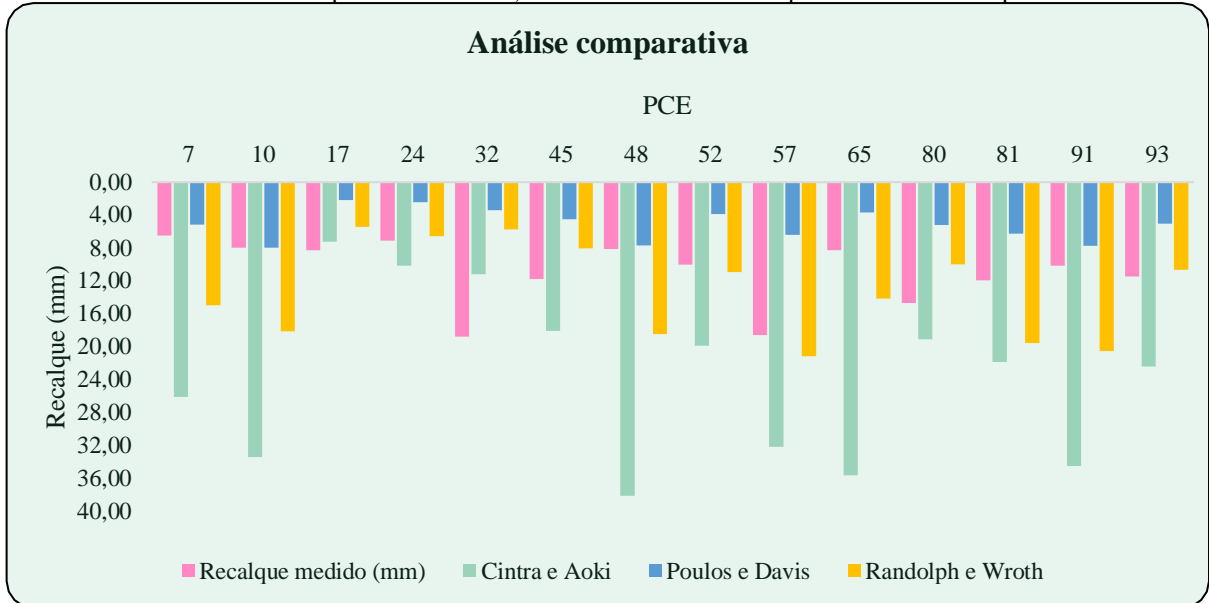
O método de Randolph e Wroth apresentou valores de recalque estimado superiores e inferiores aos valores medidos nos ensaios de PCE. Das quatorze PCEs, oito apresentaram valores de recalque calculado superiores aos valores do recalque medido e, conseqüentemente, seis exibiram valores inferiores. Quanto às menores diferenças relativas entre os recalques, considerando os valores de recalque estimado superiores aos medidos, a PCE-52 exibe uma diferença de 9,10%, e observando aquelas que possuem valores de recalque calculado inferiores aos valores do recalque medido, a PCE-93 mostra uma diferença relativa de -6,94%.

Essa variação nos valores dos recalques calculados pelo método de Randolph e Wroth pode ser explicado pelo fato do método considerar os solos de três diferentes partes da estaca, porém, ao longo do fuste, onde geralmente tem-se a ocorrência de mais de um tipo de solo, não é realizada essa consideração nos cálculos.

O Gráfico 4 apresenta a comparação entre os recalques calculados pelos três métodos e o recalque medido no ensaio de prova de carga. Avaliando a eficiência dos métodos a partir do Gráfico 4, é perceptível o método de Cintra e Aoki apresenta-se como o mais cauteloso, ou seja, exibe uma segurança em seus resultados, visto que a maioria dos recalques calculados são superiores aos recalques medidos. Já os recalques previstos pelo método de Poulos e Davis foram os que apresentaram maior número de diferenças relativas negativas, ou seja, recalques estimados menores que os recalques medidos. E o método de Randolph e Wroth exibiu resultados intermediários, isso é, alguns valores de recalques estimados inferiores e outros

superiores aos recalques medidos.

Gráfico 4 – Recalque Cintra e Aoki, Poulos e Davis e Randolph e Wroth x Recalque PCE



No Apêndice H é exibida a Tabela com todos os valores de recalques calculados e medidos nos três métodos. Esses resultados corroboram com os encontrados no trabalho de Bonan (2017), onde observou-se que o método de Aoki (1984) conduziu, em quase todas as previsões, aos maiores valores de recalque quando comparado aos outros métodos, enquanto que o método de Poulos e Davis (1980) conduziu aos menores. Já o método de Randolph e Wroth (1978) apresentou valores intermediários.

Considerando como critério de definição do método mais eficiente aquele que apresentou as menores diferenças relativas entre os recalques estimados e medidos, pode-se evidenciar o método de Randolph e Wroth, visto que aproximadamente 50% das estacas exibiram valores de recalques calculados com diferença relativa de $\pm 35\%$ dos recalques medidos.

Porém, considerando a segurança geotécnica, os métodos de estimativa de recalques devem apresentar valores de recalques iguais ou superiores aos medidos nas provas de carga, com vista a refletir uma margem de segurança nos dimensionamentos das fundações. Desse modo, o método de Cintra e Aoki apresentou uma margem de segurança na sua estimativa, visto que 86% das estacas exibiram recalques calculados superiores aos medidos.

6 CONCLUSÃO

Neste tópico são apresentadas as conclusões do presente trabalho de acordo com os resultados obtidos e posteriormente, sugestões para pesquisas futuras.

Os resultados obtidos nesta pesquisa, por meio do método de Cintra e Aoki (2010) demonstraram-se aceitáveis, quando considerado o fator da segurança, visto que em sua maioria os recalques estimados são superiores aos recalques medidos. Porém, analisando a viabilidade da implementação desse método, percebe-se que os valores dos recalques são superestimados, tendo em vista que a PCE-48 apresentou 370% de diferença relativa.

No método de Poulos e Davis (1980) todas as estacas apresentaram valores de recalques menores que os indicados nas provas de carga, sendo a maior diferença relativa de -81,78%, caracterizando assim uma insegurança na sua aplicação em projetos geotécnicos. Já o método de Randolph e Wroth (1978) apresentou 57% das estacas com valores de recalques maiores que os medidos nos ensaios e 43% dos valores inferiores. Sendo assim, o método demonstra uma certa incerteza em seus cálculos, necessitando de um aperfeiçoamento nos parâmetros e variáveis utilizadas.

Avaliando-se a estimativa dos recalques de acordo com os perfis de solo, nos métodos de Cintra e Aoki (2010) e Poulos e Davis (1980) as estacas presentes nos perfis de solo P1 e P2 apresentaram as maiores e menores diferenças relativas entre os recalques calculados e os medidos nos ensaios. Já no método de Randolph e Wroth (1978) as estacas inseridas no perfil de solo P2 exibiram a maioria dos recalques calculados superiores aos medidos na PCEs. Analisando no geral, as estacas situadas nos perfis de solo P1 e P2, identificados em sua maioria por camadas de solos arenosos, apresentaram as melhores aproximações de resultados entre os recalques estimados e os obtidos em campo.

Com relação a estimativa dos recalques nas estacas hélice contínua, a partir dos métodos elásticos, conclui-se que tais métodos são fortemente influenciados pelos parâmetros do solo (geotécnicos) e os parâmetros da fundação (estrutural). Como o SPT é um ensaio simplista, o mesmo pode auxiliar na estimativa dos recalques, através de correlações empíricas, porém o mais ideal seria usar parâmetros corretos para o tipo de solo em questão.

Confrontando os resultados calculados com os obtidos na prova de carga estática infere-se que é necessária uma avaliação mais aprofundada dos parâmetros adotados nas estimativas dos recalques para a determinação precisa do método mais eficiente, pois a proposta de Cintra e Aoki tendem a exibir resultados superestimados, enquanto as de Poulos e Davis e Randolph

e Wroth tendem a apresentar valores subestimados e intermediários, respectivamente. Porém, considerando a aproximação dos recalques estimados e medidos, o método de Randolph e Wroth apresentou as menores diferenças relativas, podendo ser classificado como o mais eficiente.

Durante o desenvolvimento desta pesquisa identificou-se inúmeras possibilidades de aperfeiçoamentos e continuação do trabalho, as quais envolvem:

- Realizar um maior número de sondagens próximas às estacas estudadas, a fim de conhecer melhor o solo;
- Empregar ensaios *in situ* para obtenção dos parâmetros do solo, como módulo de deformação e cisalhamento, necessários na determinação dos recalques;
- Analisar os grupos de estacas hélice contínua e determinar, por meio dos métodos elásticos, os recalques nessas fundações;
- Aplicar outros métodos de estimativa de recalques com a finalidade de confrontar os resultados.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, P.J.R.; MASSAD, F.; CARVALHO, D.; FERREIRA, M.A.M. (2001). **Comportamento à Compressão de Estacas Escavadas, Hélice Contínua e Hélice Tipo Ômega, em Solo Residual de Diabásio**. UNICAMP, Campinas, SP, 198 p.
- ALMEIDA, L. C. **Sapatas**. 2004. (Notas de aula – Concreto II). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- ALONSO, U. R. Provas de carga estáticas: **Evolução dos ensaios e cuidados a tomar para evitar acidentes**). 2018. Disponível em: <http://www.portaldageotecnia.com.br/wp-content/uploads/2018/10/Curso-de-provas-de-carga-est%C3%A1ticas.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2021.
- ALVES, A. M. L.; LOPES, F. R. **Estacas de deslocamento: tipos, aplicações e controle da execução**. Conferência: Seminário Sobre Fundações Profundas, Porto Alegre, 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283548820_Estacas_de_deslocamento_-_tipos_aplicacoes_e_controle_da_execucao. Acesso em: 13 ago. 2021.
- AOKI, N.; CINTRA, J. C. A. **Carga admissível e carga característica de fundações por estaca. Solos e Rochas**, v. 23, n. 2, 2000. p. 137-142.
- AOKI, N. **Considerações sobre o projeto e execução de fundações profundas**. Seminário de fundações. Sociedade Mineira de Engenharia, Belo Horizonte, 1979.
- AOKI, N. **Previsão da curva carga-recalque**. Palestra proferida na Escola de Engenharia de São Carlos - USP. Anais... São Carlos: 1984.
- AOKI, N.; VELLOSO, D. A. **An Approximate method to estimate the bearing capacity of piles**. In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS ENGINEERING, 5., 1975, Buenos Aires, v.1 p. 367-376.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 16903**. Solo — Prova de carga estática em fundação profunda. Rio de Janeiro: ABNT, set. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, mai. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, set. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6484**. Solo — Sondagem de simples reconhecimento com SPT — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, out. 2020.
- BONAN, V. H. F. **Estudo experimental do efeito de grupo de estacas escavadas em perfil de solo granular**. 2017. (Dissertação de Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal do

Ceará, Fortaleza, 2017.

