



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA

GABRIEL HENRIQUE DE OLIVEIRA SOUZA
STELLA CHAGAS CASTRO

***Análise comparativa de métodos semi-empíricos
para fundações profundas: estudo de caso em
Arujá-SP***

OURO BRANCO-MG
JULHO-2023



Universidade Federal
de São João del-Rei

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI CAMPUS
ALTO PARAOPEBA

GABRIEL HENRIQUE DE OLIVEIRA SOUZA
STELLA CHAGAS CASTRO

***Análise comparativa de métodos semi-empíricos
para fundações profundas: estudo de caso em
Arujá-SP***

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

Orientador: Leandro Duarte Neves

OURO BRANCO-MG
JULHO-2023

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

C355a Castro, Stella Chagas.
Análise comparativa de métodos semi-empíricos para fundações profundas: estudo de caso em Arujá-SP./ Stella Chagas Castro; Gabriel Henrique de Oliveira Souza; orientador Leandro Duarte Neves. -- Ouro Branco, MG, 2023.
28 f. il.

Trabalho de Conclusão (Graduação - Engenharia Civil) - Universidade Federal de São João del-Rei, 2023.

1. Fundações profundas 2. Capacidade de carga 3. Métodos semi-empíricos I. Souza, Gabriel Henrique de Oliveira. II. Neves, Leandro Duarte, orient. III. Título.

GABRIEL HENRIQUE DE OLIVEIRA SOUZA
STELLA CHAGAS CASTRO

***Análise comparativa de métodos semi-empíricos
para fundações profundas: estudo de caso em
Arujá-SP.***

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

Aprovado em ____ / ____ / _____

COMISSÃO EXAMINADORA:

Professor Orientador de PFC
Leandro Neves Duarte

Professor da Engenharia Civil da UFSJ
José Carlos Borba

Professor da Engenharia Civil da UFSJ
Anderson Ravik dos Santos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1. OBJETIVO	7
2. REFERENCIAL TEÓRICO	8
2.1. ENSAIO SPT	9
2.2. ELABORAÇÃO DE PROJETO DE FUNDAÇÃO.....	10
2.2.1. MÉTODO DOS VALORES ADMISSÍVEIS	12
2.2.2. MÉTODO DOS VALORES DE CÁLCULO.....	13
2.3. PESQUISAS REALIZADAS	14
3. METODOLOGIA.....	15
3.1. DADOS GEOTÉCNICOS DO LOCAL.....	15
3.2. DADOS DA OBRA	16
3.3. PERFIL GEOTÉCNICO	17
3.4. DIMENSIONAMENTO	18
3.4.1. ANÁLISE DOS MÉTODOS	20
3.4.1.1. ESTACA PRÉ-MOLDADA DE CONCRETO.....	20
3.4.1.2. ESTACA ESCAVADA TRADO MECÂNICO	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	22
4.1. PRÉ-MOLDADA X TRADO MECÂNICO	22
5. CONCLUSÃO	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26

ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS PARA FUNDAÇÕES PROFUNDAS: ESTUDO DE CASO EM ARUJÁ-SP.

Resumo:

O presente trabalho apresenta uma análise comparativa no dimensionamento de uma fundação profunda utilizando três métodos semi-empíricos brasileiros, Aoki-Velloso (1975), Decourt-Quaresma (1978) e Teixeira (1996). Com base nestes métodos determinou-se a capacidade de carga de dois tipos de estacas, escavada por trado mecânico e pré-moldada de concreto, a variação dos métodos e análise de custo, ambas com as mesmas características geométricas (diâmetro e comprimento), implantadas no mesmo tipo de solo. A partir destes valores realizou-se a análise de viabilidade de custo para cada tipo de estaca através da tabela SINAPI. Com base nos resultados verificou-se que a estaca pré-moldada possui um maior custo de implementação, apesar da quantidade menor de estacas totais em comparação a trado mecânico, ressaltando que não foram considerados os custos dos blocos de fundação. Os métodos semi-empíricos utilizados não mantêm um padrão de variação uniforme. Os parâmetros são alterados conforme a estaca escolhida e tipo de solo devido aos fatores acrescentados por cada autor, causando uma mudança significativa no resultado de cada método.

Palavra-chave: Fundações profundas, capacidade de carga, métodos semi-empíricos

1. INTRODUÇÃO

Fundação ou infraestrutura é a parte de uma estrutura composta por elementos geralmente construídos abaixo do nível do terreno, e que são os responsáveis por transmitir ao solo todas as ações (cargas verticais, forças do vento, etc.) que atuam na edificação. Os elementos estruturais que se apoiam sobre a infraestrutura compõem a parte chamada de superestrutura. (FALCONI *et al.*, 2019).

As cargas que atuam na superestrutura das edificações são transferidas na direção vertical por meio dos pilares. Como o solo geralmente tem resistência muito inferior à do material constituinte do pilar, é necessário projetar algum outro tipo de elemento estrutural com a função de receber essas cargas e transmiti-las ao solo em menor intensidade. Essas estruturas são as fundações, e são divididas em dois grupos: fundações rasas (diretas) e fundações profundas. (LOPES; VELLOSO, 2010).

De acordo com Velloso e Lopes (2010), as fundações profundas são caracterizadas por penetrarem no solo a uma profundidade que varia de três a dez vezes o diâmetro da sua base, essas são utilizadas quando a camada de solo superficial não possui capacidade de suporte suficiente para as cargas que serão transmitidas pela estrutura. A ABNT NBR 6122:2022 determina que a fundação profunda é aquela cuja ponta (ou base) esteja apoiada em uma profundidade superior a oito vezes a sua menor dimensão em planta e no mínimo 3 metros. Neste tipo de fundação incluem-se as estacas e os tubulões.

O conhecimento das cargas e das propriedades do solo é essencial para o dimensionamento da edificação. No Brasil, são usados métodos semi-empíricos e empíricos, para estimar a capacidade de carga de uma fundação profunda. Estes métodos se utilizam dos parâmetros do solo obtidos através dos ensaios SPT e das cargas solicitantes da edificação (LOPES; VELLOSO, 2010).

