

HEITOR DE OLIVEIRA RAMOS

**Análise comparativa dos métodos de previsão de capacidade de carga
de estacas: um estudo de caso.**

Heitor de Oliveira Ramos

**Análise comparativa dos métodos de previsão de capacidade de carga
de estacas: um estudo de caso.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Mariana Ferreira Benessiuti Motta.

| | |
|-------|--|
| R175a | Ramos, Heitor de Oliveira Análise comparativa dos métodos de previsão de capacidade de carga: um estudo de caso / Heitor de Oliveira Ramos – Guaratinguetá, 2020. 59 f. : il. Bibliografia : f. 53-54 Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020. Orientadora: Profª. Drª. Mariana Ferreira Benessiuti Motta Coorientador: Prof. Dr. Paulo Valladares Soares 1. Fundações (Engenharia). 2. Construção civil. 3. Estacaria (Engenharia civil). I. Título. |
|-------|--|

CDU 624.15

Luciana Máximo

Bibliotecária-CRB-8/3595

HEITOR DE OLIVEIRA RAMOS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL".

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO.

Prof.^a Dr.^a Isabel Cristina de Barros Trannin
Coordenadora.

BANCA EXAMINADORA:



Prof.^a Dr.^a Mariana Ferreira Benessiuti Motta (Orientadora/UNESP-FEG)



Prof. Dr. Paulo Valladares Soares (UNESP/FEG)



Prof. MSc. Douglas Andrini Edmundo (UNESP/FEG).

Guaratinguetá – SP

2020

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre foram e sempre serão minhas principais bases.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, muitas pessoas estão envolvidas em minha trajetória – seja na universidade ou em vida -, e cada uma delas tem e teve sua importância para que eu pudesse construir essa caminhada. As principais sem dúvida foram meus pais: Marta e Pedro. Sem eles, nenhuma destas realizações seria possível, agradeço do fundo do meu coração pela confiança extrema que tiveram em mim e por todo apoio em todas horas difíceis, seja durante a estadia em Guaratinguetá ou na vida.

Para complementar todo meu ciclo de pessoas que me fortalecem, agradeço também a:

- aos meus amigos da república *Moikana* e da *Lobateria*, pelo apoio e por serem os principais ombros amigos durante minha graduação.

- aos meus professores e a UNESP principalmente, por serem a fonte do conhecimento que me foi adquirido até aqui

- a professora Mariana e ao professor Paulo, por terem me dado toda atenção e suporte para que este trabalho pudesse ser realizado.

- à empresa FUGRO, pelo fornecimento dos materiais para estudo deste trabalho

- à todos que diretamente ou indiretamente me ajudaram em algum momento nesses anos, o meu muito obrigado.

RESUMO

O correto dimensionamento de fundações profundas se faz necessário para que não incorram problemas das mais variadas naturezas nas obras de construção civil. Para que este dimensionamento seja o mais assertivo possível, se faz o uso de diversos métodos para avaliação da capacidade de carga de uma estaca. O presente trabalho apresenta a análise comparativa entre os resultados dos métodos Decourt-Quaresma, Aoki-Velloso, Van der Veen, Decourt (Rigidez) e NBR 6122/2019 para duas estacas executadas, uma sendo do tipo hélice contínua e outra sendo escavada com polímero na região sul do Brasil, no estado do Paraná pela empresa FUGRO. A pesquisa se baseou na análise da bibliografia já existente, nos relatórios fornecidos pela empresa para levantamento do problema (sondagens SPT e provas de carga estática) e principalmente dos parâmetros envolvidos nos mais diferentes métodos objetos de estudo deste trabalho. Assim os cálculos, utilizando as premissas de cada um dos métodos, foram realizados para que se obtivesse as respectivas capacidades de carga de cada um dos métodos. Verificou-se que, os métodos em questão apresentam resultados por vezes muito diferentes um dos outros, para um mesmo objeto de estudo, e que pode ocorrer de um método não apresentar resultados dependendo das condições em questão. Para este trabalho, o método de Van der Veen trouxe resultados mais satisfatórios que os outros. Por fim, vale salientar que é de suma importância a adoção de mais de um método de análise quando o assunto é dimensionamento de estacas e aferição da capacidade de carga das mesmas, já que cada método leva em conta diferentes parâmetros e foi elaborado em diferentes regiões, fazendo com que suas hipóteses possam ser diferentes um dos outros.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações profundas. Métodos de capacidade de carga. Estaca Hélice contínua. Estaca escavada.

ABSTRACT

The correct dimensioning of deep foundations is necessary so that problems of the most varied nature do not incur in civil construction works. For this dimensioning to be as assertive as possible, several methods are used to assess the load capacity of a pile. The present work presents the comparative analysis between the results of the Decour-Quaresma, Aoki-Velloso, Van der Veen, Decourt (Rigidity) and NBR 6122/2019 methods for two piles executed, one being of the continuous helix type and the other being excavated with polymer in the southern region of Brazil, in the state of Paraná by the company FUGRO. The research was based on the analysis of the existing bibliography, on the reports provided by the company to survey the problem and mainly of the parameters involved in the most different methods object of study in this work. So the calculation, using the premises of each of the methods, were to obtain the respective load capacities of each method. It was found that the methods in question present results that are sometimes very different from each other, for the same object of study, and that it may happen that a method does not present results depending on the conditions in question. For this work, the Van der Veen method brought more satisfactory results than the others. Finally, it is worth noting that it is of utmost importance to adopt more than one method of analysis when it comes to dimensioning piles and measuring their load capacity, since each method takes into account different parameters and was developed in different regions, making your hypotheses different from each other.

KEYWORDS: Deep foundations. Load capacity methods. Continuous prop pile. Excavated stake.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 01 – Exemplo de fundação rasa..... | 13 |
| Figura 02 – Exemplo de tubulão..... | 14 |
| Figura 03 – Execução da estaca hélice contínua..... | 15 |
| Figura 04 – Execução de uma estaca com polímero..... | 16 |
| Figura 05 – Sistema de ensaio do SPT..... | 18 |
| Figura 06 – Representação do ensaio de prova estática..... | 27 |
| Figura 07 – Carga de ruptura convencional..... | 31 |
| Figura 08 – Curva carga versus recalque para estaca 01..... | 37 |
| Figura 09 – Curva carga versus recalque para estaca 02..... | 37 |
| Figura 10 – Relação entre tensão e deformação para estaca 01..... | 40 |
| Figura 11 – Tensão versus Deformação Específica..... | 41 |
| Figura 12 – Relação Qult versus R ² para estaca 01..... | 42 |
| Figura 13 – Relação Qult versus R ² para estaca 02..... | 42 |
| Figura 14 – Relação entre carga e rigidez para a estaca 01..... | 43 |
| Figura 15 – Extrapolação da curva utilizando linha de tendência logarítmica para estaca 02..... | 43 |
| Figura 16 – Extrapolação da curva utilizando linha de tendência linear para a estaca 02..... | 44 |
| Figura 17 – Gráfico da aplicação do método da NBR para estaca 01..... | 46 |
| Figura 18 – Gráfico da aplicação do método da NBR para estaca 01..... | 47 |
| Figura 19 – Resultados para estaca 01..... | 48 |
| Figura 20 – Resultados para estaca 02..... | 48 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 01 – Valores para k e α | 20 |
| Tabela 02 – Valores de $F1$ e $F2$ | 21 |
| Tabela 03 – Parâmetros α e k | 21 |
| Tabela 04 – Parâmetro $F1$ e $F2$ | 22 |
| Tabela 05 – Parâmetros α e k apresentados por Monteiro..... | 23 |
| Tabela 06 – Parâmetros $F1$ e $F2$ apresentados por Monteiro..... | 23 |
| Tabela 07 – Parâmetro C | 24 |
| Tabela 08 – Relação entre N médio e Atrito Lateral..... | 25 |
| Tabela 09 – Valores para o parâmetro alfa de Decourt..... | 25 |
| Tabela 10 – Valores para o parâmetro beta de Decourt..... | 26 |
| Tabela 11 – Parâmetros para o método Decourt-Quaresma..... | 34 |
| Tabela 12 – Parâmetros para o método Aoki-Velloso..... | 34 |
| Tabela 13 – Relação de carga e recalque para estaca 01..... | 35 |
| Tabela 14 – Relação entre carga e deslocamento para estaca 02..... | 36 |
| Tabela 15 – Relação carga, recalque e rigidez para estaca 01..... | 38 |
| Tabela 16 – Relação entre carga, recalque e rigidez para estaca 02..... | 39 |
| Tabela 17 – Relação Carga versus Recalque para estaca 01..... | 45 |
| Tabela 18 – Carga versus Recalque..... | 44 |
| Tabela 19 – Resultado para cada um dos métodos..... | 46 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 11 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 13 |
| 2.1 | FUNDAÇÕES E SUA IMPORTÂNCIA..... | 13 |
| 2.2 | ESTACA DO TIPO HÉLICE CONTINUA..... | 14 |
| 2.3 | ESTACA TIPO ESCAVADA COM POLÍMERO..... | 16 |
| 2.3.1 | O uso do polímero..... | 16 |
| 2.4 | PREVISÃO DA CAPACIDADE DE CARGA EM ESTACAS..... | 17 |
| 2.4.1 | Ensaio SPT..... | 17 |
| 2.4.1.1 | Etapas da Execução do SPT..... | 17 |
| 2.4.2 | Método Aoki Velloso..... | 19 |
| 2.4.3 | Método Decourt-Quaresma..... | 24 |
| 2.4.4 | Prova de Carga Estática..... | 26 |
| 2.4.5 | Extrapolação da curva carga-recalque..... | 28 |
| 2.4.5.1 | Método de Van der Veen..... | 28 |
| 2.4.5.2 | Método de Decourt (Rigidez) | 29 |
| 2.4.5.3 | Método NBR6122:2019, ABNT 2019..... | 30 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 32 |
| 3.1 | DESCRIÇÃO DAS ESTACAS ESTUDADAS..... | 32 |
| 3.1.1 | Características da estaca 01 e do solo em questão..... | 32 |
| 3.1.2 | Características da estaca 02 e do solo em questão..... | 33 |
| 3.2 | METODOLOGIA..... | 33 |
| 3.2.1 | Principais parâmetros para as estacas 01 e 02 na análise dos métodos semi empíricos..... | 33 |
| 3.2.2 | Método de Van der Veen para as estacas 01 e 02..... | 34 |
| 3.2.3 | Método de Decourt (Rigidez) para as estacas 01 e 02..... | 38 |
| 3.2.4 | Método NBR para estaca 01..... | 39 |
| 3.2.5 | Método NBR para estaca 02..... | 40 |
| 4 | RESULTADOS..... | 42 |
| 4.1 | RELAÇÕES ENCONTRADAS PARA O MÉTODO VAN DER VEEN..... | 42 |
| 4.2 | RELAÇÕES PARA RIGIDEZ..... | 42 |
| 4.3 | RELAÇÕES PARA NBR..... | 44 |
| 4.4 | RESULTADO COMPARATIVO DOS MÉTODOS..... | 47 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5 | DISCUSSÃO..... | 49 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 51 |
| 7 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 52 |
| | REFERÊNCIAS..... | 53 |
| | APÊNDICE A..... | 55 |
| | APÊNDICE B..... | 56 |
| | ANEXO A..... | 57 |
| | ANEXO B..... | 58 |
| | ANEXO C..... | 59 |

1 INTRODUÇÃO

A Engenharia Civil em suas mais diversas formas e ramificações apresenta uma série de questões muito importantes para um perfeito funcionamento da humanidade no mundo. A ótima execução e aplicação das técnicas científicas estudadas e elaboradas no decorrer do tempo garante que a grande maioria dos problemas que estão relacionados a engenharia de construção possam ser resolvidos e contornados.

Desta forma, uma das principais áreas de estudo da engenharia civil é a subárea de geotecnia, que envolve de maneira simplificada o estudo do solo e sua interação com as mais diversas estruturas que juntamente a ele formam um sistema. E é nesse sistema, que as mais diversas técnicas científicas ou empíricas devem atuar para que se obtenham ótimas análises e predições.

Quando o problema em questão envolve o dimensionamento de fundações profundas, algumas análises importantes devem ser feitas para que o dimensionamento seja em todas suas escalas bem feito. Existem hoje diversas técnicas para se prever a capacidade de carga de uma estaca, com diversos parâmetros envolvidos e considerados para cada uma destas análises. Porém, nenhum dos métodos criados até hoje traz em 100% das vezes o resultado exato para esta incógnita que é a capacidade de carga de uma estaca, sendo que cada método é mais indicado para certos tipos de situações que variam majoritariamente juntamente ao tipo de solo e o tipo de estaca objeto de estudo. Por isso, sempre que possível se faz necessário a aplicação de mais de um método para que os resultados sejam comparados e a melhor decisão seja tomada.

Diante de todo este cenário apresentado, o presente trabalho aborda a comparação dos métodos semi-empíricos: Decourt-Quaresma e Aoki-Velloso, e dos métodos de extrapolação da curva carga *versus* recalque: Van der Veen, Decourt (Rigidez) e da norma brasileira NBR 6122/2019, quando os mesmos são aplicados nas duas estacas objetos de estudo deste trabalho, utilizando também os resultados do ensaio de prova de carga estática para uma análise mais completa. As estacas em questão são: uma hélice contínua e outra escavada com polímero, elaboradas na região Sul do Brasil, mais especificamente no estado do Paraná. A empresa que realizou os ensaios foi a empresa FUGRO.

Através então deste estudo de caso, pode-se fazer uma comparação a fim de avaliar tanto a semelhança quando a dispersão dos resultados para a capacidade de carga com os métodos descritos anteriormente. Primeiro elaborou-se uma pesquisa bibliográfica a fim de elucidar os conceitos teóricos dos mais diferentes autores das mais diversas regiões do país,

depois com os relatórios fornecidos pela empresa FUGRO, foram levantados parâmetros para que cada uma das metodologias de previsão de capacidade de carga fosse aplicada. Os cálculos foram feitos com auxílio de calculadoras científicas e de softwares de planilhas eletrônicas.