CAPUTO, A. N.; MANRUBIA, H. **A estaca hélice contínua com monitoração eletrônica.** In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS – SEFE III, 3º, 1996, São Paulo. Anais... São Paulo, A.B.M.S., 1996. V.2, p. 133-140.

CINTRA, J. C. A; AOKI, N. **Fundações por estacas: projeto geotécnico.** 1. ed, São Paulo: Oficina de textos, 2010, 96p.

DANTAS, P. D. U. **Análise de provas de carga estática em estacas do tipo hélice contínua executadas na Região Metropolitana do Recife.** 2018. (Dissertação de Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

FALCONI, F.; SANTOS, M. S.; CORREA, C. N.; HACHICH, W. **Fundações profundas.** In: Concreto e Construções. IBRACON, 2014, v. 74, p. 32-41.

GEOFIX (2015). **Serviços especiais de fundação.** Disponível em: http://www.geofix.com.br/biblioteca/catalogo_geofix.pdf. Acesso em: 28 jun. 2021.

GEOFIX (2016). **6º Curso de engenharia aplicada às obras de fundações e contenções.** Disponível em: http://www.geofix.com.br/biblioteca/6o_curso_eng_Aula_Teoria_01_2016.pdf. Acesso em: 28 jun. 2021.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social.** 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008. 220 p.

GODOY, N. S. **Estimativa da capacidade de carga de estacas a partir de resultados de penetrômetro estático.** Palestra proferida na Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 1983.

GUSMÃO, A. D.; OLIVEIRA, K. P. S. **Curva carga-recalque de estaca hélice contínua.** Recife. [s.n.], 2013. 14 p.

JÚNIOR, W. M. P.; JOAQUIM, A.; CRISTIANE; DANIEL; GUSTAVO, L. **Microsoft Excel.** Universidade Federal de Uberlândia, 2001. Disponível em: http://www.facom.ufu.br/~gustavo/IC/IB/Apostilas/Apostila_EXCEL.pdf. Acesso em: 08 set. 2021.

KNAPPETT, J. A.; CRAIG, R. F. **Mecânica dos Solos,** LTC. 8ª edição. 2018.

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

MILITITSKY, J. **Provas de carga estática.** Sefe II – 2º Seminário de engenharia de fundações especiais. 1991.

MILITITSKY, J. CONSOLI, N. C. SHCNAID F. **Patologia das Fundações.** 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

MINDLIN, R. D. **Force at a point in the interior of a semi-infinite solid.** Physics, 7, p. 195-202, 1936.

MOTA, M. M. C. **Interação solo-estrutura em edifícios com fundação profunda: método numérico e resultados observados em campo.** 2009. (Tese em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MOURA, A. P. **Sistemas de fundação e o projeto de fundações.** 2016. (Notas de aula – Fundações e obras de Terra). Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Minas Gerais, 2016.

OLIVEIRA, H. M. **Contribuição ao cálculo de recalques de estacas.** 1991. (Tese de Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

POULOS, H. G.; DAVIS, E. H. **Pile foundation analysis and design.** 1. ed, Sydney, T. William Lambe et. al, 1980, 397p.

RANDOLPH, M. F.; WROTH, C. P. **Analysis of deformation of vertically loaded piles.** Journal of Geotechnical Engineering. A.S.C.E., 104, n. GT12, p. 1465-1488, 1978.

REBELLO, Y. C. P. **Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento.** 4. ed. São Paulo: Zigurate Editora, 2008.

ROCHA, B. P.; GIACHETI, H. L. A determinação do módulo de cisalhamento máximo (G_0) dos solos em furos de sondagens. 2016. **Revista Fundações & Obras Geotécnicas.** Ed. 64. p. 46-52.

SANTOS, G. V. **Patologias devido ao recalque diferencial em fundações.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil). Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas do UniCEUB, Brasília, 2014.

SILVA, C. B. L. **Estudo do efeito vibratório causado por cravação de estacas.** 1996. Dissertação (Mestrado) - COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 1996.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação.** 4. ed. rev. atual. – Florianópolis: UFSC, 2005. 138p.

SOARES, W. C. **Análise de recalques de edifícios em solos melhorados com estacas de compactação.** (Dissertação de Mestrado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SOUSA, V. B. P. **Análise da capacidade de carga e recalque das fundações de um edifício em solo da Região de Uberlândia/MG.** (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

SOUZA, M. W. F. **Estudo da variação da tensão admissível com a dimensão de sapatas apoiadas em subsolos arenosos.** 2018. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil)

Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. D. Análise, projeto e execução de fundações rasas. In: AUTORES, V. **Fundações: Teoria e Prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1998. Cap.7.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010, 568p.

VESIC, A. S. **Bearing capacity of shallow foundations**. In: Foundation Engineering Handbook, New York, McGraw-Hill, pp.121-147, 1975.

APÊNDICES

Apêndice A – Método Cintra e Aoki (Recalque elástico)

Estaca	Perfil de solo	Diâmetro (m)	Ap (m²)	Camada	Densidade (kN/m³)	Tipo de solo	Nspt (médio)	Li (m)	Al (m²)	K (kPa)	α (%)	F1	F2	Rp (kN)	RL (kN)	RL, acumulado (kN)	Pp (kN)	Pn (kN)	Pi (kN)	PiLi (kNm)	R elástico (mm)
PCE07	P2	0,40	0,13	1	19	Areia siltosa	4	0,50	0,63	800	2,0%	2,0	4,0		10,05	10,05	0,00	1200,00	1194,97	597,49	0,00
PCE07	P2	0,40	0,13	2	19	Areia siltosa	8	2,80	3,52	800	2,0%	2,0	4,0		112,59	122,65	0,00	1189,95	1133,65	3174,22	0,00
PCE07	P2	0,40	0,13	3	20	Silte arenoargiloso	12	4,70	5,91	450	2,8%	2,0	4,0		223,25	345,90	0,00	1077,35	965,73	4538,91	0,00
PCE07	P2	0,40	0,13	4	19	Areia siltosa	8	2,30	2,89	800	2,0%	2,0	4,0		92,49	438,39	0,00	854,10	807,85	1858,06	0,00
PCE07	P2	0,40	0,13	5	20	Areia siltosa	17	1,70	2,14	800	2,0%	2,0	4,0		145,27	583,66	0,00	761,61	688,98	1171,26	0,00
PCE07	P2	0,40	0,13	6	20	Areia siltosa	6	2,00	2,51	800	2,0%	2,0	4,0	301,59	0,00		616,34	616,34		0,00	4,30
PCE10	P2	0,40	0,13	1	19	Areia siltosa	4	0,50	0,63	800	2,0%	2,0	4,0		10,05	10,05	0,00	1600,00	1594,97	797,49	0,00
PCE10	P2	0,40	0,13	2	19	Areia siltosa	8	2,80	3,52	800	2,0%	2,0	4,0		112,59	122,65	0,00	1589,95	1533,65	4294,22	0,00
PCE10	P2	0,40	0,13	3	20	Silte arenoargiloso	12	4,70	5,91	450	2,8%	2,0	4,0		223,25	345,90	0,00	1477,35	1365,73	6418,91	0,00
PCE10	P2	0,40	0,13	4	19	Areia siltosa	8	2,30	2,89	800	2,0%	2,0	4,0		92,49	438,39	0,00	1254,10	1207,85	2778,06	0,00
PCE10	P2	0,40	0,13	5	20	Areia siltosa	17	1,70	2,14	800	2,0%	2,0	4,0		145,27	583,66	0,00	1161,61	1088,98	1851,26	0,00
PCE10	P2	0,40	0,13	6	20	Areia siltosa	5	0,20	0,25	800	2,0%	2,0	4,0	251,33	0,00		1016,34	1016,34		0,00	6,12
PCE17	P1	0,40	0,13	1	18	Areia	5	0,50	0,63	1000	1,4%	2,0	4,0		11,00	11,00	0,00	1000,00	994,50	497,25	0,00
PCE17	P1	0,40	0,13	2	19	Areia	2	1,05	1,32	1000	1,4%	2,0	4,0		9,24	20,23	0,00	989,00	984,39	1033,61	0,00
PCE17	P1	0,40	0,13	3	19	Areia argilosiltosa	1	0,90	1,13	500	2,8%	2,0	4,0		3,96	24,19	0,00	979,77	977,79	880,01	0,00
PCE17	P1	0,40	0,13	4	19	Areia	4	1,30	1,63	1000	1,4%	2,0	4,0		22,87	47,06	0,00	975,81	964,37	1253,69	0,00
PCE17	P1	0,40	0,13	5	20	Areia	16	4,20	5,28	1000	1,4%	2,0	4,0		295,56	342,62	0,00	952,94	805,16	3381,67	0,00
PCE17	P1	0,40	0,13	6	20	Areia	12	4,05	5,09	1000	1,4%	2,0	4,0		213,75	556,38	0,00	657,38	550,50	2229,53	0,00
PCE17	P1	0,40	0,13	7	19	Areia	7	1,05	1,32	1000	1,4%	2,0	4,0		32,33	588,70	0,00	443,62	427,46	448,83	0,00
PCE17	P1	0,40	0,13	8	19	Areia	5	1,70	2,14	1000	1,4%	2,0	4,0		37,38	626,09	0,00	411,30	392,60	667,43	0,00
PCE17	P1	0,40	0,13	9	21	Areia	25	1,05	1,32	1000	1,4%	2,0	4,0		115,45	741,54	0,00	373,91	316,19	331,99	0,00
PCE17	P1	0,40	0,13	10	21	Areia	31	0,70	0,88	1000	1,4%	2,0	4,0	1947,79	0,00		258,46	258,46		0,00	4,06
PCE24	P1	0,40	0,13	1	18	Areia	5	0,50	0,63	1000	1,4%	2,0	4,0		11,00	11,00	0,00	1206,00	1200,50	600,25	0,00
PCE24	P1	0,40	0,13	2	19	Areia	2	1,05	1,32	1000	1,4%	2,0	4,0		9,24	20,23	0,00	1195,00	1190,39	1249,91	0,00
PCE24	P1	0,40	0,13	3	19	Areia argilosiltosa	1	0,90	1,13	500	2,8%	2,0	4,0		3,96	24,19	0,00	1185,77	1183,79	1065,41	0,00
PCE24	P1	0,40	0,13	4	19	Areia	4	1,30	1,63	1000	1,4%	2,0	4,0		22,87	47,06	0,00	1181,81	1170,37	1521,49	0,00
PCE24	P1	0,40	0,13	5	20	Areia	16	4,20	5,28	1000	1,4%	2,0	4,0		295,56	342,62	0,00	1158,94	1011,16	4246,87	0,00
PCE24	P1	0,40	0,13	6	20	Areia	12	4,05	5,09	1000	1,4%	2,0	4,0		213,75	556,38	0,00	863,38	756,50	3063,83	0,00
PCE24	P1	0,40	0,13	7	19	Areia	7	1,05	1,32	1000	1,4%	2,0	4,0		32,33	588,70	0,00	649,62	633,46	665,13	0,00
PCE24	P1	0,40	0,13	8	19	Areia	5	1,70	2,14	1000	1,4%	2,0	4,0		37,38	626,09	0,00	617,30	598,60	1017,63	0,00
PCE24	P1	0,40	0,13	9	21	Areia	25	1,05	1,32	1000	1,4%	2,0	4,0		115,45	741,54	0,00	579,91	522,19	548,29	0,00
PCE24	P1	0,40	0,13	10	21	Areia	31	2,20	2,76	1000	1,4%	2,0	4,0	1947,79	0,00		464,46	464,46		0,00	5,30
PCE32	P2	0,50	0,20	1	19	Areia siltosa	4	0,50	0,79	800	2,0%	2,0	4,0		12,57	12,57	0,00	1600,00	1593,72	796,86	0,00
PCE32	P2	0,50	0,20	2	19	Areia siltosa	8	2,80	4,40	800	2,0%	2,0	4,0		140,74	153,31	0,00	1587,43	1517,06	4247,77	0,00
PCE32	P2	0,50	0,20	3	20	Silte arenoargiloso	12	4,70	7,38	450	2,8%	2,0	4,0		279,07	432,38	0,00	1446,69	1307,16	6143,64	0,00
PCE32	P2	0,50	0,20	4	19	Areia siltosa	8	2,30	3,61	800	2,0%	2,0	4,0		115,61	547,99	0,00	1167,62	1109,82	2552,58	0,00
PCE32	P2	0,50	0,20	5	20	Areia siltosa	17	1,70	2,67	800	2,0%	2,0	4,0		181,58	729,57	0,00	1052,01	961,22	1634,07	0,00
PCE32	P2	0,50	0,20	6	20	Areia siltosa	9	3,95	6,20	800	2,0%	2,0	4,0		223,37	952,94	0,00	870,43	758,74	2997,04	0,00
PCE32	P2	0,50	0,20	7	21	Silte arenoso	33	0,65	1,02	330	3,0%	2,0	4,0		83,39	1036,33	0,00	647,06	605,36	393,49	0,00
PCE32	P2	0,50	0,20	8	21	Silte arenoso	60	0,40	0,63	330	3,0%	2,0	4,0	1943,86	0,00		563,67	563,67		0,00	4,55

