

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VINICIUS EMANUEL RODRIGUES

**DESENVOLVIMENTO DE PLANILHA DE ROTINA DE CÁLCULO PARA ESTIMATIVA DA  
CAPACIDADE DE SUPORTE DE FUNDAÇÃO POR ESTACAS PRÉ-MOLDADAS  
UTILIZANDO MÉTODOS SEMI-EMPIRICOS**

Campo Mourão

2019

VINICIUS EMANUEL RODRIGUES

**DESENVOLVIMENTO DE PLANILHA DE ROTINA DE CÁLCULO PARA ESTIMATIVA DA  
CAPACIDADE DE SUPORTE DE FUNDAÇÃO POR ESTACAS PRÉ-MOLDADAS  
UTILIZANDO MÉTODOS SEMI-EMPIRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Campo Mourão, para a obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Orientador: Prof. Dr. Ewerton Clayton Alves da Fonseca.

Campo Mourão

2019



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Câmpus Campo Mourão  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Departamento Acadêmico de Construção Civil  
Coordenação de Engenharia Civil



## TERMO DE APROVAÇÃO

### Trabalho de Conclusão de Curso

### DESENVOLVIMENTO DE PLANILHA DE ROTINA DE CÁLCULO PARA ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE SUPORTE DE FUNDAÇÃO POR ESTACAS PRÉ-MOLDADAS UTILIZANDO MÉTODOS SEMI-EMPIRICOS

Por

**Vinicius Emanuel Rodrigues**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 13h30min do dia 29 de Novembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof. Ana Raíza Ciscoto Yoshioka**

( UTFPR )

**Prof. Me. Candido Ricardo Tomazoni  
Coreia**

( UTFPR )

**Prof. Dr. Ewerton Clayton Alves da  
Fonseca**

( UTFPR )

**Orientador**

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

**Prof. Dr(a). Paula Cristina de Souza**

*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.*

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é o fim de um ciclo bastante enriquecedor da minha trajetória de vida. Durante o período que estive em Campo Mourão adquiri conhecimentos técnicos para o desenvolvimento profissional, mas também conheci pessoas e vivenciei momentos que, certamente, me ajudaram nesta incessante tarefa que é tornar-me mais humano. Estendo, portanto, minha gratidão:

Ao meu orientador, Dr. Ewerton Clayton Alves da Fonseca, uma das pessoas mais competentes que conheci, e que se dispôs a me auxiliar na realização deste trabalho.

Aos professores da graduação, pelo conhecimento transmitido e por sua dedicação e zelo pela Engenharia Civil.

Aos professores da banca, Ana Raíza Ciscoto Yoshioka e Candido Ricardo Tomazoni Coreia, pela pronta aceitação do convite para avaliarem este trabalho.

Aos amigos Alisson, André, Austin, Barreto, Elielson, Everton, Fernando, Glauco, Hércules, Iago, Letícia, Lucas, Luiz Cesar e Parizoto, pelos bons momentos de descontração e estudo.

À Benedita Rodrigues, minha mãe, que nestes anos todos me deu muito suporte, sem a qual meus anos de graduação teriam sido muito mais árduos.

Por fim, minha gratidão à Aliny Marendaz, minha companheira de vida, a pessoa mais íntegra e sensível que conheço, pela paciência, compreensão e amor a mim dedicados nos momentos bons e ruins que passamos em todos esses anos, e por trazer em seu ventre Maria Fernanda, a luz da minha vida.

## RESUMO

RODRIGUES, Vinicius Emanuel. **Desenvolvimento de planilha de rotina de cálculo para estimativa de capacidade de suporte de fundação por estacas pré-moldadas utilizando métodos semi-empíricos**. 2019. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2019.

Utilizando um software de planilha eletrônica (Microsoft Office Excel), foi desenvolvida para este trabalho, uma rotina de cálculo para a estimativa de capacidade de suporte de fundação por estaca pré-moldada de concreto. Utilizou-se, para tanto, metodologias de cálculo já consagradas no campo das fundações, Aoki & Velloso (1975, Adaptado) e Décourt & Quaresma (1978, Adaptado), com a finalidade de se obter, a partir de dados da literatura técnica produzida em diferentes regiões do país, valores que representem ou se aproximem dos valores trazidos por estas literaturas, validando, assim, a planilha.

**Palavras-chave:** Rotina de Cálculo. Capacidade de suporte. Estaca pré-moldada de concreto. Métodos semi-empíricos.

## ABSTRACT

RODRIGUES, Vinicius Emanuel. **Development of calculation worksheet to estimate foundation bearing capacity by precast piles using semi-empirical methods.** 2019. 39 f. Course Conclusion Paper (Bachelor of Civil Engineering) - Federal Technological University of Paraná. Moruão Field, 2019.

Using a spreadsheet software (Microsoft Office Excel), a calculation routine was developed for this work to estimate the foundation's carrying capacity by precast concrete pile. For this, we used the calculation methodologies already established in the field of foundations, Aoki & Velloso (1975, Adapted) and Décourt & Quaresma (1978, Adapted), in order to obtain, from data from the technical literature produced. in different regions of the country, values that represent or approximate the values brought by these literatures, thus validating the spreadsheet.