Por fim, o presente trabalho estrutura-se em 5 capítulos, apresentando-se no segundo a pesquisa bibliográfica sobre geotecnia e fundações, onde é aprofundado o assunto com levantamentos sobre as estacas em questão e principalmente sobre os métodos supracitados nesta introdução, frisando sua importância e sua configuração de uso, bem como suas relações matemáticas para a aferição dos valores finais numéricos. Já no capítulo seguinte, é descrito a forma com a qual a pesquisa foi conduzida, apresentando os métodos e materiais. Assim, no capítulo 4 todos os cálculos são expostos e apresentados para que os leitores tenham em mente o raciocínio usado para cada um, bem como quais parâmetros foram adotados e quais as premissas que foram seguidas para encontrar os valores destes parâmetros. No último capítulo, se faz uma análise comparativa entre os resultados encontrados para cada método aplicado, bem como uma pequena reflexão sobre os resultados encontrados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FUNDAÇÕES E SUA IMPORTÂNCIA

Desde a antiguidade até os tempos modernos, na grande maioria das construções que existiram e existem até hoje, as fundações são elementos cruciais para a ótima performance da obra. A principal função de uma fundação é transmitir a carga que chega até ela para o solo na qual está instalada.

Segundo a norma NBR 6122/2019, pode-se classificar as fundações entre fundações rasas e fundações profundas. As fundações rasas (que também podem ser chamadas de superficiais ou diretas) são aquelas em que a carga é transmitida ao solo principalmente pelas pressões distribuídas sob a base da fundação e onde a profundidade da fundação é menor que duas vezes a menor dimensão da fundação. Dentre os principais tipos de fundações rasas pode-se citar como exemplo as sapatas (figura 01) e o *radier*.

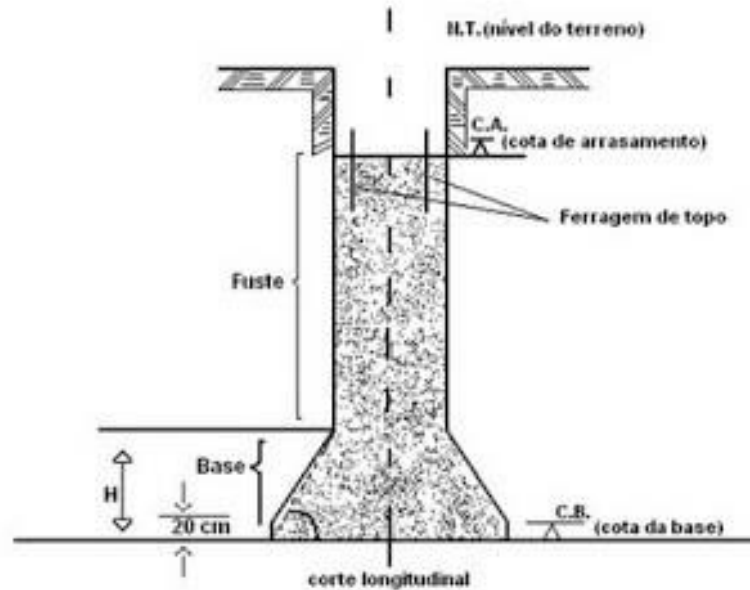
Figura 01 – Exemplo de fundação rasa.



Fonte: Engenhariaconcreta (2020).

O outro principal tipo de fundação são as fundações profundas, objetos de estudo deste trabalho. Segundo a NBR 6122/2019, fundações profundas são elementos estruturais que transmitem a carga para o solo por meio de sua ponta, por meio de sua lateral ou por uma combinação dos dois. Existem diversos tipos de fundações profundas, alguns exemplos são: estacas pré-moldadas, estaca do tipo hélice contínua (figura 02), estaca do tipo Franki, do tipo Strauss, tubulões *etc.*

Figura 02 – Exemplo de tubulão.



Fonte: Inovacivil (2020).

Para a escolha do melhor tipo de fundação e também para a execução de um projeto bem feito, os engenheiros devem fazer a análise de alguns elementos. Segundo Velloso e Lopes (2010), os principais elementos, dentre de uma série de elementos possíveis, a serem levados em conta em um projeto de fundação são:

- Topografia da área;
- Dados geológico-geotécnicos;
- Dados sobre as construções vizinhas;
- Dados da estrutura a construir.

Com estes dados, e claro, com todos dados complementares que forem possíveis de serem levantados, os engenheiros podem fazer um bom dimensionamento das fundações.

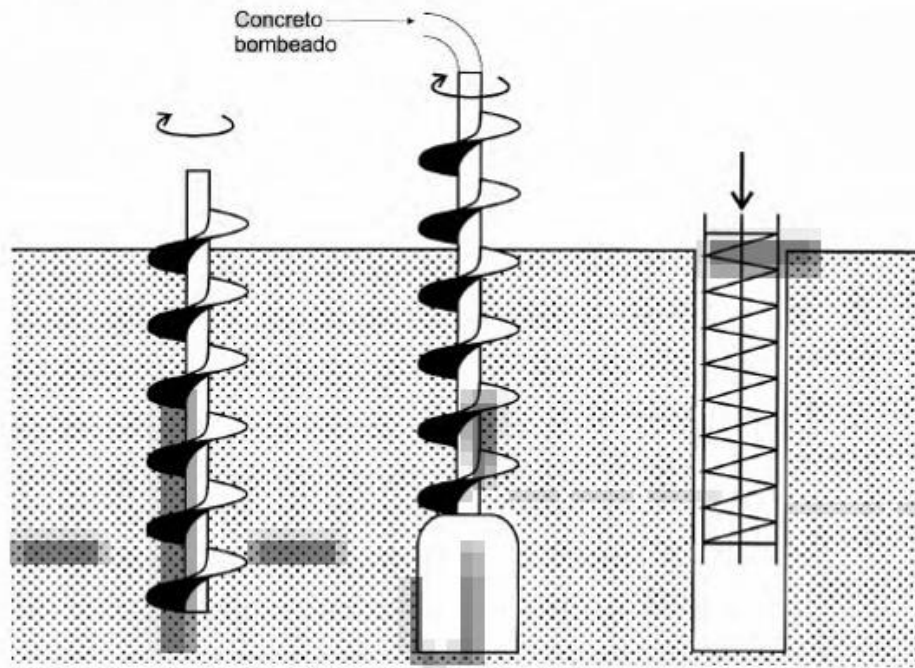
Neste trabalho serão estudados dois tipos de estacas diferentes: uma estaca do tipo hélice contínua e a outra do tipo escavada com polímero.

2.2 ESTACA DO TIPO HÉLICE CONTINUA

Segundo a NBR6122/2019, são elementos de fundação moldadas *in-loco* (moldada diretamente na obra), que são executadas no solo por meio de uma introdução por rotação de

um trado helicoidal, com a injeção de concreto pelo próprio trado que ocorre ao mesmo tempo em que é retirado. Na figura 03 tem-se a representação do processo de execução da estaca.

Figura 03 – Execução da estaca hélice contínua.



Fonte: Velloso; Lopes (2010).

Em sua dissertação de mestrado, Neto (2002) aponta como principais vantagens das estacas hélice contínua os seguintes pontos:

- a. Ao contrário de alguns tipos de estacas, elas não causam vibrações durante a execução;
- b. Não causam ruídos durante o processo executivo;
- c. Não danificam fundações em obras nos arredores.

Entre as desvantagens, Neto (2002) aponta:

- a. No que tange a execução de armaduras mais profundas, existe uma maior dificuldade;
- b. Em solos fracos, podem ocorrer mudanças nas dimensões do fuste;
- c. A qualidade durante a execução está sujeita à experiência do operador.

2.3 ESTACA TIPO ESCAVADA COM POLÍMERO

Segundo Velloso e Lopes (2010), estacas escavadas são elementos executados através da perfuração do solo onde logo após é preenchida com concreto.

Segundo Alves (2016) o método executivo deste tipo de fundação é relativamente simples, porém alguns problemas podem ser enfrentados, como por exemplo:

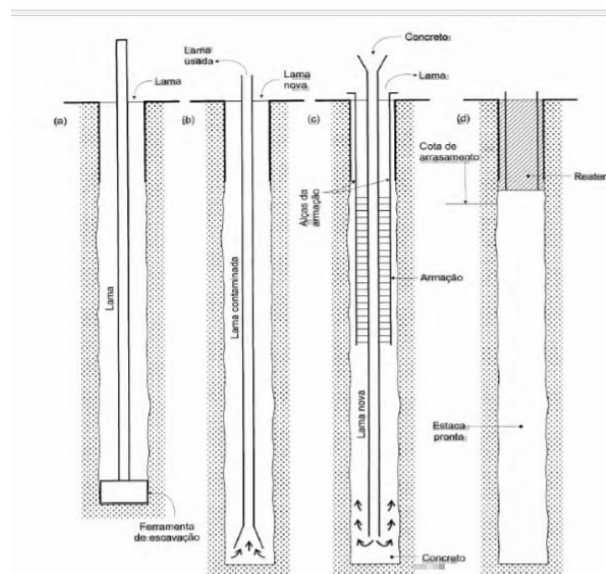
a. A dificuldade de escavação em grandes profundidades, atravessando diferentes tipos de camadas de solo;

b. O orifício deve ser mantido estável e aberto, mesmo que por vezes esteja abaixo do nível do lençol freático.

2.3.1 O uso do polímero

Os fluídos estabilizantes são utilizados em escavações submersas executadas sem o uso de revestimento (ALVES, 2016), e os dois principais tipos são a lama bentônica e o polímero. Mais recentemente, o uso de polímeros vem se tornando cada vez mais popular, principalmente por apresentar vantagens em relação a lama bentônica em seu descarte que possui um menor custo e exigem menos processamento antes de serem reutilizados. Na figura 04, temos o exemplo de uma estaca escavada com fluído estabilizante.

Figura 04 - Execução de uma estaca com polímero.



Fonte: Velloso; Lopes (2010).

2.4 PREVISÃO DA CAPACIDADE DE CARGA EM ESTACAS

Segundo Velloso e Lopes (2010), uma fundação está corretamente dimensionada quando atende dois principais pontos: a segurança contra possíveis colapsos e níveis de deslocamentos aceitáveis. A capacidade de carga de uma estaca é o valor de força correspondente à máxima resistência que o conjunto (estaca-solo) pode apresentar (CINTRA; AOKI, 2010) e, ultrapassando este limite, a ruptura do sistema solo-estaca poderá acontecer. Tendo em vista que, existem obras no mundo nas quais existem muitas pessoas usufruindo de suas utilidades, um mau dimensionamento da estaca em relação à sua capacidade de carga pode apresentar efeitos catastróficos.

A capacidade de carga de uma estaca tem sua composição total formada pela resistência de ponta e pela resistência lateral, onde a primeira quantifica a interação entre ponta e solo e a segunda quantifica a interação entre o fuste e o solo.

Diversos métodos surgiram durante os tempos para quantificar a capacidade de carga de uma estaca, neste trabalho serão abordados os métodos de Decourt-Quaresma, Aoki Velloso, método de Van Der Veen e método de Decourt (Rigidez). Para Decourt-Quaresma e Aoki Velloso, o resultado do SPT se faz necessário. Os outros dois métodos, são elaborados utilizando a extrapolação da curva Carga x Recalque.

2.4.1 Ensaio SPT

O ensaio SPT é o ensaio de investigação do subsolo mais utilizado em território brasileiro (ROCHA, 2013), normatizado pela norma NBR 6484/2001, sua sigla deriva do inglês: *Standard Penetration Test*. Segundo Milititsy (1986), no Brasil se pratica a geotécnica do SPT, uma geotecnia que utiliza um volume alto de ensaios SPT, tamanha é a importância e a presença deste ensaio em nossa geotecnia.

Por esses motivos com o passar dos anos, os engenheiros e estudiosos pautaram muitos estudos para desenvolverem métodos de cálculo para capacidade de estacas que se baseiem no SPT (VELLOSO; LOPES, 2010).

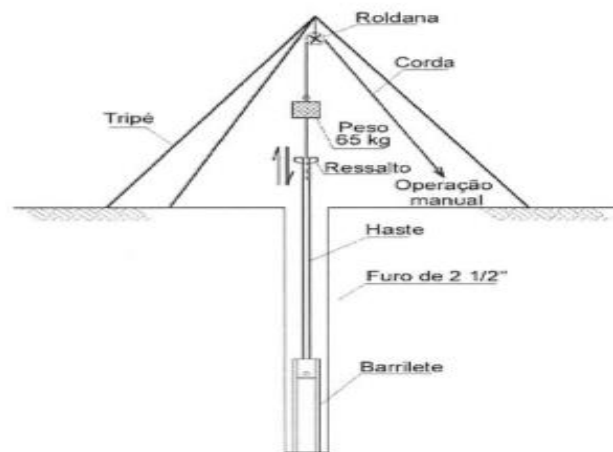
2.4.1.1 Etapas da Execução do SPT

O ensaio segundo Pinto (2006) tem duas principais fases: a perfuração e a amostragem.

O processo iniciar-se-á pela perfuração. Primeiramente é utilizado um trado do tipo cavadeira, o qual serve também para a retirada do solo em questão. Após certa profundidade, introduz-se então um tubo de revestimento que é instalado com o auxílio de um martelo, que também é utilizado na segunda etapa do ensaio. A partir da instalação do tubo, a perfuração continua com um trado helicoidal (PINTO, 2006).

Após feita a perfuração, a etapa de amostragem deve se iniciar. A figura abaixo ilustra o sistema montado para o ensaio.

Figura 05 – Sistema de ensaio do SPT.



Fonte: Pinto (2006).

Segundo a NBR 6484/1997, a aparelhagem padrão para o ensaio é:

- torre com roldana;
- tubos de revestimento;
- composição de perfuração ou cravação;
- trado-concha ou cavadeira;
- trado helicoidal;
- trépano de lavagem;
- amostrador-padrão;
- cabeças de bateria;
- martelo padronizado para a cravação do amostrador;
- baldinho para esgotar o furo;
- medidor de nível-d'água;
- metro de balcão;

- recipientes para amostras;
- bomba d'água centrífuga motorizada;
- caixa d'água ou tambor com divisória interna para decantação; e
- ferramentas gerais necessárias à operação da aparelhagem.

A cravação do amostrador se dará através do impacto do martelo de 65kg, que é elevado à 75 cm e deixado cair livremente. São anotados então os números de golpes (N_{spt}) para que o amostrador crave cada trecho de 15cm, onde os primeiros 15 cm são desprezados e o N_{spt} será dado pelo número de golpes do martelo para os seguintes 30cm (PINTO 2006). O N_{spt} é a importante variável que tiramos do SPT para os cálculos utilizando os métodos de Decourt-Quaresma e Aoki Velloso.

2.4.2 Método Aoki Velloso

Este método apresentado pelos engenheiros Nelson Aoki e Dirceu Velloso no ano de 1975. É um método que, segundo Biachin (2013), citando Wayhs (2013b), se baseia em correlações entre resultados de provas de cargas em estacas e o ensaio de cone (CPT). Mesmo sendo desenvolvido a partir de dados do CPT, o método pode ser aplicado com resultados do SPT (VELLOSO; LOPES, 2010).