Estaca	Perfil de solo	Diâmetro (m)	Ap (m²)	Camada	Densidade (kN/m³)	Tipo de solo	Nspt (médio)	Li (m)	Al (m²)	K (kPa)	α (%)	F1	F2	Rp (kN)	RL (kN)	RL, acumulado (kN)	Pp (kN)	Pn (kN)	Pi (kN)	PiLi (kNm)	R elástico (mm)
PCE45	P2	0,50	0,20	1	19	Areia siltosa	4	0,50	0,79	800	2,0%	2,0	4,0		12,57	12,57	0,00	2600,00	2593,72	1296,86	0,00
PCE45	P2	0,50	0,20	2	19	Areia siltosa	8	2,80	4,40	800	2,0%	2,0	4,0		140,74	153,31	0,00	2587,43	2517,06	7047,77	0,00
PCE45	P2	0,50	0,20	3	20	Silte arenoargiloso	12	4,70	7,38	450	2,8%	2,0	4,0		279,07	432,38	0,00	2446,69	2307,16	10843,64	0,00
PCE45	P2	0,50	0,20	4	19	Areia siltosa	8	2,30	3,61	800	2,0%	2,0	4,0		115,61	547,99	0,00	2167,62	2109,82	4852,58	0,00
PCE45	P2	0,50	0,20	5	20	Areia siltosa	17	1,70	2,67	800	2,0%	2,0	4,0		181,58	729,57	0,00	2052,01	1961,22	3334,07	0,00
PCE45	P2	0,50	0,20	6	20	Areia siltosa	9	3,95	6,20	800	2,0%	2,0	4,0		223,37	952,94	0,00	1870,43	1758,74	6947,04	0,00
PCE45	P2	0,50	0,20	7	21	Silte arenoso	33	0,65	1,02	330	3,0%	2,0	4,0		83,39	1036,33	0,00	1647,06	1605,36	1043,49	0,00
PCE45	P2	0,50	0,20	8	21	Silte arenoso	60	2,40	3,77	330	3,0%	2,0	4,0	1943,86	0,00		1563,67	1563,67		0,00	8,58
PCE48	P1	0,50	0,20	1	18	Areia	5	0,50	0,79	1000	1,4%	2,0	4,0		13,74	13,74	0,00	2520,00	2520,00	1260,00	0,00
PCE48	P1	0,50	0,20	2	19	Areia	2	1,05	1,65	1000	1,4%	2,0	4,0		11,55	25,29	0,00	2506,26	2506,26	2631,57	0,00
PCE48	P1	0,50	0,20	3	19	Areia argilosiltosa	1	0,90	1,41	500	2,8%	2,0	4,0		4,95	30,24	0,00	2494,71	2494,71	2245,24	0,00
PCE48	P1	0,50	0,20	4	19	Areia	4	1,30	2,04	1000	1,4%	2,0	4,0		28,59	58,83	0,00	2489,76	2489,76	3236,69	0,00
PCE48	P1	0,50	0,20	5	20	Areia	16	4,20	6,60	1000	1,4%	2,0	4,0		369,45	428,28	0,00	2461,17	2461,17	10336,93	0,00
PCE48	P1	0,50	0,20	6	20	Areia	12	4,05	6,36	1000	1,4%	2,0	4,0		267,19	695,47	0,00	2091,72	2091,72	8471,48	0,00
PCE48	P1	0,50	0,20	7	19	Areia	7	1,05	1,65	1000	1,4%	2,0	4,0		40,41	735,88	0,00	1824,53	1824,53	1915,76	0,00
PCE48	P1	0,50	0,20	8	19	Areia	5	0,95	1,49	1000	1,4%	2,0	4,0	490,87	0,00		1784,12	1784,12		0,00	7,30
PCE52	P3	0,50	0,20	1	20	Silte arenoso	10	1,60	2,51	330	3,0%	2,0	4,0		62,20	62,20	0,00	1400,00	1400,00	2240,00	0,00
PCE52	P3	0,50	0,20	2	20	Silte arenoso	11	2,00	3,14	330	3,0%	2,0	4,0		85,53	147,73	0,00	1337,80	1337,80	2675,59	0,00
PCE52	P3	0,50	0,20	3	20	Silte arenoso	14	5,20	8,17	330	3,0%	2,0	4,0		283,03	430,76	0,00	1252,27	1252,27	6511,79	0,00
PCE52	P3	0,50	0,20	4	21	Silte arenoso	25	1,80	2,83	330	3,0%	2,0	4,0	809,94	0,00		969,24	969,24		0,00	2,77
PCE57	P3	0,50	0,20	1	20	Silte arenoso	10	1,60	2,51	330	3,0%	2,0	4,0		62,20	62,20	0,00	2600,00	2600,00	4160,00	0,00
PCE57	P3	0,50	0,20	2	20	Silte arenoso	11	2,00	3,14	330	3,0%	2,0	4,0		85,53	147,73	0,00	2537,80	2537,80	5075,59	0,00
PCE57	P3	0,50	0,20	3	20	Silte arenoso	14	5,20	8,17	330	3,0%	2,0	4,0		283,03	430,76	0,00	2452,27	2452,27	12751,79	0,00
PCE57	P3	0,50	0,20	4	21	Silte arenoso	25	2,20	3,46	330	3,0%	2,0	4,0	809,94	0,00		2169,24	2169,24		0,00	5,33
PCE65	P1	0,50	0,20	1	18	Areia	5	0,50	0,79	1000	1,4%	2,0	4,0		13,74	13,74	0,00	2600,00	2600,00	1300,00	0,00
PCE65	P1	0,50	0,20	2	19	Areia	2	1,05	1,65	1000	1,4%	2,0	4,0		11,55	25,29	0,00	2586,26	2586,26	2715,57	0,00
PCE65	P1	0,50	0,20	3	19	Areia argilosiltosa	1	0,90	1,41	500	2,8%	2,0	4,0		4,95	30,24	0,00	2574,71	2574,71	2317,24	0,00
PCE65	P1	0,50	0,20	4	19	Areia	4	1,30	2,04	1000	1,4%	2,0	4,0		28,59	58,83	0,00	2569,76	2569,76	3340,69	0,00
PCE65	P1	0,50	0,20	5	20	Areia	16	4,20	6,60	1000	1,4%	2,0	4,0		369,45	428,28	0,00	2541,17	2541,17	10672,93	0,00
PCE65	P1	0,50	0,20	6	20	Areia	12	4,05	6,36	1000	1,4%	2,0	4,0		267,19	695,47	0,00	2171,72	2171,72	8795,48	0,00
PCE65	P1	0,50	0,20	7	19	Areia	7	1,05	1,65	1000	1,4%	2,0	4,0		40,41	735,88	0,00	1904,53	1904,53	1999,76	0,00
PCE65	P1	0,50	0,20	8	19	Areia	5	1,70	2,67	1000	1,4%	2,0	4,0		46,73	782,61	0,00	1864,12	1864,12	3169,01	0,00
PCE65	P1	0,50	0,20	9	21	Areia	25	1,05	1,65	1000	1,4%	2,0	4,0		144,32	926,93	0,00	1817,39	1817,39	1908,26	0,00
PCE65	P1	0,50	0,20	10	21	Areia	31	9,20	14,45	1000	1,4%	2,0	4,0	3043,42	0,00		1673,07	1673,07		0,00	8,78
PCE80	P2	0,60	0,28	1	19	Areia siltosa	4	0,50	0,94	800	2,0%	2,0	4,0		15,08	15,08	0,00	3240,00	3240,00	1620,00	0,00
PCE80	P2	0,60	0,28	2	19	Areia siltosa	8	2,80	5,28	800	2,0%	2,0	4,0		168,89	183,97	0,00	3224,92	3224,92	9029,78	0,00
PCE80	P2	0,60	0,28	3	20	Silte arenoargiloso	12	4,70	8,86	450	2,8%	2,0	4,0		334,88	518,85	0,00	3056,03	3056,03	14363,33	0,00
PCE80	P2	0,60	0,28	4	19	Areia siltosa	8	2,30	4,34	800	2,0%	2,0	4,0		138,73	657,59	0,00	2721,15	2721,15	6258,64	0,00
PCE80	P2	0,60	0,28	5	20	Areia siltosa	17	1,70	3,20	800	2,0%	2,0	4,0		217,90	875,49	0,00	2582,41	2582,41	4390,10	0,00
PCE80	P2	0,60	0,28	6	20	Areia siltosa	9	3,95	7,45	800	2,0%	2,0	4,0		268,04	1143,53	0,00	2364,51	2364,51	9339,83	0,00
PCE80	P2	0,60	0,28	7	21	Silte arenoso	33	0,65	1,23	330	3,0%	2,0	4,0		100,07	1243,60	0,00	2096,47	2096,47	1362,71	0,00
PCE80	P2	0,60	0,28	8	21	Silte arenoso	60	3,20	6,03	330	3,0%	2,0	4,0	2799,16	0,00		1996,40	1996,40		0,00	7,81

