

**FACULDADE DOCTUM
CINTHIA GABRIELA CARDOZO MAKKAI
RODRIGO RAMOS SOARES**

**ANÁLISE HISTÓRICA DOS MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS DE ESTIMATIVA
DE RECALQUE EM FUNDAÇÕES PROFUNDAS**

Juiz de Fora
2020

ANÁLISE HISTÓRICA DOS MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS DE ESTIMATIVA DE RECALQUE EM FUNDAÇÕES PROFUNDAS

Monografia de Conclusão de Curso, apresentada ao curso de Engenharia Civil, Faculdade Doctum de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador (a): – M. Sc. Wellington Coutinho da Silva

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, por nos dar força, saúde e fé para enfrentar os desafios diários, até chegar à conclusão de mais uma etapa em nossa vida.

Também agradecemos ao nosso orientador, M.Sc. Wellington Coutinho da Silva, pela dedicação, atenção, apoio e prontidão para nos auxiliar no desenvolvimento do trabalho. Sem seu auxílio e orientação, não seria possível concluir o estudo.

A nossa família, pela compreensão nos momentos em que estivemos ausentes pelo tempo dedicado ao trabalho.

Aos companheiros, que sempre nos apoiaram nos nossos sonhos, nos incentivaram e acreditaram no nosso potencial.

Por fim, gostaríamos de agradecer a todos aos nossos amigos e professores que nos auxiliaram nessa jornada.

Resumo

Em projetos de fundações, a análise de recalques é um procedimento imprescindível para garantir a segurança estrutural da obra, pois os elementos de fundações devem suportar as cargas da superestrutura, não gerando recalques que exceda os limites admissíveis. O principal objetivo desse trabalho é analisar os métodos de estimativa de recalque de diferentes autores, abordando a evolução dos métodos. Para o estudo dos métodos foi dimensionada a fundação do tipo estaca hélice contínua. Nesta abordagem, as estacas foram dimensionadas pelo método de Aoki e Velloso, e logo em seguida, escolhemos o pilar P33 do empreendimento para a estimativa de recalque, por se tratar de uma estaca isolada, pois os cálculos semi-empíricos dos autores Vésic, Poulos e Davis e Cintra e Aoki abordados neste trabalho apresentam como objeto de estudo esta classe de estaca. O estudo revelou que os métodos apesar de apresentaram análises diferentes e em algumas partes semelhanças entre si, no sentido de levarem em considerações alguns fatores do solo e das estruturas de maneira semelhante evoluíram com o tempo, tornando o método de Cintra e Aoki mais atual, uma vez que utiliza parâmetros que descrevem características mais específicas do solo. O estudo apontou que o empreendimento está de acordo com o recalque limite admissível, onde essa verificação foi feita através de um gráfico que mostra o limite de recalque para cada tipo de empreendimento.

Palavras-chave: Fundação Profunda; Recalques; Métodos Semi-empíricos.

Abstract

In foundation projects, the settlement analysis is an essential procedure to guarantee the structural safety of the work, as the elements of the foundations must support the loads of the superstructure, not generating settlements that exceed the allowable limits. The main objective of this work was to analyze the methods of estimating settlement of different authors, addressing the evolution of the methods among them. For the study of the method, the continuous propeller pile foundation was designed. In this approach, the piles were dimensioned by the method of Aoki and Velloso, and right after that, we chose the P33 pile for the settlement estimate because it is an isolated pile because the semi-empirical calculations of the authors Vésic, Poulos and Davis and Cintra and Aoki addressed in this work present this stake class as an object of study. The study revealed that the methods despite having different analyzes and in some parts similarities to each other, in the sense of taking into account some factors of the soil and structures in a similar way have evolved over time making the Cintra and Aoki method more current once that uses parameters that describe more specific characteristics of the soil. The study pointed out that the project is in accordance with the permissible limit settlement, where this verification was done through a graph that shows the settlement limit for each type of project.

Keywords: Deep Foundation; Settlements; Semi-empirical methods.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Execução da estaca tipo hélice contínua	17
Figura 2 - Situações de ocorrência do mecanismo da interação solo-estrutura	18
Figura 3 – Exemplo de sondagem a percussão	19
Figura 4 – Parcelas de resistência	20
Figura 5 – Recalque Diferencial	24
Figura 6 – Tipos de Recalques e os danos associados.	25
Figura 7 – Recalques de uma Fundação sob Carga Vertical	26
Figura 8 – distribuição do atrito	29
Figura 9 – ábaco para obtenção de l_0	32
Figura 10 – ábaco para obtenção de R_k	33
Figura 11 – ábaco para obtenção de R_h	34
Figura 12 – ábaco para obtenção de R_v	34
Figura 13 – diagrama de esforço normal da estaca	36
Figura 14 – propagação de tensões devido à reação de ponta.....	38
Figura 15 – propagação de tensões devido a cargas laterais	39
Figura 16 – Primeira página do relatório de sondagem referente ao estudo em questão	44
Figura 17– Segunda página do relatório de sondagem referente ao estudo em questão	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Coeficientes K e α	23
Quadro 2 – Fatores F1 e F2.....	23
Quadro 3 - Valores de Cp para o método de Vésic (1969,1975a).....	30
Quadro 4 – valores do coeficiente KA.....	41
Quadro 5 – Carregamento dos pilares referente ao estudo em questão.....	43
Quadro 6 – Resumo do Dimensionamento da Estaca Hélice Contínua	46
Quadro 7 - Parâmetros do solo em função do SPT.....	47
Quadro 8 - valores estimados do módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão do concreto.....	47
Quadro 9 – Resultados de recalque.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

NBR – Normas Brasileira Regulamentadora;

SPT – Standard Penetration Test;

ELU – Estado Limite Último;

ELS – Estado Limite de Serviço;

CPT – Cone penetration test;

Fck – Feature Compression Know

tf – Tonelada-força;

Kn – Kilonewton;

mm – Milímetro;

cm – Centímetro;

m – Metro;

m² – Área;

m³ – Volume;

GPa – Gigapascal;

MPa – Megapascal;

KPa – Kilopascal;

Pa – Pascal;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS.....	11
1.1.1 Objetivo Geral	11
1.1.2 Objetivos Específicos.....	12
1.2 JUSTIFICATIVA.....	12
1.3 METODOLOGIA	13
2 ANÁLISE DE RECALQUES	15
2.1 PRINCIPAIS ASPECTOS DE FUNDAÇÃO PROFUNDA	15
2.1.1 Estacas	16
2.1.2 Estacas escavadas do tipo Hélice Contínua.....	16
2.2 INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA.....	17
2.3 SONDAGEM SPT	19
2.4 CAPACIDADE DE CARGA.....	20
2.5 AOKI E VELLOSO (1975).....	22
2.6 RECALQUE	23
2.6.1 Principais Métodos De Estimativa De Recalque	26
2.7 MÉTODO VÉSIC (1969, 1975A).....	28
2.7.1 Recalque Devido ao Encurtamento Elástico da Estaca (Se)	28
2.7.2 Recalque do Solo Devido à Carga Transmitida na Ponta (Sp)	29
2.7.3 Recalque do Solo Devido à Carga Distribuída no Fuste (Sf)	30
2.8 MÉTODO POULOS E DAVIS (1980).....	31
2.9 MÉTODO CINTRA E AOKI (2010).....	35
2.9.1 Encurtamento Elástico	35
2.9.2 Recalque do Solo.....	37

3 ESTUDO DE CASO HIPOTÉTICO	42
3.1 DESCRIÇÃO DO PROJETO	42
3.1.1 Descrição Da Empresa Responsável Pelo Projeto	45
3.2 DIMENSIONAMENTO DAS ESTACAS PARA O PILAR P33	46
4 CÁLCULO DA ESTIMATIVA DE RECALQUE	47
4.1 CÁLCULO PELO MÉTODO VÉSIC (1969, 1975 A).....	48
4.2 CÁLCULO PELO MÉTODO POULOS E DAVIS (1980)	50
4.3 CÁLCULO PELO MÉTODO CINTRA E AOKI (2010)	52
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	55
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS	59
ANEXOS	63

1 INTRODUÇÃO

As fundações constituem a principal etapa de uma obra, trata-se do elemento principal responsável por transmitir ou distribuir todas as cargas das estruturas ao solo (GOMES, 2014; SOUSA, 2019).

O estudo da caracterização do solo é o que vai definir o tipo de fundação em uma obra. O solo pode ter características heterogêneas, devido ao fato, um conhecimento prévio é imprescindível. Neste contexto, o procedimento de reconhecimento do solo conhecido como sondagem SPT, sigla em inglês para (Standard Penetration Test) torna – se uma ferramenta de grande valia. A partir da análise geotécnica é possível a realização da estimativa de recalque e prova de carga (ROSA, 2009; SOUSA, 2019).

Existem diferentes tipos de métodos para a realização dessas estimativas de acordo com as características geotécnicas do solo e do tipo de estaca usada na fundação.

A relevância deste trabalho fica evidente diante da responsabilidade de se realizar um estudo prévio e criterioso em obras de fundação.

Neste trabalho será abordado um estudo sobre os métodos semi-empíricos de estimativa de recalque em fundações profundas, a partir do método de interação solo-estrutura.

Será apresentado o método Vésic (1975), o método Poulos e Davis (1980) e o método Cintra e Aoki (2010).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é analisar os métodos de estimativa de recalque de diferentes autores, abordando a evolução dos métodos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Dimensionar as fundações profundas por meio do método de interação solo-estrutura.

- Apresentar e analisar o método Vésic (1975), o método Poulos e Davis (1980) e o método Cintra e Aoki (2010) para estimativa do recalque do elemento de fundação.

- Aplicar os métodos de estimativa de recalque em um estudo de caso hipotético.

1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira – Norma Técnica ABNT-NBR 6122/2019 - a fundação profunda é um elemento de fundação que transmite a carga ao terreno pela base (resistência de ponta), por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação das duas, e que está assente em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo 3 (três) metros, salvo justificativa.

O comportamento de uma fundação a longo prazo pode ser afetado por patologias decorrentes do próprio projeto e do processo de construção. A necessidade de reforço da fundação pode gerar custos muito superiores ao valor médio usual que é de 4% do custo global de uma obra. A ocorrência de recalques em obras civis podem ser observadas em exemplos clássicos como da Torre de Pisa e Cidade do México, tais casos tem sido amplamente estudados. No Brasil pode-se citar como exemplo as edificações no litoral de São Paulo, na cidade de Santos, a ocorrência desses recalques gerou inúmeros pontos negativos, o principal deles foi o desconforto dos moradores e conseqüentemente a desvalorização imobiliária desses prédios. É notório a importância dos estudos de recalques em fundações com o principal objetivo de se prever os recalques diferenciais, pois quando não previstos são responsáveis por danos expressivos sobre a estrutura e podem ter um impacto direto no uso do edifício, inviabilizando em alguns casos, até a permanência de pessoas no local (Milititsky *et al.* 2015).

Pela importância das fundações em construções, torna-se necessário considerar a deformação vertical da estrutura (recalque) que pode ocorrer, neste contexto a análise de diferentes métodos para estimativa de tal deslocamento é relevante, no sentido de apresentar um histórico como os métodos e entendimentos evoluíram.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho está classificada quanto à sua natureza como uma pesquisa básica bibliográfica. Com relação à abordagem classifica-se como qualitativa; quanto aos objetivos, exploratória; com relação aos procedimentos técnicos, classifica-se como uma pesquisa bibliográfica.

Para Gerhardt e Silveira (2009), a pesquisa básica objetiva gera novos conhecimentos, úteis para o avanço científico sem aplicações práticas previstas. Envolve verdades e interesses universais. A pesquisa com abordagem qualitativa é exposta sem a necessidade de representatividade numérica, mas sim com o aprofundamento da compreensão e expressão de características.

Segundo Gil (2007), a pesquisa exploratória preocupa-se em proporcionar maior familiaridade com o problema, a fim de torná-lo mais explícito ou com mais construção de hipóteses.

Para Fonseca (2002), a pesquisa bibliográfica é feita a partir do levantamento de referências teóricas já analisadas e publicadas. Nesse modelo, procura-se referências teóricas publicadas com o objetivo de recolher informações ou conhecimentos prévios sobre o problema a respeito do qual se procura a resposta.

A missão de se alcançar os objetivos gerais e específicos propostos neste trabalho será feita através da demonstração do dimensionamento do elemento de fundação, pelo método de interação solo-estrutura e pela análise dos métodos de estimativa de recalque em fundações profundas. O material e métodos utilizados nesta pesquisa são por meio de livros, revistas especializadas, artigos, monografias, teses, dissertações, pesquisados no portal de periódicos CAPES.