A fórmula 1 apresenta a expressão utilizada com dados do ensaio CPT:

$$Q_{ult} = A_b \cdot \frac{q_{cone}}{F1} + U \sum \frac{\tau_{cone}}{F2} \cdot \Delta l \quad (1)$$

Segundo Reinert (2011), citando Goulart (2001), para que esta metodologia possa ser utilizada em ensaios de penetração dinâmica devemos utilizar o coeficiente k . Assim, para também introduzirmos a relação com o SPT, faz-se a seguinte manipulação, com as equações 2 e 3:

$$q_c = k \cdot N \quad (2)$$

$$\tau_c = \alpha \cdot q_c = \alpha \cdot k \cdot N \quad (3)$$

Por fim, tem-se a expressão final 4:

$$Q_{ult} = A_b \cdot \frac{k \cdot N}{F_1} + U \sum \frac{\alpha \cdot k \cdot N}{F_2} \cdot \Delta l \quad (4)$$

Para esta formulação apresentada por Aoki e Velloso (1975), os parâmetros α e k são apresentados nas tabelas 01 e 02 a seguir:

Tabela 01 – Valores para k e α .

| TIPO DE SOLO | k (kgf/cm²) | α (%) |
|----------------------|--|--------------------------------|
| Areia | 10 | 1,4 |
| Areia siltosa | 8 | 2 |
| Areia siltoargilosa | 7 | 2,4 |
| Areia argilossiltosa | 5 | 2,8 |
| Areia argilosa | 6 | 3 |
| Silte arenoso | 5,5 | 2,2 |
| Silte arenoargiloso | 4,5 | 2,8 |
| Silte | 4 | 3 |
| Silte argiloarenoso | 2,5 | 3 |
| Silte argiloso | 2,3 | 3,4 |
| Argila arenosa | 3,5 | 2,4 |
| Argila arenossiltosa | 3 | 2,8 |
| Argila siltoarenosa | 3,3 | 3 |
| Argila siltosa | 2,2 | 4 |
| Argila | 2 | 6 |

Fonte: Velloso; Lopes (2010).

Segundo Velloso e Lopes (2010), os valores para os parâmetros F_1 e F_2 foram obtidos através da realização de uma retro análise de resultados de provas de carga em estacas. Pode-se calcular através da expressão 3 os valores de F_1 e F_2 estando um em função do outro. Na época, não se dispunha de provas de carga instrumentadas, sendo assim, adotou-se $F_2 = 2F_1$. Na tabela 02, tem-se os valores de F_1 e F_2 :

Tabela 02 – Valores de F1 e F2.

| TIPO DE ESTACA | F1 | F2 |
|-------------------------|-----------|-----------|
| Franki | 2,50 | 5,00 |
| Metálica | 1,75 | 3,50 |
| Pré-moldada de concreto | 1,75 | 3,50 |
| Escavada | 3,00 | 6,00 |

Fonte: Velloso; Lopes (2010).

Com o passar dos anos, o método recebeu algumas contribuições notáveis. Nas tabelas 03 e 04, os autores Laprovitera (1988) e Benegas (1993) trazem novos valores para os parâmetros α , k , F1 e F2.

Tabela 03 – Parâmetros α e k .

| TIPO DE SOLO | k (kgf/cm^2) | α (%) |
|----------------------|---|--------------------------------|
| Areia | 6,00 | 1,40 |
| Areia siltosa | 5,30 | 1,90 |
| Areia siltoargilosa | 5,30 | 2,40 |
| Areia argilossiltosa | 5,30 | 2,80 |
| Areia argilosa | 5,30 | 3,00 |
| Silte arenoso | 4,80 | 3,00 |
| Silte arenoargiloso | 3,80 | 3,00 |
| Silte | 4,80 | 3,00 |
| Silte argiloarenoso | 3,80 | 3,00 |
| Silte argiloso | 3,00 | 3,40 |
| Argila arenosa | 4,80 | 4,00 |
| Argila arenossiltosa | 3,00 | 4,50 |
| Argila siltoarenosa | 3,00 | 5,00 |
| Argila siltosa | 2,50 | 5,50 |
| Argila | 2,50 | 6,00 |

Fonte: Velloso; Lopes (2010).

Tabela 04 – Parâmetro F1 e F2.

| TIPO DE ESTACA | F1 | F2 |
|-------------------------|-----------|-----------|
| Franki | 2,50 | 3,00 |
| Metálica | 2,40 | 3,40 |
| Pré-moldada de concreto | 2,00 | 3,50 |
| Escavada | 4,50 | 4,50 |

Fonte: Velloso; Lopes (2010).

Posteriormente, Monteiro (1997) propôs novas relações, com base em sua experiência prática como engenheiro na empresa Estacas Franki Ltda (VELLOSO; LOPES, 2010). Além destas novas relações também propôs algumas recomendações, como:

1. O valor de N é limitado à 40. Qualquer valor maior que 40 deve ser considerado como 40;
2. Para o cálculo da resistência de ponta deverão ser considerados valores ao longo de espessuras iguais a 3,5 e 7,0 vezes o diâmetro da base, para baixo e para cima da ponta. A resistência de ponta será calculada como uma média entre os valores médios obtidos logo acima da ponta e logo abaixo da mesma. (VELLOSO; LOPES, 2010).

As tabelas 05 e 06 apresentam os valores apresentados por Monteiro (1997):

Tabela 05 – Parâmetros α e k apresentados por Monteiro.

| TIPO DE SOLO | k (kgf/cm²) | α (%) |
|----------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Areia | 7,3 | 2,1 |
| Areia siltosa | 6,8 | 2,3 |
| Areia siltoargilosa | 6,3 | 2,4 |
| Areia argilossiltosa | 5,7 | 2,9 |
| Areia argilosa | 5,4 | 2,8 |
| Silte arenoso | 5 | 3 |
| Silte arenoargiloso | 4,5 | 3,2 |
| Silte | 4,8 | 3,2 |
| Silte argiloarenoso | 4 | 3,3 |
| Silte argiloso | 3,2 | 3,6 |
| Argila arenosa | 4,4 | 3,2 |
| Argila arenossiltosa | 3 | 3,8 |
| Argila siltoarenosa | 3,3 | 4,1 |
| Argila siltosa | 2,6 | 4,5 |
| Argila | 2,50 | 5,50 |

Fonte: Monteiro (1997).

Para os valores de F1 e F2:

Tabela 06 – Parâmetros F1 e F2 apresentados por Monteiro.

| TIPO DE ESTACA | F1 | F2 |
|---|-----------|-----------|
| Franki de fuste apilado | 2,30 | 3,00 |
| Franki de fuste vibrado | 2,30 | 3,20 |
| Metálica | 1,75 | 3,50 |
| Pré-moldada de concreto cravada a percussão | 2,50 | 3,50 |
| Pré-moldada de concreto cravada por prensagem | 1,20 | 2,30 |
| Escavada com lama bentônica | 3,50 | 4,50 |
| Raiz | 2,20 | 2,40 |
| Strauss | 4,20 | 3,90 |
| Hélice contínua | 3,00 | 3,80 |

Fonte: Monteiro (1997).

2.4.3 Método Decourt-Quaresma

Os responsáveis por este método são os engenheiros Luciano Decourt e Arthur Quaresma, que o apresentaram em um congresso brasileiro nos anos 70. O método se baseia nos resultados obtidos pelo SPT. O método segue o princípio de que para se encontrar a capacidade de carga total, duas variáveis têm contribuição: a resistência de ponta e o atrito lateral.

O método, que foi se aperfeiçoando, apresentou as seguintes versões, apresentadas por Velloso e Lopes (2010):

a) PRIMEIRA VERSÃO

A resistência de ponta é dada pela equação 5:

$$q_{p,ult} = C \cdot N \quad (5)$$

Onde tem-se que C varia com o tipo de solo, e é apresentado na tabela 7r:

Tabela 07 – Parâmetro C.

| TIPO DE SOLO | C (kN/m ²) |
|---------------------------------------|------------------------|
| Argilas | 120,00 |
| Siltos Argilosos (Alteração de rocha) | 200,00 |
| Siltos arenosos (Alteração de rocha) | 250,00 |
| Areias | 400,00 |

Fonte: Adaptado da teoria de Decourt-Quaresma (2020).

Para os valores de N por sua vez, deve-se utilizar a média do valor de N na ponta, um logo acima e outro logo abaixo da mesma.

No caso do atrito lateral, tiram-se os números de N ao longo do fuste com exceção daqueles utilizados para cálculo da ponta. Calcula-se a média e então é obtido o atrito lateral de acordo com a tabela 8:

Tabela 08 – Relação entre N médio e Atrito Lateral.

| N (MÉDIO AO LONGO DO FUSTE) | ATRITO LATERAL (tf/m²) |
|------------------------------------|--|
| ≤3 | 2 |
| 6 | 3 |
| 9 | 4 |
| 12 | 5 |
| > 15 | 6 |

Fonte: Velloso; Lopes (2010).

b) SEGUNDA VERSÃO

Para a segunda versão, uma atualização foi feita em 1982 no que tange a parcela do atrito lateral, que será dada por:

$$\tau_{l,ult} = \frac{N_{médio}}{3} + 1 \quad (6)$$

Neste caso, valores de N menores que 3 devem ser considerados 3 e os maiores que 50 devem ser considerados 50 (VELLOSO; LOPES, 2010).

c) TERCEIRA VERSÃO

Por fim, Decourt apresentou em 1996 os fatores α e β , que serviriam para ajustes nas parcelas de resistência de ponta e de atrito lateral, respectivamente. Os valores estão apresentados nas tabelas a seguir:

Tabela 09 – Valores para o parâmetro alfa de Decourt.

| TIPO DE SOLO | ESCAVADA GERAL | ESCAVADA (BENTÔNICA) | HÉLICE CONTINUA | RAIZ | INJETADA SOB ALTA PRESSÃO |
|---------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|-------------|----------------------------------|
| Argila | 0,85 | 0,85 | 0,30 | 0,85 | 1,00 |
| Intermediário | 0,60 | 0,60 | 0,30 | 0,60 | 1,00 |
| Areia | 0,50 | 0,50 | 0,30 | 0,50 | 1,00 |

Fonte: Decourt (1996).

Tabela 10 – Valores para o parâmetro beta de Decourt.

| TIPO DE SOLO | ESCAVADA EM GERAL | ESCAVADA BENTÔNICA | HÉLICE CONTÍNUA | RAIZ | INJETADA SOB ALTA PRESSÃO |
|---------------|-------------------|--------------------|-----------------|------|---------------------------|
| Argila | 0,8 | 0,9 | 1 | 1,5 | 3 |
| Intermediário | 0,65 | 0,75 | 1 | 1,5 | 3 |
| Areia | 0,50 | 0,60 | 1,00 | 1,50 | 3,00 |

Fonte: Decourt (1996).

Por fim, obtem-se a expressão geral para o método:

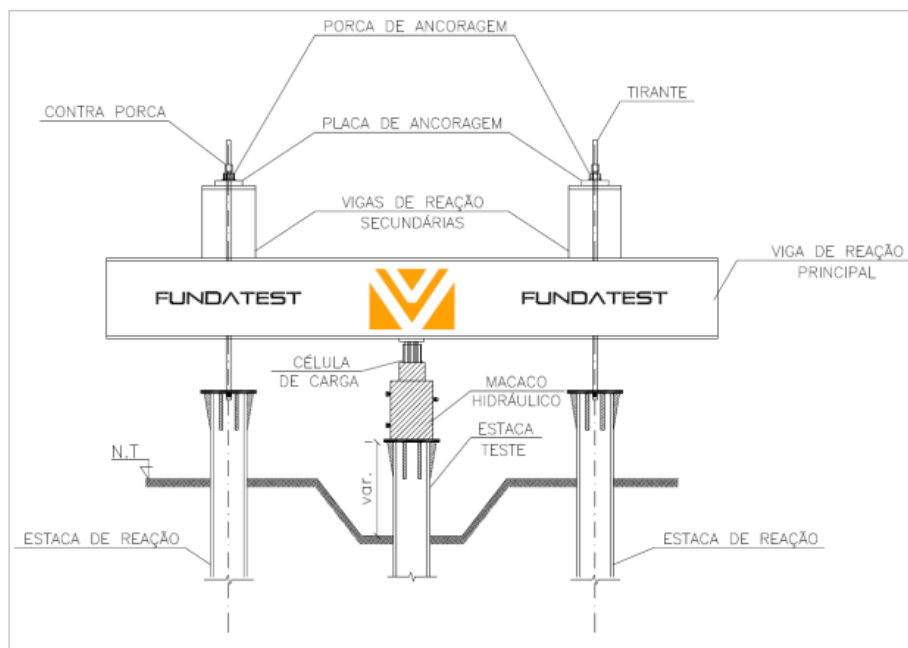
$$Q_{ult} = \alpha \cdot C \cdot N_p \cdot A_p + \beta \cdot 10 \cdot \left(\frac{N_L}{3} + 1 \right) \cdot U \cdot L \quad (7)$$

2.4.4 Prova de Carga Estática

Para este trabalho, ambas estacas estudadas foram submetidas a este importante ensaio de campo. Como comentado no início deste trabalho, é de suma importância para os engenheiros conhecerem o maior número de informações sobre os itens que fazem parte dos sistemas a serem dimensionados ou executados.

Sendo assim, um dos principais ensaios que auxiliam os dimensionamentos é o ensaio de prova de carga estática. Segundo Cruz (2019) em sua dissertação de mestrado, a prova de carga estática é executada através da aplicação de um carregamento no topo da estaca em questão produzindo uma compressão no sistema de reação. A figura a seguir representa o ensaio.

Figura 06 – Representação do ensaio de prova estática.



Fonte: Fundatest (2020).

Vale salientar que existem variações do ensaio de prova de carga estática sendo o retratado neste trabalho o mais convencional.

Ainda segundo Cruz (2019), o ensaio consiste em carregamentos em diferentes estágios no que tange o nível de intensidade da carga concomitantemente com a leitura dos recalques correspondentes. Ao citar Velloso e Lopes (2010), Cruz (2019) aponta que existem três categorias de aplicação de carga em prova de carga estática:

- a. Carga controlada;
 - i. Carga incremental lenta;
 - ii. Carga incremental rápida;
 - iii. Carga cíclica.
- b. Deformação (deslocamento) controlada;
- c. Método do equilíbrio.