Estaca	Perfil de solo	Diâmetro (m)	Ap (m²)	Camada	Densidade (kN/m³)	Tipo de solo	Nspt (médio)	Li (m)	Al (m²)	K (kPa)	α (%)	F1	F2	Rp (kN)	RL (kN)	RL, acumulado (kN)	Pp (kN)	Pn (kN)	Pi (kN)	PiLi (kNm)	R elástico (mm)
PCE81	P1	0,60	0,28	1	18	Areia	5	0,50	0,94	1000	1,4%	2,0	4,0		16,49	16,49	0,00	3600,00	3600,00	1800,00	0,00
PCE81	P1	0,60	0,28	2	19	Areia	2	1,05	1,98	1000	1,4%	2,0	4,0		13,85	30,35	0,00	3583,51	3583,51	3762,68	0,00
PCE81	P1	0,60	0,28	3	19	Areia argilosiltosa	1	0,90	1,70	500	2,8%	2,0	4,0		5,94	36,29	0,00	3569,65	3569,65	3212,69	0,00
PCE81	P1	0,60	0,28	4	19	Areia	4	1,30	2,45	1000	1,4%	2,0	4,0		34,31	70,59	0,00	3563,71	3563,71	4632,83	0,00
PCE81	P1	0,60	0,28	5	20	Areia	16	4,20	7,92	1000	1,4%	2,0	4,0		443,34	513,93	0,00	3529,41	3529,41	14823,52	0,00
PCE81	P1	0,60	0,28	6	20	Areia	12	4,05	7,63	1000	1,4%	2,0	4,0		320,63	834,56	0,00	3086,07	3086,07	12498,57	0,00
PCE81	P1	0,60	0,28	7	19	Areia	7	1,05	1,98	1000	1,4%	2,0	4,0		48,49	883,05	0,00	2765,44	2765,44	2903,71	0,00
PCE81	P1	0,60	0,28	8	19	Areia	5	1,70	3,20	1000	1,4%	2,0	4,0		56,08	939,13	0,00	2716,95	2716,95	4618,81	0,00
PCE81	P1	0,60	0,28	9	21	Areia	25	1,05	1,98	1000	1,4%	2,0	4,0		173,18	1112,31	0,00	2660,87	2660,87	2793,91	0,00
PCE81	P1	0,60	0,28	10	21	Areia	31	1,70	3,20	1000	1,4%	2,0	4,0	4382,52	0,00		2487,69	2487,69		0,00	8,60
PCE91	P1	0,60	0,28	1	18	Areia	5	0,50	0,94	1000	1,4%	2,0	4,0		16,49	16,49	0,00	2800,00	2800,00	1400,00	0,00
PCE91	P1	0,60	0,28	2	19	Areia	2	1,05	1,98	1000	1,4%	2,0	4,0		13,85	30,35	0,00	2783,51	2783,51	2922,68	0,00
PCE91	P1	0,60	0,28	3	19	Areia argilosiltosa	1	0,90	1,70	500	2,8%	2,0	4,0		5,94	36,29	0,00	2769,65	2769,65	2492,69	0,00
PCE91	P1	0,60	0,28	4	19	Areia	4	1,30	2,45	1000	1,4%	2,0	4,0		34,31	70,59	0,00	2763,71	2763,71	3592,83	0,00
PCE91	P1	0,60	0,28	5	20	Areia	16	4,20	7,92	1000	1,4%	2,0	4,0		443,34	513,93	0,00	2729,41	2729,41	11463,52	0,00
PCE91	P1	0,60	0,28	6	20	Areia	12	4,05	7,63	1000	1,4%	2,0	4,0		320,63	834,56	0,00	2286,07	2286,07	9258,57	0,00
PCE91	P1	0,60	0,28	7	19	Areia	7	1,05	1,98	1000	1,4%	2,0	4,0		48,49	883,05	0,00	1965,44	1965,44	2063,71	0,00
PCE91	P1	0,60	0,28	8	19	Areia	5	0,95	1,79	1000	1,4%	2,0	4,0	706,86	0,00		1916,95	1916,95		0,00	5,59
PCE93	P2	0,60	0,28	1	19	Areia siltosa	4	0,50	0,94	800	2,0%	2,0	4,0		15,08	15,08	0,00	3600,00	3600,00	1800,00	0,00
PCE93	P2	0,60	0,28	2	19	Areia siltosa	8	2,80	5,28	800	2,0%	2,0	4,0		168,89	183,97	0,00	3584,92	3584,92	10037,78	0,00
PCE93	P2	0,60	0,28	3	20	Silte arenoargiloso	12	4,70	8,86	450	2,8%	2,0	4,0		334,88	518,85	0,00	3416,03	3416,03	16055,33	0,00
PCE93	P2	0,60	0,28	4	19	Areia siltosa	8	2,30	4,34	800	2,0%	2,0	4,0		138,73	657,59	0,00	3081,15	3081,15	7086,64	0,00
PCE93	P2	0,60	0,28	5	20	Areia siltosa	17	1,70	3,20	800	2,0%	2,0	4,0		217,90	875,49	0,00	2942,41	2942,41	5002,10	0,00
PCE93	P2	0,60	0,28	6	20	Areia siltosa	9	3,95	7,45	800	2,0%	2,0	4,0		268,04	1143,53	0,00	2724,51	2724,51	10761,83	0,00
PCE93	P2	0,60	0,28	7	21	Silte arenoso	33	0,65	1,23	330	3,0%	2,0	4,0		100,07	1243,60	0,00	2456,47	2456,47	1596,71	0,00
PCE93	P2	0,60	0,28	8	21	Silte arenoso	60	7,90	14,89	330	3,0%	2,0	4,0	2799,16	0,00		2356,40	2356,40		0,00	8,82

Legenda

Ap – Área de ponta da estaca;

Li – Espessura da camada i;

Al - Área lateral da camada.

Apêndice B – Método Cintra e Aoki (Recalque do solo)