Inicialmente foi realizada uma análise bibliográfica, incluindo diversos autores, Velloso e Lopes, Aoki, entre outros, que trouxeram embasamento para a pesquisa e para a elaboração do referencial teórico. O trabalho tem como marco inicial o estudo do dimensionamento de fundações profundas pelo método de interação solo-estrutura, e o conceito de recalque em fundações profundas. Em sequência foram apresentados métodos de estimativa de recalque de diferentes autores.

Será realizado um estudo hipotético, que visa fazer uma comparação histórica dos métodos semi-empíricos de cálculo que tentam prever o quanto um elemento de fundação profunda irá recalcar, a partir da interação solo-estrutura, considerando fatores como as propriedades do solo no contato com este elemento. Esta comparação histórica está fundamentada em métodos propostos por Vésic (1969, 1975a), Poulos e Davis (1980) e Cintra e Aoki (2010).

Será feito uma breve revisão dos métodos e um estudo comparativo entre eles.

2 ANÁLISE DE RECALQUES

2.1 PRINCIPAIS ASPECTOS DE FUNDAÇÃO PROFUNDA

O termo Fundação trata-se de um elemento estrutural que transmite toda sua carga ao terreno. O principal papel da Fundação é promover uma distribuição de cargas de maneira que não haja rupturas e/ou recalques sobre o solo. As características das Fundações dependem da natureza do solo, se resistentes ou não, bem como suas propriedades mecânicas. Uma análise do tipo de fundação a ser aplicada deve – se levar em conta o comportamento do solo com relação a interação solo-estrutura para evitar prejuízos futuros (CRESPO, 2004; MOROSINI *et al.* 2014).

Quanto às Fundações, são classificadas em três categorias: Fundações Superficiais, Fundações Especiais e Fundações Profundas. Nesta seção será abordado principais aspectos relacionados a Fundações Profundas.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira – Norma Técnica ABNT - NBR 6122 (2019, p.5):

[...]elemento de fundação que transmite a carga ao terreno ou pela base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência de fuste) ou por uma combinação das duas, devendo sua ponta ou base estar assente em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo 3,0 m. Neste tipo de fundação incluem – se as estacas e os tubulões.

Os elementos que caracterizam as fundações profundas, são separados em três grupos (VELOSO E LOPES, 2010; CARNEIRO, 2018):

Estacas: elemento de fundação profunda executado por ferramentas ou equipamentos, execução esta que pode ser por cravação ou escavação, ou ainda, mista;

Tubulão: elemento de fundação profunda de forma cilíndrica que, pelo menos na sua fase final de execução, requer a descida de operário ou técnico (o tubulão não difere da estaca por suas dimensões, mas pelo processo executivo, que envolve a descida de pessoas);

Caixão: elemento de fundação profunda de forma prismática, concretado na superfície e instalado por escavação interna (tipo não citado na norma NBR 6122/2019).

Será apresentado um breve histórico dos métodos semi-empíricos de estimativa de recalque propostos por Vésic (1969, 1975 a), Poulos e Davis (1980) e Cintra e Aoki (2010). Esses autores levaram em consideração a interação solo-estrutura e utilizaram as propriedades dos solos em contato com a fundação e o sistema executivo de estacas para elaboração deste método (PRUNUNCIATI *et al.* 2018).

2.1.1 Estacas

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira – Norma Técnica ABNT - NBR 6122/2019 estaca é o elemento de fundação profunda executado inteiramente por equipamentos ou ferramentas, sem que, em qualquer fase de sua execução, haja descida de operário.

As estacas podem ser cravadas no solo, denominadas também como estacas de deslocamento, ou podem ser implantadas em um furo perfurado por uma escavação, chamadas de estacas escavadas (BHUDU, 2013).

Conforme Bhudu (2013), para selecionar a estaca adequada deve-se levar em consideração a magnitude das cargas, do tipo de solo, da disponibilidade e do ambiente na qual a estaca vai ser executada.

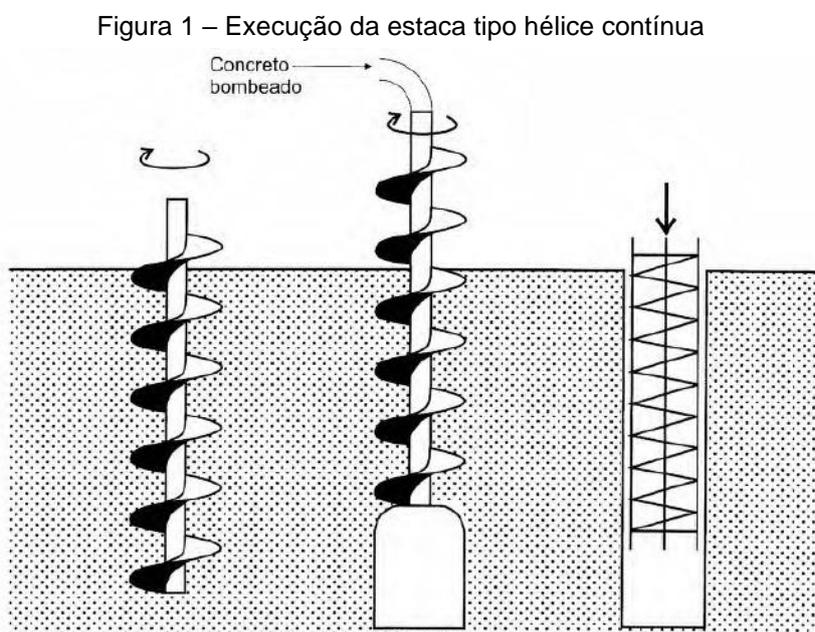
2.1.2 Estacas escavadas do tipo Hélice Contínua

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira – Norma Técnica ABNT-NBR 6122/2019 a hélice contínua é uma estaca de concreto moldada in loco, executada mediante a introdução, por rotação, de um trado helicoidal contínuo no terreno e injeção de concreto pela própria haste central do trado simultaneamente com a sua retirada, sendo que a armadura é introduzida após a concretagem da estaca.

De acordo com Rebello (2008) as estacas hélice contínua são estacas de concreto, cuja execução é realizada através da rotação de um tubo metálico envolto de um trado helicoidal, conforme mostra a figura 1, possuindo em sua extremidade dentes em sua extremidade para melhor escavação. Quando a profundidade especificada em projeto é atingida inicia-se a concretagem simultaneamente a retirada da hélice.

Após a concretagem é colocada a armadura da estaca, podendo ser colocadas por gravidade ou com auxílio de um pilão de pequena de carga (ANTUNES *et al.* 1998; CORDEIRO, 2019).

As estacas hélice contínua apresentam uma alta produtividade, além de sua execução ser monitorada eletronicamente, permitindo obter informações a respeito da profundidade da escavação, do torque, da velocidade de rotação e também da inclinação da perfuração. Podem ser executadas abaixo do nível d'água e atingir até 30 m de profundidade (REBELLO, 2008).



Fonte: VELLOSO e LOPES, 2010.

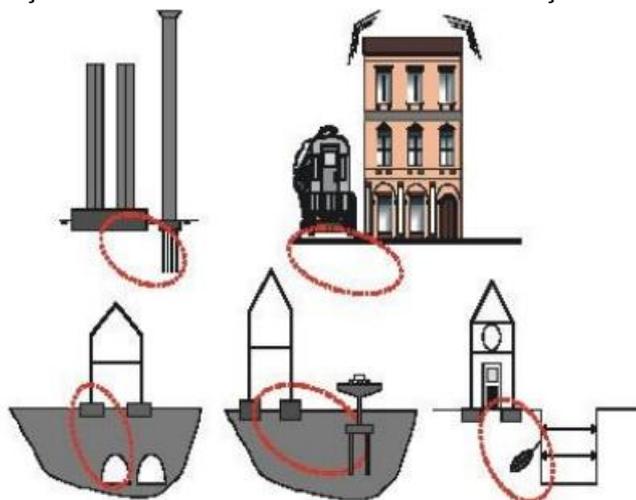
2. 2 INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

De acordo com VELOSO E LOPES, 2010 e FERREIRA, 2017:

“Uma análise de interação solo-fundação tem por objetivo fornecer os deslocamentos reais da fundação - e também da estrutura, se esta estiver incluída na análise e seus esforços internos. Esses esforços podem ser obtidos diretamente pela análise da interação, ou, indiretamente, por meio das pressões de contato. As pressões de contato são as pressões na interface estrutura-solo. A determinação das pressões de contato é necessária para o cálculo dos esforços internos na fundação, a partir dos quais é feito seu dimensionamento estrutural.”

A interação solo-estrutura abrange um vasto campo de estudo na Engenharia Civil e pode abordar todos os tipos de estruturas e relacioná-las com o solo a ser construídas. Várias abordagens já foram realizadas sobre a interação da estrutura com o solo, a figura 2 mostra o comportamento intrínseco de cada tipo de estrutura (COLARES, 2006; SAUTHIER, 2016):

Figura 2 - Situações de ocorrência do mecanismo da interação solo-estrutura



Fonte: COLARES, 2006.

Meyerhof (1953) foi um dos pioneiros no estudo da interação solo-estrutura, principalmente no desenvolvimento para estimativas de recalques. Outro ponto a ser considerado no desenvolvimento de seus trabalhos foi o aprofundamento no estudo de rigidez de infraestrutura e de estruturas rígidas, o que possibilitou desenvolver análises simplificadas com o conceito de rigidez equivalente no estudo da interação solo- estrutura (GONÇALVES, 2004; DORSCHIEDT, 2018).

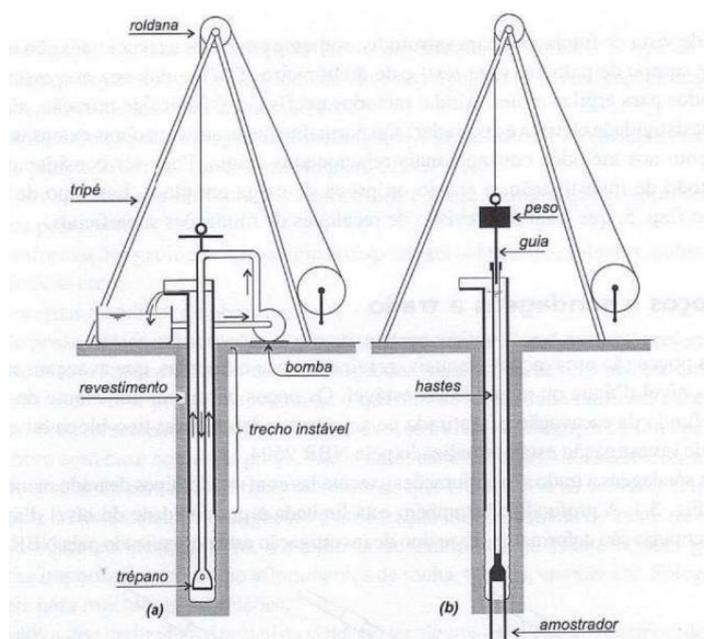
2.3 SONDAGEM SPT

Como citado anteriormente, a sondagem SPT é uma ferramenta de grande importância no estudo dos solos. A partir da análise geotécnica é possível a realização da estimativa de recalque e prova de carga (ROSA, 2009; SOUSA, 2019).

Segundo Marangon (2018) a sondagem mais utilizada nos campos de obra para a inspeção do solo é a sondagem à percussão (SPT). Com ela, podemos obter informações tais como, descrição das camadas do solo, resistência à penetração e um possível nível de água.

Este ensaio é normatizado, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira – Norma Técnica ABNT-NBR 6484/2020 Solo – Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Método de ensaio, ele consiste em obter o número de golpes necessários para a penetração do amostrador, que é um objeto no formato circular, com 50,2 mm de diâmetro externo, onde um martelo de 65 kg cai em queda livre em uma altura de 75 cm. Apesar de ser realizado metro a metro, o resultado só é obtido nos 30 cm finais de cada metro, como se pode observar na figura 3.

Figura 3 – Exemplo de sondagem a percussão



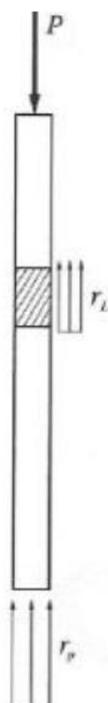
Fonte: VELLOSO E LOPES, 2010.

2.4 CAPACIDADE DE CARGA

Quando ocorre a aplicação de um esforço axial num elemento de fundação, este irá resistir pela parcela da resistência lateral ao longo do fuste e pela resistência na sua extremidade, que são provenientes das tensões normais geradas na ponta do elemento. Sendo assim, podemos separar essas forças em duas parcelas: a resistência lateral (R_L), e a resistência de ponta (R_p), como demonstra a figura 4. A capacidade de carga de uma fundação pode ser entendida então como a soma da máxima força suportada pelo atrito lateral e pela ponta na interação solo-estrutura (MAGALHÃES, 2005; CORDEIRO 2019).