Em sua obra, Velloso e Lopes (2010) apontam que este ensaio é uma das formas mais significativas para reconhecer a capacidade de carga máxima de uma estaca e também os níveis de recalque atrelados aos níveis de cargas aplicados. É um ensaio muito difundido e utilizado no Brasil, normalizado pela NBR 12131 (2006), porém, é um ensaio que necessita de um sistema de reação relativamente grande, o que pode tornar inviável sua execução para

pequenas obras. A NBR 12131 indica que é obrigatório que obras que tenham em sua composição mais de 100 estacas realizem provas de carga igual a pelo menos 1% da quantidade total de estacas.

2.4.5 Extrapolação da curva carga-recalque

Após a realização do ensaio de carga estática, obtêm-se uma série de relações entre carga aplicada e recalque produzido na estaca, onde estas relações nos levarão à uma curva característica. Para se chegar ao valor do carregamento cujo qual leva o sistema à ruptura, deve-se utilizar métodos para extrapolar a curva característica, uma vez que o ensaio não ocorre até a ruptura.

Na literatura existente até o momento, podemos apontar como principais os métodos a seguir: Van der Veen (1953), Decourt (1996) e a NBR 6122/96.

2.4.5.1 Método de Van der Veen

O método de Van der Venn indica que a curva característica carga x recalque segue a função exponencial a seguir:

$$Q = Q_{ult} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot r}) \quad (8)$$

Onde temos que:

Q é a carga vertical aplicada em determinado estágio de carregamento

r é o recalque correspondente

α é um coeficiente que define a forma da curva

Este é um método amplamente utilizado no Brasil e, ao citar Décourt e Niyama (1994), Vianna (2000) indica que alguns cuidados devem ser tomados ao aplicarmos este método. Primeiramente, temos que atentar para os ensaios finalizados prematuramente, àqueles em que foram encerrados ainda na parte retilínea da curva cara x recalque e, neste caso, alguns importantes alertas devem ser feitos, como por exemplo: o método de Van der Veen só é aplicável se o ensaio atingiu pelo menos dois terços da carga de ruptura. Ainda citando Vianna (2000), nós encontramos um problema, visto que não temos como saber para uma prova de carga não rompida qual proporção dela o ensaio atingiu.

Por fim, Vianna (2000) cita que o método de Vander Veen tem duas hipóteses fundamentais para que sua aplicação seja correta:

- a) A forma da curva Carga x Recalque é do tipo exponencial;
- b) O modo de ruptura é do modo ruptura física, tendo em correspondência recalques teoricamente infinitos.

Sendo assim, quando não forem satisfeitas estas duas condições, o método poderá não trazer resultados satisfatórios.

2.4.5.2 Método de Decourt (Rigidez)

O método proposto pelo engenheiro Decourt em 1996, toma por base o conceito de rigidez. O conceito de rigidez pode ser brevemente definido como a capacidade em que um material tem de resistir à deformação quando submetido a tensão. Para uma fundação, sua rigidez é definida pela relação entre carga na qual ela está submetida e o recalque correspondente a ela (ALVES, 2014). A expressão 9 representa o conceito:

$$R = \frac{Q}{s} \quad (9)$$

Segundo Oliveira (2013), é de propriedade das fundações que a rigidez diminua com o aumento dos recalques. Citando Decourt (1996), Oliveira (2013) prossegue dizendo que a ruptura ocorre quando a rigidez tende à zero. Assim, definimos como Carga de Ruptura Física (Q_{uu}) a carga cuja qual provoca recalques que se aproximam do infinito e induzam valores de rigidez próxima à zero.

A partir então da construção do gráfico poderemos obter dois tipos de ruptura:

- a) **Ruptura Física:** é a ruptura quando a estaca apresenta rigidez nula. Na prática, este estado não é possível de ser alcançado.
- b) **Ruptura Convencional:** É a ruptura definida para um recalque do topo da estaca de 10% do diâmetro da mesma. (BESSA *et. al.* 2016).

O método então, segundo Alves (2014), consiste na elaboração do gráfico de Carga *versus* Rigidez e realizar uma extrapolação (seja linear ou não) que melhor se ajuste no gráfico, até o valor da Rigidez ser nulo.

2.4.5.3 Método NBR6122:2019, ABNT 2019

Segundo a norma, a capacidade de carga de uma estaca ou um tubulão (no caso deste trabalho só estamos considerando estacas) é àquela em que se observa uma ruptura nítida caracterizada por deformações continuadas sem um novo acréscimo de carga.

Ainda segundo a norma, existirão casos em que para se determinar a capacidade de carga, deveremos extrapolar a curva, pois nestes não teremos uma ruptura nítida na estaca. A carga de ruptura então será aquela correspondente ao recalque, na curva carga x recalque, dado pela expressão:

$$\Delta_r = \frac{P.L}{A.E} + \frac{D}{30} \quad (10)$$

Onde:

Δ_r é o recalque de ruptura convencional

P é a carga de ruptura convencional

L é o comprimento da estaca

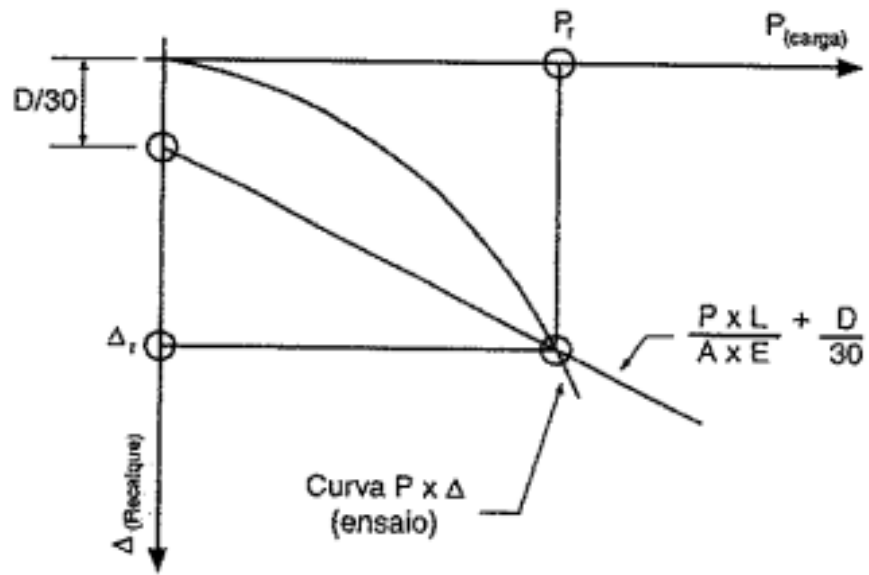
A é a área da seção transversal

E é o módulo de elasticidade da estaca

D é o diâmetro do círculo circunscrito à estaca

Na figura 07, temos uma representação da norma:

Figura 07 – Carga de ruptura convencional.



Fonte: NBR 6122 (2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o presente estudo foi feita uma revisão da bibliografia sobre a importância da engenharia de fundações, sobre tipos de fundações estudadas no trabalho, sobre a sondagem à percussão (SPT), a capacidade de carga, e principalmente sobre os métodos de estimativa de capacidade de carga para fundações profundas, dentre eles: Decourt-Quaresma (1996), Aoki-Velloso (Utilizando as contribuições de Monteiro (1997), Van der Veen, Decourt (Rigidez) e o método da NBR6122/2019.

Sendo assim, as estacas estudadas que serão descritas nos próximos tópicos, foram submetidas a estes métodos previamente descritos, para que fosse quantificada a capacidade de carga delas por todos os métodos. O principal auxílio na aplicação dos métodos foi o software Excel 2016, produzido pela empresa Microsoft. Foi através dele que os parâmetros foram calculados, os gráficos elaborados e as tabelas feitas.

Por fim então, elaborou-se uma análise comparativa entre os resultados obtidos por cada método, para que possamos entender a aplicabilidade e assertividade de cada um.

Vale salientar que os resultados de ensaios como o SPT e as características intrínsecas de cada estaca foram fornecidos pela empresa “FUGRO”. A colaboração da mesma foi indispensável para a realização deste estudo.

Nos anexos A, B e C presentes no final deste trabalho, estão os resultados do ensaio de SPT para ambas estacas.

3.1 DESCRIÇÃO DAS ESTACAS ESTUDADAS

As duas estacas estudadas neste trabalho foram executadas na região de sul do Brasil. A primeira estaca (01) é uma estaca do tipo Hélice contínua e a segunda (02) é uma estaca do tipo Escavada com Polímero.

3.1.1 Características da estaca 01 e do solo em questão

A estaca 01 foi executada na obra “EDIFÍCIO EOS BARIGUI”, na cidade de Curitiba – PR, Brasil, pela empresa “FUGRO”. É uma estaca do tipo Hélice contínua e tem as seguintes características intrínsecas:

- ❖ Diâmetro: 60,00 cm
- ❖ Comprimento Executado: 11,12 metros

No anexo A está apresentado o resultado da sondagem do ensaio SPT para o local de execução da estaca.

3.1.2 Características da estaca 02 e do solo em questão

A estaca 02 foi executada na obra “EDIFÍCIO ANTONIO SCHWABE”, na cidade de Maringá – PR, Brasil, pela empresa “FUGRO”. É uma estaca do tipo Escavada com Polímero, com as seguintes características intrínsecas:

- ❖ Diâmetro: 70,00 cm
- ❖ Comprimento Executado: 26,00 metros

Nos anexos A e B estão apresentados os resultados da sondagem do ensaio SPT para o local de execução da estaca.

3.2 METODOLOGIA

No presente trabalho, fez-se uma comparação entre os resultados obtidos pelos métodos supracitados para a capacidade de carga obtida. Com a comparação de todos os resultados, se descobrirão àqueles mais conservadores e mais arrojados no que tange a capacidade de carga.

Por fim, fez-se uma análise das principais variáveis de cada método, para se entender onde estão as principais diferenças entre eles.

3.2.1 Principais parâmetros para as estacas 01 e 02 na análise dos métodos semiempíricos

As tabelas 11 e 12 apresentam quais foram os parâmetros utilizados em cada um dos métodos semiempíricos (Decourt-Quaresma e Aoki-Velloso) para ambas estacas, sendo que estes parâmetros já foram descritos anteriormente neste trabalho. Aqui, se faz necessário comentar que alguns dos parâmetros são de interpretação do aplicador do método em questão.

Tabela 11 – Parâmetros para o método Decourt-Quaresma.

| Parâmetro | Estaca 1 | Estaca 2 |
|---------------|-----------------------|---------------------|
| α | 0,30 | 0,85 |
| C | 23,00 | 150 |
| N_p | 47,30 | 38,1 |
| Área da Ponta | 0,2827 m ² | 0,38 m ² |
| β | 1,00 | 0,9 |
| N_i | 11,00 | 12,48 |
| U | 1,88 m | 2,20 m |
| L | 11,12 m | 26,00 m |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tabela 12 – Parâmetros para o método Aoki-Velloso.

| Parâmetro | Estaca 1 | Estaca 2 |
|------------------------|-----------------------|---------------------|
| k | 430 kPa | 320 kPa |
| N_p | 50,00 | 48,00 |
| F_1 | 3,00 | 3,50 |
| A_b | 0,2827 m ² | 0,38 m ² |
| F_2 | 3,80 | 4,50 |
| Somatório $\alpha.k.N$ | 460,00 kN | 971,80 kN |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Assim, utilizando as fórmulas 7 para Decourt-Quaresma e 4 para Aoki-Velloso, foram obtidos os resultados calculados para este trabalho, apresentado no capítulo 4.

3.2.2 Método de Van der Veen para as estacas 01 e 02

Para a aplicação do método de Van der Veen, se fez necessário o uso das informações de carga e respectivo recalque associado a este carregamento. A tabela 13 apresenta a relação carga e recalque para a estaca 01, e a tabela 14 apresenta a relação para a estaca 02.

Tabela 13 – Relação de carga e recalque para estaca 01.

| ESTÁGIO | CARGA | RECALQUE |
|----------------|--------------|-----------------|
| 1 | 346 | 0,87 |
| 2 | 624 | 1,66 |
| 3 | 899 | 2,98 |
| 4 | 1171 | 3,99 |
| 5 | 1457 | 5,19 |
| 6 | 1747 | 6,62 |
| 7 | 2040 | 8,2 |
| 8 | 2325 | 10,24 |
| 9 | 2607 | 12,2 |
| 10 | 2923 | 15,19 |
| 11 | 3185 | 19,33 |
| 12 | 3476 | 25,81 |
| 13 | 2624 | 24,85 |
| 14 | 1771 | 23,49 |
| 15 | 911 | 21,54 |
| 16 | 0 | 18,44 |

Fonte: Relatório da Empresa FUGRO (2020).

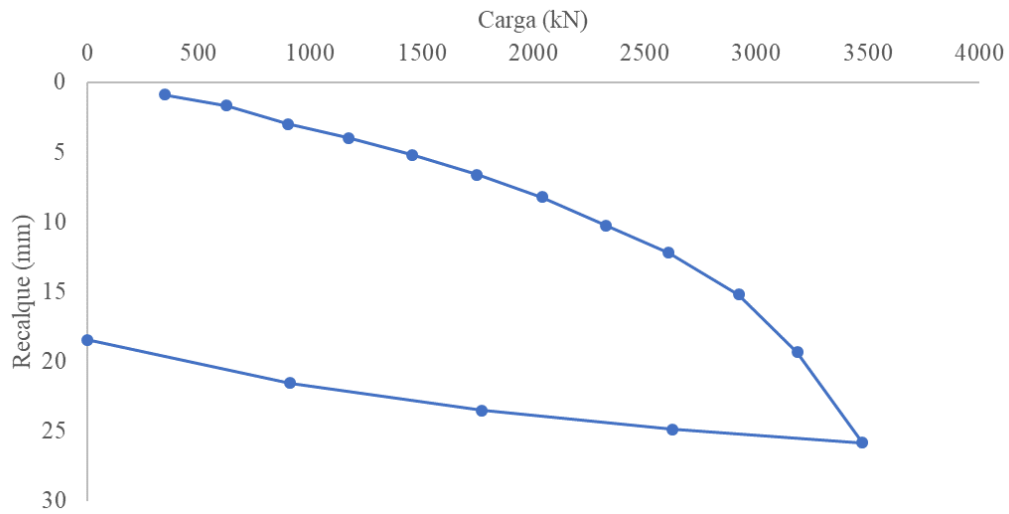
Tabela 14 – Relação entre carga e deslocamento para estaca 02.

| ESTÁGIO | CARGA (KN) | RECALQUE |
|----------------|-------------------|-----------------|
| 1 | 306 | 0,02 |
| 2 | 603 | 0,12 |
| 3 | 907 | 0,45 |
| 4 | 1204 | 0,66 |
| 5 | 1506 | 1,01 |
| 6 | 1813 | 1,41 |
| 7 | 2121 | 1,78 |
| 8 | 2406 | 2,14 |
| 9 | 2705 | 2,57 |
| 10 | 2993 | 3,00 |
| 11 | 3299 | 3,41 |
| 12 | 3602 | 3,88 |
| 13 | 3908 | 4,54 |
| 14 | 4192 | 4,97 |
| 15 | 4492 | 5,60 |
| 16 | 4789 | 6,32 |
| 17 | 5007 | 9,46 |
| 18 | 3699 | 7,09 |
| 19 | 2501 | 5,82 |
| 20 | 1255 | 4,58 |
| 21 | 0 | 2,33 |

Fonte: Relatório da Empresa FUGRO (2020).