Estaca	Camada	Z	hp	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8	h9	$\Delta\sigma 1$ (kPa)	$\Delta\sigma 2$ (kPa)	$\Delta\sigma 3$ (kPa)	$\Delta\sigma 4$ (kPa)	$\Delta\sigma 5$ (kPa)	$\Delta\sigma 6$ (kPa)	$\Delta\sigma 7$ (kPa)	$\Delta\sigma 8$ (kPa)	$\Delta\sigma 9$ (kPa)	$\Delta\sigma p$ (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	Nspt (médio)2	K (MPa)	E0 (MPa)	$\sigma 0$ (kPa)	Es (MPa)	$(\Delta\sigma/Es)*H$ (mm)	Recalque total (mm)
PCE07	6	15,0	0	13,75	12,10	8,35	4,85	2,85	-	-	-	-	0,06	0,85	3,32	3,56	13,15	-	-	-	-	968,83	989,77	8	0,80	25,6	156,90	69,21	14,0	0,00
PCE07	7	16,0	1	14,75	13,10	9,35	5,85	3,85	-	-	-	-	0,05	0,73	2,71	2,58	8,20	-	-	-	-	217,38	231,65	10	0,80	32,0	158,40	50,22	4,3	0,00
PCE07	8	17,0	2	15,75	14,10	10,35	6,85	4,85	-	-	-	-	0,05	0,64	2,25	1,96	5,59	-	-	-	-	93,31	103,80	15	0,55	33,0	158,40	42,46	2,2	0,00
PCE07	9	18,0	3	16,75	15,10	11,35	7,85	5,85	-	-	-	-	0,04	0,56	1,89	1,54	4,06	-	-	-	-	51,59	59,69	33	0,55	72,6	162,90	84,86	0,6	0,00
PCE07	10	19,0	4	17,75	16,10	12,35	8,85	6,85	-	-	-	-	0,04	0,50	1,62	1,24	3,08	-	-	-	-	32,68	39,15	60	0,55	132,0	163,90	146,92	0,2	0,00
PCE07	11	20,0	5	18,75	17,10	13,35	9,85	7,85	-	-	-	-	0,03	0,44	1,40	1,02	2,42	-	-	-	-	22,54	27,85	60	0,55	132,0	164,90	142,71	0,2	0,00
PCE07	12	21,0	6	19,75	18,10	14,35	10,85	8,85	-	-	-	-	0,03	0,40	1,22	0,85	1,95	-	-	-	-	16,48	20,93	60	0,55	132,0	165,90	140,08	0,1	0,00
PCE07	13	22,0	7	20,75	19,10	15,35	11,85	9,85	-	-	-	-	0,03	0,36	1,08	0,72	1,60	-	-	-	-	12,57	16,36	60	0,55	132,0	166,90	138,32	0,1	0,00
PCE07	14	23,0	8	21,75	20,10	16,35	12,85	10,85	-	-	-	-	0,02	0,33	0,96	0,62	1,34	-	-	-	-	9,91	13,18	60	0,55	132,0	167,90	137,08	0,1	21,80
PCE10	6	13,2	0	11,95	10,30	6,55	3,05	1,05	-	-	-	-	0,08	1,14	5,12	7,55	48,64	-	-	-	-	1597,59	1660,12	19	0,80	60,8	141,90	216,67	7,4	0,00
PCE10	7	14,2	1	12,95	11,30	7,55	4,05	2,05	-	-	-	-	0,07	0,96	3,98	4,81	21,25	-	-	-	-	358,46	389,53	5	0,80	16,0	137,90	31,29	11,5	0,00
PCE10	8	15,2	2	13,95	12,30	8,55	5,05	3,05	-	-	-	-	0,06	0,82	3,18	3,33	11,85	-	-	-	-	153,87	173,11	8	0,80	25,6	136,90	38,52	4,0	0,00
PCE10	9	16,2	3	14,95	13,30	9,55	6,05	4,05	-	-	-	-	0,05	0,71	2,60	2,44	7,55	-	-	-	-	85,08	98,43	10	0,80	32,0	140,40	41,74	2,0	0,00
PCE10	10	17,2	4	15,95	14,30	10,55	7,05	5,05	-	-	-	-	0,05	0,62	2,17	1,86	5,22	-	-	-	-	53,90	63,82	15	0,55	33,0	140,40	39,80	1,4	0,00
PCE10	11	18,2	5	16,95	15,30	11,55	8,05	6,05	-	-	-	-	0,04	0,55	1,83	1,47	3,83	-	-	-	-	37,17	44,89	33	0,55	72,6	146,90	82,96	0,4	0,00
PCE10	12	19,2	6	17,95	16,30	12,55	9,05	7,05	-	-	-	-	0,04	0,48	1,57	1,19	2,93	-	-	-	-	27,18	33,39	60	0,55	132,0	147,90	146,14	0,2	0,00
PCE10	13	20,2	7	18,95	17,30	13,55	10,05	8,05	-	-	-	-	0,03	0,43	1,36	0,98	2,31	-	-	-	-	20,73	25,85	60	0,55	132,0	148,90	143,00	0,1	0,00
PCE10	14	21,2	8	19,95	18,30	14,55	11,05	9,05	-	-	-	-	0,03	0,39	1,19	0,82	1,87	-	-	-	-	16,34	20,64	60	0,55	132,0	149,90	140,79	0,1	0,00
PCE10	15	22,2	9	20,95	19,30	15,55	12,05	10,05	-	-	-	-	0,03	0,35	1,05	0,70	1,54	-	-	-	-	13,20	16,88	60	0,55	132,0	150,90	139,19	0,1	0,00
PCE10	16	23,2	10	21,95	20,30	16,55	13,05	11,05	-	-	-	-	0,02	0,32	0,93	0,61	1,30	-	-	-	-	10,89	14,07	60	0,55	132,0	151,90	137,98	0,1	27,28
PCE17	10	17,5	0	16,25	15,48	14,50	13,40	10,65	6,53	3,98	2,60	1,23	0,05	0,04	0,02	0,14	2,82	4,94	1,73	3,89	32,55	406,27	452,45	29	1,00	116,0	184,25	215,64	1,9	0,00
PCE17	11	18,5	1	17,25	16,48	15,50	14,40	11,65	7,53	4,98	3,60	2,23	0,04	0,04	0,02	0,12	2,39	3,83	1,19	2,35	15,05	91,16	116,20	31	1,00	124,0	185,25	158,18	0,6	0,00
PCE17	12	19,5	2	18,25	17,48	16,50	15,40	12,65	8,53	5,98	4,60	3,23	0,04	0,03	0,02	0,11	2,05	3,06	0,87	1,57	8,64	39,13	55,53	31	1,00	124,0	186,25	141,28	0,3	0,00
PCE17	13	20,5	3	19,25	18,48	17,50	16,40	13,65	9,53	6,98	5,60	4,23	0,03	0,03	0,01	0,10	1,78	2,50	0,66	1,13	5,60	21,64	33,48	31	1,00	124,0	187,25	134,63	0,2	0,00
PCE17	14	21,5	4	20,25	19,48	18,50	17,40	14,65	10,53	7,98	6,60	5,23	0,03	0,03	0,01	0,09	1,56	2,09	0,52	0,85	3,92	13,71	22,79	31	1,00	124,0	188,25	131,29	0,1	0,00
PCE17	15	22,5	5	21,25	20,48	19,50	18,40	15,65	11,53	8,98	7,60	6,23	0,03	0,03	0,01	0,08	1,37	1,76	0,42	0,66	2,90	9,45	16,71	31	1,00	124,0	189,25	129,36	0,1	0,00
PCE17	16	23,5	6	22,25	21,48	20,50	19,40	16,65	12,53	9,98	8,60	7,23	0,03	0,02	0,01	0,07	1,22	1,51	0,35	0,53	2,23	6,91	12,88	31	1,00	124,0	190,25	128,13	0,1	0,00
PCE17	17	24,5	7	23,25	22,48	21,50	20,40	17,65	13,53	10,98	9,60	8,23	0,02	0,02	0,01	0,06	1,09	1,31	0,29	0,43	1,77	5,27	10,28	31	1,00	124,0	191,25	127,29	0,0	3,17
PCE24	10	19,0	0	17,75	16,98	16,00	14,90	12,15	8,03	5,48	4,10	2,73	0,04	0,04	0,02	0,12	2,21	3,42	1,01	1,90	11,19	730,08	750,02	31	1,00	124,0	200,75	269,86	2,7	0,00
PCE24	11	20,0	1	18,75	17,98	17,00	15,90	13,15	9,03	6,48	5,10	3,73	0,04	0,03	0,02	0,10	1,91	2,76	0,76	1,32	6,87	163,81	177,62	31	1,00	124,0	201,75	170,04	1,0	0,00
PCE24	12	21,0	2	19,75	18,98	18,00	16,90	14,15	10,03	7,48	6,10	4,73	0,03	0,03	0,01	0,09	1,66	2,28	0,59	0,97	4,65	70,32	80,63	31	1,00	124,0	202,75	146,60	0,5	0,00
PCE24	13	22,0	3	20,75	19,98	19,00	17,90	15,15	11,03	8,48	7,10	5,73	0,03	0,03	0,01	0,08	1,46	1,91	0,47	0,74	3,35	38,88	46,97	31	1,00	124,0	203,75	137,55	0,3	0,00
PCE24	14	23,0	4	21,75	20,98	20,00	18,90	16,15	12,03	9,48	8,10	6,73	0,03	0,02	0,01	0,07	1,29	1,63	0,38	0,59	2,53	24,63	31,19	31	1,00	124,0	204,75	133,11	0,2	0,00
PCE24	15	24,0	5	22,75	21,98	21,00	19,90	17,15	13,03	10,48	9,10	7,73	0,03	0,02	0,01	0,07	1,16	1,40	0,32	0,48	1,98	16,99	22,44	31	1,00	124,0	205,75	130,59	0,1	0,00
PCE24	16	25,0	6	23,75	22,98	22,00	20,90	18,15	14,03	11,48	10,10	8,73	0,02	0,02	0,01	0,06	1,04	1,22	0,27	0,39	1,59	12,42	17,04	31	1,00	124,0	206,75	129,01	0,1	4,84
PCE32	8	18,0	0	16,75	15,10	11,35	7,85	5,85	3,03	0,73	-	-	0,05	0,69	2,33	1,88	4,93	17,55	35,68	-	-	717,69	780,80	33	0,55	72,6	190,95	163,78	4,4	0,00
PCE32	9	19,0	1	17,75	16,10	12,35	8,85	6,85	4,03	1,73	-	-	0,05	0,61	1,99	1,52	3,75	11,26	14,30	-	-	179,42	212,90	60	0,55	132,0	191,95	191,70	0,9	0,00
PCE32	10	20,0	2	18,75	17,10	13,35	9,85	7,85	5,03	2,73	-	-	0,04	0,55	1,73	1,25	2,95	7,83	7,65	-	-	79,74	101,75	60	0,55	132,0	192,95	163,13	0,5	0,00
PCE32	11	21,0	3	19,75	18,10	14,35	10,85	8,85	6,03	3,73	-	-	0,04	0,49	1,51	1,05	2,38	5,76	4,76	-	-	44,86	60,84	60	0,55	132,0	193,95	151,29	0,3	0,00
PCE32	12	22,0	4	20,75	19,10	15,35	11,85	9,85	7,03	4,73	-	-	0,03	0,44	1,33	0,89	1,96	4,42	3,24	-	-	28,71	41,03	60	0,55	132,0	194,95	145,23	0,2	0,00
PCE32	13	23,0	5	21,75	20,10	16,35	12,85	10,85	8,03	5,73	-	-	0,03	0,40	1,18	0,77	1,65	3,49	2,35	-	-	19,94	29,80	60	0,55	132,0	195,95	141,68	0,1	0,00
PCE32	14	24,0	6	22,75	21,10	17,35	13,85	11,85	9,03	6,73	-	-	0,03	0,37	1,06	0,67	1,40	2,83	1,78	-	-	14,65	22,77	60	0,55	132,0	196,95	139,42	0,1	0,00
PCE32	15	25,0	7	23,75	22,10	18,35	14,85	12,85	10,03	7,73	-	-	0,03	0,34	0,95	0,59	1,21	2,34	1,39	-	-	11,21	18,05	60	0,55	132,0	197,95	137,89	0,1	6,63
PCE45	8	20,0	0	18,75	17,10	13,35	9,85	7,85	5,03	2,73	-	-	0,04	0,55	1,73	1,25	2,95	7,83	7,65	-	-	1990,93	2012,93	60	0,55	132,0	212,95	426,76	4,7	0,00