1.1. OBJETIVO

Este trabalho, tem como objetivo realizar uma análise comparativa da capacidade de carga geotécnica e a viabilidade econômica de uma fundação profunda, aplicando três métodos semi-empíricos brasileiros — Aoki-Velloso (1975), Decourt-Quaresma (1978) e Teixeira (1996) — com base em dados

obtidos no ensaio de sondagem tipo SPT de um edifício residencial de três andares em Arujá-SP.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O método de dimensionamento para fundações profundas de Aoki-Velloso (1975) originou-se do desenvolvimento de correlações entre os ensaios de penetração estática (CPT, sigla em inglês) e penetração dinâmica (SPT, na sigla em inglês). A teoria subjacente para estimar a capacidade de carga de estacas baseia-se no ensaio de penetração estática. No entanto, é possível estimar a capacidade de carga utilizando os resultados do SPT por meio da utilização do coeficiente 'K' (MANTUANO, 2013), que transforma a resistência de ponta do cone para NSPT.

São usados como correção fatores F1 e F2 que levam em consideração o efeito de escala, ou seja, a diferença de desempenho entre a estaca (protótipo) e o cone do CPT (modelo), bem como a influência do processo de instalação de cada tipo de estaca, além de coeficientes k e α , que variam de acordo com o tipo de solo (CINTRA; AOKI, 2010). Os valores iniciais de F1 e F2, originalmente foram propostos por Aoki-Velloso (1975), porém Monteiro, em 1997, estabeleceu correlações diferentes. (VELLOSO; LOPES, 2010).

A abordagem desenvolvida pelos engenheiros Luciano Décourt e Arthur Quaresma, propuseram um método semi-empírico para estimar a capacidade de carga de cada estaca, através dos valores N obtidos no ensaio SPT. Inicialmente desenvolvido para estacas pré-moldadas de concreto, esse método foi posteriormente expandido para abranger outros tipos de estacas (HACHICH, 1998). Os autores criaram o coeficiente característico do solo em 1978 a partir de provas de carga realizadas em estacas pré-moldadas de concreto, a fim de ponderar a carga de ruptura de ponta.

Para abranger outros tipos de estacas, Decourt, em 1996, adotou outros fatores para a equação de resistência da ponta e resistência lateral. (CINTRA; AOKI, 2010)

Com base nos métodos semi-empíricos como do Aoki-Velloso (1975), Decourt-Quaresma (1978), entre outros, Teixeira apresenta, em 1996, uma equação simplificada com baseamento nos índices de penetração de ensaio SPT e parâmetros de α que foi introduzido por conta da parcela de resistência da ponta,

levando em conta as camadas de solos e o tipo de estaca, o parâmetro β depende do tipo de estaca e independente do solo, este é introduzido na parcela de resistência lateral. (FALCONI *et al.*, 2019).

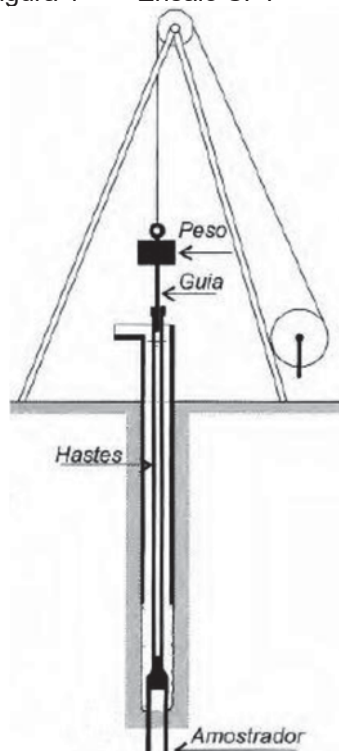
Todos os métodos citados anteriormente dependem do método de execução de sondagem de simples reconhecimento com o ensaio SPT (*standard penetration test*). De acordo com a ABNT NBR 6484:2020, esse é responsável por determinar o índice de resistência à penetração N a cada metro, além dos tipos de solos, profundidades de ocorrência e indicação da posição do nível de água. Este ensaio pode ser executado de duas maneiras: manualmente ou mecanizado.

Para viabilidade econômica, como referência foi utilizada a tabela do SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil), do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) do mês de abril de 2023 do estado de São Paulo. A tabela SINAPI “tem por objetivo a produção de séries mensais de custos e índices de custos da construção civil, em diferentes níveis de agregação técnica e espacial, visando permitir a programação de investimentos e a execução e análise de orçamentos” (IBGE, 2023, n.p.).

2.1. ENSAIO SPT

Este ensaio permite a determinação da capacidade de solos granulares e a identificação da consistência de solos coesivos ou até mesmo rochas brandas, o resultado obtido pelo teste SPT é dado por meio do número de golpes necessários à cravação de um amostrador padrão (NSPT). Sua perfuração é realizada por tradagem ou circulação de água, sendo as amostras coletadas a cada metro por meio de um amostrador padrão do tipo Raymond. O teste consiste na cravação de um amostrador usando um martelo de 65 kg, que cai de uma altura livre de 75 cm em tubos de aço “schedule” com 1 polegada de diâmetro interno e massa de 3,2 kg/m, a cravação do amostrador é realizada em três trechos iguais de 15 cm. O valor do NSPT é o número de golpes necessários para fazer o amostrador padrão penetrar 30 cm, após uma cravação inicial de 15 cm (ALBUQUERQUE; GARCIA; 2020).

Figura 1 – Ensaio SPT



Fonte: Adaptado de Velloso e Lopes (2010).

De acordo com a ABNT NBR 8036:1983, é estabelecido que o número mínimo de sondagens varia de acordo com a área de projeção em planta do edifício. Para áreas de até 1.200 m², é necessário realizar pelo menos uma sondagem para cada 200 m² de área. Quando a área está compreendida entre 1200 m² e 2400 m², é requerida uma sondagem adicional para cada 400 m² que excederem os 1200 m² iniciais.