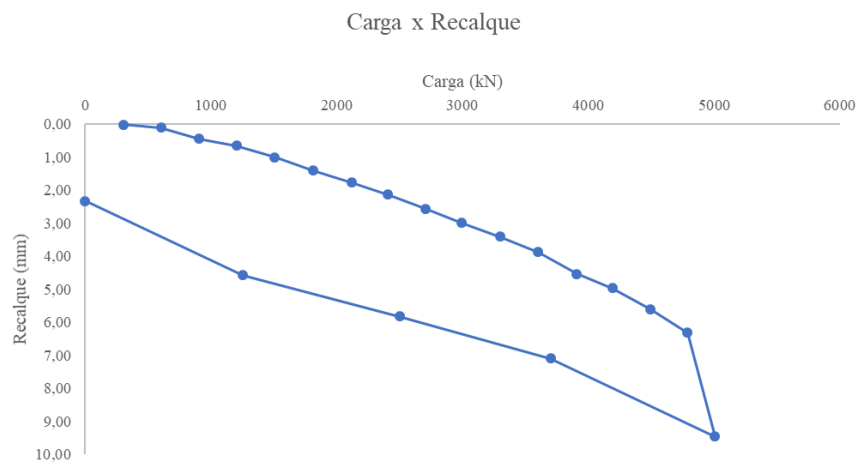
Plotaram-se então os gráficos referentes as curvas carga x recalque para cada uma das estacas, apresentadas respectivamente nas figuras 08 e 09.

Figura 08 – Curva carga versus recalque para estaca 01.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 09 – Curva carga versus recalque para estaca 02.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

A partir então dos dados apresentados, aplicou-se o método de acordo com a expressão 8, onde deve-se arbitrar um valor para Q_{ult} até que se obtenha um valor de coeficiente de determinação (R^2) mais próximo de 1. Vale ressaltar que, os valores arbitrados para Q_{ult} devem-se iniciar a partir da última carga aplicada sobre o corpo de prova. A fim de facilitar os cálculos, a expressão 8 foi manipulada para a seguinte expressão:

$$-\ln\left(1 - \frac{Q}{Q_{ult}}\right) \quad (11)$$

No apêndice A presente neste trabalho, está a relação entre o Recalque, Carga e resultado para a expressão de Van der Veen.

3.2.3 Método de Decourt (Rigidez) para as estacas 01 e 02

Para a aplicação deste método, primeiramente elaborou-se a relação entre carga, recalque e rigidez, apresentada pelas tabelas 15 e 16.

Tabela 15 – Relação carga, recalque e rigidez para estaca 01.

| ESTÁGIO | CARGA (kN) | RECALQUE (mm) | RIGIDEZ |
|----------------|-----------------------|--------------------------|----------------|
| 1 | 346 | 0,87 | 397,70 |
| 2 | 624 | 1,66 | 375,90 |
| 3 | 899 | 2,98 | 301,68 |
| 4 | 1171 | 3,99 | 293,48 |
| 5 | 1457 | 5,19 | 280,73 |
| 6 | 1747 | 6,62 | 263,90 |
| 7 | 2040 | 8,20 | 248,78 |
| 8 | 2325 | 10,24 | 227,05 |
| 9 | 2607 | 12,20 | 213,69 |
| 10 | 2923 | 15,19 | 192,43 |
| 11 | 3185 | 19,33 | 164,77 |
| 12 | 3476 | 25,81 | 134,68 |
| 13 | 2624 | 24,85 | 105,59 |
| 14 | 1771 | 23,49 | 75,39 |
| 15 | 911 | 21,54 | 42,29 |
| 16 | 0 | 18,44 | 0,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tabela 116 – Relação entre carga, recalque e rigidez para estaca 02.

| ESTÁGIO | CARGA (kN) | CARGA X RECALQUE | RIGIDEZ |
|----------------|-----------------------|-----------------------------|----------------|
| 1 | 306,00 | 0,02 | 15300,00 |
| 2 | 603,00 | 0,12 | 5025,00 |
| 3 | 907,00 | 0,45 | 2015,00 |
| 4 | 1204,00 | 0,66 | 1824,00 |
| 5 | 1506,00 | 1,01 | 1491,00 |
| 6 | 1812,00 | 1,41 | 1285,00 |
| 7 | 2121,00 | 1,78 | 1191,00 |
| 8 | 2406,00 | 2,14 | 1124,00 |
| 9 | 2705,00 | 2,57 | 1052,00 |
| 10 | 2993,00 | 3,00 | 997,00 |
| 11 | 3299,00 | 3,41 | 967,00 |
| 12 | 3602,00 | 3,88 | 928,00 |
| 13 | 3908,00 | 4,54 | 860,00 |
| 14 | 4192,00 | 4,97 | 843,00 |
| 15 | 4492,00 | 5,60 | 802,00 |
| 16 | 4789,00 | 6,32 | 757,00 |
| 17 | 5007,00 | 9,46 | 529,00 |
| 18 | 3699,00 | 7,09 | 521,00 |
| 19 | 2501,00 | 5,82 | 429,00 |
| 20 | 1255,00 | 4,58 | 274,00 |
| 21 | 0,00 | 2,33 | 0,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Com os valores da rigidez estabelecidos, plotou-se então o gráfico entre Carga *versus* Rigidez, com a linha de tendência, no local onde ela tem maior aderência ao modelo apresentado pela relação entre carga e recalque. Os resultados se encontram mais à frente no trabalho, na seção de resultados.

3.2.4 Método NBR para estaca 01

Para o cálculo pelo método da NBR, se faz necessário o cálculo do parâmetro Módulo de Elasticidade para a estaca 01. O módulo de elasticidade é definido pela seguinte equação 12:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (12)$$

Onde:

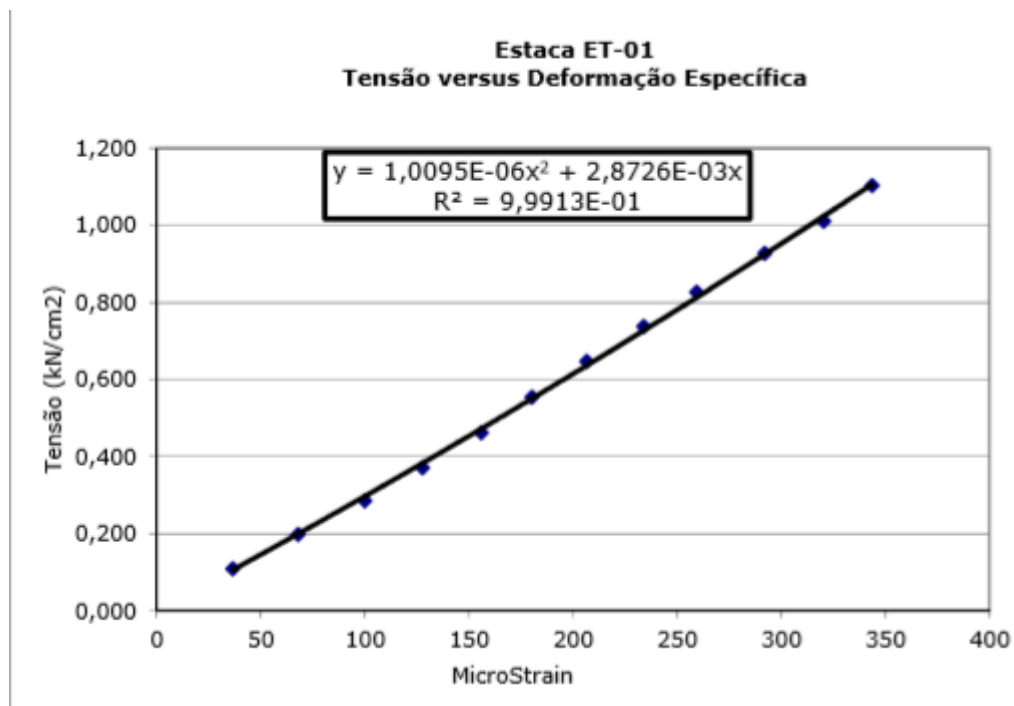
E é o módulo de elasticidade

σ é a tensão aplicada

ε é a deformação específica no material

A figura 15 foi retirada do relatório fornecido pela empresa FUGRO, e apresenta a relação entre tensão e deformação para a estaca 01:

Figura 10 – Relação entre tensão e deformação para estaca 01.



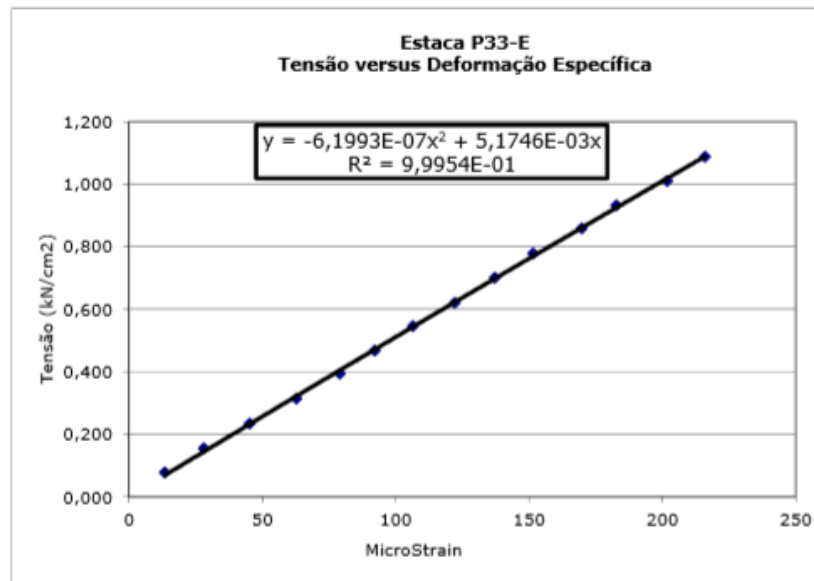
Fonte: Relatório da Empresa FUGRO (2020).

Tem-se que então, o valor calculado para E da estaca 01 é de $3,005.10^3$ MPa, ou $3,00.10^7$ kN por m².

3.2.5 Método NBR para estaca 02

Para a estaca 02, o gráfico que representa a tensão versus deformação, está na figura abaixo:

Figura 11 – Tensão versus Deformação Específica.



Fonte: Relatório da Empresa FUGRO (2020).

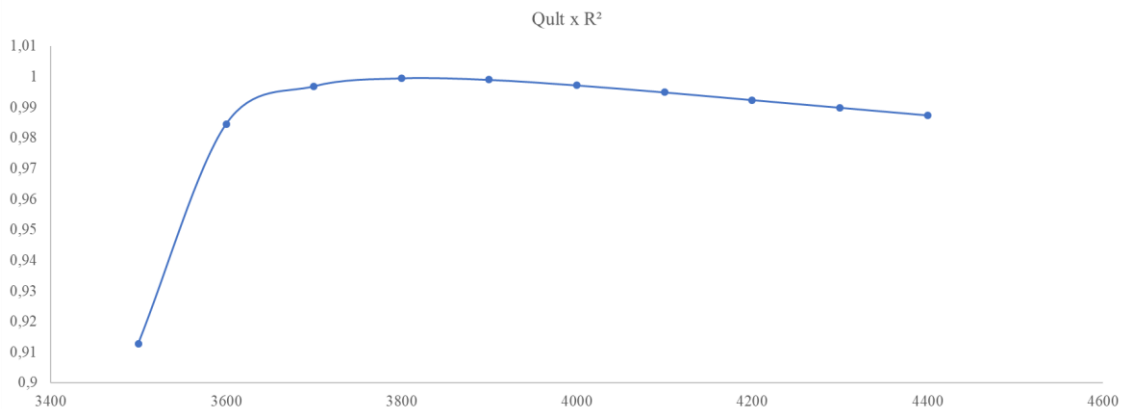
Tem-se então que o módulo de elasticidade para esta estaca será de $5,852 \cdot 10^4$ MPa ou de $5,85 \cdot 10^7$ kN por m².

4 RESULTADOS

4.1 RELAÇÕES ENCONTRADAS PARA O MÉTODO VAN DER VEEN

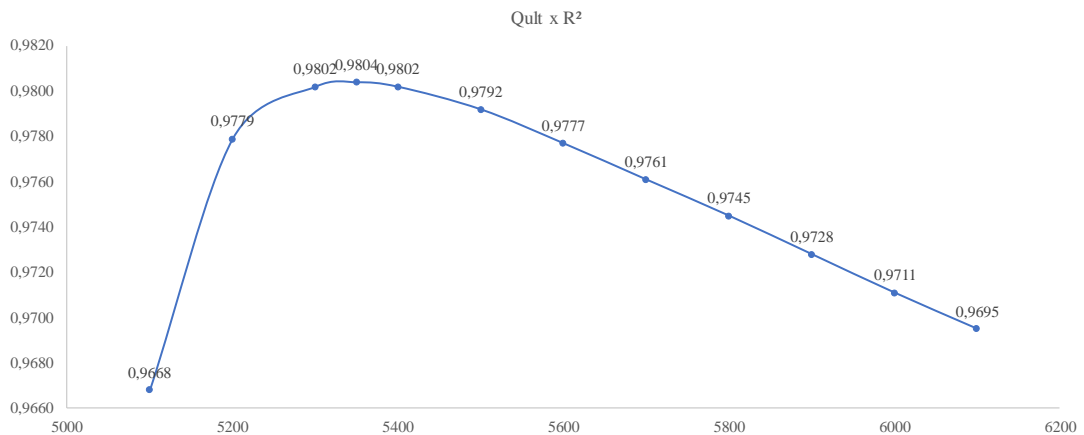
Nas figuras 12 e 13 tem-se os valores de R^2 encontrados nas arbitrações para Q_{ult} :

Figura 12 – Relação Qult versus R^2 para estaca 01.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 13 – Relação Qult versus R^2 para estaca 02.