**Keywords:** Calculation Routine. Supportability. Precast concrete pile. Semi-empirical methods.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mobilização das resistências em um elemento de fundação por estaca. ....	3
Figura 2: Curva carga x recalque típica de um sistema de fundação por estaca (ruptura nítida). ....	4
Figura 3: Laudo SPT SP-919 – Quadra I3 – Parte 1 .....	9
Figura 4: Laudo SPT SP-919 – Quadra I3 – Parte 2 .....	10
Figura 5: Laudo SPT SP-920 – Quadra I4 – Parte 1 .....	11
Figura 6: Laudo SPT SP-920 – Quadra I4 – Parte 2 .....	12
Figura 7: Laudo de sondagem SPT SP 01 – Rodriguez .....	13
Figura 8: Laudo de sondagem SPT SP 02 – Rodriguez .....	14
Figura 9: Laudo de sondagem SPT SP 03 – Rodriguez .....	14
Figura 10: Laudo de sondagem SPT SP 05 – Rodriguez .....	15
Figura 11: Laudo de sondagem SPT E11 – Vianna. ....	16
Figura 12: Laudo de sondagem SPT E21 – Vianna. ....	16
Figura 13: Laudo de sondagem SPT E30 – Vianna. ....	17
Figura 14: Planilha para previsão da capacidade de suporte de um elemento de fundação por estaca: dados necessários. ....	19
Figura 15: Planilha para previsão da capacidade de suporte de um elemento de fundação por estaca. Dados necessários: parâmetros dos métodos (a).....	19
Figura 16: Planilha para previsão da capacidade de suporte de um elemento de fundação por estaca. Dados necessários: parâmetros dos métodos (b).....	20
Figura 17: Planilha para previsão da capacidade de suporte de um elemento de fundação por estaca: Método Aoki & Velloso (1975, Adaptado). ....	21
Figura 18: Planilha para previsão da capacidade de suporte de um elemento de fundação por estaca: Método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado).....	22
Figura 19: Cálculo da capacidade de suporte de sistema de fundação pelo método Aoki & Velloso (1975, Adaptado). ....	23
Figura 20: Cálculo da capacidade de suporte de sistema de fundação pelo método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado). ....	23
Figura 21: Fluxograma metodológico.....	24
Figura 22: Comparação dos resultados estimados com os resultados apresentados pelos autores a partir do método Aoki & Velloso (1975, Adaptado). ....	26
Figura 23: Comparação dos resultados estimados com os resultados apresentados pelos autores a partir do método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado).....	27
Figura 24: Comparação dos resultados estimados com os resultados apresentados em Cabette (2014) a partir do método Aoki & Velloso (1975, Adaptado). ....	28

Figura 25: Comparação dos resultados estimados com os resultados apresentados em Cabette (2014) a partir do método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado).....	28
Figura 26: Comparação dos resultados estimados com os resultados apresentados em Rodriguez (2015) a partir do método Aoki & Velloso (1975, Adaptado).....	30
Figura 27: Comparação dos resultados estimados com os resultados apresentados em Rodriguez (2015) a partir do método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado). ....	30
Figura 28: Comparação dos resultados estimados com os resultados apresentados em Vianna (2000) a partir do método Aoki & Velloso (1975, Adaptado).....	31
Figura 29: Comparação dos resultados estimados com os resultados apresentados em Vianna (2000) a partir do método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado). ....	31



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coeficiente $k$ e razão de atrito $\alpha$ .....	6
Tabela 2: Fatores de correção por tipo de estaca .....	6
Tabela 3: Coeficiente característico do solo conforme Método Décourt & Quaresma (1978). 7	
Tabela 4: Valores do coeficiente $\alpha$ em função do tipo de solo e do tipo de estaca.....	7
Tabela 5: Valores do coeficiente $\beta$ em função do tipo de solo e do tipo de estaca.....	8
Tabela 6: Dados obtidos e estimativas calculadas .....	25

## Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS .....	2
2.1 OBJETIVO GERAL .....	2
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
3.1 CAPACIDADE DE SUPORTE DE UM ELEMENTO DE FUNDAÇÃO POR ESTACA... 3	
3.2 MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS .....	5
3.2.1 Método Aoki & Velloso (1975, Adaptado).....	5
3.2.2 Método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado) .....	7
3.3 PERFIS DE SONDAGEM.....	8
3.3.1 Perfis Geotécnicos Apresentados por Jean Félix Cabette.....	8
3.3.2 Perfis Geotécnicos Apresentados por Yan Carlos Chiu Rodriguez .....	13
3.3.3 Perfis Geotécnicos Apresentados por Ana Paula Fontana Vianna.....	15
4. METODOLOGIA DE PESQUISA .....	18
5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	25
5.1 RESULTADOS COMPARADOS A PARTIR DE CABETTE (2014).....	28
5.2 RESULTADOS COMPARADOS A PARTIR DE RODRIGUEZ (2015) .....	29
5.3 RESULTADOS COMPARADOS A PARTIR DE VIANNA (2000) .....	30
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	32
6.1. CONCLUSÕES .....	32
6.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	32
REFERÊNCIAS .....	33
APÊNDICE I .....	34

## 1. INTRODUÇÃO

Este estudo analisou o desenvolvimento de uma planilha eletrônica para o cálculo da previsão de capacidade de suporte de sistemas de fundação por estaca pré-moldada a partir de dois métodos semi-empíricos: Aoki & Velloso (1975, Adaptado) e Décourt & Quaresma (1978, Adaptado). Estas metodologias foram escolhidas por serem as mais comumente utilizadas no cálculo das estimativas acerca do assunto.

Embora a opção tenha sido por essas metodologias tradicionais, é importante ressaltar que outras existem, muitas delas fundamentadas nestas. Tais metodologias vêm alterando e criando fatores e correções de cálculo específicos para cada tipo de solo nas mais variadas regiões do Brasil. Considerando isso, buscou-se, nesta pesquisa, elencar trabalhos de diferentes regiões do país para se ter uma prévia noção de suas diferenças.

Inicialmente foi realizada a análise e seleção de três obras da literatura técnica que abordam o tema fundações por estacas pré-moldadas. Destas obras foram extraídos dados fundamentais para a instrumentalização da planilha de rotina de cálculo, tais como: perfis geotécnicos e tipos de estaca e suas dimensões. Também foram utilizados os resultados apresentados pelos autores dos trabalhos a fim de cumprir um objetivo maior, que é a comparação dos resultados estimados pela planilha com os resultados apresentados pelos autores. A partir da congruência dos resultados foi feita a validação da planilha de rotina de cálculo desenvolvida.

É importante dizer, ainda, que este estudo não visa produzir respostas acabadas sobre a eficiência dos métodos semi-empíricos, também não busca abordar todas as formas de sistemas de fundações, tampouco estabelecer um regime de verdade absoluta sobre qual é melhor ou pior, ainda que, por conveniência de acesso aos dados, escolheu-se a análise dos sistemas de fundações por estaca pré-moldada.