Segundo Cintra (2010) a capacidade de carga é o valor da carga da qual irá gerar uma máxima resistência que o sistema pode oferecer em termos geotécnicos.

Figura 4 – Parcelas de resistência



Fonte: CINTRA E AOKI, 2010.

A capacidade de carga da estaca é deduzida através do equilíbrio de forças, de acordo com a equação 2.1.

$$R = R_L + R_p \quad (2.1)$$

A parcela da resistência de ponta (R_p), é encontrada multiplicando-se a resistência de ponta pela área da seção transversal (A_p), conforme equação 2.2.

$$R_p = r_p * A_p \quad (2.2)$$

A parcela de atrito lateral é representada como U o perímetro do fuste fazendo o somatório das forças resistentes nos diversos segmentos de estaca, de acordo com equação 2.3.

$$R_L = U \sum (R_L * \Delta_L) \quad (2.3)$$

Fazendo a adição das duas parcelas temos então a equação 2.4.

$$R = U \sum (R_L * \Delta_L) + r_p * A_p \quad (2.4)$$

Em casos onde a capacidade de carga do solo tiver valor superior a resistência a compressão do concreto, é adotado como valor limite a própria resistência do concreto.

A capacidade de carga pode ser calculada por meio de métodos teóricos e semi-empíricos, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira – Norma Técnica ABNT-NBR 6122/2019, são considerados métodos semi-empíricos aqueles em que as propriedades dos materiais estimadas com base em correlações e são usadas em teorias de Mecânica dos Solos.

Os métodos de Aoki e Velloso (1975) e de Décourt e Quaresma (1978), são típicos métodos propostos para fundações em estacas, mas que podem também serem utilizados para determinação de tensão admissível em fundações por tubulões, considerando-os como estacas escavadas. (MARANGON, 2018).

No Brasil são mais utilizados os métodos semi-empíricos para obtenção de capacidade de carga, sendo o SPT o mais predominante (MAGALHÃES, 2005; CORDEIRO, 2019).

2.5 AOKI E VELLOSO (1975)

O método de capacidade de carga de Aoki e Velloso é um dos métodos mais utilizados atualmente no Brasil, tanto para realização de projetos, quanto para realização de pesquisas acadêmicas. Inicialmente foi desenvolvido com base no ensaio de penetração de cone, o CPT. Porém como o CPT não é tão utilizado no Brasil quanto o SPT, a metodologia de cálculo foi adaptada através do coeficiente de conversão “K”, que varia dependendo do tipo de solo, conforme quadro 1. (LOBO, 2005; CORDEIRO 2019).

Partindo de correlações estabelecidas para os solos brasileiros entre o N (número médio de golpes do ensaio SPT) e a resistência unitária de ponta (R_p), os autores chegaram a equação 2.5.

$$R_p = K * N \quad (2.5)$$

Para a resistência unitária por atrito lateral (R_L) local no ensaio CPT, preferiu-se adotar correlações estabelecidas por Begemann (1965) entre este parâmetro e a resistência de ponta, conforme equação 2.6. O coeficiente α é tabelado e depende do tipo de solo, conforme quadro 1.

$$R_L = \alpha * R_p \quad (2.6)$$

O conhecimento dessas correlações permite a estimativa dos parâmetros correspondentes para uma estaca pelas equações 2.7 e 2.8.

$$R_p' = \frac{R_p}{F1} = \frac{K*N}{F1} \quad (2.7)$$

$$R_L' = \frac{R_L}{F2} = \frac{\alpha*K*N}{F2} \quad (2.8)$$

Os fatores F1 e F2 são fatores de correção de escala, das resistências de ponta e lateral, ou seja, a diferença entre a estaca (protótipo) e o cone do CPT (modelo), levando em conta também a influência do método de execução de cada tipo de estaca. No quadro 2 temos os valores dos fatores de correção F1 e F2 de acordo com o tipo de estaca executada.

Quadro 1 – Coeficientes K e α

Tipo de Terreno	K (Mpa)	α (%)
Areia	1,00	1,4
Areia siltosa	0,80	2,0
Areia siltosa-argilosa	0,70	2,4
Areia argilosa	0,60	3,0
Areia argilo-siltosa	0,50	2,8
Silte	0,40	3,0
Silte arenoso	0,55	2,2
Silte arenoso-argiloso	0,45	2,8
Silte argiloso	0,23	3,4
Silte argilo-arenoso	0,25	3,0
Argila	0,20	6,0
Argila arenosa	0,35	2,4
Argila areno-siltosa	0,30	2,8
Argila siltosa	0,22	4,0
Argila silto-arenosa	0,33	3,0

Fonte: adaptado de AOKI E VELLOSO, 1975.

Quadro 2 – Fatores F1 e F2

ESTACA	F1	F2
Franki	2,5	5
Pré- moldadas	1,75	3,5
Escavadas	3	6
Metálica	1,75	3,5

Fonte: adaptado de AOKI E VELLOSO, 1975.

2.6 RECALQUE

O recalque é o deslocamento vertical da estrutura causado pelas deformações originadas das magnitudes das cargas sobre o solo (CASTRO, 2010; SANTOS, 2016).

O recalque total R_{tot} pode ser estimado através da equação 2.9:

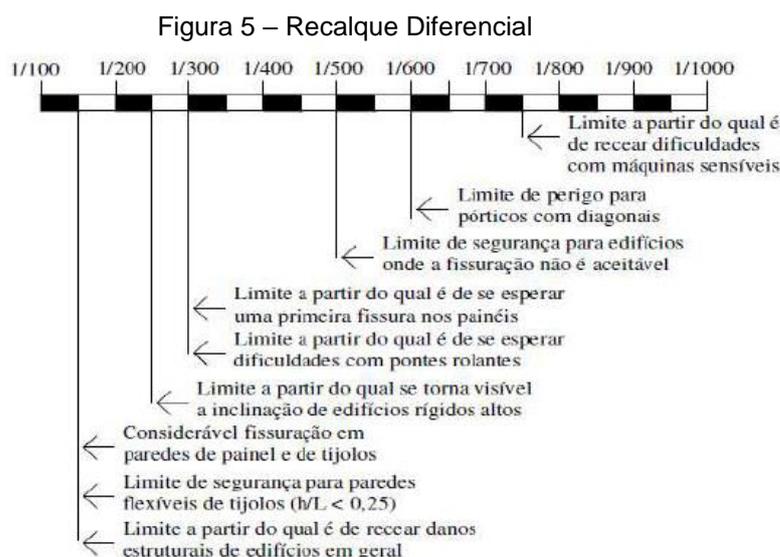
$$R_{tot} = R_e + R_{ap} \quad (2.9)$$

Onde R_e é o recalque imediato e R_{ap} é o recalque devido ao adensamento primário da massa do solo. O recalque de adensamento resulta de deformações volumétricas devido a dissipação do excesso de pressão neutra, gerada pelo carregamento em um período longo de tempo. O recalque imediato é gerado simultaneamente a aplicação do carregamento.

O recalque diferencial específico δ_{esp} é definido pela razão entre o recalque diferencial δ entre dois pilares e a distância L entre os seus centros, representado na equação 2.10.

$$\delta_{esp} = \frac{\delta}{L} \quad (2.10)$$

A figura 5 aborda a correlação entre a ocorrência de danos com valores limites para o recalque diferencial (CASTRO, 2010; LEITE, 2018):



Fonte: LEITE, 2018.

Os principais elementos usados para classificar os recalques quanto à sua tolerância nas estruturas dependem basicamente dos materiais constituintes da estrutura, da velocidade de ocorrência do recalque e do tipo de construção.

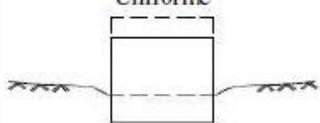
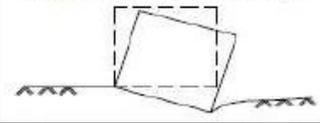
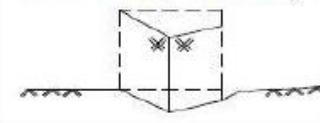
Os principais fatores que levam a ocorrência de recalques são:

- Rebaixamento do lençol freático;
- Solos colapsíveis e expansivos;

- Escavação em áreas próximas à fundação;
- Vibrações mecânicas.

As patologias provocadas por recalques são classificadas como estéticos, funcionais e estruturais, a figura 6 apresenta as patologias associadas a cada tipo de recalque (CASTRO, 2010; LEITE, 2018):

Figura 6 – Tipos de Recalques e os danos associados.

Tipo de recalque	Danos associados
<p>Uniforme</p> 	<p>Danos arquitetônicos (estéticos e funcionais), dependendo da grandeza dos recalques. Danos às ligações com o exterior (instalações, rampa, escada).</p>
<p>Não uniforme; sem distorção</p> 	<p>Danos arquitetônicos: desaprumo em prédios altos, etc.</p>
<p>Não uniforme; com distorção</p> 	<p>Danos arquitetônicos: fissuração, distorção de vãos, etc. Danos estruturais: fissuras em vigas, etc.</p>

Fonte: LEITE, 2018.

Os dois principais tipos de recalques diferenciais são os de origem gradual que ocorre em um intervalo de tempo relativamente longo. O outro tipo é de origem colapsoidal, o que ocorre de forma instantânea causando danos nos elementos estruturais de sustentação (CASTRO, 2010; SANTOS, 2016).

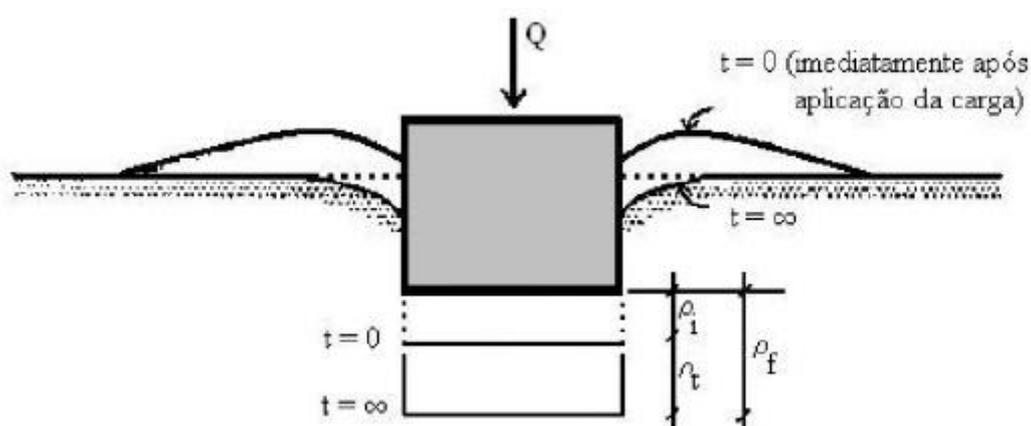
A ocorrência de Recalques é um fator relevante na execução de obras. Segundo Aoki (2000) o grau de variabilidade do maciço do solo pode ser acompanhando analisando-se a curva carga-tempo-recalque (BARROS, 2012).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira – Norma Técnica ABNT-NBR 6122/2019 recomenda que para obras em que há a predominância de carga verticais, os recalques devem ser medidos para a previsão do comportamento da obra e ainda, que os valores medidos sejam comparados com os calculados, para o aprimoramento dos métodos de previsão

de recalques. De acordo com um valor limite para o recalque, é possível limitar a carga admissível da estaca.

De acordo com Velloso e Lopes, (2004); Rocha *et al.* (2018) os recalques ocorrem após a aplicação da carga ao solo e se desenvolve ao longo do tempo até a sua estabilização. A figura 7 aborda uma ilustração que representa a ocorrência anteriormente citadas:

Figura 7 – Recalques de uma Fundação sob Carga Vertical



Fonte: VELLOSO E LOPES, 2004.

2.6.1 Principais Métodos De Estimativa De Recalque

O recalque de fundações profundas e suas consequências numa construção é um parâmetro crítico, pois seu cálculo é importante no sentido de estabelecer um fator limitante que permita a estrutura recalcar sem que a mesma sofra danos. O recalque de uma estrutura está estritamente ligado ao estado de limite de serviço (ELS), quando uma estrutura sofre recalque ela pode ser prejudicada no sentido de perder seus aspectos estruturais, funcionais ou arquitetônicos, por isso se torna necessário o cálculo desse fator limitante (PRUNUNCIATI *et al.* 2018).