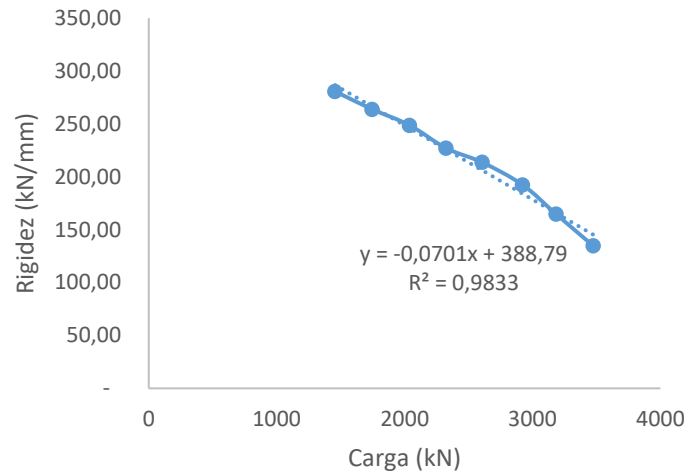


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.2 RELAÇÕES PARA RIGIDEZ

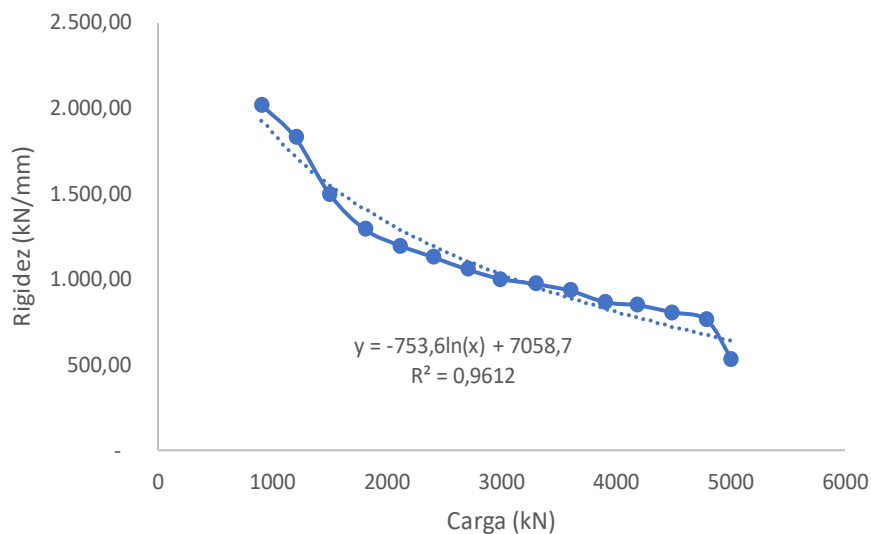
As figuras 14 e 15 apresentam a relação entre carga e rigidez, traçadas para que se possa determinar a melhor aderência ao modelo:

Figura 14 – Relação entre carga e rigidez para estaca 01.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 15 – Extrapolação da curva utilizando linha de tendência logarítmica para estaca 02.

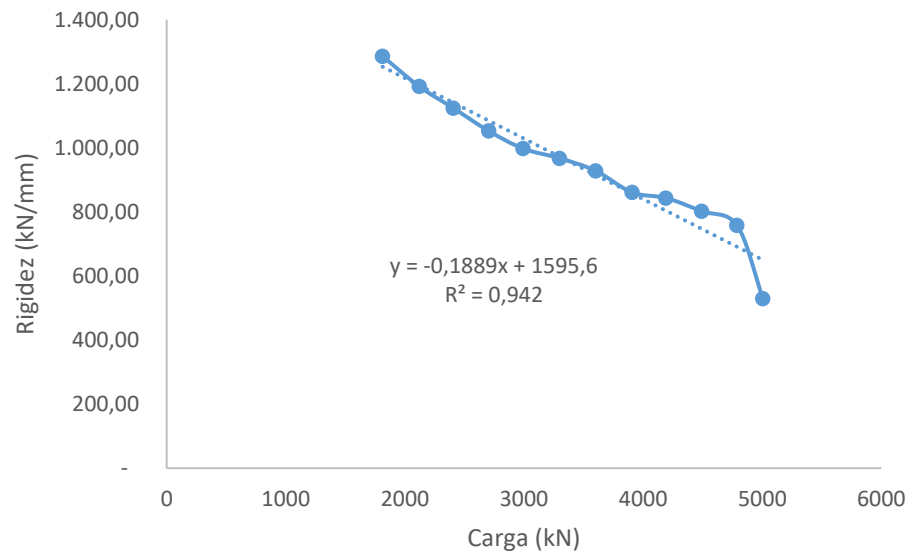


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para a estaca 02, a extrapolação que mais se ajustou a curva foi a logarítmica, que retornou um $R^2 = 0,9612$. Sendo assim, para que $R = 0$, a carga será de aproximadamente 11280 kN. Esta, porém, abrangeu todos os pontos da relação entre carga e recalque.

Quando se utiliza a extrapolação linear, apenas nos pontos onde a aderência ao formato linear é maior, tem-se o seguinte resultado:

Figura 16 – Extrapolação da curva utilizando linha de tendência linear para a estaca 02.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Quando R tende a zero, tem-se que a capacidade de carga da estaca pelo método da rigidez, será de 8440 kN.

4.3 RELAÇÕES PARA NBR

A tabela a seguir apresenta os valores adotados e o resultado correspondente de recalque:

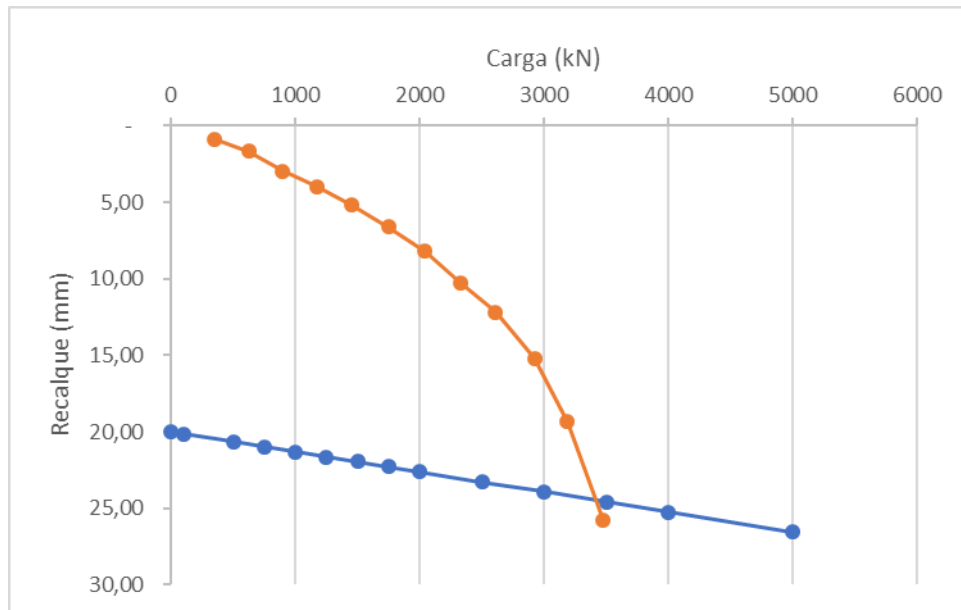
Tabela 17 – Relação Carga versus Recalque para estaca 01.

| CARGA (kN) | RECALQUE (mm) |
|-------------------|----------------------|
| 0 | 20 |
| 100 | 20,13 |
| 500 | 20,65 |
| 750 | 20,98 |
| 1000 | 21,31 |
| 1250 | 21,64 |
| 1500 | 21,96 |
| 1750 | 22,29 |
| 2000 | 22,62 |
| 2500 | 23,27 |
| 3000 | 23,93 |
| 3500 | 24,58 |
| 4000 | 25,24 |
| 5000 | 26,54 |

Fonte: Relatório da Empresa FUGRO (2020).

Assim, traça-se o gráfico representado na figura 16 e o mesmo indicará, na intersecção entre a reta e a curva, a carga de ruptura.

Figura 17 – Gráfico da aplicação do método da NBR para estaca 01.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tem-se que a intersecção se dá quando a carga é de aproximadamente 3400 kN.

Já para a estaca 02, teremos a seguinte relação, apresentada na tabela 18:

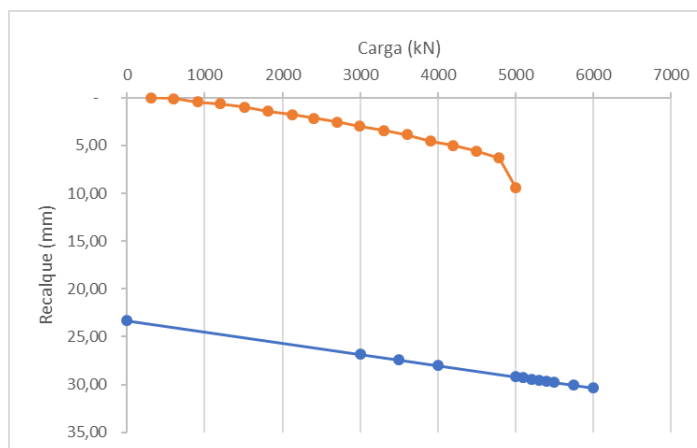
Tabela 18 – Carga versus Recalque.

| CARGA (kN) | RECALQUE (mm) |
|-------------------|----------------------|
| 0 | 23,33 |
| 3000 | 26,84 |
| 3500 | 27,43 |
| 4000 | 28,01 |
| 5000 | 29,18 |
| 5100 | 29,3 |
| 5200 | 29,41 |
| 5300 | 29,53 |
| 5400 | 29,65 |
| 5500 | 29,76 |
| 5750 | 30,06 |
| 6000 | 30,35 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Na figura 18, tem-se o gráfico combinado entre a reta e a curva de carga versus recalque:

Figura 18 – Gráfico referente à aplicação do método NBR para estaca 02.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Como reta e curva não se interceptam, não se conclui uma carga de ruptura através deste método, este ponto será comentado mais à frente neste trabalho.

4.4 RESULTADO COMPARATIVO DOS MÉTODOS

Após todos cálculos e análises, os métodos apresentaram para cada uma das estacas os seguintes valores de capacidade de carga, conforme a tabela 19.

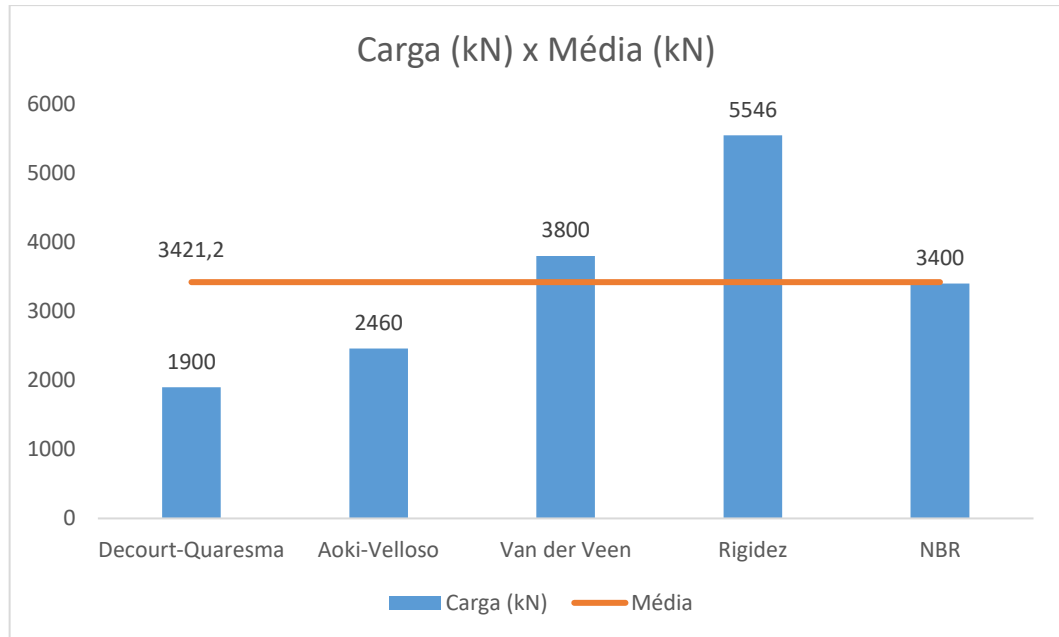
Tabela 19 – Resultado para cada um dos métodos analisados.

| MÉTODO | CARGA PARA ESTACA 01 (kN) | CARGA PARA ESTACA 02 (kN) |
|------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Decourt-Quaresma | 1900 | 4500 |
| Aoki-Velloso | 2460 | 2700 |
| Van der Veen | 3800 | 5350 |
| Rigidez | 5546 | 8440 |
| NBR | 3400 | NÃO SE APLICA |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

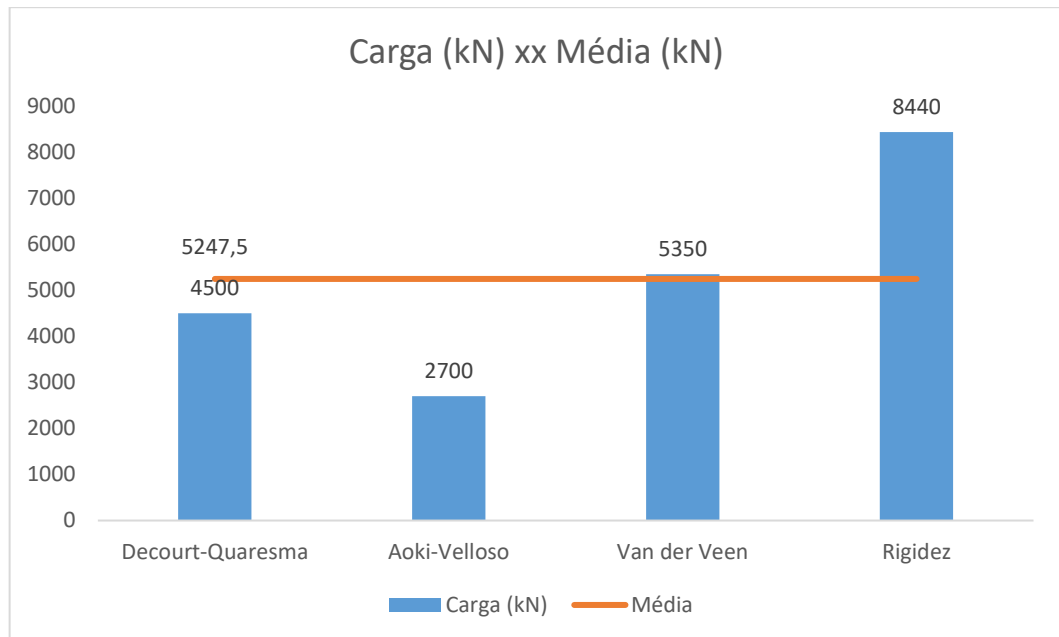
As figuras 19 e 20 apresentam os resultados de cada um dos métodos para cada estaca e também traz uma média entre eles.