2.2. ELABORAÇÃO DE PROJETO DE FUNDAÇÃO

Em qualquer tipo de obra, deve-se buscar um projeto econômico, no entanto, a edificação deve trazer segurança aos usuários, sendo resistente, estável e duradoura. Existem diferentes tipos de fundações profundas, como estacas e tubulões sendo que a escolha do tipo a ser utilizado depende das características do solo e das cargas a serem suportadas. (FALCONI *et al.*, 2019)

Conforme Velloso e Lopes (2010), as estacas são classificadas de acordo com diferentes critérios. Uma forma de classificação é baseada no material utilizado em sua estrutura, podendo ser feitas de madeira, concreto, aço ou mistas. Outra forma de classificação considera o processo executivo, levando

em conta o efeito que as estacas causam no solo durante sua instalação, podendo ser de estacas de deslocamento, de substituição e sem deslocamento. As estacas de deslocamento são cravadas no solo por meio de um processo de deslocamento do solo para os lados. Assim, conforme a estaca penetra no solo durante a cravação, este é empurrado para os lados. Já as estacas de substituição, são estacas que são introduzidas no solo por meio da retirada de parte do solo existente, criando um furo no solo que é posteriormente preenchido com concreto ou outro material. Por fim, as estacas sem deslocamento são estacas escavadas as quais são introduzidas no solo sem causar deslocamento significativo do solo, sendo executadas por meio de perfuração do solo

Danziger e Lopes (2021) classificam as estacas em dois grupos: estacas escavadas e cravadas. As estacas escavadas são executadas por meio de uma escavação no solo e são, em geral, mais indicadas para solos de baixa a média resistência, com baixa capacidade de carga, e podem ser executadas em diferentes diâmetros e profundidades, essas são do tipo Strauss, trado mecânico, hélice contínua e estacas raiz. Por outro lado, as estacas chamadas de cravadas, são cravadas no solo por meio de um processo de batida, vibração ou prensagem, sendo mais indicadas para solos de média a alta resistência, com alta capacidade de carga. São pré-fabricadas, podendo ser de madeira, metálicas ou concreto armado.

Uma estrutura é denominada segura quando for capaz de resistir todas as ações que vierem a solicitá-la durante a sua vida útil, sem sofrer danos, permanente ou temporariamente, desempenhando as funções para as quais foi concebida. Dessa forma, denomina-se “estado limite” qualquer condição que impossibilite a estrutura de cumprir essas funções.

Velloso e Lopes (2010) apontam que os requisitos básicos que um projeto de fundações deverá atender são:

- Deformações aceitáveis sob as condições de trabalho, sendo tal verificação de possíveis colapsos, conhecida como verificação dos estados limites de utilização ou serviço (ELS);
- Segurança adequada ao colapso do solo de fundação (capacidade de carga geotécnica) e segurança adequada ao colapso dos elementos estruturais (capacidade de carga estrutural), correspondentes à verificação dos estados limites últimos (ELU).

Em conjunto há verificação da carga admissível, sendo essa a carga máxima aplicada sob uma estaca com o fator de segurança predeterminado ao limite de ruptura e limite de serviço (recalque, vibração, etc.). (ALBUQUERQUE; GARCIA, 2020). Conforme a ABNT NBR 6122:2022, quando um projeto de fundações utiliza coeficientes de segurança global, emprega-se o Método dos valores admissíveis, ou Método de valores de Cálculo, quando se utilizam os fatores de seguranças parciais.

2.2.1. MÉTODO DOS VALORES ADMISSÍVEIS

Como citado em Velloso e Lopes (2010), o Método dos Valores Admissíveis envolve o uso de um fator de segurança global FS que varia de acordo com o tipo de obra. Neste caso, as tensões que provém de ações características (σ_k) devem ser menores que as tensões admissíveis (σ_{adm}). Por sua vez, as tensões admissíveis são obtidas através da ponderação das tensões de ruptura (ou escoamento, ou últimas), pelo fator de segurança FS . Como demonstrado na Equação (01).

$$\sigma_k \leq \frac{\sigma_{rup}}{FS} \quad (01)$$

Onde:

- σ_k é a ação característica;
- σ_{rup} é a tensão de ruptura;
- FS é o fator de segurança global.

Para fins de dimensionamento de fundações, é considerado que este mesmo princípio pode ser aplicado em cargas. Logo, a solicitação ou carga de trabalho característica admissível é chamada de Q_k e a carga última de Q_{ult} , como é possível ver na Equação (02).

$$Q_k \leq \frac{Q_{ult}}{FS} \quad (02)$$

Onde:

- Q_k é a carga característica admissível;
- Q_{rup} é a carga última.

O cálculo da resistência de um elemento de fundação se dá através da obtenção da carga característica, como já citado. Para se obter esses valores, são utilizados os métodos analíticos ou teóricos (emprega-se os valores característicos das resistências dos materiais como solos e rochas), semi-empíricos e os derivados de provas de carga. Os métodos semi-empíricos são os mais comuns para o cálculo de fundações profundas.

De acordo com a ABNT NBR 6122:2022, os fatores de segurança para solicitações de compressão são obtidos pela Tabela 1.

Tabela 1 - Fatores de segurança para solicitações de compressão

Tipo	Método de determinação da Resistência Última	FS
	Semi-empíricos	Mínimo 3,0
Rasa	Analítico	3,0
	Semi-empírico ou analítico acrescido de duas ou mais provas de carga	2,0
	Semi-empíricos	2,0
Profunda	Analítico	2,0
	Provas de Carga	1,6

Fonte: Adaptada NBR 6122 (ABNT, 2022).

2.2.2. MÉTODO DOS VALORES DE CÁLCULO

O chamado Método dos Valores de Cálculo envolve a adoção de coeficientes de segurança parciais, visto que as solicitações da fundação e a resistência do solo são variáveis independentes, como citado por Velloso e Lopes (2010).