Um projeto de fundações deve atender de forma concomitante aos critérios do estado limite último (ELU) e do estado limite de serviço (ELS). Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira –

Norma Técnica ABNT-NBR 6118 (2014 p.3) o estado limite último (ELU) pode ser definido como:

“estado limite relacionado ao colapso, ou a qualquer outra forma de ruína estrutural, que determine a paralisação do uso da estrutura”.

Já o estado de limite de serviço (ELS) de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira – Norma Técnica ABNT-NBR 6118 (2014 p.5) pode ser definido como:

“aqueles relacionados ao conforto do usuário e à durabilidade, aparência e boa utilização das estruturas, seja em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos suportados pelas estruturas”.

Sendo assim, percebemos que o estado limite último (ELU) está relacionado a capacidade de carga da estrutura, enquanto que o estado limite de serviço (ELS) se relaciona com as limitações impostas ao uso da estrutura.

Nesse trabalho será abordado métodos semi-empíricos para previsão de recalque nas estacas. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas - Norma Brasileira – Norma Técnica ABNT - NBR 6122 (2019, p.3) tem se a definição de estaca como:

“elemento de fundação profunda executado inteiramente por equipamentos ou ferramentas, sem que em qualquer fase de sua execução, haja descida de pessoas. Os materiais empregados podem ser: madeira, aço, concreto pré-moldado, concreto moldado *in loco* ou pela combinação dos anteriores”.

Os métodos semi-empíricos são baseados em correlações semi-empíricas com resultados de ensaio *in situ* e ajustados com provas de carga. Os métodos semi-empíricos de cálculo de previsão de recalque em estacas aqui abordados têm embasamento em vários ensaios de campo, realizados em variados tipos de solos do território brasileiro (CINTRA, 2010; SANTOS, 2015).

2.7 MÉTODO VÉSIC (1969, 1975A)

O método de previsão de recalque proposto por Vésic (1969, 1975) admite que o recalque total de uma fundação profunda está relacionado a 3 (três) parcelas de recalque, sendo o recalque total resultado da soma de tais parcelas.

As 3 (três) parcelas de recalque relacionadas são: devido ao encurtamento elástico da estaca, recalque do solo devido a carga transmitida na ponta e recalque do solo devido às cargas de atrito lateral distribuídas ao longo do fuste, representadas na equação 2.11.

$$S = S_e + S_p + S_f \quad (2.11)$$

Onde:

S = recalque total (m);

S_e = recalque devido ao encurtamento elástico da estaca (m);

S_p = recalque devido à carga transmitida na ponta (m);

S_f = recalque devido à carga distribuída no fuste (m).

2.7.1 Recalque Devido ao Encurtamento Elástico da Estaca (S_e)

O recalque devido ao encurtamento elástico da estaca pode ser determinado em função da distribuição do atrito lateral e da carga de ponta, pela equação apresentada na equação 2.12.

$$S_e = \frac{(Q_p + \alpha_{ss} \cdot Q_{lat}) \cdot L}{A \cdot E_c} \quad (2.12)$$

Onde:

S_e = recalque devido ao encurtamento elástico (m);

Q_p = carga na ponta no estágio de carregamento (kN);

α_{ss} = índice que depende da distribuição do atrito ao longo do fuste, conforme figura 5.

Q_{lat} = carga lateral no estágio de carregamento (kN);

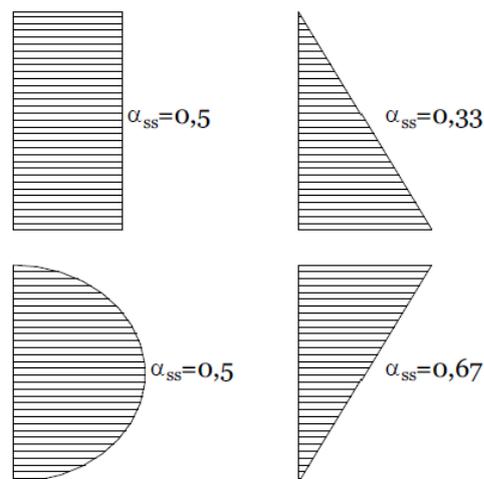
L = comprimento da estaca (m).

A = área da secção transversal da estaca (m^2);

E_c = módulo de elasticidade do material da estaca (MPa).

A figura 8 mostra a distribuição do atrito ao longo do fuste.

Figura 8 – distribuição do atrito.



Fonte: adaptado GARCIA, 2006.

2.7.2 Recalque do Solo Devido à Carga Transmitida na Ponta (S_p)

Para a determinação do recalque do solo devido à carga transmitida na ponta a equação 2.13 é apresentada.

$$S_p = \frac{c_p * Q_p}{\phi * q_p} \quad (2.13)$$

Onde:

S_p = recalque devido à carga transmitida na ponta (m);

C_p = índice que depende do tipo de solo e do tipo de estaca, de acordo com o quadro 3;

Q_p = carga na ponta no estágio de carregamento (kN);

\emptyset = diâmetro da estaca (m);

q_p = reação de ponta da estaca (Kpa).

Quadro 3 - Valores de C_p para o método de Vésic (1969,1975a)

Tipo de Solo	Estaca cravada	Estaca escavada
Areia (densa a fofa)	0,02 – 0,04	0,09 – 0,18
Argila (rija a mole)	0,02 – 0,04	0,04 – 0,08
Silte (denso a fofo)	0,03 – 0,05	0,09 – 0,12

Fonte: ALBUQUERQUE 2001.

2.7.3 Recalque do Solo Devido à Carga Distribuída no Fuste (S_f)

Para a determinação do recalque do solo devido à carga transmitida ao longo do fuste vale a equação 2.14:

$$S_f = \frac{C_s * Q_{lat}}{L * q_p} \quad (2.14)$$

Onde:

S_f = recalque devido a distribuição de carga no fuste (m);

C_s = coeficiente que depende do tipo de solo e do tipo de estaca;

Q_{lat} = carga lateral no estágio de carregamento (kN);

L = comprimento da estaca (m);

q_p = reação de ponta da estaca (kPa).

Conforme o método proposto por Vésic (1969, 1975a) o valor de C_s (coeficiente que depende do tipo de solo e do tipo de estaca) pode ser obtido por uma relação entre o solo e a estaca, levando em consideração fatores como a compacidade do solo, o diâmetro da estaca e o seu comprimento.

A equação 2.15 é válida para cálculo do coeficiente C_s :

$$C_s = \left(0,93 + 0,16 * \sqrt{L/\emptyset} \right) * C_p \quad (2.15)$$

Onde:

L = comprimento da estaca (m);

\emptyset = diâmetro da estaca (m);

C_p = índice que depende do tipo de solo e do tipo de estaca, de acordo com tabela 1.

2.8 MÉTODO POULOS E DAVIS (1980)

Inicialmente o método de estimativa de recalque desenvolvido por Poulos e Davis (1980) era apenas para estacas incompressíveis, sendo assim eram adotadas algumas hipóteses. Depois o método foi adaptado para estacas compressíveis, desenvolvido considerando a ideia de se dividir a estaca em elementos carregados de maneira uniforme, e na distribuição uniforme do efeito do cisalhamento em sua superfície. Para deslocamento do solo utiliza-se a resolução da equação de Mindlin.

Segundo Poulos e Davis (1980) para estacas em areias ou em solos não saturados, é possível obter o valor de recalque final imediatamente após a aplicação de um carregamento axial a compressão, portanto ocorre sob condições drenadas (ou seja, a água flui livremente para dentro ou para fora do solo como resposta a algum carregamento, na condição drenada uma alteração na carga não causa nenhuma mudança na pressão da água). O valor do deslocamento é obtido compatibilizando o deslocamento da estaca com o deslocamento do solo adjacente para cada elemento da estaca (CARNEIRO, 2018).

Após essas considerações Poulos e Davis (1980) chegaram a equação 2.16 para estacas apoiadas em uma camada resistente de solo:

$$p = \frac{P}{d * E_s} * I_p \quad (2.16)$$

Onde:

p : deslocamento (m);

P : carga aplicada na estaca (kN);

d : diâmetro da estaca (m);

E_s : módulo de elasticidade do solo (MPa);

$$I_p = I_o \cdot R_k \cdot R_h \cdot R_v;$$

I_o : fator de influência para deformações

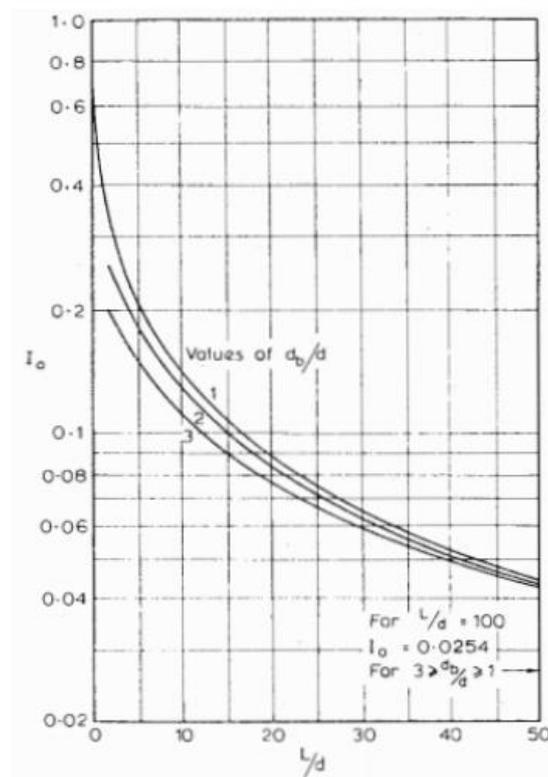
R_k : fator de correção para a compressibilidade da estaca;

R_h : espessura h (finita) de solo compressível;

R_v : correção para o coeficiente de Poisson do solo.

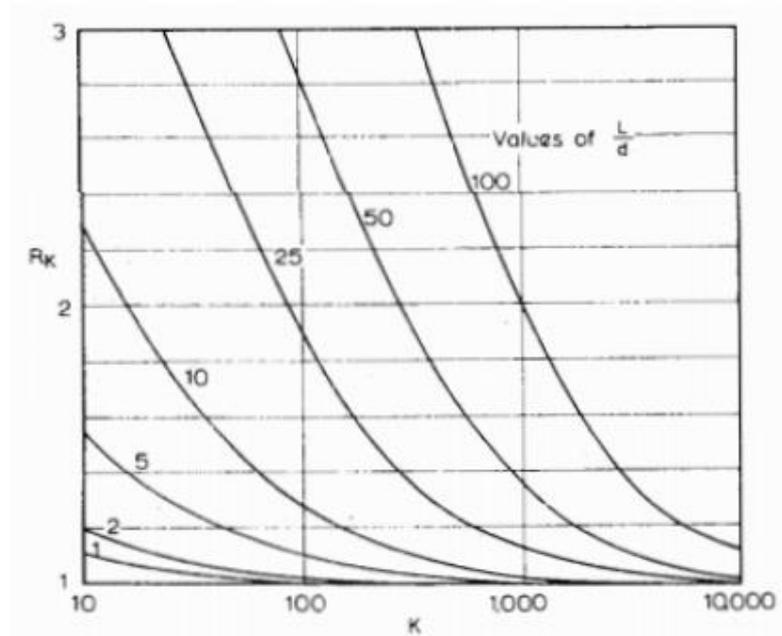
O fator I_o é em função do diâmetro da base estaca e do diâmetro da estaca, sendo proposto pelos autores a utilização do ábaco da figura 9 para sua determinação. No ábaco o diâmetro da base da estaca está representado por d_o , e o diâmetro da estaca por d .

Figura 9 – ábaco para obtenção de I_o



Fonte: POULOS E DAVIS, 1980.

Para obtenção do fator de correção R_k utilizamos o seguinte ábaco da figura 10:

Figura 10 – ábaco para obtenção de R_k .

Fonte: POULOS E DAVIS, 1980.

Sendo que o valor de k apresentado no eixo horizontal do ábaco é obtido pela equação 2.17:

$$K = \frac{E_c * R_a}{E_s} \quad (2.17)$$

Onde:

E_c = módulo de elasticidade do material da estaca (MPa).