Sabe-se de antemão que as metodologias semi-empíricas comumente adotadas no Brasil são eficientes, tendo se mostrado assim há décadas desde as suas formulações. O que se procura é construir uma análise que auxilie a compreender melhor suas aplicabilidades mediante a formulação de uma rotina pré-programada e que, a partir dela, novas possibilidades surjam para a sua instrumentalização na ampliação do conhecimento acadêmico sobre o assunto.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Este estudo visa desenvolver uma rotina de cálculo de capacidade de suporte de fundações em programa de planilha eletrônica utilizando os métodos semi-empíricos Aoki & Velloso (1975, Adaptado) e Décourt & Quaresma (1978, Adaptado), comparando os valores estimados com valores relatados em três casos da literatura técnica, disponíveis em três dissertações de mestrado desenvolvidas em diferentes regiões do território brasileiro: sul, sudeste e nordeste.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Desenvolver rotina de cálculo com os métodos Aoki & Velloso (1975, Adaptado) e Décourt & Quaresma (1978, Adaptado) em planilha eletrônica.
- Selecionar quinze casos disponíveis na literatura técnica sobre fundações por estacas pré-moldadas de concreto armado de diferentes regiões do país;
- Estimar as capacidades de suporte dos elementos de fundação por estacas pré-moldadas de concreto armado utilizando-se dos dados disponibilizados em cada caso e submetendo-os à rotina de cálculo desenvolvida.
- Validar a planilha comparando os resultados previstos com a rotina de cálculo com os resultados relatados na literatura técnica.

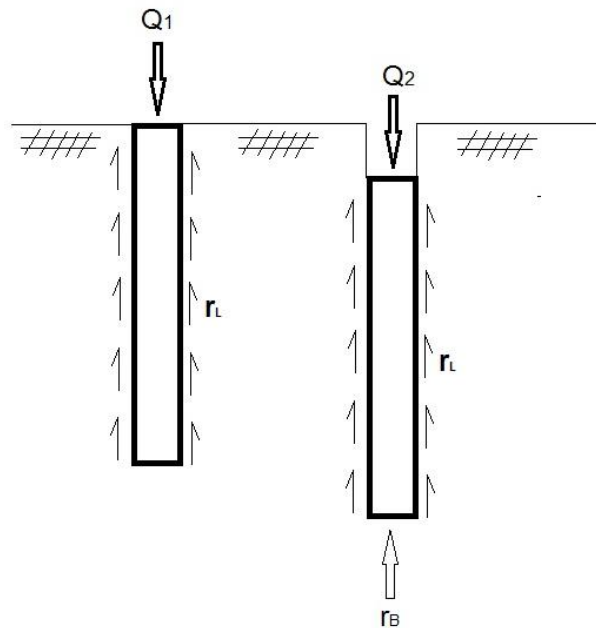
### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 CAPACIDADE DE SUPORTE DE UM ELEMENTO DE FUNDAÇÃO POR ESTACA

Neste estudo será adotado o conceito de “elementos de fundação” esboçado por Cintra & Aoki (2010), que trata da capacidade de suporte do sistema composto pelo elemento estrutural (estaca) e pelo elemento geotécnico (solo que envolve a estaca).

O conceito da capacidade de suporte de um elemento de fundação por estaca pode ser entendida mediante a observação da Figura 1, cuja análise se dá pelo método estático, que considera o equilíbrio entre a carga aplicada, o peso próprio da estaca e a resistência do solo.

Figura 1: Mobilização das resistências em um elemento de fundação por estaca.



Fonte: adaptada de Cintra & Aoki (2010)

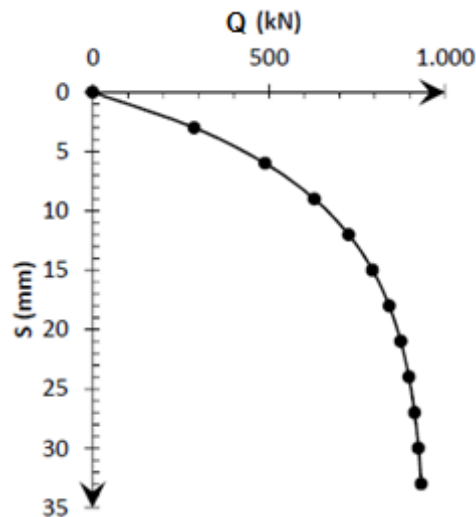
Na maioria das situações o peso próprio da estaca é desprezado de forma a considerar apenas as cargas envolvidas no sistema. Assim, será considerada uma estaca cravada ou escavada de comprimento qualquer, disposta em determinado solo. No topo da estaca será aplicada uma força de compressão  $Q$  aumentada progressivamente, conforme denota a Figura 1. À medida que ocorre o aumento da força, o sistema mobilizará tensões resistentes, sendo estas ao longo do fuste ( $r_L$ ) e na base ( $r_B$ ).

Para efeito didático serão consideradas primeiramente as tensões mobilizadas ao longo do fuste até sua máxima mobilização, vindo depois o acionamento das tensões mobilizadas na base. Não quer dizer que estas tensões não ocorram simultaneamente, mas

que, na maioria dos casos, quando as tensões resistentes ao longo do fuste chegam ao seu limite, a mobilização das tensões na base ainda são pouco significativas.

Inicialmente  $Q < Q_1$ . Nesse momento a mobilização das tensões de atrito no fuste é incompleta, variando de acordo com a profundidade e com as características geotécnicas da camada do solo. Quando  $Q = Q_1$ , tem-se a mobilização máxima dos atritos e a tensão mobilizada ao longo do fuste chega ao seu limite, restando a tensão mobilizada na base. Em  $Q = Q_2$ , a resistência de base também alcança sua máxima mobilização possível. Em teoria, neste estado limite, a estaca se deslocaria infinitamente para baixo, conforme fica perceptível no gráfico da Figura 2. Em termos práticos, portanto,  $Q = Q_2$  é considerada a resistência máxima oferecida pelo sistema.