Para isso, os coeficientes de segurança parciais, aqui chamados de fatores de majoração (γ_f), são aplicados sobre as cargas características (Q_k), obtendo-se, assim, as ações de projeto. Já a resistência de projeto (σ_d) é obtida

aplicando um fator parcial de minoração da resistência de ruptura do material (γ_m), nesse caso o solo, como exemplificado pela Equação 03 e 04:

$$Q_k \times \gamma_f \leq Q_d \quad (03)$$

Onde:

- γ_f é o fator de majoração da carga;
- Q_d é a carga de projeto.

$$Q_d = \frac{Q_{ult}}{\gamma_m} \quad (04)$$

Onde:

- γ_m é o fator de minoração das resistências.

A ABNT NBR 6122:2022 estabelece os valores recomendados para os coeficientes de minoração da resistência do solo, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficiente de minoração da resistência de elementos de fundação sob compressão

Tipo	Método de determinação da Resistência	γ_m
	Semi-empíricos	Mínimo 2,15
Rasa	Analítico	2,15
	Semi-empírico ou analítico acrescido de duas ou mais provas de carga	1,4
Profunda	Semi-empíricos	1,4
	Analítico	1,4
	Provas de Carga	1,14

Fonte: Adaptada NBR 6122 (ABNT, 2022).

2.3. PESQUISAS REALIZADAS

Pagnussatti e Santos (2011) elaboraram um estudo comparativo entre diferentes tipos de fundações utilizando o Método dos Valores Admissíveis para uma área de estudo localizado no bairro Barreiros, na cidade de São José, Santa

Catarina. Os métodos utilizados para estimar a capacidade de carga das estacas foram baseados no NSPT, tais como, Aoki-Velloso (1975), Lobo (2005), e Decourt-Quaresma (1978). Com base nestes métodos determinou-se a capacidade de carga, de dois tipos de estacas (pré-moldada de concreto e raiz), com as mesmas características geométricas (diâmetro e comprimento), implantadas no mesmo tipo de solo de fundação. A partir destes valores, realizou-se a análise comparativa, determinando para o presente caso o método mais adequado economicamente submetidas a esforços de compressão, tração e para o dimensionamento de estaca flutuante. Ficou evidente que o método de Lobo (2005) é o mais adequado para a estimativa da capacidade de carga por atrito lateral (estaca flutuante) e total (estaca submetida a esforços de compressão axial) de estacas pré-moldadas de concreto. Para o caso de estaca raiz, o trabalho demonstrou que o método de Aoki-Velloso (1975) é o mais adequado para a estimativa da capacidade de carga por atrito lateral (estaca flutuante e de tração) e total (estaca submetida a esforços de compressão axial).

Martins Hansen (2013) elaborou um estudo comparativo de diferentes configurações de diâmetros de estacas em blocos de fundações, para isso, utilizou o método dos valores admissíveis e o Método dos valores de cálculo. O estudo teve como objetivo a análise de como a escolha de diferentes diâmetros das estacas em blocos de fundações impacta no custo da fundação. As estacas em estudo são escavadas mecanicamente, com o diâmetro variando de 30 a 70 centímetros. Para cada uma das possibilidades realizaram-se os cálculos dos blocos de fundações. Através de uma pesquisa de preço de execução e materiais das estacas e dos blocos de fundação, comparou-se os custos de cada solução com os diferentes diâmetros.

O resultado deste trabalho foi a constatação que blocos de fundações com poucas estacas de maior diâmetro possuem uma tendência a apresentar menor custo de execução que blocos com maiores números de estacas de menor diâmetro.

3. METODOLOGIA

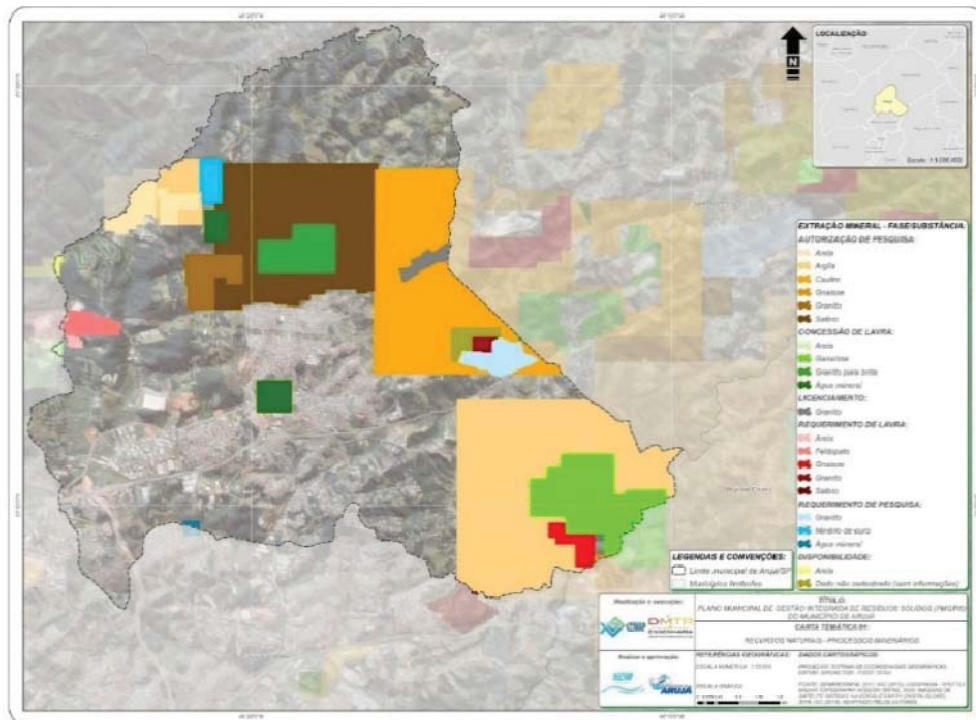
3.1. DADOS GEOTÉCNICOS DO LOCAL

Para realização do projeto, é necessário considerar uma vistoria geológica e geotécnica para obtenção da classificação dos materiais, profundidade do

lençol freático e determinação da resistência de penetração (NSPT). (ALBUQUERQUE; GARCIA, 2020)

Segundo o plano municipal de gestão Integrada de resíduos sólidos de Arujá, a pedologia do município é predominante Argissolos Vermelho-Amarelos, solos caracterizados profundos, bem drenados com uma grande variação de relevo, possuindo textura argilosa ou muito argilosa.