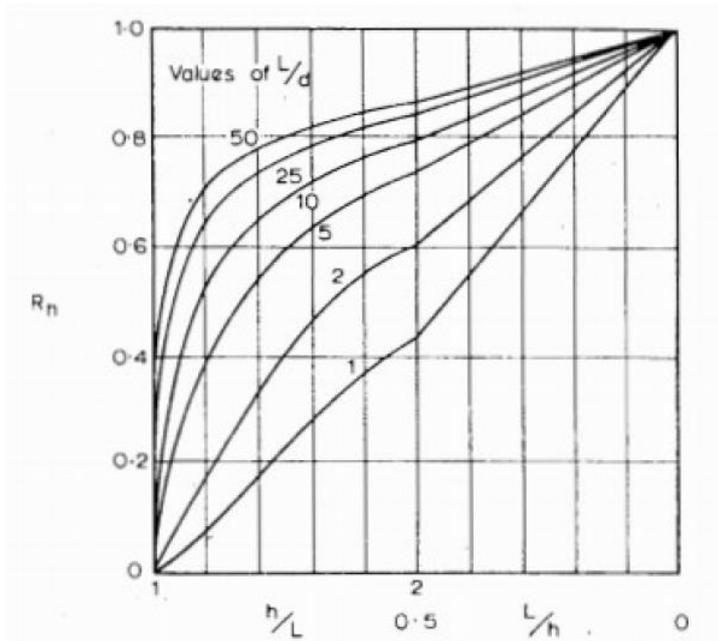
E R_a é obtido pela equação 2.18:

$$R_a = \frac{A_p}{\pi * d / 4} \quad (2.18)$$

Onde:

A_p = área de ponta da estaca (m^2).

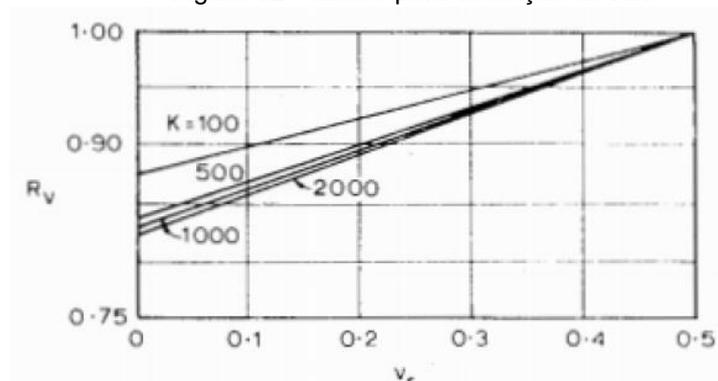
O valor de R_h - espessura h (finita) de solo compressível - é obtido pelo ábaco apresentado na figura 11.

Figura 11 – ábaco para obtenção de R_h .

Fonte: POULOS E DAVIS, 1980.

O fator R_v que representa correção para a influência do coeficiente de Poisson R_v considera a influência da redução do coeficiente de Poisson (ν) dos solos que envolvem a estaca, em valores de assentamento da estaca para módulo de elasticidade constante destes solos. Estes valores são apresentados em função do coeficiente de Poisson do solo envolvente ν_s para um fator de rigidez da estaca K variável.

O valor de R_v que representa a correção para o coeficiente de Poisson do solo, é obtido pelo ábaco da figura 12.

Figura 12 – ábaco para obtenção de R_v .

Fonte: POULOS E DAVIS, 1980.

2.9 MÉTODO CINTRA E AOKI (2010)

O método de estimativa de recalque de Cintra e Aoki (2010) é baseado na divisão do recalque de uma estaca de duas formas diferentes: o encurtamento elástico e o recalque do solo.

2.9.1 Encurtamento Elástico

O encurtamento elástico pode ser definido por um recalque de igual magnitude na cabeça da estaca, mantendo sua base imóvel.

Segundo PRUNUNCIATI *et al.* (2018) para o encurtamento elástico leva-se em consideração a capacidade de carga admissível e o esforço normal da estaca devido ao carregamento aplicado, levando em consideração duas hipóteses.

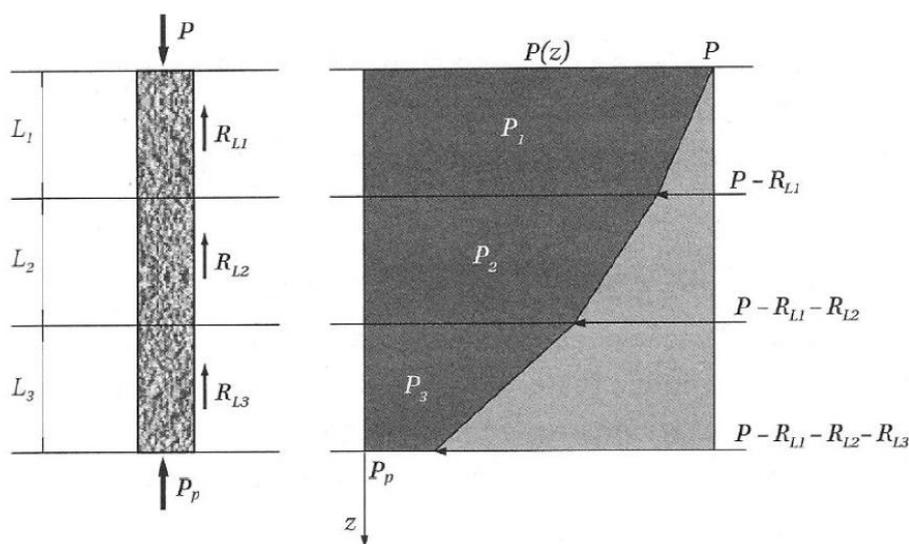
A primeira hipótese é de que a carga vertical aplicada na superfície da estaca deve ter valor superior à resistência lateral e menor que a capacidade de carga. Sendo assim, todo o atrito lateral será mobilizado, tornando-se necessário o acionamento da resistência de ponta.

Outra hipótese que deve ser levada em consideração é de que a reação de ponta deve ser de valor inferior à resistência de ponta na ruptura e seja suficiente para o equilíbrio das forças. Ou seja, a soma entre a reação de ponta da estaca e seu atrito lateral deve possuir o mesmo valor da carga vertical aplicada no topo da estaca.

O diagrama de esforço normal utilizado para determinação do recalque da estaca utiliza metodologia adaptada de Aoki (1979) que admite a diminuição do esforço normal da estaca conforme a profundidade é aumentada, essa diminuição acontece devido ao aumento da resistência de atrito lateral.

Cintra e Aoki (2010) partiram da ideia de que a diminuição do esforço normal da estaca acontece de forma linear, como está demonstrado na figura 13 a seguir, onde $P(z)$ representa a diminuição do esforço normal da estaca ao longo da profundidade, devido ao aumento da resistência de atrito lateral (RL_i).

Figura 13 – diagrama de esforço normal da estaca



Fonte: Cintra e Aoki, 2010.

A partir do diagrama tem-se que o esforço normal médio da estaca para camada L_i apresentado na equação 2.19:

$$P_i = P - \frac{RL_i}{2} \quad (2.19)$$

Onde:

P_i = esforço normal médio da camada "i" (kN);

P = carga aplicada na estaca (kN);

i = número da camada.

Sendo assim o valor do esforço normal é reduzido pela redução acumulada, onde é somada a redução em cada camada de profundidade abordado nas equações 2.20 e 2.21

$$P_1 = P - \frac{RL_1}{2} \quad (2.20)$$

e

$$P_2 = P - RL_1 - \frac{RL_2}{2} \quad (2.21)$$

E assim sucessivamente para as camadas de profundidade do solo.

Atribuídos os valores de esforço normal da estaca, e com o auxílio da Lei de Hooke, o encurtamento elástico da estaca pode ser obtido pela equação 2.22:

$$\rho_e = 1/(A * E_c) * \Sigma(P_i * L_i) \quad (2.22)$$

Onde:

ρ_e = encurtamento elástico da estaca (mm);

A = área da seção transversal do fuste da estaca (m²);

E_c = módulo de elasticidade do concreto (MPa);

P_i = esforço normal médio na camada “i” (kN);

L_i = comprimento da estaca na camada “i” (m).

2.9.2 Recalque do Solo

Já para o recalque do solo, o método Cintra e Aoki (2010) propõe que a estaca aplica cargas ao solo, ao longo do seu contato com superfície do fuste, transmitindo a carga ao solo que está situado na base da estaca. De acordo com Cintra e Aoki (2010), devido esse carregamento, acontecem deformações entre as camadas situadas entre as bases da estaca e a superfície imóvel, resultando no recalque do solo, e conseqüentemente na base da estaca.

Cintra e Aoki (2010) seguiram a mesma ideia do método de Vésic (1969,1975a) apresentado aqui anteriormente, onde o recalque do solo é dividido em duas parcelas, que são o recalque do solo devido a carga transmitida na ponta e o recalque do solo devido às cargas de atrito lateral distribuídas ao longo do fuste.

Neste método a parcela de recalque da estaca devida à carga de ponta é obtida considerando a força devido a reação de ponta, vertical e para baixo e que a aplicação dessa força gerará tensões nas camadas subjacentes (PRUNUNCIATI *et al.* 2018).

Para obter uma equação que estime o recalque do solo Cintra e Aoki (2010) usaram a metodologia de Aoki (1984), onde a força, situada na ponta da estaca, provoca um acréscimo de tensões numa camada subjacente qualquer de espessura, e a propagação de tensões acontece na proporção 1:2 (horizontal e vertical, respectivamente), conforme demonstra a figura 14. O acréscimo de tensões pode ser obtido de acordo com a equação 2.23.

$$\Delta\sigma_p = \frac{4P_p}{\pi(D+h+H/2)^2} \quad (2.23)$$

Onde:

$\Delta\sigma_p$ = acréscimo de tensões (kPa);

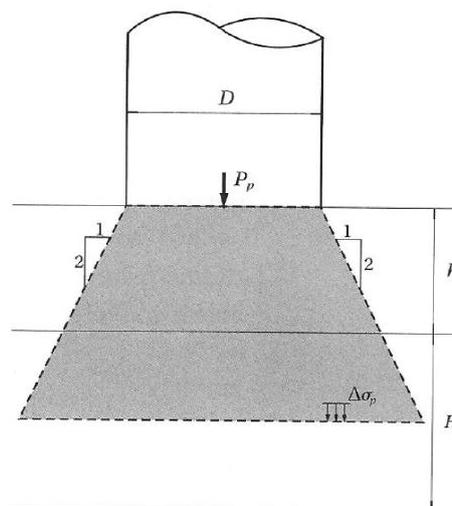
P_p = reação de ponta (kN);

D = diâmetro da base da estaca (m);

h = distância entre o ponto de aplicação da carga até o topo da camada H (m);

H = espessura da camada subjacente (m).

Figura 14 – propagação de tensões devido à reação de ponta



Fonte: CINTRA E AOKI, 2010.

O cálculo da parcela de recalque devido à reação às cargas laterais é calculado de maneira semelhante, considera-se que as reações às parcelas de resistência lateral também produzem um acréscimo de tensões na camada de solo subjacente, conforme a figura 15.

Sendo assim, tem-se que o acréscimo de tensões devido aos carregamentos laterais é obtido pela equação 2.24:

$$\Delta\sigma_i = \frac{4RL_i}{\pi(D+h+H/2)^2} \quad (2.24)$$

Onde:

$\Delta\sigma_i$ = acréscimo de tensões (kPa);

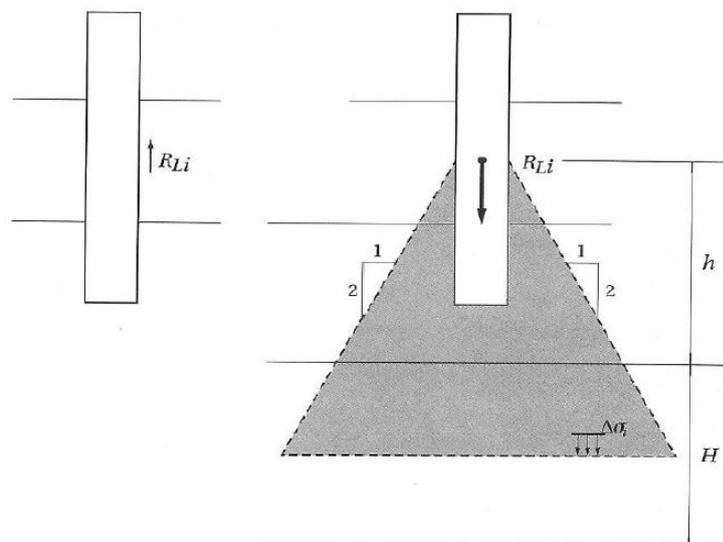
R_{Li} = resistência de atrito lateral (kN);

D = diâmetro do fuste da estaca (m);

h = distância entre o ponto de aplicação da carga até o topo da camada
 H (m);

H = comprimento da camada subjacente (m).

Figura 15 – propagação de tensões devido a cargas laterais



Fonte: CINTRA E AOKI, 2010.