Figura 2: Curva carga x recalque típica de um sistema de fundação por estaca (ruptura nítida).



Fonte: adaptada de Cintra & Aoki (2010).

Para efeito de análise da capacidade de suporte de um elemento isolado de fundação por estaca, deve-se considerar que o material que constitui a estaca é suficientemente resistente para não romper antes da mobilização máxima do sistema. Em geral isto é verdade, mas, caso a estaca apresente menor resistência, deve-se considerá-la como limite de cálculo.

A fim de obter a expressão de capacidade de suporte do sistema, tem-se a equação 1:

$$Q_{ult} = R_L + R_B \quad (1)$$

onde:

$Q_{ult}$ : capacidade de suporte do elemento de fundação por estaca;

$R_L$ : parcela da capacidade de suporte, devido ao atrito lateral;

$R_B$ : parcela da capacidade de suporte, devido a resistência na base.

Para obter a parcela da capacidade de suporte devido ao atrito lateral, multiplica-se a somatória da resistência de atrito (em unidades de tensão) pelo perímetro do fuste, conforme a equação 2.

$$R_L = U \sum(r_L \Delta_L) \quad (2)$$

onde:

$R_L$ : parcela da capacidade de suporte, devido ao atrito lateral;

$U$ : perímetro do fuste;

$r_L$ : tensão resistente do fuste;

$\Delta_L$ : espessura da camada de solo.

Para a estimativa da parcela da capacidade de suporte devido à base, multiplica-se a resistência da base (também em unidades de tensão) pela área da seção transversal da estaca, conforme equação 3.

$$R_B = r_B A_B \quad (3)$$

onde:

$R_B$ : parcela da capacidade de suporte, devido à resistência na base;

$r_B$ : tensão resistente de base;

$A_B$ : área da seção transversal da base.

Desta forma tem-se deduzida a equação 1 que servirá de parâmetro para os métodos semi-empíricos analisados.

## 3.2 MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS

### 3.2.1 Método Aoki & Velloso (1975, Adaptado)

Este método foi desenvolvido a partir dos testes de “Standard Penetration Test” (SPT) associados à equação 1. Para tanto, retoma-se as equações a ela vinculadas de forma a considerar  $r_B$  e  $a_L$  como incógnitas geotécnicas às quais serão associados fatores de correção. Tem-se, portanto, estas incógnitas assim representadas:

$$r_B = \frac{k N_B}{F_1} \quad (4)$$

$$r_L = \frac{\alpha k N_L}{F_2} \quad (5)$$

Os coeficientes  $k$  e  $\alpha$  estão descritos na tabela 1 e dependem do tipo de solo. Os fatores de correção  $F_1$  e  $F_2$  se encontram na tabela 2 e dependem do tipo da estaca.  $N_B$  e  $N_L$  são, respectivamente, os índices de resistência às penetrações da base e médio da variação  $\Delta_L$  da estaca e se encontram no ensaio SPT.

Tabela 1: Coeficiente  $k$  e razão de atrito  $\alpha$

Solo	$k(\text{MPa})$	$\alpha(\%)$
Areia	1,00	1,40
Areia siltosa	0,80	2,00
Areia siltoargiloso	0,70	2,40
Areia argilosa	0,60	3,00
Areia argilossiltosa	0,50	2,80
Silte	0,40	3,00
Silte arenoso	0,55	2,20
Silte arenoargiloso	0,45	2,80
Silte argiloso	0,23	3,40
Silte argiloarenoso	0,25	3,00
Argila	0,20	6,00
Argila arenosa	0,35	2,40
Argila arenossiltosa	0,30	2,80
Argila siltosa	0,22	4,00
Argila siltoarenosa	0,33	3,00

Fonte: Cintra & Aoki (2010)

Tabela 2: Fatores de correção por tipo de estaca

Estaca	$F_1$	$F_2$
Franki	2,50	$2 F_1$
Metálica	1,75	$2 F_1$
Pré-moldada (com $D$ em metro)	$1 + D/0,80$	$2 F_1$
Escavada	3,00	$2 F_1$
Raiz, Hélice contínua, Ômega	2,00	$2 F_1$

Fonte: Cintra & Aoki (2010)

Considerando a equação 1 tem-se, para expressão da equação 6 para o método Aoki & Velloso (1975).

$$Q_{ult} = \frac{k N_B}{F_1} A_B + \frac{\alpha k N_L}{F_2} U \Delta L \quad (6)$$



### 3.2.2 Método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado)

A partir da equação 1, o método Décourt & Quaresma (1978) considera o valor médio do índice de penetração SPT ao longo de toda a estaca ( $N_L$ ). Neste método desconsidera-se o tipo de solo no cálculo das tensões de resistência ao longo do fuste, conforme apresentado na equação 7.

$$r_L = 10 \left( \frac{N_L}{3} + 1 \right) \quad (7)$$

As tensões de resistência na base, por este método, serão calculadas conforme a equação 8, em que  $N_B$  corresponde ao valor médio dos três últimos índices de SPT sendo o mais próximo da base e os imediatamente anterior e posterior.  $C$  é o coeficiente dependente do tipo de solo, conforme Tabela 3.

$$r_B = C N_B \quad (8)$$

Tabela 3: Coeficiente característico do solo conforme Método Décourt & Quaresma (1978).

Tipo de solo	C (kPa)
Argila	120
Silte argiloso	200
Silte arenoso	250
Areia	400

Fonte: Cintra & Aoki (2010)

Para o cálculo da capacidade de suporte obtido mediante equação 1 o método propõe, ainda, que sejam acrescidos fatores  $\alpha$  e  $\beta$  presentes nas Tabelas 3 e 4, que resultará na equação 9, sendo  $P$  o perímetro do fuste e  $L$  o seu comprimento.

$$Q_{ult} = \alpha C N_B A_B + \beta 10 \left( \frac{N_L}{3} + 1 \right) U L \quad (9)$$

Tabela 4: Valores do coeficiente  $\alpha$  em função do tipo de solo e do tipo de estaca.