Figura 2 – Mapa de recursos naturais do município de Arujá

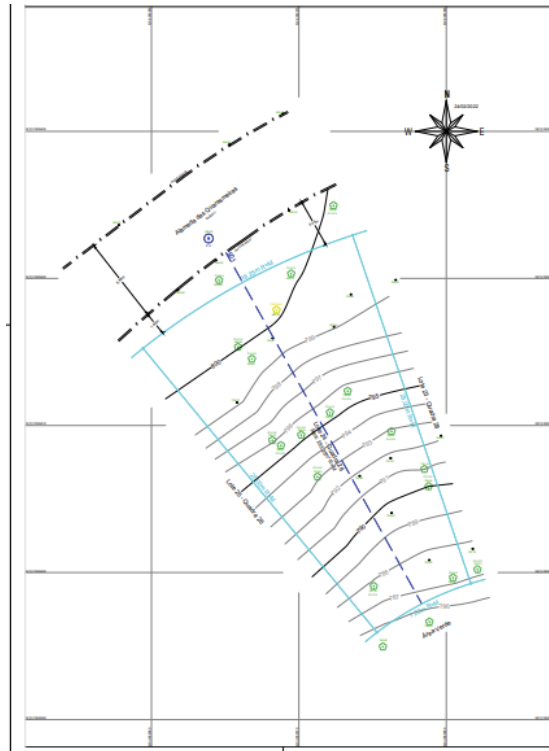


Fonte: Prefeitura de Arujá. (2017). Plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos (pmgirs) do município de Arujá.

3.2. DADOS DA OBRA

A obra em questão se trata de um edifício residencial de 3 andares localizado em Arujá-São Paulo, cujo terreno possui área total de 293,25 m² e área construída de 420,88 m². O terreno da residência possui um afunilamento, o início do terreno possuindo um raio de 16,25 m, comprimento de 25 m e o raio final do terreno de 7 m e um declive acentuado de início cota 800 e final 786,54.

Figura 3 – Plano planialtimétrico do terreno

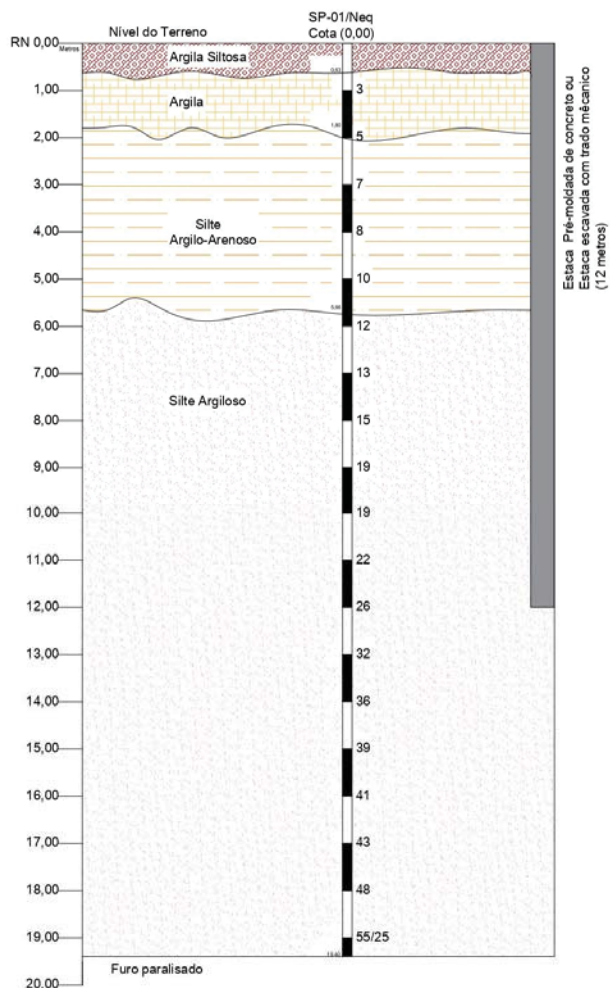


Fonte: Autoria própria.

3.3. PERFIL GEOTÉCNICO

Foram realizados dois furos de sondagem a percussão no local de estudo, os quais foram paralisados ao atingirem o critério de paralisação conforme o item 5.2.4.2 da ABNT NBR 6484:2020. Com tais dados, foi traçado o perfil estratigráfico do solo de fundação com base no furo de menores valores de NSPT.

Figura 4 – Perfil estratigráfico estimado de cálculo



Fonte: Autoria própria.

3.4. DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento geotécnico da fundação foi balizado pelo método dos valores admissíveis. Para o cálculo da capacidade de carga geotécnica, foram utilizados os seguintes métodos semi-empíricos: Aoki-Velloso (1975), Decourt-Quaresma (1978) e Teixeira (1996). Foram realizados cálculos com dois tipos de estacas: cravada (pré-moldada) e escavada (trado mecânico), a fim de realizar uma análise de viabilidade econômica entre as médias dos métodos semi-empíricos de previsão da capacidade de carga em estacas.

Através do software *eberick*, foi obtido o mapa de carga de valores característicos por pilar (Tabela 3), sendo adotado um diâmetro de 30 cm e como

critério de cálculo de parada das estacas a profundidade com NSPT acima de 20, totalizando um comprimento de 12 metros.

Tabela 3 - Mapa de carga de valores característicos por pilar

PILARES	
NÚMERO	Carga (KN)
1	260
2	352
3	268
4	592
5	926
6	406
7	500
8	820
9	502
10	256
11	728
12	254
13	494
14	492
15	310
16	308
17	286
18	566
19	550
20	286

Fonte: Autoria própria.