Então, o método de Cintra e Aoki (2010) estima que o recalque devido ao solo, utilizando a Teoria da Elasticidade Linear, é obtido através da equação 2.25:

$$\rho S = \Sigma \left(\frac{\Delta\sigma}{E_s} * H \right) \quad (2.25)$$

Onde:

P_s = recalque devido ao solo (mm);

$\Delta\sigma$ = soma de todas as tensões devido às parcelas de atrito lateral e reação de ponta (kPa);

E_s = Módulo de elasticidade da camada de solo (MPa);

H = comprimento da camada subjacente (m).

O módulo de elasticidade do solo (E_s) é obtido pela equação 2.26:

$$E_s = E_o \left(\frac{\sigma_o + \Delta\sigma}{\sigma_o} \right)^n \quad (2.26)$$

Onde:

E_o = módulo de elasticidade do solo antes da execução da estaca

σ_o = tensão geostática no centro da camada

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

Para o valor de E_o , Aoki (1984) sugere as seguintes equações:

$E_o = 6 \cdot KA \cdot NSPT$; para estacas cravadas

$E_o = 4 \cdot KA \cdot NSPT$; para estacas hélice contínua

$E_o = 3 \cdot KA \cdot NSPT$; para estacas escavadas

KA é o coeficiente empírico adotado no método Aoki & Velloso (1975) para capacidade de carga, em função do tipo de solo, de acordo com o quadro 4.

Para encontrar o valor do NSPT durante o ensaio SPT, o amostrador deve penetrar 45 cm a partir das batidas com o peso. A cada 15 cm anota-se o número de batidas que foram feitas para realizar o serviço.

Os 15 cm iniciais são descartados, e o que deve ser realmente levado em consideração são o número de golpes para o avanço dos 30 cm finais.

Quadro 4 – valores do coeficiente KA

Tipo de Solo	KA (kPa)
Areia	1000
Areia siltosa	800
Areia silto -argilosa	700
Areia argilosa	600
Areia argilo – siltosa	500
Silte	400
Silte arenoso	550
Silte areno – argiloso	450
Silte argiloso	230
Silte argilo – arenoso	250
Argila	200
Argila arenosa	350
Argila areno – siltosa	300
Argila siltosa	220
Argila silto – arenosa	330

Fonte: AOKI E VELLOSO, 1975.

3 ESTUDO DE CASO HIPOTÉTICO

Foi elaborado um estudo de caso hipotético, utilizando um boletim de sondagem SPT para efeito didático de um terreno localizado na cidade de Juiz de Fora – MG.

Através do resultado dessa sondagem é realizada uma análise para um empreendimento localizado na cidade de Bicas - MG, que é um prédio comercial e residencial de 7 pavimentos. Utilizamos a sondagem realizada pela investigação SPT e aplicamos o empreendimento ao terreno caracterizado anteriormente, cuja sondagem obtida ajudou na escolha do tipo de fundação, que é do tipo hélice contínua.

Para o estudo do empreendimento em questão foi adotado o valor de parâmetro de 1/500, conforme figura 5, que corresponde ao valor limite de recalque admissível adotado para edifícios onde a fissuração não é aceitável, visto que o empreendimento do estudo de caso hipotético se assemelha com essas características.

Para tal estudo de caso hipotético foram utilizados os métodos semi-empíricos de estimativa de recalque em fundações profundas propostos por Vésic (1969, 1975 a), Poulos e Davis (1980) e Cintra e Aoki (2010).

3.1 DESCRIÇÃO DO PROJETO

O objeto de interesse nesse estudo é um prédio de uso residencial e comercial, que possui 7 (sete) pavimentos, 26 m de altura e está localizado na cidade de Bicas-MG. Para realização do estudo obtivemos informações sobre as cargas que a estrutura está sujeita, através do projeto estrutural, elaborado pelo engenheiro da empresa responsável pela execução da obra.

Para o cálculo da estimativa de recalque da fundação foi adotado o pilar P33 do projeto estrutural elaborado, que deve suportar a carga de 171 KN. Para isso, foi necessário calcular as dimensões e a quantidade estacas necessárias

para suportar a carga desse pilar, utilizando-se nos cálculos também os dados referentes a sondagem SPT. Esse cálculo foi realizado através do método de capacidade de carga de Aoki e Velloso (1975), conforme anexo I.

O quadro 5 apresenta todos os pilares da primeira parte da execução da fundação do empreendimento, juntamente com a carga que cada pilar está sujeito.

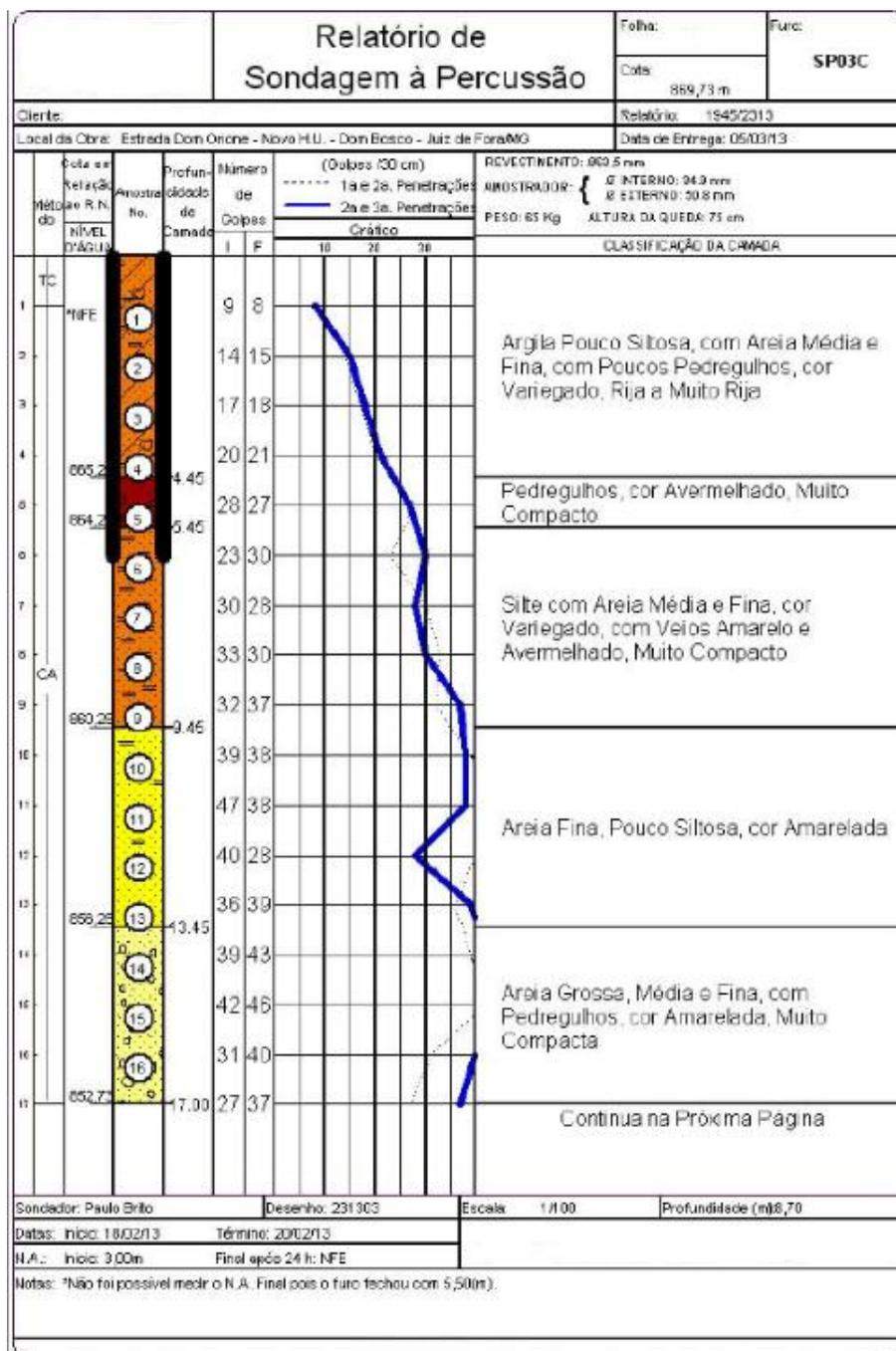
Quadro 5 – Carregamento dos pilares referente ao estudo em questão

PILAR	CARGA (T)
P4	39.50
P5	123.60
P6	234.70
P7	170.00
P8	97.70
P13	206.60
P14	255.10
P15	186.90
P16	101.80
P20	32.90
P21	19.70
P22	137.30
P23	162.60
P24	243.50
P25	127.30
P27	21.90
P28	66.40
P33	17.10
P35	33.70
P36	133.40
P42	26.20

Fonte: Autores, 2020.

A sondagem é do tipo SPT, e o procedimento foi realizado até 18 metros de profundidade, para uma melhor caracterização do solo, conforme boletim de sondagem das figuras 16 e 17, porém só foi utilizado 12 metros devido ao tipo de fundação adotada.

Figura 16 – Primeira página do relatório de sondagem referente ao estudo em questão



Fonte: Autores, 2020.

Figura 17– Segunda página do relatório de sondagem referente ao estudo em questão

Relatório de Sondagem à Percussão										Folha: 5/7	Furo: SP03C
Cliente:										Relatório: 1945/2313	
Local da Obra: Estrada Dom Orione - Novo H.U. - Dom Bosco - Juiz de Fora/MG										Data de Entrega: 05/03/13	
Método	Cota em Relação ao R.N. NÍVEL D'ÁGUA	Amostra No.	Profundidade do Camado	Número de Golpes		(Golpes / 30 cm)			REVESTIMENTO: 063,5 mm	AMOSTRADOR: { Ø INTERNO: 24,9 mm Ø EXTERNO: 30,8 mm	PESO: 65 Kg ALTURA DA QUEDA: 75 cm
				I	F	Gráfico					
	16	652,25	17	47,15	27	37					
	16	651,05	18	18,70	30	-					
CLASSIFICAÇÃO DA CAMADA										Areia Grossa, Média e Fina, com Pedregulhos, cor Amarelada, Muito Compacta Silte Arenoso, cor Predominante Avermelhado, com Veios Variegado, Branco e Avermelho, Muito Compacto	
Limite da Sondagem										Impenetrável ao Trépano Estágio de 30 min. 10 min. de 18,70 p/ 18,70 10 min. de 18,70 p/ 18,70 10 min. de 18,70 p/ 18,70	
Soniador: Paulo Brito			Desenho: 231303			Escala: 1/100		Profundidade (m): 2,70			
Datas: início: 18/02/13			Término: 20/02/13								
N.A.: início: 3,00m			Final após 24 h: NFE								
Notas: *Não foi possível medir o N.A. Final pois o furo fechou com 5,50(m).											

Fonte: Autores, 2020.

3.1.1 Descrição Da Empresa Responsável Pelo Projeto

A empresa responsável pela execução do empreendimento e elaboração do projeto utilizado para o estudo de caso, aqui denominada como Empresa Contratada (EC), teve o início das suas atividades em 2007, na cidade de Bicas

– MG, construindo casas e condomínios residenciais. Em 2011, começou a fazer as construções de condomínios com prédios, buscando o segmento de habitação popular. Sempre procurando executar as obras com velocidade, qualidade e baixo custo.

Atualmente a empresa realiza obras por várias cidades da região, como Bicas – MG, Mar de Espanha – MG, Juiz de Fora – MG, dentre outras, ampliando sua atuação no ramo da construção civil.

3.2 DIMENSIONAMENTO DAS ESTACAS PARA O PILAR P33

A escolha do pilar P33 para o dimensionamento da estaca, se baseia no fato de que a carga deste pilar é de valor inferior, quando comparada as cargas dos outros pilares, apresentando indícios de que seria um dimensionamento de uma estaca isolada, fato este comprovado com o dimensionamento da mesma para o pilar em questão, através do método de capacidade de carga de Aoki e Velloso (1975).

Foi realizado o dimensionamento da estaca hélice contínua para o tipo de SPT apresentado anteriormente, chegando ao valor de resistência do solo na 4ª camada de 838,80 KN para uma estaca com o diâmetro de 40 cm e para a resistência de 800 KN será necessário 01 estaca com comprimento de 12 m para suportar a carga de 171 KN que descarrega sobre a fundação de acordo com o quadro 6.

Quadro 6 – Resumo do Dimensionamento da Estaca Hélice Contínua

Estaca Hélice Contínua		solo	P serviço (kN) usar menor	Carga no pilar (Kn)	N° de Estacas	Profundidade (m)
Diâmetro	Resistência (kN)	Resistência (kN)				
40	800,0	1009,3	800,0	171	1	12

Fonte: Autores, 2020.