Tipo de solo	Tipo de estaca							
	Pré-moldada	Metálica	Franki	Escavada em geral	Escavada (bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injet. sob alta pressão
Argilas	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	0,30*	0,85*	1,00*
Solos intermediários	1,00	1,00	1,00	0,60	0,60	0,30*	0,60*	1,00*
Areias	1,00	1,00	1,00	0,50	0,50	0,30*	0,50*	1,00*

\*Valores apenas orientativos diante do reduzido número de dados disponíveis

Fonte: Cintra & Aoki (2010)

Tabela 5: Valores do coeficiente  $\beta$  em função do tipo de solo e do tipo de estaca.

Tipo de solo	Tipo de estaca							
	Pré-moldada	Metálica	Franki	Escavada em geral	Escavada (bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetada sob altas pressões
Argilas	1,00	1,00	1,00	0,80*	0,90*	1,00*	1,50*	3,00*
Solos intermediários	1,00	1,00	1,00	0,65*	0,75*	1,00*	1,50*	3,00*
Areias	1,00	1,00	1,00	0,50*	0,60*	1,00*	1,50*	3,00*

\*Valores apenas orientativos diante do reduzido número de dados disponíveis

Fonte: Cintra & Aoki (2010)

### 3.3 PERFIS DE SONDAAGEM

Este trabalho analisou obras resultantes de pesquisas de mestrado que trazem em seu conteúdo análise de métodos de previsão de capacidade de suporte de elementos de fundações por estacas pré-moldadas. Foi feita, a partir destas análises, a seleção de casos que representassem a problemática chegando-se a um total de quinze casos cujos dados serão submetidos à planilha de rotina de cálculo e os resultados comparados com os resultados contidos nas pesquisas.

Os tópicos 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3 apresentam as descrições dos perfis de sondagem trazidos por cada um dos três autores elencados. Estes dados são importantes, pois foram utilizados para abastecer a planilha desenvolvida.

#### 3.3.1 Perfis Geotécnicos Apresentados por Jean Félix Cabette

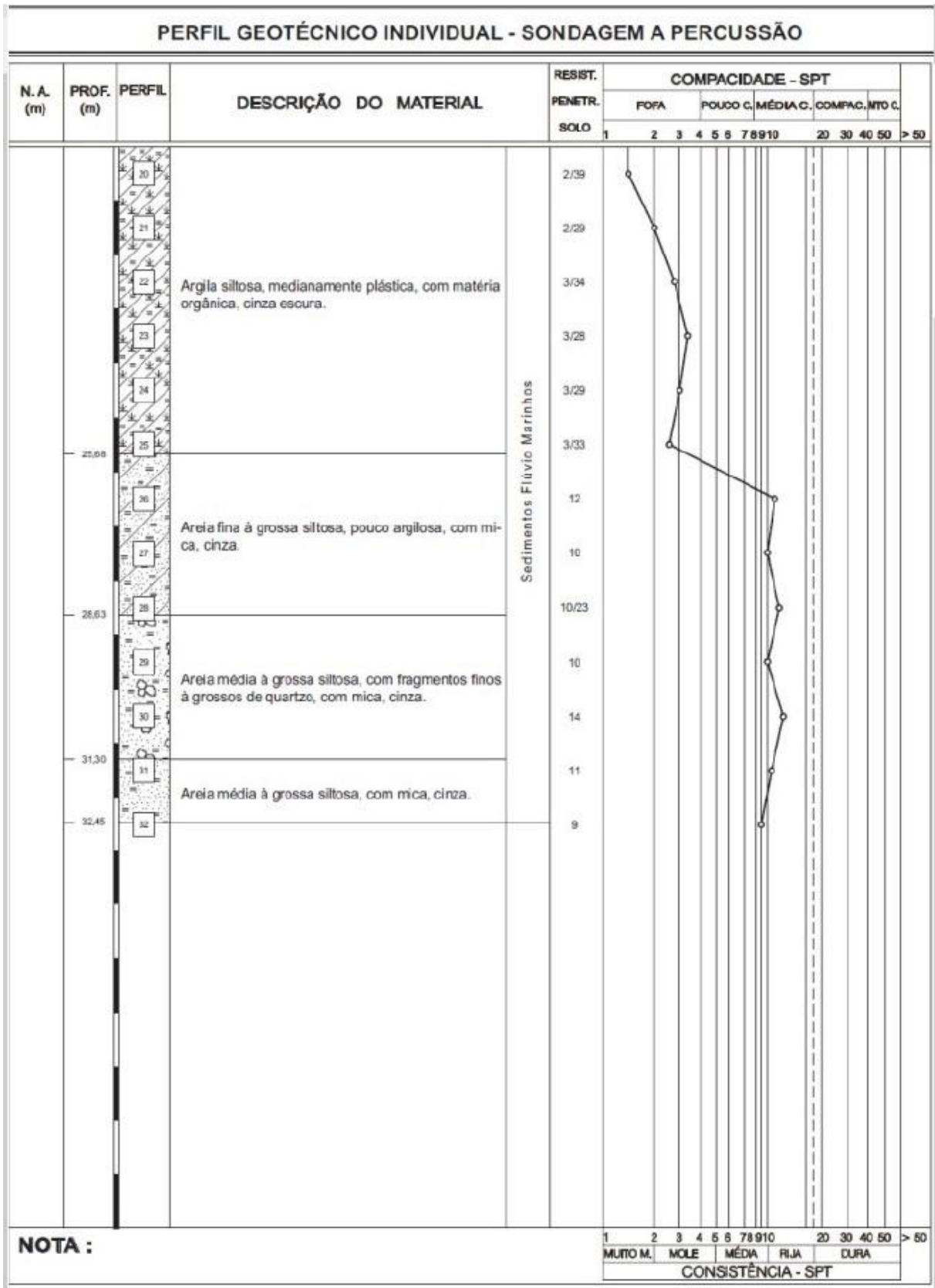
Cabette (2014) apresentou a análise de dados e provas de carga realizadas pela empresa Benaton Construções, responsável pela obra de um conjunto habitacional na cidade de Cubatão, na baixada santista. Sabe-se que o solo desta região é bastante compressível e de baixa resistência, caracterizado por uma espessa camada de argila de sedimentos flúvio-lagunares (Cabette, 2014, p. 17). Junto a estes dados estão os cálculos também realizados pela empresa que também utiliza os três métodos semi-empíricos clássicos aqui abordados.