3.4.1. ANÁLISE DOS MÉTODOS

3.4.1.1. ESTACA PRÉ-MOLDADA DE CONCRETO.

Através de cada método foram calculadas as cargas de ponta, a carga de atrito lateral, a carga de ruptura e a carga admissível, apresentadas na Tabela 4.

Sendo considerado o fator de segurança 2, conforme ABNT NBR 6122:2022.

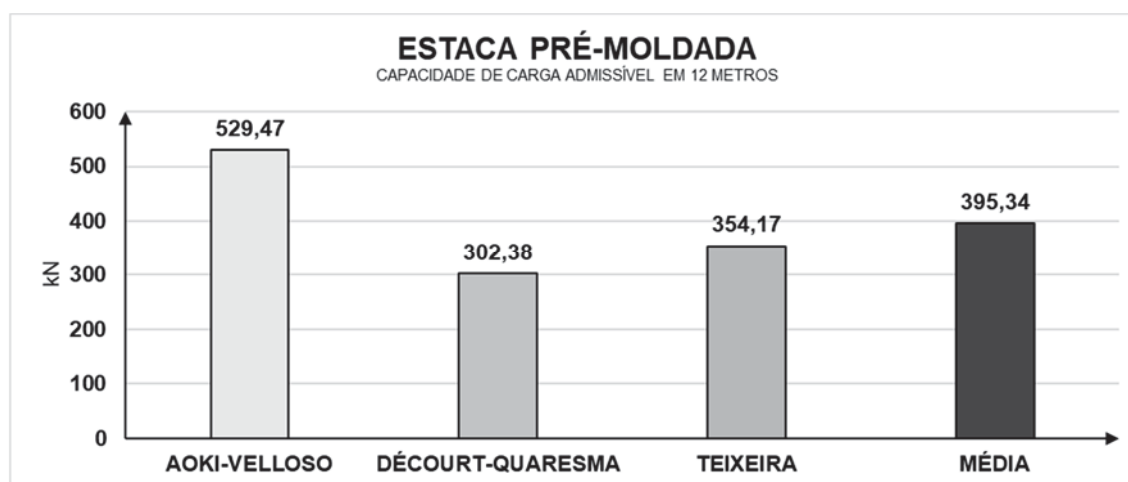
Com os valores de carga admissível de cada método, foi calculado a média aritmética entre eles, conforme a Figura 5.

Tabela 4 – Estaca Pré-moldada: capacidade de carga geotécnica em 12 metros

MÉTODO	CARGA DE PONTA RP (kN)	CARGA DE ATRITO LATERAL RL (kN)	CARGA DE RUPTURA RR (kN)	CARGA ADMISSÍVEL Radm (kN)
Aoki-Velloso	414,65	644,29	1.058,95	529,47
Decourt-Quaresma	189,42	415,35	604,77	302,38
Teixeira	252,56	455,77	708,34	354,17

Fonte: autoria própria.

Figura 5 - Capacidade de carga admissível da estaca pré-moldada



Fonte: autoria própria.

Ao analisar os dados da Figura 6 conclui-se que o método de Aoki-Velloso (1975) apresentou a maior capacidade geotécnica, sendo 33,93% maior que do que a média, já o método de Decourt-Quaresma (1978) demonstrou uma capacidade geotécnica 23,51% menor considerando a média, por fim o método de Teixeira (1996) também apresentou uma capacidade abaixo da média, 10,41% a menos, sendo o desvio padrão de 97,17 KN.

3.4.1.2. ESTACA ESCAVADA TRADO MECÂNICO

A referente Tabela 5 apresenta os valores de carga de ponta, carga de atrito lateral, carga de ruptura e carga admissível, calculados através de cada método, nota-se que a carga de ruptura é igual a carga de atrito lateral. Essa relação deve-se ao fato de que na soma final, a carga de ponta é considerada nula para estacas escavadas, conforme indicado no anexo “J” da ABNT NBR 6122:2022 e o fator de segurança considerado igual a 2.

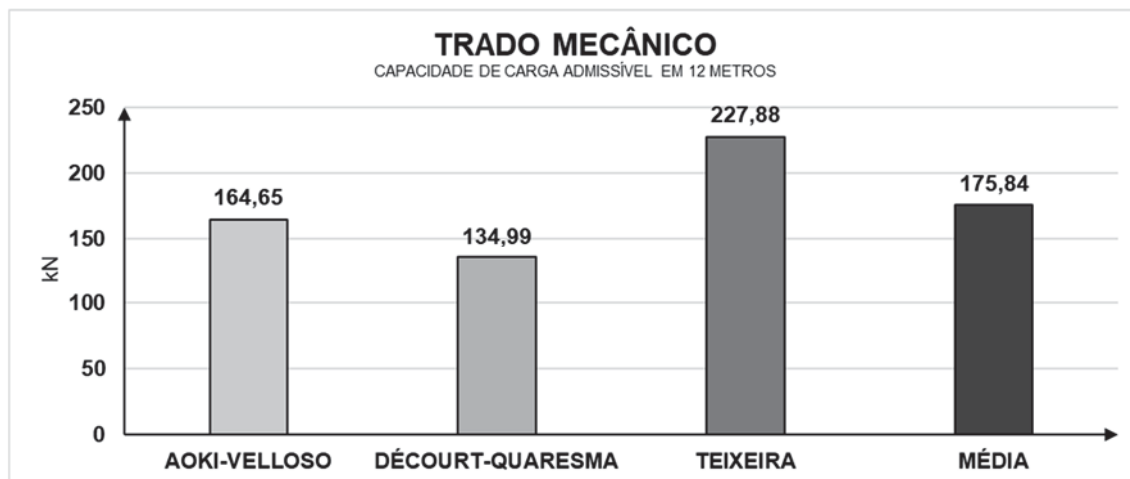
Com os valores de carga admissível de cada método, foi calculado a média aritmética entre eles, conforme a Figura 6.