4 CÁLCULO DA ESTIMATIVA DE RECALQUE

Nesta seção são realizados os cálculos para determinação do valor do recalque da estaca do pilar P33, através dos métodos semi-empíricos de estimativa de recalque abordados na seção 2.4.

Para determinação do valor do Módulo de Elasticidade do Solo foi utilizado o quadro 7, onde relacionou-se o tipo de solo e seu grau de compactidade, verificado a partir do boletim de sondagem do ensaio SPT das figuras 16 e 17.

Quadro 7 - Parâmetros do solo em função do SPT

TIPO DE SOLO	GRAU DE COMPACIDADE	MÓDULO DE ELASTICIDADE (KN/m ²)	COEFICIENTE DE POISSON
Areia e solos arenosos	Pouco compacta	9500	0,35
	Medianamente compacta	27000	
	Compacta	55000	
	Muito compacta	70000	
Argila e solos argilosos	Média	390	0,45

Fonte: Adaptado de JOBERT, 2007; PRUNUNCIATI, 2018.

O material da estaca aqui adotado é o concreto com fck de 20 Mpa, ou seja de classe de resistência C20. O valor de E_c (módulo de elasticidade do material da estaca) foi obtido com base no quadro 8, adaptado da Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira – Norma Técnica ABNT-NBR 6118 (2014 p.25), onde estão relacionados os valores estimados do módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão do concreto.

Quadro 8 - Valores estimados do módulo de elasticidade em função da resistência característica à compressão do concreto

Classe de resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60	C70	C80	C90
E_c (Gpa)	25	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas – Norma Brasileira – Norma Técnica ABNT-NBR 6118/2014.

4.1 CÁLCULO PELO MÉTODO VÉSIC (1969, 1975 A)

O recalque devido ao encurtamento elástico da estaca pode ser determinado em função da distribuição do atrito lateral e da carga de ponta, de acordo com a equação 2.12. Os parâmetros utilizados são:

$$Q_p = 3800 \text{ (kN);}$$

$$\alpha_{ss} = 0,5;$$

$$Q_{lat} = 224,30 \text{ (kN);}$$

$$L = 12 \text{ (m);}$$

$$A = 0,38 \text{ (m}^2\text{);}$$

$$E_c = 25000 \text{ (MPa).}$$

$$S_e = \frac{(3800 + 0,5 * 224,30) * 12}{0,38 * 25000}$$

$$S_e = 4,94 \text{ mm}$$

Para a determinação do recalque do solo devido à carga transmitida na ponta conforme a equação 2.13, e os parâmetros apresentados são:

$$C_p = 0,09;$$

$$Q_p = 3800 \text{ (kN);}$$

$$\phi = 0,4 \text{ (m);}$$

$$q_p = 10000 \text{ (Kpa).}$$

Os valores dos parâmetros C_p e q_p foram adotados de acordo com o quadro 1 e o anexo 1 respectivamente.

$$S_p = \frac{0,09 * 3800}{0,4 * 10000}$$

$$S_p = 0,0855 \text{ mm}$$

Para a determinação do recalque do solo devido à carga transmitida ao longo do fuste vale a equação 2.14 com os seguintes parâmetros:

C_s = coeficiente que depende do tipo de solo e do tipo de estaca;

$Q_{lat} = 224,30$ (kN);

$L = 12$ (m);

$q_p = 10000$ (kPa).

Conforme o método proposto por Vésic (1969, 1975a) o valor de C_s (coeficiente que depende do tipo de solo e do tipo de estaca) pode ser obtido através da equação 2.15 com os determinados parâmetros:

$L = 12$ (m);

$\phi = 0,40$ (m);

$C_p = 0,09$.

$$C_s = \left(0,93 + 0,16 * \sqrt{12/0,40} \right) * 0,09$$

$$C_s = 0,162$$

$$S_f = \frac{0,162 * 224,30}{12 * 10000}$$

$$S_f = 0,301 \text{ mm}$$

Vésic (1969, 1975) propôs que o recalque total de uma fundação profunda está relacionado com as três parcelas de recalque calculadas:

$$S = 4,94 + 0,085,5 + 0,30$$

$$S = 5,3255 \text{ mm}$$

O recalque total S é o resultado da soma dessas parcelas de acordo com a equação 2.3 apresentada anteriormente.

4.2 CÁLCULO PELO MÉTODO POULOS E DAVIS (1980)

No método de Poulos e Davis o deslocamento, ou seja, o recalque da estaca é obtido pela equação 2.16:

$$p = \frac{P}{d * E_s} * I_p$$

O valor da carga aplicada na estaca (P), conforme quadro 3 é de 17,10 T, ou seja, 171 kN, e o diâmetro da estaca conforme cálculos realizados no anexo 1 é de 40 cm ou 0,4 m.

Como o solo do boletim de sondagem SPT aqui utilizado se caracteriza do tipo areia, com grau de compactidade elevado, temos que o valor de E_s (módulo de elasticidade do solo) é de 70.000 KN/m² ou 70 Mpa e o valor do coeficiente de Poisson é 0,35.

Para determinação do fator de influência para deformações (I_o) utilizou-se o ábaco da figura 9, relacionando os valores do diâmetro da base da estaca com o diâmetro da estaca, e os valores do comprimento e do diâmetro da estaca. O valor do fator de influência para deformações (I_o) é de 0,068.

Para obtenção do fator de correção R_k (fator de correção para a compressibilidade da estaca) utilizamos o ábaco da figura 10, sendo que o valor de k apresentado no eixo horizontal do ábaco é obtido pela equação 2.17:

$$K = \frac{E_c * R_a}{E_s}$$

E R_a é obtido pela equação 2.18:

$$R_a = \frac{A_p}{\pi * d/4}$$

O valor da área de ponta da estaca e o diâmetro da estaca adotada são respectivamente 0,38 m² e 0,40 m, conforme anexo 1. Sendo assim temos que:

$$R_a = \frac{0,38}{\pi * 0,4/4}$$

$$Ra = 1,21$$

Logo o valor de K será:

$$K = \frac{Ec * 1,21}{70}$$

O concreto de classe C20, de acordo com o quadro 8, tem o seu módulo de elasticidade estimado em 25 GPa, ou seja, 25.000 Mpa. O cálculo referente a esses parâmetros é realizado da seguinte forma:

$$K = \frac{25000 * 1,21}{70}$$

$$K = 432,14$$

Consultando o ábaco da figura 11 e relacionando o valor de K, com o quociente da espessura de solo compreensível da sondagem SPT (h) com o comprimento da estaca (L), temos o valor de Rh igual a 0,7.

Como calculado anteriormente o fator K tem valor de 432,14, enquanto o coeficiente de Poisson para o solo analisado é de 0,35. Logo, o valor de Rv (correção para o coeficiente de Poisson do solo) é 0,95.

Sendo assim para determinação do valor do recalque da estaca do pilar P33 temos o seguinte:

$$p = \frac{171}{0,4 * 70.000} * 0,068 * 1,8 * 0,7 * 0,95$$

$$p = 0,497 \text{ mm}$$

Para o método semi-empírico de estimativa de recalque proposto por Poulos e Davis (1980), o valor do recalque é de 0,497 mm.

4.3 CÁLCULO PELO MÉTODO CINTRA E AOKI (2010)

Seguindo a metodologia de Cintra e Aoki (2010), foi calculada, inicialmente, a capacidade de carga de acordo com o método Aoki-Velloso (1975), conforme anexo1, a fim de identificar as parcelas de carga a serem absorvidas pelo atrito lateral e pela ponta. Logo após, prosseguiu-se a análise de acordo com o método já explicitado.

O valor do esforço normal é reduzido pela redução acumulada, onde é somada a redução em cada camada de profundidade abordado nas equações 2.20 e 2.21 e assim sucessivamente para as camadas de profundidade do solo com os determinados parâmetros:

$$RL1 = 143,52 \text{ (kN)};$$

$$P = 171 \text{ (kN)};$$

$$P1 = 171 - \frac{143,52}{2}$$

$$P1 = 99,24 \text{ kN}$$

$$RL2 = 49,84 \text{ (kN)};$$

$$P2 = 171 - 143,52 - \frac{49,84}{2}$$

$$P2 = 2,56 \text{ kN}$$

$$RL3 = 253,41 \text{ (kN)};$$

$$P3 = 171 - 143,52 - 2,56 - \frac{253,41}{2}$$

$$P3 = -101,785 \text{ kN}$$

$$RL4 = 224,30 \text{ (kN)};$$

$$P4 = 171 - 143,52 - 2,56 + 101,785 - \frac{224,30}{2}$$

$$P4 = 14,555 \text{ kN}$$

Pela Lei de Hooke, o encurtamento elástico da estaca pode ser obtido pela equação 2.22 com os seguintes parâmetros:

$$\rho e = 1/(A * E_c) * \Sigma(P_i * L_i)$$

$$\rho e = 1/(0,38 * 25000) * (99,24 * 4,45 + 2,56 * 1 + (-101,785 * 4) + 14,555 * 2,55)$$

$$\rho e = 0,00000142 \text{ mm}$$

Para obter uma equação que estime o recalque do solo, Cintra e Aoki (2010) usaram a metodologia de Aoki (1984), onde a força, situada na ponta da estaca, provoca um acréscimo de tensões numa camada subjacente qualquer de espessura, e a propagação de tensões acontece na proporção 1:2 (horizontal e vertical, respectivamente). O acréscimo de tensões pode ser obtido conforme a equação 2.23 os parâmetros apresentados são:

$$P_p = 4471,07 \text{ (kN)};$$

$h = 12 \text{ (m)}$ distância entre o ponto de aplicação da carga até o topo da camada H (m);

$H = 6 \text{ (m)}$ espessura da camada subjacente (m).

$$\Delta\sigma_p = \frac{4 * 4471,07}{\pi(0,4 + 12 + 6 / 2)^2}$$

$$\Delta\sigma_p = 24 \text{ KPa}$$

O cálculo da parcela de recalque devido à reação às cargas laterais é calculado de maneira semelhante, considera-se o acréscimo de tensões devido aos carregamentos laterais é obtido pela equação 2.24 com os determinados parâmetros:

$$R_{Li} = 224,30 \text{ (Kn)} \text{ resistência de atrito lateral (kN)};$$

$h = 12 \text{ (m)}$; distância entre o ponto de aplicação da carga até o topo da camada H (m);

$H = 6 \text{ (m)}$ comprimento da camada subjacente (m).

$$\Delta\sigma_i = \frac{4 * 224,30}{\pi(0,4 + 12 + 6/2)^2}$$

$$\Delta\sigma_i = 1,20 \text{ KPa}$$

O método de Cintra e Aoki (2010) estima que o recalque devido ao solo, é obtido através da equação 2.25 com os parâmetros a seguir:

$\Delta\sigma$ = soma de todas as tensões devido às parcelas de atrito lateral e reação de ponta (kPa);

$$\rho S = \left(\frac{(24 + 1,20)}{70} * 6 \right)$$

$$\rho S = 2,16 \text{ mm}$$

Cintra e Aoki (2010) proporam que o recalque total de uma fundação profunda está relacionado com as duas parcelas de recalque calculadas:

$$\rho = 0,00000142 + 2,16$$

$$\rho = 2,16000142 \text{ mm}$$

O recalque total S é o resultado da soma dessas parcelas de acordo com a equação apresentada anteriormente.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para efeito de comparação é feita uma análise a partir do quadro 9, que mostra os valores de recalque para os métodos semi-empíricos de estimativa de recalque abordados no trabalho.

Os resultados obtidos através dos métodos dos diferentes autores não excedem o limite de recalque admissível, fato que pode ser constatado comparando os valores encontrados com o gráfico da figura 5, que correlaciona a ocorrência de danos com valores limites para o recalque diferencial.

Quadro 9 – Resultados de recalque

MÉTODO	RECALQUE (mm)
VÉSIC (1969, 1975a)	5,3255
POULOS E DAVIS (1980)	0,497
CINTRA E AOKI (2010)	2,16000142

Fonte: Autores, 2020.

O método de Vésic (1969, 1975a) é um método conservador que supervalorizou o resultado do recalque, o que pode ser atribuído ao fato de que este leva em consideração de modo superficial as características de solo, pois apresenta apenas um fator de correção para o solo.

O método de Poulos e Davis (1980) leva em consideração a utilização de diversos ábacos, que possuem diversos fatores de correção para a estaca analisada e sua deformação (solo) aplicando os fatores de correção no intuito de deixar o cálculo mais preciso.