Figura 19 – Resultados para estaca 01.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 20 – Resultados para estaca 02.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

5 DISCUSSÃO

Primeiramente, nota-se que o método que trouxe os maiores resultados foi o da Rigidez, em ambos os casos. O autor Alves (2014) comenta que o método da rigidez se mostra por vezes mais ousado que os outros métodos, principalmente em estacas feitas em solos granulares. Para a estaca 01, conforme a figura 14 aponta, o valor obtido R^2 de 0,98, que apresenta um valor próximo à 1, indicando que os dados utilizados da relação carga versus recalque apontam em uma adesão dos pontos ao modelo de uma reta, fazendo com que tenha um resultado aceitável, porém, bem maior que o dos outros métodos.

Para a estaca 02, o valor obtido para R^2 foi o de 0,94, indicando que talvez o modelo e a equação pudessem entregar resultados para a capacidade de carga máxima não tão próximos à realidade e não tão confiáveis. O que se vê então é uma carga máxima de 8440 kN, valor bem distante do que os outros métodos apontaram. Neste ponto também vale ressaltar, que o último ponto da relação carga versus recalque, o par de pontos com coordenadas 5007 kN de carga e rigidez igual a aproximadamente 529,00 poderia ditar um novo comportamento da curva e assim, caso o ensaio tivesse durado mais um pouco, trazer uma nova série de pontos que melhor ditariam o comportamento da curva e assim, trazer uma capacidade de carga máxima mais próxima da realidade

O ensaio de carga estática para a estaca 01, foi realizado até a carga aplicada de 3476 kN, e este é um importante ponto para efeito comparativo. Da tabela 19, tem-se que o método de Decourt-Quaresma retornou um valor de 1900 kN apenas, sendo que o ensaio ocorreu sem rupturas até o valor de 3476 kN, indicando que este método por sua vez, aponta um resultado extremamente conservador, cerca de 45% inferior à carga máxima do ensaio de prova de carga estática. Quando se aplica a análise deste método para a estaca 02, ele não se demonstra o mais conservador, porém, ainda tem-se um valor abaixo ao valor máximo do ensaio de prova de carga estática que foi de 5007 kN.

O método Aoki-Velloso por sua vez, apontou para a estaca 01 o valor de 2460 kN, abaixo também da carga máxima ensaiada, mostrando que também é um método que neste caso apresentou resultados conservadores. Para a estaca 02, se mostrou o método mais conservador, com uma capacidade de carga máxima apontada de 2700 kN, bem abaixo daquela máxima ensaiada de 5007 kN, cerca de 50,8%. Como comenta CABETTE (2014) em sua dissertação de mestrado, estes métodos semi-empíricos trabalham a favor da segurança, e assim, trazendo resultados por vezes bem abaixo àqueles observados em ensaio.

Para o método de Van der Veen, os valores encontrados de 3800 e 5350 kN para a estaca 01 e estaca 02 respectivamente, foram próximos aos valores máximos de carga do ensaio, o que é bom indicativo dado que as cargas de referências são, respectivamente de 3476 e 5007 kN.

Por fim, para o método indicado pela Norma Brasileira NBR 6122/2019, tem-se uma pequena diferença em relação aos anteriores. Primeiramente, para a estaca 01, o valor encontrado foi de 3400 kN, valor também abaixo daquele ensaiado, como comentado anteriormente. Este valor, porém, se aproxima do indicado pelo método de Van der Veen, o que poderia indicar que a ruptura da estaca estaria por volta dos valores indicados por estes dois métodos gráficos de extrapolação. Como comenta Monteiro *et al.* (2016), considerando que estes dois métodos foram os que mais se aproximaram da carga de referência fornecida pelo ensaio, são conseqüentemente os que trouxeram os melhores resultados. No caso da estaca 02, o método não retornou um valor, já que a reta e a curva não se encontram em nenhum ponto. Como comenta ALVES (2014), a extrapolação pelo método da NBR6122/2019 só se faz possível quando existem recalques mais acentuados e neste caso, o ensaio não provocou recalques suficientemente grandes para que este método se aplicasse nesta estaca, o que mostra uma limitação intrínseca do método.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os métodos apresentados trouxeram diferentes valores para uma mesma variável: a capacidade de carga, e isto, cientificamente, não seria algo ideal, já que o que está em discussão são os mesmos solos e estacas, o mesmo sistema.

No caso das estacas estudadas neste trabalho, elas eram estacas teste, o que mostra uma maior preocupação com a qualidade das fundações pela empresa dona dos empreendimentos, fato que não vemos com muita frequência no Brasil.

Porém, vale ressaltar que, todos os diferentes métodos foram elaborados considerando estudos em regiões e solos diferentes, e quando se fala de Aoki-Velloso e Decourt-Quaresma, vale salientar que os métodos são considerados semi-empíricos, e levam em conta resultados do SPT. O ensaio SPT, por vezes, apresenta erros em sua execução provinda dos executores do ensaio, o que acaba por gerar também, retrabalho e um custo maior para a obra.

Outro fator relevante a se apontar, é o fato de que alguns parâmetros adotados nos diversos métodos aqui apresentados, são de interpretação do aplicador do método, podemos citar como exemplo o parâmetro C, utilizado no método Decourt-Quaresma. Na literatura, a tabela utilizada para a adoção do parâmetro discrimina apenas quatro tipos de solo: argila, siltes argilosos, siltes arenosos e areia, o que por vezes faz com que em solos sem definição precisa do tipo, o parâmetro se torne de fato muito subjetivo. O solo não é algo uniforme em grande parte das vezes e tem muitas variações de material dentro de um mesmo perfil, o que fornece margem para diferentes interpretações de um mesmo perfil de solo.

Como comentado no capítulo de resultados, o método que apresentou os melhores resultados foi o de Van der Veen (1953). O método da NBR 6122/2019 também apresentou resultado satisfatório para a estaca 01, já que não retornou valor quando aplicado para estaca 02. Estes, se aproximaram das cargas de referência apresentadas pelo ensaio de carga estática, enquanto os métodos Aoki-Velloso e Decourt-Quaresma se mostraram muito conservadores, e o método da Rigidez se mostrou bem ousado.

Considerando que variando as condições os diferentes métodos trazem resultados diferentes, o engenheiro deve sempre utilizar o máximo de ferramentas possível para se determinar todos os parâmetros do sistema estudado, e também utilizar dos diversos métodos presentes na literatura, para que sempre se possa fazer a decisão de forma embasada no melhor método para o sistema em questão.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade nas pesquisas, a aplicação de mais métodos para determinação da capacidade de carga seria interessante, visto que a bibliografia sobre o assunto é vasta e bem rica. Neste estudo de caso, muitos parâmetros já estão determinados ou são de fácil acesso, facilitando as análises para outros métodos.

Um estudo sobre o comportamento dos métodos citados neste trabalho quando aplicados à outros tipos de estacas se faz de grande utilidade também, visto que existem muitos outros tipos de estacas, e os parâmetros dos métodos variam de estaca para estaca, o que poderá indicar correlações em que um método traz melhores resultados em certos tipos de estacas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA NETO, J. A. de. **Análise do desempenho de estacas de hélice contínua e omega – aspectos executivos**. 2002. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-27012003-180424/publico/dissertacao.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2020.

ALVES, D. F. **Previsões do comportamento carga-recalque de estaca escavada com polímero**. 2015. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/156349/001014562.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 02 abr. 2020.

ALVES, R. D. F. **Estudo da previsão da carga de ruptura de estacas pré-moldadas de concreto**. 2014. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014. Disponível em: http://arquivos.info.ufrn.br/arquivos/2014252158fd3320383184ee6c60cd839/Verso_Definitiva_1.pdf. Acesso em: 06 abr. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6122: projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=426719>. Acesso em: 10 abr. 2020.

CABETTE, J. F. **Análise dos métodos semi-empíricos utilizando para estimativa da capacidade de carga de estacas pré-fabricadas com base em resultados de carregamento dinâmico**. 2014. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-29122014-172152/publico/Dissertacao_JeanFelixCabette.pdf. Acesso em: 15 ago. 2020.

ENGENHARIA CONCRETA. **Sapatas isoladas processo executivo e dicas importantes**. Disponível em: <https://engenhariaconcreta.com/sapatas-isoladas-processo-executivo-e-dicas-importantes/>. Acesso em: 20 jan 2020.

FUNDATEST. **Ensaio de carregamento dinâmico PDA (Pile Driving Analyser) com sistema de impacto (martelo) próprio**. Disponível em: <http://fundatest.com.br/equipamentos>. Acesso em: 23 abr. 2020.

FURGO IN SITU GEOTECNIA LTDA. Prova de carga estática vertical instrumentada LAG-01-PCE-01. **Relatório**. Curitiba, 2014. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1yf2HenO9I3EbCwcIDUjRRZBe_iQH_M7i/view?usp=sharing. Acesso em: 07 out. 2020.

FURGO IN SITU GEOTECNIA LTDA. Prova de carga estática vertical instrumentada RSV-01-PCE-01. **Relatório**. Curitiba, 2014. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1JQIvHxbtydFr6vmSsh1NvcnFs0bxcgX5/view?usp=sharing>. Acesso em: 07 out. 2020.

GOULART, M. R. M. **Previsão de capacidade de carga em estacas escavadas com a utilização de ensaios de cone em solos residuais**. 2001. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

INOVA CIVIL. **Os 10 principais tipos de fundações**. Disponível em: <https://www.inovacivil.com.br/os-principais-tipos-de-fundacoes/>. Acesso em: 02 abr. 2020.

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

MONTEIRO, F. F. *et. al.* **Análise da eficiência de métodos de extrapolação de prova de carga em solo arenoso de Fortaleza**. In: ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA, 16., 2016, Recife. **Anais [...]**. Recife. 2016. Disponível em: <https://marcosporto.eng.br/wp-content/uploads/2018/01/An%C3%A1lise-da-Efici%C3%Aancia-de-M%C3%A9todos-de-Extrapol%C3%A7%C3%A3o-de-Prova-de-Carga-em-Solo-Arenoso-de-Fortaleza.pdf>. Acesso em: 01 maio 2020.

OLIVEIRA, P. E. S. de. **Análise de provas de carga e confiabilidade para edifício comercial na região metropolitana do Recife**. 2013. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/12501/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20Pedro%20Eugenio%20Silva%20de%20Oliveira.compressed.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2020.

REINERT, J. **Estudo do comportamento das fundações profundas de obra industrial no litoral fluminense usando abordagem probabilística**. 2011. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/28286/R%20-%20D%20-%20JULIANA%20REINERT.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 16 abr. 2020.

ROCHA, B. P. **Emprego do ensaio SPT Sísmico na investigação de solos tropicais**. 2013. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-28112013100232/publico/dissertacao_breno.pdf. Acesso em: 10 mar. 2020.

SCHULZE, T. **Análise da capacidade de carga de estaca escavada instrumentada de pequeno diâmetro por meio de métodos semi-empíricos**. 2013. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013. Disponível em: http://taurus.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/258566/1/Schulze_Tami_M.pdf. Acesso em: 23 mar. 2020.

VIANNA, A. P. F. **Análise de provas de carga estática em estacas pré-moldadas cravadas na cidade de Curitiba e região metropolitana**. 2000. 202 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-18102006-101542/publico/dissertacao.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2020.

APÊNDICE A – RELAÇÕES DE VAN DER VEEN PARA ESTACA 01

| Carga | Recalque | Qult | | | | | | | | | |
|-------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 3500 | 3600 | 3700 | 3800 | 3900 | 4000 | 4100 | 4200 | 4300 | 4400 |
| 346 | 0,87 | 0,10409 | 0,10105 | 0,09818 | 0,09547 | 0,0929 | 0,09047 | 0,08817 | 0,08597 | 0,08389 | 0,0819 |
| 624 | 1,66 | 0,19636 | 0,19035 | 0,1847 | 0,17938 | 0,17435 | 0,1696 | 0,1651 | 0,16084 | 0,15679 | 0,15294 |
| 899 | 2,98 | 0,29687 | 0,28731 | 0,27836 | 0,26995 | 0,26203 | 0,25457 | 0,24752 | 0,24086 | 0,23455 | 0,22856 |
| 1171 | 3,99 | 0,40732 | 0,39345 | 0,38051 | 0,3684 | 0,35704 | 0,34637 | 0,33633 | 0,32685 | 0,3179 | 0,30943 |
| 1457 | 5,19 | 0,53834 | 0,51873 | 0,50052 | 0,48357 | 0,46775 | 0,45295 | 0,43907 | 0,42603 | 0,41376 | 0,40218 |
| 1747 | 6,62 | 0,69143 | 0,66413 | 0,63897 | 0,6157 | 0,59411 | 0,57403 | 0,5553 | 0,53777 | 0,52135 | 0,50591 |
| 2040 | 8,2 | 0,87433 | 0,83625 | 0,80152 | 0,76969 | 0,7404 | 0,71335 | 0,68828 | 0,66498 | 0,64325 | 0,62294 |
| 2325 | 10,24 | 1,09149 | 1,03799 | 0,98988 | 0,94634 | 0,90672 | 0,87048 | 0,83719 | 0,80648 | 0,77805 | 0,75164 |
| 2607 | 12,2 | 1,36593 | 1,28796 | 1,21941 | 1,15853 | 1,10401 | 1,05483 | 1,0102 | 0,96947 | 0,93211 | 0,89771 |
| 2923 | 15,19 | 1,80268 | 1,67102 | 1,56065 | 1,46625 | 1,38425 | 1,31211 | 1,24802 | 1,19057 | 1,13871 | 1,09159 |
| 3185 | 19,33 | 2,40795 | 2,16041 | 1,97192 | 1,82113 | 1,69645 | 1,59086 | 1,49982 | 1,4202 | 1,34976 | 1,28686 |
| 3476 | 25,81 | 4,98246 | 3,36841 | 2,80444 | 2,46201 | 2,219 | 2,03256 | 1,88259 | 1,75805 | 1,6522 | 1,56065 |
| 2624 | 24,85 | 1,38515 | 1,30523 | 1,23508 | 1,17288 | 1,11725 | 1,06711 | 1,02165 | 0,98019 | 0,94221 | 0,90724 |
| 1771 | 23,49 | 0,70522 | 0,67716 | 0,65133 | 0,62746 | 0,60532 | 0,58474 | 0,56555 | 0,5476 | 0,53079 | 0,515 |
| 911 | 21,54 | 0,30149 | 0,29176 | 0,28265 | 0,27409 | 0,26604 | 0,25845 | 0,25128 | 0,2445 | 0,23808 | 0,23199 |