Tabela 5 -Trado mecânico: capacidade de carga geotécnica em 12 metros

MÉTODO	CARGA DE PONTA RP (kN)	CARGA DE ATRITO LATERAL RL (kN)	CARGA DE RUPTURA RR (kN)	CARGA ADMISSÍVEL Radm (kN)
Aoki-Velloso	142,16	329,30	329,30	164,65
Decourt-Quaresma	113,65	269,98	269,98	134,99
Teixeira	173,63	455,77	455,77	227,89

Fonte: autoria própria.

Figura 6 - Capacidade de carga admissível da estaca a trado mecânico



Fonte: autoria própria.

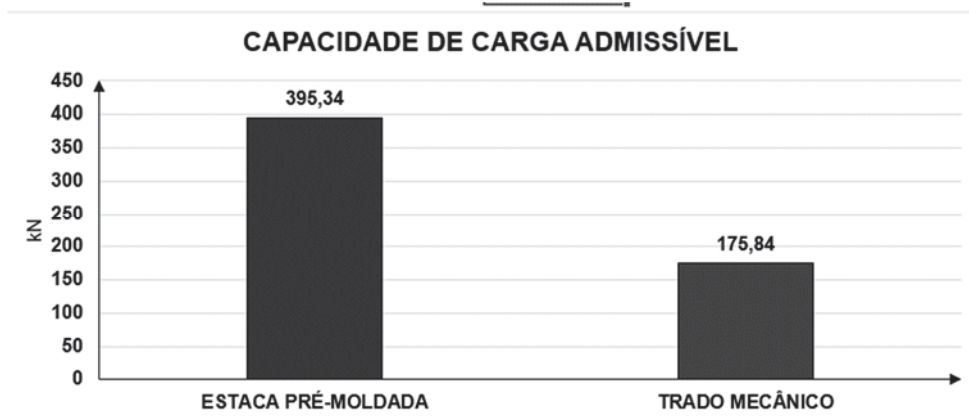
Ao analisar os dados, conclui-se que o método Teixeira (1996) apresentou uma maior carga geotécnica, sendo 29,59% maior do que a média, já os métodos de Decourt-Quaresma (1978) e Aoki-Velloso (1975) demonstraram uma capacidade geotécnica menor que a média, sendo de 23,23% e 6,36% respectivamente, o desvio padrão foi de 47,44 KN.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. PRÉ-MOLDADA X TRADO MECÂNICO

Para o estudo de viabilidade econômica, foi realizado uma comparação da média das capacidades de carga admissíveis de cada estaca, conforme a Figura 7, a partir desses dados foi possível apresentar duas Tabelas (6 e 7) demonstrando a quantidade de estacas por pilar e o custo de implementação de cada método e cada tipo de estaca.

Figura 7 - Capacidade de carga admissível: média dos métodos



Fonte: autoria própria.

Tabela 6 – Estaca cravada pré-moldada, quantidade de estacas e viabilidade econômica

ESTACA CRAVADA PRÉ-MOLDADA					
PILARES		QUANTIDADE DE ESTACAS			
NÚMERO	CARGA (KN)	AOKI-VELLOSO	DECOURT-QUARESMA	TEIXEIRA	MÉDIA DA CAPACIDADE
1	260	1	1	1	1
2	352	1	2	1	1
3	268	1	1	1	1
4	592	2	2	2	2
5	926	2	4	3	3
6	406	1	2	2	2
7	500	1	2	2	2
8	820	2	3	3	3
9	502	1	2	2	2
10	256	1	1	1	1
11	728	2	3	3	2
12	254	1	1	1	1
13	494	1	2	2	2
14	492	1	2	2	2
15	310	1	2	1	1
16	308	1	2	1	1
17	286	1	1	1	1
18	566	2	2	2	2
19	550	2	2	2	2
20	286	1	1	1	1
Total de estacas		26	38	34	33
Custo (R\$)		101.836,80	148.838,40	133.171,20	129.254,40

Fonte: autoria própria.

Tabela 7 – Estaca escavada trado mecânico, quantidade de estacas e viabilidade econômica

ESTACA ESCAVADA TRADO MECÂNICO					
PILARES		QUANTIDADE DE ESTACAS			
NÚMERO	CARGA (KN)	AOKI-VELLOSO	DECOURT-QUARESMA	TEIXEIRA	MÉDIA DA CAPACIDADE
1	260	2	2	2	2
2	352	3	3	2	3
3	268	2	2	2	2
4	592	4	5	3	4
5	926	6	7	5	6
6	406	3	4	2	3
7	500	4	4	3	3
8	820	5	7	4	5
9	502	4	4	3	3
10	256	2	2	2	2
11	728	5	6	4	5
12	254	2	2	2	2
13	494	4	4	3	3
14	492	3	4	3	3
15	310	2	3	2	2
16	308	2	3	2	2
17	286	2	3	2	2
18	566	4	5	3	4
19	550	4	5	3	4
20	286	2	3	2	2
Total de estacas		65	78	54	62
Custo (R\$)		107.850,60	129.420,72	89.598,96	102.872,88

Fonte: autoria própria.

Conforme demonstrando, a estaca pré-moldada apresentou uma capacidade de carga admissível 125,82% maior em relação a do trado mecânico, como já era esperado pelo seu método construtivo e pelos parâmetros de cálculos. Assim, a fim de uma análise mais aprofundada, foi realizado um estudo da viabilidade econômica de cada método e tipo de estaca.

Conforme a carga de valores característicos dos pilares, foi calculada a quantidade de estacas com cada método e a média desses. Através da tabela SINAPI de abril de 2023, itens 100658 e 101176, foi possível obter os custos para realização do projeto de cada método e tipo de estaca.

Foi possível concluir que apesar do trado mecânico apresentar em média 87,87% a mais de estacas do que a o estilo pré-moldado, o custo ficou 20,41% menor considerando a média dos métodos.

No estudo de Pagnussatti e Santos (2011) foi concluído que entre os métodos semi-empíricos testados para capacidade de carga de estacas pré-moldadas de concreto e raiz, o método de lobo (2005) se mostrou mais adequado para estacas pré-moldadas em concreto e o método de Aoki-Velloso (1975) para estacas raiz.