As estacas analisadas nesse trabalho possuem fuste com dimensões longitudinais acima de 26 metros, sendo alocadas em uma região com solo colapsivo com o agravante de que foram realizados despejos de materiais provindo da abertura de túneis da rodovia Imigrantes.

Nas Figuras 3 a 6, os laudos de sondagens SPT mostram como o solo é heterogêneo ainda que em um mesmo local. Encontra-se  $N_{SPTs}$  que variam de 0 a 40 em profundidades não tão distantes e  $N_{SPTs}$  baixíssimos em grandes profundidades. O laudo

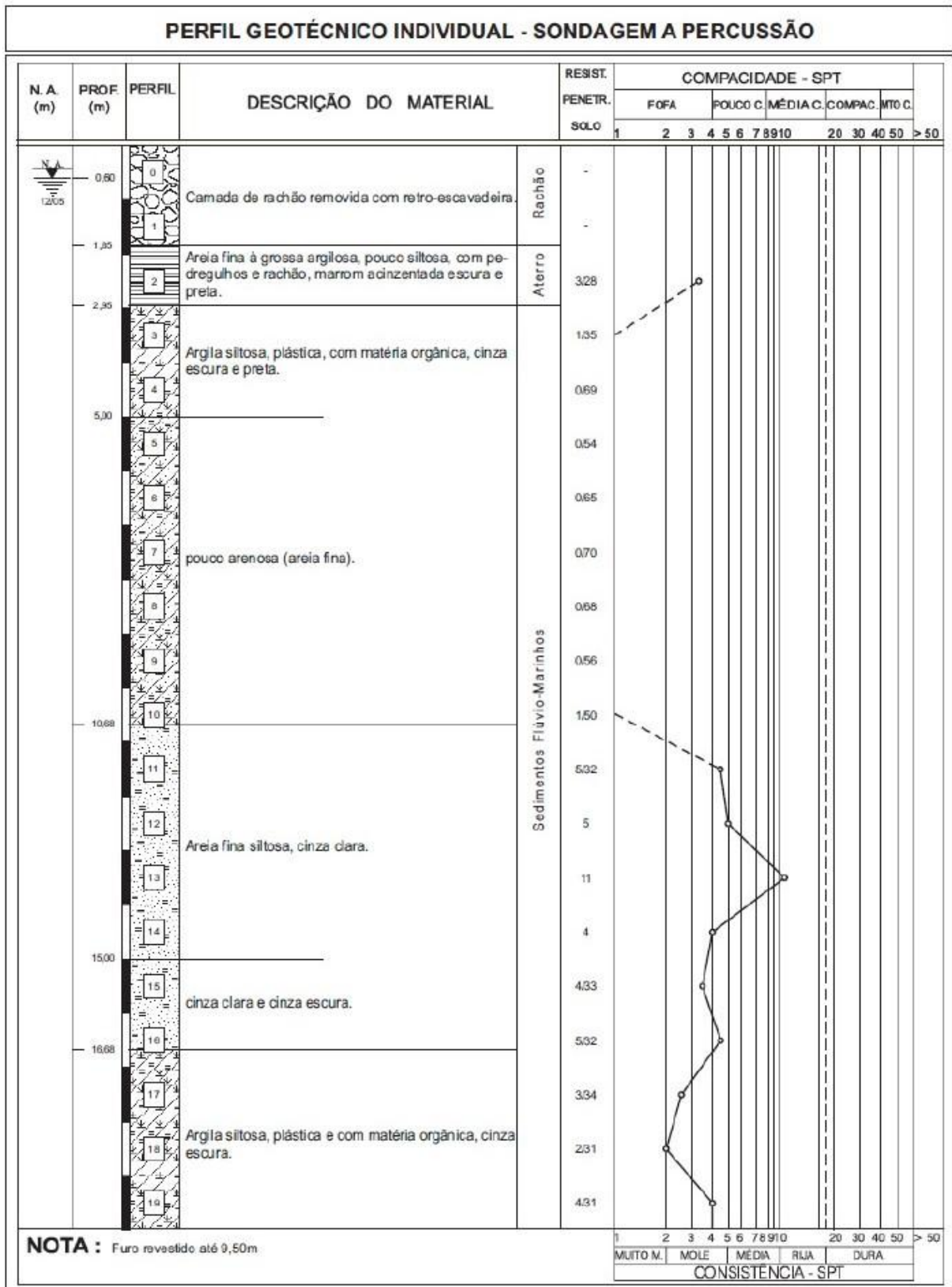


Figura 4: Laudo SPT SP-919 – Quadra I3 – Parte 2.