Estaca	Camada	Z	hp	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8	h9	$\Delta\sigma 1$ (kPa)	$\Delta\sigma 2$ (kPa)	$\Delta\sigma 3$ (kPa)	$\Delta\sigma 4$ (kPa)	$\Delta\sigma 5$ (kPa)	$\Delta\sigma 6$ (kPa)	$\Delta\sigma 7$ (kPa)	$\Delta\sigma 8$ (kPa)	$\Delta\sigma 9$ (kPa)	$\Delta\sigma p$ (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	Nspt (médio)2	K (MPa)	E0 (MPa)	$\sigma 0$ (kPa)	Es (MPa)	$(\Delta\sigma/Es)*H$ (mm)	Recalque total (mm)
PCE48	8	15,0	0	13,75	12,98	12,00	10,90	8,15	4,03	1,48	-	-	0,08	0,08	0,04	0,26	5,62	13,47	8,40	-	-	2271,61	2300	6	1,00	24,0	155,25	95,43	23,8	0,00
PCE48	9	16,0	1	14,75	13,98	13,00	11,90	9,15	5,03	2,48	-	-	0,07	0,07	0,03	0,22	4,57	9,37	4,26	-	-	567,90	586	25	1,00	100,0	159,25	216,40	2,6	0,00
PCE48	10	17,0	2	15,75	14,98	14,00	12,90	10,15	6,03	3,48	-	-	0,06	0,06	0,03	0,19	3,78	6,89	2,57	-	-	252,40	266	29	1,00	116,0	160,25	189,18	1,3	0,00
PCE48	11	18,0	3	16,75	15,98	15,00	13,90	11,15	7,03	4,48	-	-	0,06	0,05	0,02	0,16	3,19	5,28	1,72	-	-	141,98	152	31	1,00	124,0	161,25	172,96	0,8	0,00
PCE48	12	19,0	4	17,75	16,98	16,00	14,90	12,15	8,03	5,48	-	-	0,05	0,05	0,02	0,14	2,72	4,18	1,23	-	-	90,86	99	31	1,00	124,0	162,25	157,42	0,6	0,00
PCE48	13	20,0	5	18,75	17,98	17,00	15,90	13,15	9,03	6,48	-	-	0,04	0,04	0,02	0,13	2,35	3,39	0,92	-	-	63,10	70	31	1,00	124,0	163,25	148,22	0,4	0,00
PCE48	14	21,0	6	19,75	18,98	18,00	16,90	14,15	10,03	7,48	-	-	0,04	0,04	0,02	0,11	2,05	2,80	0,72	-	-	46,36	52	31	1,00	124,0	164,25	142,32	0,3	0,00
PCE48	15	22,0	7	20,75	19,98	19,00	17,90	15,15	11,03	8,48	-	-	0,04	0,03	0,02	0,10	1,80	2,35	0,57	-	-	35,49	40	31	1,00	124,0	165,25	138,33	0,3	0,00
PCE48	16	23,0	8	21,75	20,98	20,00	18,90	16,15	12,03	9,48	-	-	0,03	0,03	0,01	0,09	1,60	2,01	0,47	-	-	28,04	32	31	1,00	124,0	166,25	135,51	0,2	0,00
PCE48	17	24,0	9	22,75	21,98	21,00	19,90	17,15	13,03	10,48	-	-	0,03	0,03	0,01	0,08	1,43	1,73	0,39	-	-	22,72	26	31	1,00	124,0	167,25	133,43	0,2	0,00
PCE48	18	25,0	10	23,75	22,98	22,00	20,90	18,15	14,03	11,48	-	-	0,03	0,03	0,01	0,08	1,28	1,51	0,33	-	-	18,77	22	31	1,00	124,0	168,25	131,87	0,1	0,00
PCE48	19	26,0	11	24,75	23,98	23,00	21,90	19,15	15,03	12,48	-	-	0,03	0,02	0,01	0,07	1,16	1,32	0,28	-	-	15,78	19	31	1,00	124,0	169,25	130,66	0,1	30,81
PCE52	4	11,6	0	9,80	8,00	4,40	-	-	-	-	-	-	0,68	1,34	12,36	-	-	-	-	-	-	1234,08	1248	21	0,55	46,2	134,30	148,24	8,3	0,00
PCE52	5	12,6	1	10,80	9,00	5,40	-	-	-	-	-	-	0,57	1,09	8,80	-	-	-	-	-	-	308,52	319	25	0,55	55,0	135,30	100,78	3,1	0,00
PCE52	6	13,6	2	11,80	10,00	6,40	-	-	-	-	-	-	0,48	0,90	6,58	-	-	-	-	-	-	137,12	145	25	0,55	55,0	136,30	79,02	1,7	0,00
PCE52	7	14,6	3	12,80	11,00	7,40	-	-	-	-	-	-	0,42	0,76	5,11	-	-	-	-	-	-	77,13	83	25	0,55	55,0	137,30	69,73	1,1	0,00
PCE52	8	15,6	4	13,80	12,00	8,40	-	-	-	-	-	-	0,36	0,64	4,08	-	-	-	-	-	-	49,36	54	25	0,55	55,0	138,30	64,93	0,8	0,00
PCE52	9	16,6	5	14,80	13,00	9,40	-	-	-	-	-	-	0,32	0,56	3,33	-	-	-	-	-	-	34,28	38	25	0,55	55,0	139,30	62,13	0,6	0,00
PCE52	10	17,6	6	15,80	14,00	10,40	-	-	-	-	-	-	0,28	0,48	2,77	-	-	-	-	-	-	25,19	29	25	0,55	55,0	140,30	60,37	0,4	0,00
PCE52	11	18,6	7	16,80	15,00	11,40	-	-	-	-	-	-	0,25	0,43	2,34	-	-	-	-	-	-	19,28	22	25	0,55	55,0	141,30	59,18	0,3	0,00
PCE52	12	19,6	8	17,80	16,00	12,40	-	-	-	-	-	-	0,22	0,38	2,01	-	-	-	-	-	-	15,24	18	25	0,55	55,0	142,30	58,35	0,3	0,00
PCE52	13	20,6	9	18,80	17,00	13,40	-	-	-	-	-	-	0,20	0,34	1,74	-	-	-	-	-	-	12,34	15	25	0,55	55,0	143,30	57,74	0,2	0,00
PCE52	14	21,6	10	19,80	18,00	14,40	-	-	-	-	-	-	0,18	0,30	1,52	-	-	-	-	-	-	10,20	12	25	0,55	55,0	144,30	57,28	0,2	0,00
PCE52	15	22,6	11	20,80	19,00	15,40	-	-	-	-	-	-	0,17	0,27	1,34	-	-	-	-	-	-	8,57	10	25	0,55	55,0	145,30	56,92	0,2	17,09
PCE57	4	12,0	0	10,20	8,40	4,80	-	-	-	-	-	-	0,63	1,23	10,71	-	-	-	-	-	-	2761,96	2775	25	0,55	55,0	138,70	252,06	11,0	0,00
PCE57	5	13,0	1	11,20	9,40	5,80	-	-	-	-	-	-	0,53	1,01	7,79	-	-	-	-	-	-	690,49	700	25	0,55	55,0	139,70	134,83	5,1	0,00
PCE57	6	14,0	2	12,20	10,40	6,80	-	-	-	-	-	-	0,45	0,84	5,92	-	-	-	-	-	-	306,88	314	25	0,55	55,0	140,70	98,88	3,1	0,00
PCE57	7	15,0	3	13,20	11,40	7,80	-	-	-	-	-	-	0,39	0,71	4,65	-	-	-	-	-	-	172,62	178	25	0,55	55,0	141,70	82,66	2,1	0,00
PCE57	8	16,0	4	14,20	12,40	8,80	-	-	-	-	-	-	0,34	0,61	3,75	-	-	-	-	-	-	110,48	115	25	0,55	55,0	142,70	73,94	1,5	0,00
PCE57	9	17,0	5	15,20	13,40	9,80	-	-	-	-	-	-	0,30	0,53	3,09	-	-	-	-	-	-	76,72	81	25	0,55	55,0	143,70	68,72	1,1	0,00
PCE57	10	18,0	6	16,20	14,40	10,80	-	-	-	-	-	-	0,27	0,46	2,59	-	-	-	-	-	-	56,37	60	25	0,55	55,0	144,70	65,37	0,9	0,00
PCE57	11	19,0	7	17,20	15,40	11,80	-	-	-	-	-	-	0,24	0,40	2,20	-	-	-	-	-	-	43,16	46	25	0,55	55,0	145,70	63,09	0,7	0,00
PCE57	12	20,0	8	18,20	16,40	12,80	-	-	-	-	-	-	0,21	0,36	1,89	-	-	-	-	-	-	34,10	37	25	0,55	55,0	146,70	61,47	0,6	0,00
PCE57	13	21,0	9	19,20	17,40	13,80	-	-	-	-	-	-	0,19	0,32	1,65	-	-	-	-	-	-	27,62	30	25	0,55	55,0	147,70	60,29	0,5	0,00
PCE57	14	22,0	10	20,20	18,40	14,80	-	-	-	-	-	-	0,18	0,29	1,44	-	-	-	-	-	-	22,83	25	25	0,55	55,0	148,70	59,40	0,4	26,82
PCE65	10	26,0	0	24,75	23,98	23,00	21,90	19,15	15,03	12,48	11,10	9,73	0,03	0,02	0,01	0,07	1,16	1,32	0,28	0,41	1,60	2130,22	2135	31	1,00	124,0	277,75	365,48	5,8	0,00
PCE65	11	27,0	1	25,75	24,98	24,00	22,90	20,15	16,03	13,48	12,10	10,73	0,02	0,02	0,01	0,06	1,05	1,17	0,25	0,35	1,34	532,56	537	31	1,00	124,0	278,75	212,10	2,5	0,00
PCE65	12	28,0	2	26,75	25,98	25,00	23,90	21,15	17,03	14,48	13,10	11,73	0,02	0,02	0,01	0,06	0,96	1,05	0,21	0,30	1,13	236,69	240	31	1,00	124,0	279,75	169,09	1,4	0,00
PCE65	13	29,0	3	27,75	26,98	26,00	24,90	22,15	18,03	15,48	14,10	12,73	0,02	0,02	0,01	0,05	0,88	0,94	0,19	0,26	0,98	133,14	136	31	1,00	124,0	280,75	151,17	0,9	0,00
PCE65	14	30,0	4	28,75	27,98	27,00	25,90	23,15	19,03	16,48	15,10	13,73	0,02	0,02	0,01	0,05	0,81	0,85	0,17	0,23	0,85	85,21	88	31	1,00	124,0	281,75	142,09	0,6	0,00
PCE65	15	31,0	5	29,75	28,98	28,00	26,90	24,15	20,03	17,48	16,10	14,73	0,02	0,02	0,01	0,05	0,74	0,77	0,15	0,20	0,74	59,17	62	31	1,00	124,0	282,75	136,90	0,4	0,00
PCE65	16	32,0	6	30,75	29,98	29,00	27,90	25,15	21,03	18,48	17,10	15,73	0,02	0,02	0,01	0,04	0,69	0,70	0,14	0,18	0,66	43,47	46	31	1,00	124,0	283,75	133,66	0,3	0,00
PCE65	17	33,0	7	31,75	30,98	30,00	28,90	26,15	22,03	19,48	18,10	16,73	0,02	0,01	0,01	0,04	0,64	0,64	0,12	0,16	0,58	33,28	36	31	1,00	124,0	284,75	131,51	0,3	0,00
PCE65	18	34,0	8	32,75	31,98	31,00	29,90	27,15	23,03	20,48	19,10	17,73	0,02	0,01	0,01	0,04	0,59	0,59	0,11	0,15	0,52	26,30	28	31	1,00	124,0	285,75	130,00	0,2	0,00
PCE65	19	35,0	9	33,75	32,98	32,00	30,90	28,15	24,03	21,48	20,10	18,73	0,01	0,01	0,01	0,04	0,55	0,54	0,10	0,13	0,47	21,30	23	31	1,00	124,0	286,75	128,91	0,2	0,00
PCE65	20	36,0	10	34,75	33,98	33,00	31,90	29,15	25,03	22,48	21,10	19,73	0,01	0,01	0,01	0,03	0,52	0,50	0,09	0,12	0,43	17,61	19	31	1,00	124,0	287,75	128,10	0,1	12,74
PCE80	8	20,8	0	19,55	17,90	14,15	10,65	8,65	5,83	3,53	-	-	0,05	0,60	1,83	1,28	2,92													