Já o estudo de Martins Hansen (2013) realizou uma comparação de viabilidade de custo de execução, para blocos de fundações através dos métodos dos valores admissíveis e de cálculos, analisando estacas escavadas mecanicamente com diâmetros que variavam de 30 a 70 cm, ao final foi concluído que maiores diâmetros apresentam a tendência de menores custo de execução dos blocos.

5. CONCLUSÃO

Considerado os parâmetros de segurança fornecidos pela norma ABNT NBR 6122:2022 para a capacidade de carga e os três métodos de cálculos semi-empíricos citados ao longo do estudo, foi possível concluir que a estaca pré-moldada, apesar de apresentar, como já esperado, maior capacidade geotécnica e menor quantidade de estacas, apresentou um custo de implementação de R\$ 26.381,52 a mais que a trado mecânico.

Para a estaca pré-moldada, o método de Aoki-Velloso (1975) apresentou um valor de capacidade geotécnica 33,93% maior que a média, o método de Teixeira (1996) e Decourt-Quaresma (1978) apresentaram uma menor capacidade geotécnica em comparação com a média, sendo de 10,41% e 23,51% respectivamente.

Já para a estaca escavada a trado mecânico, conclui-se que o método proposto por Teixeira (1996) apresentou uma maior carga geotécnica, sendo 29,59% maior que a média, já os métodos de Decourt-Quaresma (1978) e Aoki-Velloso (1975) demonstraram uma capacidade geotécnica menor, sendo de 23,23% e 6,36% respectivamente.

Comparando as capacidades geotécnicas de cada estaca, considerando as médias dos métodos, à estaca pré-moldada apresentou uma capacidade de

carga admissível 125,82% maior em relação a do trado mecânico. A quantidade de estacas para a edificação também teve uma discrepância de 87,87% entre os tipos de estacas considerando a média de carga para cálculo, sendo de 33 estacas para pré-moldada a 62 para a de trado mecânico.

Porém, conclui-se, em suma, que a melhor opção em questão de viabilidade econômica seria à estaca escavada a trado mecânico, uma vez que seu custo de implementação se mostrou 20,41% menor que estaca cravada pré-moldada.

Vale ressaltar que o presente artigo não visou como proposta avaliação de demais tipos de estacas ou métodos, e não foi computadorizado os custos dos blocos de fundações, sendo essa sugestão para pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE *et al.* **Engenharia de fundações**. LTC; 1 edição (13 de julho 2022)

ALONSO, Urbano Rodriguez. **Dimensionamento de fundações profundas**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2012. 158 p.

AOKI, N.; VELLOSO, D. A. **An approximate method to estimate the bearing capacity of piles**. In: PANAMERICAN CSMFE, 5., 1975, Buenos Aires. Proceedings... Buenos Aires, 1975. V. 1, p.367-376.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16796: Solo — Método padrão para avaliação de energia em SPT. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484: Solo – Sondagens de simples reconhecimentos com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson. **Fundações por estacas: Projeto Geotécnico**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

DANZIGER, *et al.* **Fundações em estacas**. 1 Edição (22 de março 2021).

DECOURT, L. **Previsão da capacidade de estacas com base nos ensaios SPT e CPT**, Divisão Técnica de Mecânica dos Solos e Fundações - Instituto de Engenharia, São Paulo, 1986.

DECOURT, L.; QUARESMA, A. R. **Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT**. In: CBMSEF, 6., 1978, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, 1978. v. 1, p. 45-53.

DECOURT, L.; QUARESMA, A. R. **Como calcular (rapidamente) a capacidade de carga limite de uma estaca**, A Construção São Paulo, n. 1800, ago. 1982..

HACHICH, Waldemar, *et al.* (Eds.). **Fundações: Teoria e Prática**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2019. 758 p.

HANSEN, V.M. **Análise de diferentes configurações de diâmetro de estacas em blocos de fundações: comparativo de custo**. 2014. 75 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2014.. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/107497/000943440.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 20 maio 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil). Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9270-sistema-nacional-de-pesquisa-de-custos-e-indices-da-construcao-civil.html?edicao=36868>. Acesso em: 16 de abril 2023.

LOBO, O, Bianca. **Método de Previsão de Capacidade de Carga de Estacas: Aplicando os conceitos de energia do ensaio SPT**. 2005. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Univ. Fed. do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MELHADO, S. B. *et al.* **Fundações**. 2002

MONTEIRO, P. E. **Capacidade de carga de estacas - método Aoki-Velloso**, Relatório interno de Estacas Franki, Ltda, 1997.

OLIVEIRA, L. M. de. **Diretrizes para projeto de blocos de concreto armado sobre estacas**. 2009. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-27032009084307/publico/Diretrizes_para_projeto_de_blocos_de_concreto_armado_sobre.pdf>. Acesso em: 20 maio 2023.

PAGNUSSATTI, H; DOS SANTOS, A. A; **Análise comparativa dos métodos de estimativa de capacidade de carga de fundações profundas-estudo de caso**. UNESC, 2011. Disponível em: <<http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/1260/1/Heriberto%20Pagnussatti.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2023.

Prefeitura de Arujá. (2017). PLANO MUNICIPAL DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PMGIRS) DO MUNICÍPIO DE ARUJÁ [mapa]. 1:55.000. Consultado em: 04-01-2023. Website: https://smastr20.blob.core.windows.net/conesan/Aruja_RS_2017.pdf.

REBELLO, Yopanan Conrado Pereira. **Fundações: Guia Prático de Projeto, Execução e Dimensionamento**. 4 ed. São Paulo: Zigurate Editora, 2008. 233 p.

SILVA. **Previsão da capacidade de carga em estacas raiz através de métodos semi-empíricos associados a análises estatísticas**. Revista CIATEC-UPF, Vol.10 (2), p. p102-114,2018.

TEIXEIRA, A. H. **Projeto e execução de fundações**. In: SEFE, 3, São Paulo, 1996.

VELLOSO, I. A; LOPES, F.R; **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas**.1ª edição. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2011.