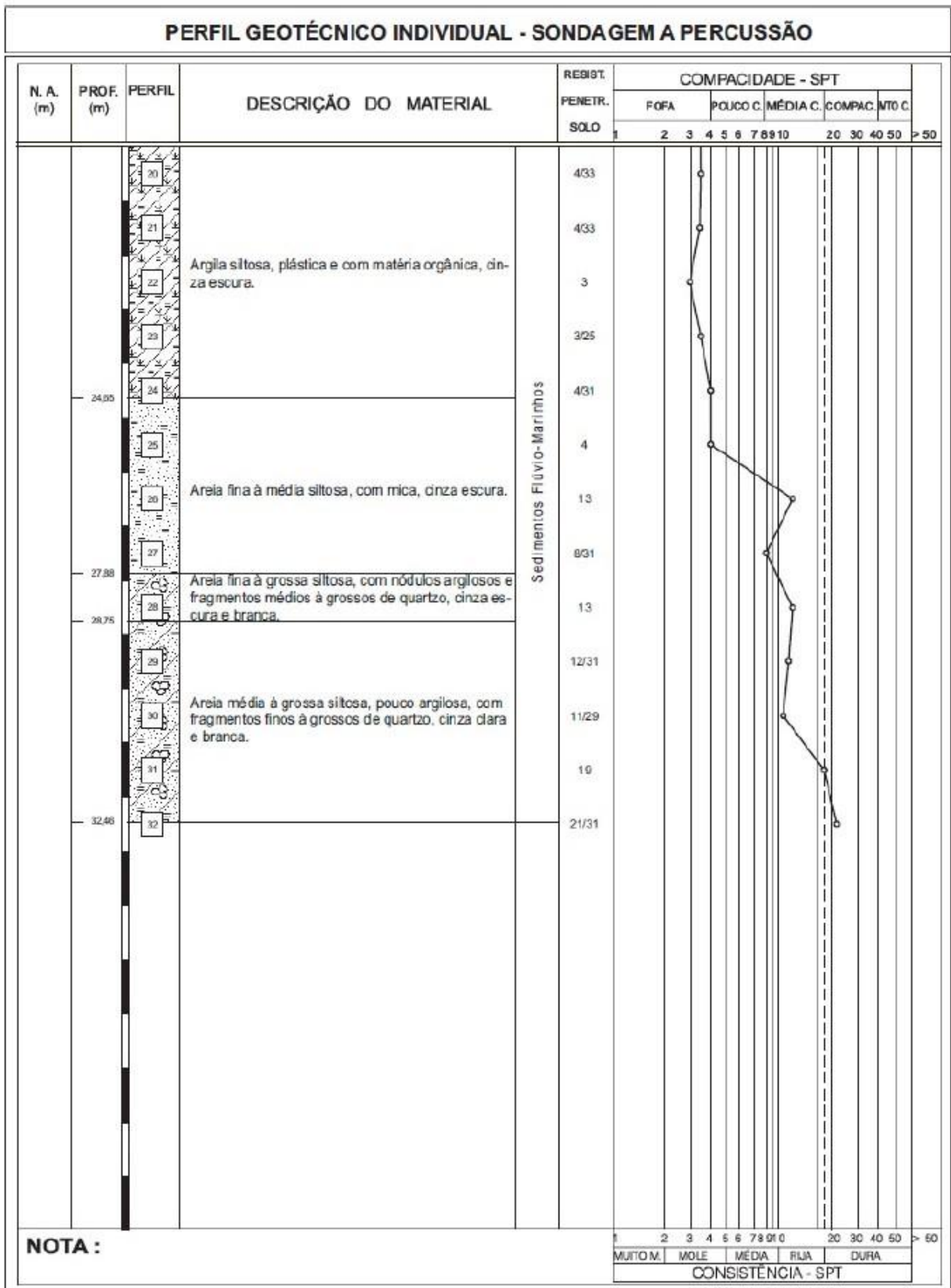
Fonte: Cabette (2014)

Figura 5: Laudo SPT SP-920 – Quadra I4 – Parte 1



Fonte: Cabette (2014)

Figura 6: Laudo SPT SP-920 – Quadra I4 – Parte 2



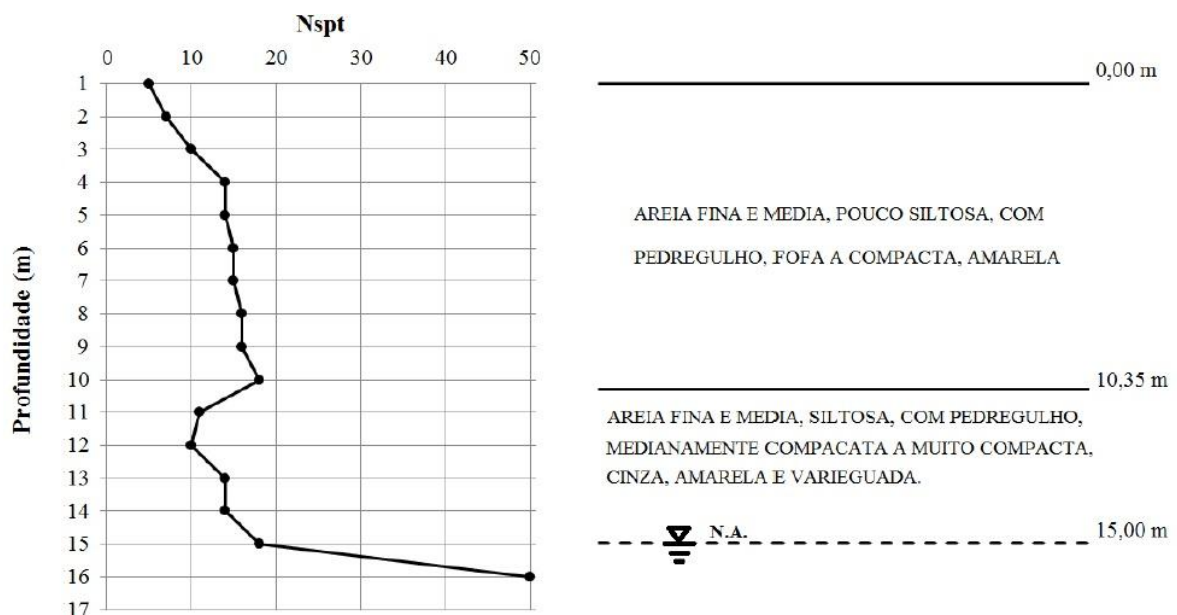
Fonte: Cabette (2014)

### 3.3.2 Perfis Geotécnicos Apresentados por Yan Carlos Chiu Rodriguez

Rodriguez (2015) analisou 5 estacas e suas respectivas provas de carga em dois locais distintos da Região Metropolitana de Fortaleza, descrevendo detalhadamente cada sondagem SPT e as respectivas provas de carga realizadas. De posse dos dados o autor aplica os métodos semi-empíricos de Aoki & Velloso (1975, Adaptado), Décourt & Quaresma (1978, Adaptado), Monteiro 1997 e Teixeira 1996, comparando-os com os resultados aferidos. Fornecidos por Rodriguez, foram tomadas como objeto de análise neste trabalho as estacas 1, 2, 3, 5 e 6, localizadas no bairro Aldeota e Meireles, em um quadrilátero de aproximadamente 6 km<sup>2</sup>, na cidade de Fortaleza.