O método de Cintra e Aoki (2010) considera parâmetros do método de Vésic (1969, 1975a), onde correlaciona o recalque do solo dividido em duas parcelas, porém sofre o acréscimo da metodologia de Aoki (1984) onde o módulo de elasticidade do solo é discriminado para cada tipo de estaca a ser executada, e ainda utiliza o coeficiente empírico baseado na metodologia de Aoki e Velloso

(1975) para cada tipo de solo onde será feita a fundação. Dessa maneira o método de Cintra e Aoki (2010) torna-se mais preciso do que o método de Vésic, uma vez que utiliza parâmetros que descrevem características mais específicas do solo.

Quando comparados, os métodos de Cintra e Aoki (2010) e Poulos e Davis (1980) demonstram comportamentos semelhantes. Tal semelhança pode ser devido à proximidade dos parâmetros de resistência mecânica do solo e do material da estaca empregados para estimar o recalque.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou um aprofundamento do conhecimento relacionado a fundações profundas, sobretudo na importância do dimensionamento de fundações pelo método de interação solo-estrutura e na análise de diferentes métodos semi-empíricos para estimativa de recalque.

O recalque em fundações é um parâmetro crítico, que deve ser levado em consideração durante o dimensionamento de uma fundação, pois é de extrema importância saber o quanto uma construção irá recalcar no âmbito de estabelecer um fator limitante, no qual uma estrutura pode recalcar sem que a mesma sofra danos e perca suas características estruturais.

Os métodos semi-empíricos de estimativa de recalque dos autores Vésic (1975), Poulos e Davis (1980) e o método Cintra e Aoki (2010) aqui abordados apresentaram análises diferentes e em algumas partes semelhanças entre si, no sentido de levarem em considerações alguns fatores do solo e das estruturas de maneira semelhante.

O método Vésic (1975) relaciona o recalque total a três diferentes parcelas de recalque, divididas entre encurtamento elástico da estaca, recalque do solo devido a carga transmitida na ponta e recalque do solo devido às cargas de atrito lateral distribuídas ao longo do fuste. Sendo assim quando analisamos as equações propostas por Vésic (1975) percebemos que é levada em consideração de maneira superficial algumas características do solo, sendo necessário um estudo mais cuidadoso e uma análise comparativa de um corpo de prova, no intuito de verificar se o método atende de maneira satisfatória a estimativa do recalque de uma estaca.

O seguinte método apresentado foi o de Poulos e Davis (1980), onde o método de estimativa de recalque em estacas foi desenvolvido considerando a ideia de se dividir a estaca em elementos carregados de maneira uniforme, e na distribuição uniforme do efeito do cisalhamento em sua superfície, enquanto que para o recalque do solo o método propõe a equação de Mindlin. Para o cálculo do recalque pelo método Poulos e Davis percebemos a utilização de diversos ábacos que levam em consideração diversos fatores de correção tanto para a

estaca analisada e sua deformação, quanto para o solo analisado, apresentando uma abordagem interessante e bem completa, uma vez que a equação para estimativa de recalque relaciona fatores de influência para deformações, que abrangem diversas características físicas da estaca, bem como do solo e ainda aplica tais fatores de correção no intuito de precisar ainda mais o cálculo.

O último método apresentado foi o de Cintra e Aoki (2010) baseado na divisão do recalque de uma estaca de duas formas diferentes: o encurtamento elástico da estaca e o recalque do solo. O método para calcular o encurtamento elástico da estaca se baseia em um diagrama de propagação de esforço normal na estaca baseado na metodologia de Aoki (1979), onde é possível perceber que conseguimos calcular o encurtamento elástico da estaca somando os esforços normais para cada camada de solo que ela penetra.

Já para análise do solo percebemos uma semelhança entre o método de Cintra e Aoki e o método de Vésic (1975), pois tanto em um quanto no outro o recalque do solo é dividido em duas parcelas, que são o recalque do solo devido a carga transmitida na ponta e o recalque do solo devido às cargas de atrito lateral distribuídas ao longo do fuste. Porém o método de Cintra e Aoki (2010) utiliza ainda em sua equação para obter o recalque do solo a metodologia de Aoki (1984), no que se diz em relação a proporcionalidade de propagação da força situada na ponta da estaca ocasiona nas camadas do solo. O módulo de elasticidade do solo é discriminado para cada tipo de estaca a ser executada, e além disso utiliza coeficiente empírico baseado na metodologia de Aoki e Velloso (1975) para cada tipo de solo onde será feita a fundação.

Sendo assim, o estudo mostra que o cálculo de estimativa de recalque evoluiu com o passar do tempo, uma vez que o método de Cintra e Aoki (2010), mesmo possuindo uma abordagem própria, tem embasamento em alguns métodos e entendimentos abordados em métodos anteriores. Vale ressaltar que um estudo de campo, com uma carga de prova, é importante para realização de uma comparação, que permita analisar qual método é mais preciso ou mais adequado a se utilizar quando precisamos determinar o recalque de uma fundação, uma vez que se trata de um fator de extrema importância para o dimensionamento e execução de qualquer empreendimento.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, P. J. R. Estacas escavadas, hélice-contínua e omega: estudo do comportamento à compressão em solo residual de diabásio através de provas de carga instrumentadas em Profundidade. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001.

AOKI, N.; VELLOSO, D. A. An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 5., Buenos Aires, 1975. Anais. p.367-376.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

BARBOSA, Y.; ALBUQUERQUE, P. J. R.; GARCIA, J. R. Análise da capacidade de carga de estaca pré moldada instrumentada por meio de métodos semiempíricos e numérico. In: 16º CNG – CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 2018, Açores.

BARROS, N.B.F. Previsão de Recalque e Análise de Confiabilidade de Fundações em Estacas Hélice Contínua. 2012. 252f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos Departamento de Geotecnia, São Carlos, SP, 2012.

CARNEIRO, T.O. Análise de Tensões e Recalques em uma Estrutura Enterrada. 2018. 82f. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia) Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2018.

CASTRO, R.M. Uso da Planilha Excel para Estimativa de Recalques Diferenciais em Fundações Superficiais. 2010. 67f. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2010.

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

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. Tensão admissível em fundações diretas. São Paulo: Rima, 2003.

COLARES, G.M. Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios. 2006. 83f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de

São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2006.

CRESPO, V.A.S. Estudo da Sensibilidade de Edificações em Relação ao Solo. 2004. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2004.

DORSCHIEDT, E. Análise Comparativa de Modelagens da Interação Solo-Estrutura. 2018. 197f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

FERREIRA, P.F.S. Análise Não-Linear de Estacas Semienterradas de Seção Circular. XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Florianópolis, SC, Brazil (2017).

FREITAS, M.S. Análise dos Deslocamentos e dos Momentos Fletores nas Fundações e nos Pilares de Pontes Retas Ortogonais em Concreto Armado Considerando a Interação Solo-Estrutura. 2018. 202f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

GARCIA, J. R. Estudo do comportamento carga vs recalque de estacas raiz carregadas à compressão. p. 189, 2006.

GOMES, S.R.F. Recalques provenientes dos elementos das fundações rasas. 2014. 132f. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia) Curso de Engenharia Civil, Universidade Jean Piaget de Cabo Verde, Cabo Verde, 2014.

GONÇALVES, J.C. Avaliação da Influência dos Recalques das Fundações na Variação de Cargas dos Pilares de um Edifício. 2004. 141f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2004.

JOPPERT JUNIOR, I. Fundações e contenções de edifícios: qualidade total na gestão do projeto e execução, 1. ed, São Paulo, PINI, 2007, 221p.

LEITE, A.A.B. Fissuras Causadas por Recalques Diferenciais. 2018. 21f. Artigo apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da UNICESUMAR – Centro Universitário de Maringá, PR, 2018.

LOBO, B.O. Método de previsão de capacidade de carga de estacas: aplicação dos conceitos de energia do ensaio SPT. Porto Alegre: Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 2005, 139p.

MAGALHÃES, P.H.L. (2005). Avaliação dos métodos de capacidade de carga e recalque de estacas hélice contínua via prova de carga. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-141/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 243p.

MILITITSKY, J.; CONSOLI, N. C.; SCHNAID, F. Patologia das Fundações. 2.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 207 p.

MOROSINI, G.M; NAVIA, J.P.B; CUNHA, J.M.B. Aplicação da Interação Solo-Estrutura na Análise de Um Edifício com Fundações Profundas – Estudo de Caso. 2014. 59f. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia) Curso de Engenharia de Produção Civil, Universidade Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

P. PRUNUNCIATI; J. GARCIA; T. RODRIGUEZ. Recalques em fundações profundas – análise em estacas hélice contínua – Revista Eletrônica de Engenharia Civil Vol 14- nº1 (2018).

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

ROCHA, L.Q; MOREIRA, C.W.R; NASCIMENTO, D.P; FILHO, M.G.S; SILVA, F.R. A Influência da Compressibilidade e Adensamento no Recalque. III Colóquio Estadual de Pesquisa Multidisciplinar e I Congresso Nacional de Pesquisa Multidisciplinar (2018).

ROSA, M. Linha de Transmissão: Critérios de Projetos e Definição do Tipo de Fundação. 2009. 82f. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia) Curso de Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2009.

SANTOS, M.J.A.P. Interação Solo x Estrutura: Análise de um caso de Obra com Acompanhamento dos Recalques desde o início da Construção. 2016. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2016.

SANTOS, P.E.F.S. Avaliação da Capacidade de Carga e Recalque de Estacas via Métodos Teóricos e Provas de Carga. 2015. 104f. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia) Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2015.

SAUTHIER, M.S. Segurança Estrutural na Interação Solo- Estrutura em Edifícios de Concreto Armado sobre Estacas. 2016. 117f. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia) Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

SOUSA, V.B.P. Análise da Capacidade de Carga e Recalque das Fundações de um Edifício em Solo da Região de Uberlândia/MG. 2019. 144f. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia) Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2019.

VELLOSO, D.A; LOPES, F.R. Fundações Volume Completo, 1. ed, São Paulo, Oficina de textos, 2010, 583p.

VÉSIC, A. S. Experiments with instrumented pile groups in sand. Performance of Deep Foundation, ASTM -- SPEC Techn. Publ., nº 444, p.177-222. 1969.

ANEXOS

ANEXO I

SPT MÉDIO							
CAMADA	1º METRO	2º METRO	3º METRO	4º METRO	5º METRO	N (MÉDIO)	N (MÉDIO) MINORADO
1º	8	15	-	-	-	11,5	11
2º	15	15	18	21	-	17,25	17
3º	21	21	27	30	30	25,8	25
4º	30	28	30	-	-	29,33	30
5º	30	30	-	-	-	30,00	30

DADOS DO SOLO (SPT)				
CAMADA	ΔL (m)	N (MÉDIO)	K (Mpa)	Q (%)
1º	4,45	11	0,50	2,8
2º	1	17	1,00	1,4
3º	4	25	0,55	2,2
4º	2,55	30	1,00	1,4
5º	1,55	30	1,00	1,4

Capacidade de Carga Estaca Hélice Contínua (Método Aoki Velloso)					
DADOS DA ESTACA		PERÍMETRO	RAIO	ÁREA	ÁREA
		$U = 2\pi R = \pi D$ (m)	$R^3 = 3V/4\pi$	$A = \pi R^2$	MINORADA
D (cm)	40	1,26	0,35	0,3854	0,38
F1	3				
F2	6				
VOLUME BASE (m³)	0,18				

DADOS DO SOLO (SPT)				
CAMADA	ΔL (m)	N (MÉDIO)	K (Mpa)	Q (%)
1º	4,45	11	0,50	2,8
2º	1	17	1,00	1,4
3º	4	25	0,55	2,2
4º	2,55	30	1,00	1,4
5º	1,55	30	1,00	1,4
SOMA	13,55			

CALCULOS PARA CARGA TOTAL SUPORTADA PELA ESTACA (P)

$R_p(\text{kpa})=k.n$	$rL(\text{kpa})=k.n.q$	$P=rL/F2$	$PL=U.\Delta L.RL/F2$	$\Sigma PL (\text{kn})$
5500	154	25,666667	143,52	143,52
17000	238	39,666667	49,84	193,36
13750	302,5	50,42	253,41	446,77
30000	420	70,00	224,30	671,07
30000	420	70,00	136,34	807,41

$R_p=K*1000*N/F1 (\text{kpa})$	$PP=A.R_p (\text{kn})$	$PR=PP+PL (\text{kn})$	$P=PR/2 (\text{kn})$	$P=PL/0,8$
1.833,33	696,67	840,19	420,09	179,4
5.666,67	2153,33	2346,70	1173,35	241,7
4.583,33	1741,67	2188,44	1094,22	558,5
10.000,00	3800,00	4471,07	2235,53	838,8
10.000,00	3800,00	4607,41	2303,70	1009,3

Hélice Contínua		solo	usar menor
Diâmetro (cm)	resistência (kN)	resistência (kN)	
40	800,0	1009,3	800,0