Estaca	Camada	Z	hp	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8	h9	$\Delta\sigma_1$ (kPa)	$\Delta\sigma_2$ (kPa)	$\Delta\sigma_3$ (kPa)	$\Delta\sigma_4$ (kPa)	$\Delta\sigma_5$ (kPa)	$\Delta\sigma_6$ (kPa)	$\Delta\sigma_7$ (kPa)	$\Delta\sigma_8$ (kPa)	$\Delta\sigma_9$ (kPa)	$\Delta\sigma_p$ (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	Nspt (médio)2	K (MPa)	E0 (MPa)	σ_0 (kPa)	Es (MPa)	$(\Delta\sigma/Es)*H$ (mm)	Recalque total (mm)
PCE91	8	15,0	0	13,75	12,98	12,00	10,90	8,15	4,03	1,48	-	-	0,10	0,09	0,04	0,30	6,60	15,54	9,31	-	-	2017,13	2049	6	1,00	24,0	155,25	90,44	22,3	0,00
PCE91	9	16,0	1	14,75	13,98	13,00	11,90	9,15	5,03	2,48	-	-	0,08	0,08	0,04	0,26	5,37	10,88	4,83	-	-	553,45	575	25	1,00	100,0	159,25	214,72	2,6	0,00
PCE91	10	17,0	2	15,75	14,98	14,00	12,90	10,15	6,03	3,48	-	-	0,07	0,07	0,03	0,22	4,46	8,04	2,95	-	-	253,98	270	29	1,00	116,0	160,25	190,03	1,3	0,00
PCE91	11	18,0	3	16,75	15,98	15,00	13,90	11,15	7,03	4,48	-	-	0,07	0,06	0,03	0,19	3,76	6,18	1,99	-	-	145,20	157	31	1,00	124,0	161,25	174,33	0,8	0,00
PCE91	12	19,0	4	17,75	16,98	16,00	14,90	12,15	8,03	5,48	-	-	0,06	0,05	0,03	0,17	3,22	4,90	1,43	-	-	93,84	104	31	1,00	124,0	162,25	158,75	0,6	0,00
PCE91	13	20,0	5	18,75	17,98	17,00	15,90	13,15	9,03	6,48	-	-	0,05	0,05	0,02	0,15	2,78	3,98	1,08	-	-	65,59	74	31	1,00	124,0	163,25	149,39	0,4	0,00
PCE91	14	21,0	6	19,75	18,98	18,00	16,90	14,15	10,03	7,48	-	-	0,05	0,04	0,02	0,13	2,43	3,30	0,84	-	-	48,42	55	31	1,00	124,0	164,25	143,34	0,3	0,00
PCE91	15	22,0	7	20,75	19,98	19,00	17,90	15,15	11,03	8,48	-	-	0,04	0,04	0,02	0,12	2,14	2,78	0,67	-	-	37,20	43	31	1,00	124,0	165,25	139,21	0,3	0,00
PCE91	16	23,0	8	21,75	20,98	20,00	18,90	16,15	12,03	9,48	-	-	0,04	0,04	0,02	0,11	1,90	2,37	0,55	-	-	29,47	34	31	1,00	124,0	166,25	136,26	0,2	28,90
PCE93	8	25,5	0	24,25	22,60	18,85	15,35	13,35	10,53	8,23	-	-	0,03	0,38	1,07	0,65	1,33	2,53	1,47	-	-	2479,56	2487	60	0,55	132,0	273,45	419,40	5,9	0,00
PCE93	9	26,5	1	25,25	23,60	19,85	16,35	14,35	11,53	9,23	-	-	0,03	0,35	0,97	0,58	1,16	2,14	1,20	-	-	680,33	687	60	0,55	132,0	274,45	247,03	2,8	0,00
PCE93	10	27,5	2	26,25	24,60	20,85	17,35	15,35	12,53	10,23	-	-	0,03	0,33	0,88	0,52	1,03	1,84	0,99	-	-	312,20	318	60	0,55	132,0	275,45	193,72	1,6	0,00
PCE93	11	28,5	3	27,25	25,60	21,85	18,35	16,35	13,53	11,23	-	-	0,02	0,30	0,81	0,47	0,91	1,60	0,84	-	-	178,48	183	60	0,55	132,0	276,45	170,25	1,0	0,00
PCE93	12	29,5	4	28,25	26,60	22,85	19,35	17,35	14,53	12,23	-	-	0,02	0,28	0,74	0,42	0,82	1,40	0,72	-	-	115,35	120	60	0,55	132,0	277,45	157,94	0,7	0,00
PCE93	13	30,5	5	29,25	27,60	23,85	20,35	18,35	15,53	13,23	-	-	0,02	0,26	0,68	0,38	0,73	1,23	0,62	-	-	80,63	85	60	0,55	132,0	278,45	150,72	0,5	0,00
PCE93	14	31,5	6	30,25	28,60	24,85	21,35	19,35	16,53	14,23	-	-	0,02	0,24	0,63	0,35	0,66	1,10	0,54	-	-	59,52	63	60	0,55	132,0	279,45	146,14	0,4	0,00
PCE93	15	32,5	7	31,25	29,60	25,85	22,35	20,35	17,53	15,23	-	-	0,02	0,23	0,59	0,32	0,60	0,98	0,48	-	-	45,73	49	60	0,55	132,0	280,45	143,06	0,3	0,00
PCE93	16	33,5	8	32,25	30,60	26,85	23,35	21,35	18,53	16,23	-	-	0,02	0,21	0,55	0,30	0,55	0,89	0,42	-	-	36,23	39	60	0,55	132,0	281,45	140,89	0,3	13,58

Legenda

Z – Profundidade da camada analisada (m);

hp – Camada abaixo da ponta analisada;

h_i – Distância vertical do ponto de aplicação da força ao topo dessa camada i.

Apêndice C – Método Poulos e Davis

Recalque total																										
Estaca	Diâmetro (m)	L (m)	Espessura do perfil	h (m)	P (kN)	Tipo de Solo	K (Mpa)	α	NSPT (fuste)	NSPT (ponta)	Es (MPa)	Ep (Mpa)	Eb (Mpa)	Eb/Es	us	b/B	L/B	h/L	L/h	Kp	IO	Rk	Rh	Rv	I	W (mm)
PCE07	0,4	15,0	19,00	19,00	1200	Areia siltosa	0,70	3	12	17	25,20	27000	35,70	1,42	0,3	1	37,5	1,27	0,79	1071,43	0,053	1,19	0,74	0,93	0,043	5,17
PCE10	0,4	13,2	19,00	19,00	1600	Areia siltosa	0,70	3	12	17	25,20	27000	35,70	1,42	0,3	1	33,0	1,44	0,69	1071,43	0,060	1,15	0,78	0,93	0,050	7,94
PCE17	0,4	17,5	18,85	18,85	1000	Areia	0,90	3	13	31	35,10	27000	83,70	2,38	0,3	1	43,8	1,08	0,93	769,23	0,050	1,46	0,44	0,94	0,030	2,15
PCE24	0,4	19,0	18,85	19,00	1206	Areia	0,90	3	13	31	35,10	27000	83,70	2,38	0,3	1	47,5	1,00	1,00	769,23	0,048	1,49	0,42	0,94	0,028	2,43
PCE32	0,5	18,0	19,00	19,00	1600	Areia siltosa	0,70	3	12	53	25,20	27000	111,30	4,42	0,3	1	36,0	1,06	0,95	1071,43	0,058	1,19	0,42	0,93	0,027	3,42
PCE45	0,5	20,0	19,00	20,00	2600	Areia siltosa	0,70	3	14	60	29,40	27000	126,00	4,29	0,3	1	40,0	1,00	1,00	918,37	0,052	1,25	0,42	0,93	0,025	4,49
PCE48	0,5	15,0	18,85	18,85	2520	Areia	0,90	3	13	23	35,10	27000	62,10	1,77	0,3	1	30,0	1,26	0,80	769,23	0,068	1,23	0,68	0,94	0,053	7,68
PCE52	0,5	11,6	11,50	11,60	1400	Silte arenoso	0,45	5	12	25	27,00	27000	56,25	2,08	0,4	1	23,2	1,00	1,00	1000,00	0,080	1,19	0,42	0,93	0,037	3,86
PCE57	0,5	12,0	11,50	12,00	2600	Silte arenoso	0,45	5	13	24	29,25	27000	54,00	1,85	0,4	1	24,0	1,00	1,00	923,08	0,079	1,17	0,42	0,93	0,036	6,42
PCE65	0,5	26,0	18,85	26,00	2600	Areia	0,90	3	18	31	48,60	27000	83,70	1,72	0,3	1	52,0	1,00	1,00	555,56	0,043	2,00	0,42	0,95	0,034	3,67
PCE80	0,6	20,8	19,00	20,80	3240	Areia siltosa	0,70	3	14	60	29,40	27000	126,00	4,29	0,3	1	34,7	1,00	1,00	918,37	0,059	1,23	0,42	0,93	0,028	5,21
PCE81	0,6	18,5	18,85	18,85	3600	Areia	0,90	3	13	31	35,10	27000	83,70	2,38	0,3	1	30,8	1,02	0,98	769,23	0,067	1,38	0,42	0,94	0,037	6,24
PCE91	0,6	15,0	18,85	18,85	2800	Areia	0,90	3	13	23	35,10	27000	62,10	1,77	0,3	1	25,0	1,26	0,80	769,23	0,078	1,22	0,65	0,94	0,058	7,73
PCE93	0,6	25,5	19,00	25,50	3600	Areia siltosa	0,70	3	18	60	37,80	27000	126,00	3,33	0,3	1	42,5	1,00	1,00	714,29	0,051	1,58	0,42	0,94	0,032	5,05

Legenda

L – Comprimento da estaca;

h – Maior valor entre o comprimento da estaca e a espessura do perfil;

b – Diâmetro da base da estaca;

B – Diâmetro do fuste da estaca.