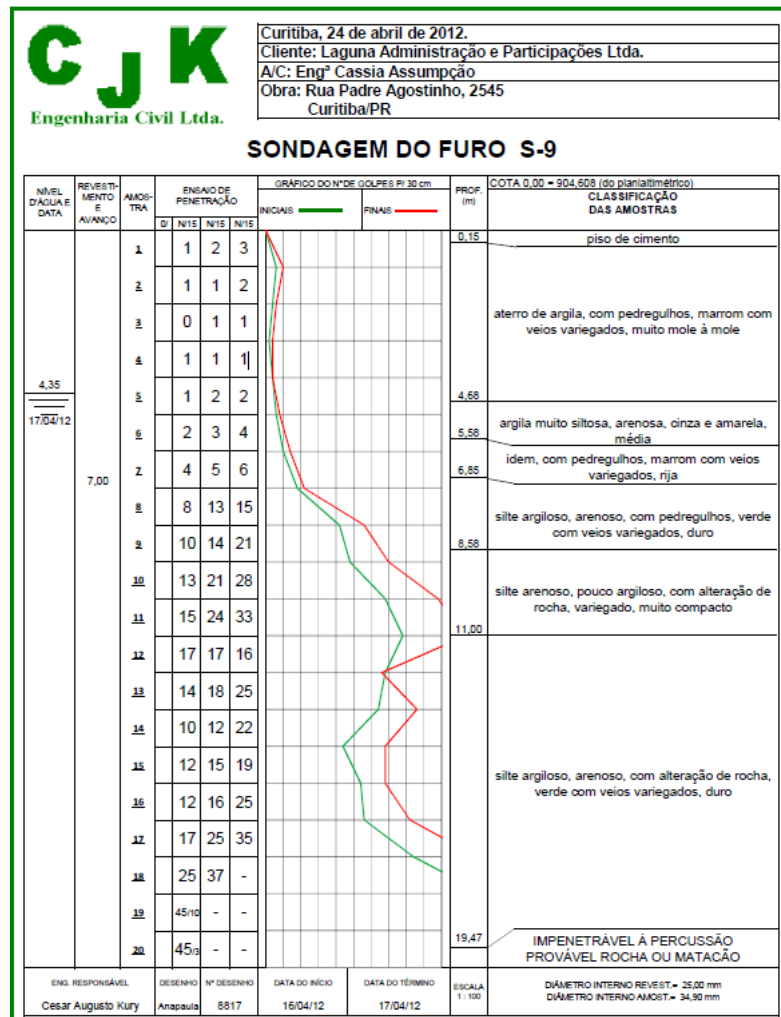
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

APÊNDICE B – RELAÇÕES DE VAN DER VEEN PARA ESTACA 02

| Carga (kN) | Carga x Recalque | Qult | | | | | | | | | | | |
|------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 5100 | 5200 | 5300 | 5350 | 5400 | 5500 | 5600 | 5700 | 5800 | 5900 | 6000 | 6100 |
| 306 | 0,02 | 0,0619 | 0,0606 | 0,0595 | 0,0589 | 0,0583 | 0,0572 | 0,0562 | 0,0552 | 0,0542 | 0,0533 | 0,0523 | 0,0515 |
| 603 | 0,12 | 0,1258 | 0,1233 | 0,1208 | 0,1196 | 0,1184 | 0,1161 | 0,1139 | 0,1118 | 0,1098 | 0,1078 | 0,1059 | 0,1041 |
| 907 | 0,45 | 0,1958 | 0,1917 | 0,1877 | 0,1858 | 0,1839 | 0,1802 | 0,1767 | 0,1733 | 0,1701 | 0,1669 | 0,1639 | 0,1610 |
| 1204 | 0,66 | 0,2693 | 0,2634 | 0,2577 | 0,2550 | 0,2523 | 0,2471 | 0,2421 | 0,2373 | 0,2327 | 0,2282 | 0,2240 | 0,2199 |
| 1506 | 1,01 | 0,3500 | 0,3419 | 0,3343 | 0,3306 | 0,3270 | 0,3200 | 0,3132 | 0,3068 | 0,3006 | 0,2947 | 0,2890 | 0,2835 |
| 1813 | 1,41 | 0,4393 | 0,4287 | 0,4187 | 0,4138 | 0,4091 | 0,3999 | 0,3912 | 0,3828 | 0,3748 | 0,3671 | 0,3598 | 0,3527 |
| 2121 | 1,78 | 0,5377 | 0,5241 | 0,5111 | 0,5049 | 0,4989 | 0,4872 | 0,4760 | 0,4654 | 0,4552 | 0,4455 | 0,4362 | 0,4273 |
| 2406 | 2,14 | 0,6382 | 0,6212 | 0,6051 | 0,5973 | 0,5898 | 0,5753 | 0,5615 | 0,5484 | 0,5358 | 0,5239 | 0,5125 | 0,5016 |
| 2705 | 2,57 | 0,7559 | 0,7344 | 0,7141 | 0,7044 | 0,6950 | 0,6769 | 0,6598 | 0,6435 | 0,6281 | 0,6134 | 0,5994 | 0,5860 |
| 2993 | 3,00 | 0,8840 | 0,8570 | 0,8318 | 0,8197 | 0,8080 | 0,7857 | 0,7646 | 0,7446 | 0,7257 | 0,7078 | 0,6908 | 0,6746 |
| 3299 | 3,41 | 1,0409 | 1,0063 | 0,9741 | 0,9588 | 0,9440 | 0,9158 | 0,8894 | 0,8646 | 0,8412 | 0,8191 | 0,7981 | 0,7783 |
| 3602 | 3,88 | 1,2251 | 1,1799 | 1,1383 | 1,1186 | 1,0997 | 1,0639 | 1,0306 | 0,9995 | 0,9703 | 0,9429 | 0,9171 | 0,8928 |
| 3908 | 4,54 | 1,4536 | 1,3925 | 1,3370 | 1,3111 | 1,2863 | 1,2398 | 1,1969 | 1,1571 | 1,1202 | 1,0858 | 1,0536 | 1,0235 |
| 4192 | 4,97 | 1,7258 | 1,6407 | 1,5652 | 1,5304 | 1,4974 | 1,4362 | 1,3806 | 1,3297 | 1,2829 | 1,2396 | 1,1995 | 1,1622 |
| 4492 | 5,6 | 2,1268 | 1,9940 | 1,8809 | 1,8302 | 1,7829 | 1,6968 | 1,6202 | 1,5515 | 1,4894 | 1,4328 | 1,3810 | 1,3333 |
| 4789 | 6,32 | 2,7972 | 2,5378 | 2,3391 | 2,2551 | 2,1791 | 2,0458 | 1,9323 | 1,8337 | 1,7469 | 1,6697 | 1,6003 | 1,5375 |
| 5007 | 9,46 | 4,0044 | 3,2937 | 2,8953 | 2,7471 | 2,6203 | 2,4120 | 2,2453 | 2,1072 | 1,9898 | 1,8881 | 1,7988 | 1,7194 |
| 3699 | 7,09 | 1,2921 | 1,2425 | 1,1971 | 1,1757 | 1,1552 | 1,1164 | 1,0804 | 1,0468 | 1,0154 | 0,9860 | 0,9584 | 0,9324 |
| 2501 | 5,82 | 0,6741 | 0,6558 | 0,6384 | 0,6301 | 0,6220 | 0,6065 | 0,5917 | 0,5776 | 0,5642 | 0,5515 | 0,5393 | 0,5276 |
| 1255 | 4,58 | 0,2825 | 0,2762 | 0,2702 | 0,2673 | 0,2645 | 0,2590 | 0,2537 | 0,2487 | 0,2438 | 0,2392 | 0,2347 | 0,2303 |

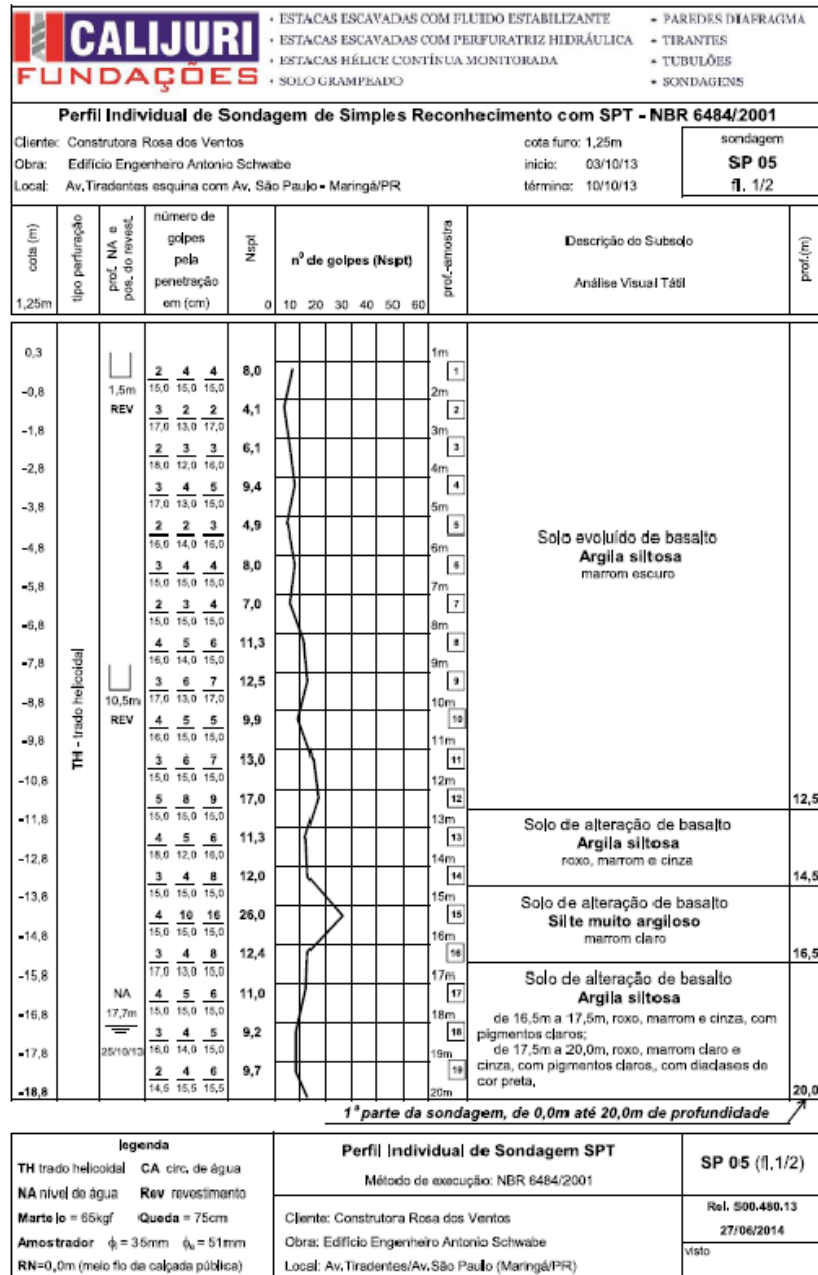
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

ANEXO A – RELATÓRIO SPT PARA ESTACA 01



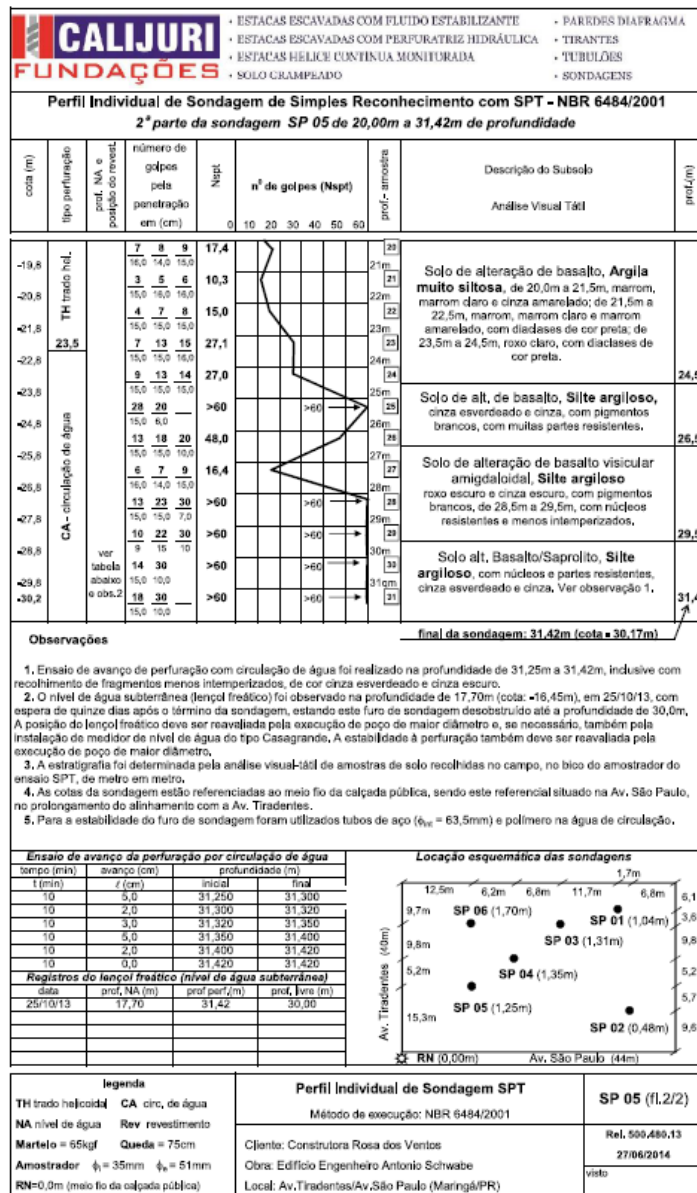
Fonte: Relatório Empresa FUGRO (2020).

ANEXO B – RELATÓRIO SPT PARA ESTACA 02 PARTE I



Fonte: Relatório Empresa FUGRO (2020).

ANEXO C – RELATÓRIO SPT PARA ESTACA 02 PARTE II



Fonte: Relatório Empresa FUGRO (2020).