Apêndice D – Método Randolph e Wroth

Dados da estaca					Ponta da estaca							Abaixo da ponta						
Estaca	L (m)	P (kN)	r0 (m)	rb (m)	Tipo de solo (L)	KL (Mpa)	αL	uL	NSPT L	EL (Mpa)	GL (Mpa)	Tipo de solo (b)	Kb (Mpa)	αb	$u b$	NSPT b	Eb (Mpa)	Gb
PCE07	15,00	1200	0,20	0,20	Areia siltosa	0,70	3	0,30	8	16,80	6,46	Areia siltosa	0,70	3	0,30	17	35,70	13,73
PCE10	13,20	1600	0,20	0,20	Areia siltosa	0,70	3	0,30	9	18,90	7,27	Areia siltosa	0,70	3	0,30	17	35,70	13,73
PCE17	17,50	1000	0,20	0,20	Areia	0,90	3	0,30	30	81,00	31,15	Areia	0,90	3	0,30	31	83,70	32,19
PCE24	19,00	1206	0,20	0,20	Areia	0,90	3	0,30	30	81,00	31,15	Areia	0,90	3	0,30	31	83,70	32,19
PCE32	18,00	1600	0,25	0,25	Silte arenoso	0,45	5	0,35	33	74,25	27,50	Silte arenoso	0,45	5	0,35	53	119,25	44,17
PCE45	20,00	2600	0,25	0,25	Silte arenoso	0,45	5	0,35	33	74,25	27,50	Silte arenoso	0,45	5	0,35	60	135,00	50,00
PCE48	15,00	2520	0,25	0,25	Areia	0,90	3	0,30	6	16,20	6,23	Areia	0,90	3	0,30	23	62,10	23,88
PCE52	11,60	1400	0,25	0,25	Silte arenoso	0,45	5	0,35	25	56,25	20,83	Silte arenoso	0,45	5	0,35	25	56,25	20,83
PCE57	12,00	2600	0,25	0,25	Silte arenoso	0,45	5	0,35	25	56,25	20,83	Silte arenoso	0,45	5	0,35	24	54,00	20,00
PCE65	26,00	2600	0,25	0,25	Areia	0,90	3	0,30	30	81,00	31,15	Areia	0,90	3	0,30	31	83,70	32,19
PCE80	20,80	3240	0,30	0,30	Silte arenoso	0,45	5	0,35	33	74,25	27,50	Silte arenoso	0,45	5	0,35	60	135,00	50,00
PCE81	18,50	3600	0,30	0,30	Areia	0,90	3	0,30	30	81,00	31,15	Areia	0,90	3	0,30	31	83,70	32,19
PCE91	15,00	2800	0,30	0,30	Areia	0,90	3	0,30	6	16,20	6,23	Areia	0,90	3	0,30	23	62,10	23,88
PCE93	25,50	3600	0,30	0,30	Silte arenoso	0,45	5	0,35	33	74,25	27,50	Silte arenoso	0,45	5	0,35	60	135,00	50,00

Dados da estaca					Fuste da estaca							Cálculo do recalque total									
Estaca	L (m)	P (kN)	r0 (m)	rb (m)	Tipo de solo (médio)	médio (Mpa)	αm	$u m$	NSPT m	Em (Mpa)	Gm (Mpa)	n	ξ	ρr	Ep (MPa)	λ	u	rm (m)	ζ	μL	wt (mm)
PCE07	15,00	1200	0,20	0,20	Areia siltosa	0,70	3	0,315	12	25,20	9,58	1	0,47	1,48	27000	4178,57	0,30	20,30	4,62	3189,76	14,95
PCE10	13,20	1600	0,20	0,20	Areia siltosa	0,70	3	0,377	12	25,20	9,15	1	0,53	1,26	27000	3714,29	0,30	16,95	4,44	2699,78	18,13
PCE17	17,50	1000	0,20	0,20	Areia	0,90	3	0,300	13	35,10	13,50	1	0,97	0,43	27000	866,67	0,30	12,98	4,17	1783,27	5,44
PCE24	19,00	1206	0,20	0,20	Areia	0,90	3	0,300	13	35,10	13,50	1	0,97	0,43	27000	866,67	0,30	14,10	4,26	1917,32	6,56
PCE32	18,00	1600	0,25	0,25	Areia siltosa	0,70	3	0,368	12	25,20	9,21	1	0,62	0,33	27000	981,82	0,30	8,27	3,50	1705,76	5,72
PCE45	20,00	2600	0,25	0,25	Areia siltosa	0,70	3	0,382	14	29,40	10,64	1	0,55	0,39	27000	981,82	0,30	9,70	3,66	1853,53	8,03
PCE48	15,00	2520	0,25	0,25	Areia	0,90	3	0,300	13	35,10	13,50	1	0,26	2,17	27000	4333,33	0,30	17,61	4,25	2707,97	18,46
PCE52	11,60	1400	0,25	0,25	Silte arenoso	0,45	5	0,350	12	27,00	10,00	1	1,00	0,48	27000	1296,00	0,35	9,05	3,59	1246,98	10,92
PCE57	12,00	2600	0,25	0,25	Silte arenoso	0,45	5	0,350	13	29,25	10,83	1	1,04	0,52	27000	1296,00	0,35	10,44	3,73	1265,04	21,13
PCE65	26,00	2600	0,25	0,25	Areia	0,90	3	0,300	18	48,60	18,69	1	0,97	0,60	27000	866,67	0,30	26,63	4,67	2003,99	14,13
PCE80	20,80	3240	0,30	0,30	Areia siltosa	0,70	3	0,384	14	29,40	10,62	1	0,55	0,39	27000	981,82	0,30	10,07	3,51	1639,03	9,98
PCE81	18,50	3600	0,30	0,30	Areia	0,90	3	0,300	13	35,10	13,50	1	0,97	0,43	27000	866,67	0,30	13,73	3,82	1313,03	19,57
PCE91	15,00	2800	0,30	0,30	Areia	0,90	3	0,300	13	35,10	13,50	1	0,26	2,17	27000	4333,33	0,30	17,61	4,07	2306,60	20,51
PCE93	25,50	3600	0,30	0,30	Areia siltosa	0,70	3	0,408	18	37,80	13,42	1	0,55	0,49	27000	981,82	0,30	14,85	3,90	1906,83	10,66

Apêndice E – Tabela de Resultados Método Cintra e Aoki

PCE	Recalque calculado (mm)	Recalque medido (mm)	Diferença relativa (%)
PCE-7	26,09	6,47	303,28%
PCE-10	33,40	7,95	320,14%
PCE-17	7,23	8,28	-12,63%
PCE-24	10,14	7,12	42,41%
PCE-32	11,18	18,79	-40,51%
PCE-45	18,07	11,76	53,62%
PCE-48	38,11	8,10	370,46%
PCE-52	19,86	10,01	98,37%
PCE-57	32,16	18,59	72,98%
PCE-65	35,61	8,29	329,53%
PCE-80	19,09	14,68	30,04%
PCE-81	21,84	11,92	83,19%
PCE-91	34,49	10,14	240,17%
PCE-93	22,39	11,45	95,55%

Apêndice F – Tabela de Resultados Método Poulos e Davis

PCE	Recalque calculado (mm)	Recalque medido (mm)	Diferença relativa (%)
PCE-7	5,17	6,47	-20,14%
PCE-10	7,94	7,95	-0,06%
PCE-17	2,15	8,28	-74,03%
PCE-24	2,43	7,12	-65,94%
PCE-32	3,42	18,79	-81,78%
PCE-45	4,49	11,76	-61,81%
PCE-48	7,68	8,10	-5,23%
PCE-52	3,86	10,01	-61,48%
PCE-57	6,42	18,59	-65,47%
PCE-65	3,67	8,29	-55,71%
PCE-80	5,21	14,68	-64,53%
PCE-81	6,24	11,92	-47,65%
PCE-91	7,73	10,14	-23,76%
PCE-93	5,05	11,45	-55,90%

Apêndice G – Tabela de Resultados Método Randolph e Wroth

PCE	Recalque calculado (mm)	Recalque medido (mm)	Diferença relativa (%)
PCE-7	14,95	6,47	131,09%
PCE-10	18,13	7,95	128,05%
PCE-17	5,44	8,28	-34,34%
PCE-24	6,56	7,12	-7,93%
PCE-32	5,72	18,79	-69,54%
PCE-45	8,03	11,76	-31,68%
PCE-48	18,46	8,10	127,96%
PCE-52	10,92	10,01	9,10%
PCE-57	21,13	18,59	13,68%
PCE-65	14,13	8,29	70,50%
PCE-80	9,98	14,68	-32,03%
PCE-81	19,57	11,92	64,18%
PCE-91	20,51	10,14	102,24%
PCE-93	10,66	11,45	-6,94%

Apêndice G – Tabela da Análise Comparativa

PCE	Recalque medido (mm)	Cintra e Aoki	Poulos e Davis	Randolph e Wroth
PCE-7	6,47	26,09	5,17	14,95
PCE-10	7,95	33,40	7,94	18,13
PCE-17	8,28	7,23	2,15	5,44
PCE-24	7,12	10,14	2,43	6,56
PCE-32	18,79	11,18	3,42	5,72
PCE-45	11,76	18,07	4,49	8,03
PCE-48	8,10	38,11	7,68	18,46
PCE-52	10,01	19,86	3,86	10,92
PCE-57	18,59	32,16	6,42	21,13
PCE-65	8,29	35,61	3,67	14,13
PCE-80	14,68	19,09	5,21	9,98
PCE-81	11,92	21,84	6,24	19,57
PCE-91	10,14	34,49	7,73	20,51
PCE-93	11,45	22,39	5,05	10,66