As estacas possuem comprimentos bem menores se comparadas às analisadas por Cabette. Dados da sondagem apresentados nas Figuras 7 a 10 mostram a composição do solo em sua maioria de areia, variando de fina a média, e com valores de  $N_{SPT}$  maiores do que 10 a partir dos 3 metros de profundidade nas sondagens próximas às estacas 1 e 2 e a partir dos 6 metros para a estaca 3. Os laudos SP 05 corresponde à estimativa das estacas 5 e 6.

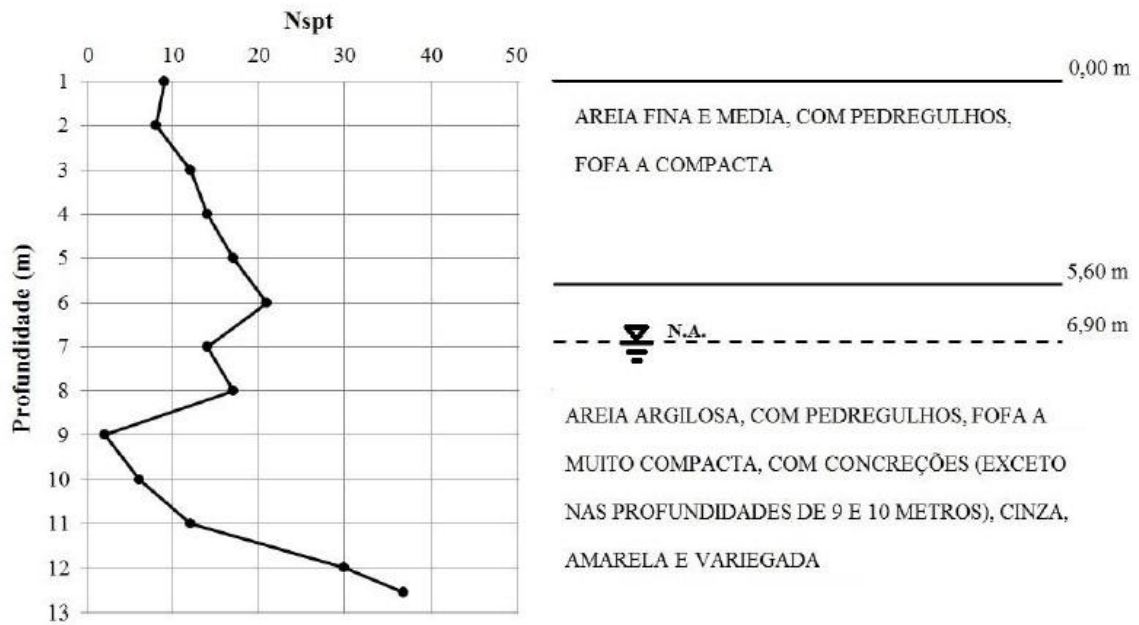
Figura 7: Laudo de sondagem SPT SP 01 – Rodriguez.



Fonte: Rodriguez (2015)

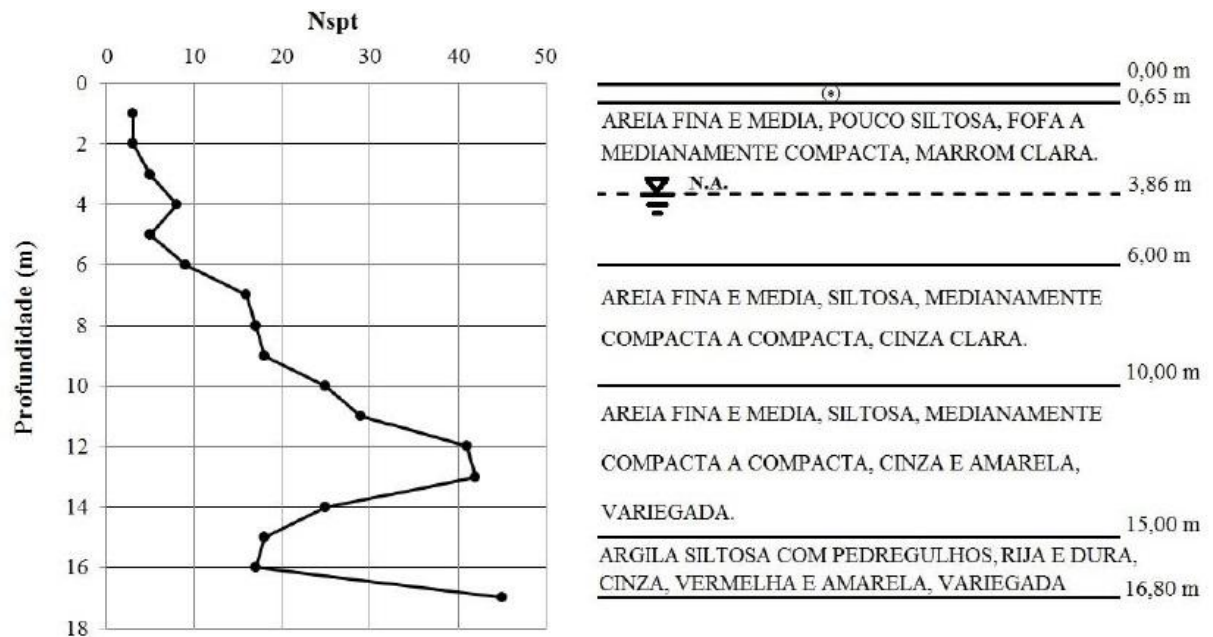


Figura 8: Laudo de sondagem SPT SP 02 – Rodriguez.



Fonte: Rodriguez (2015)

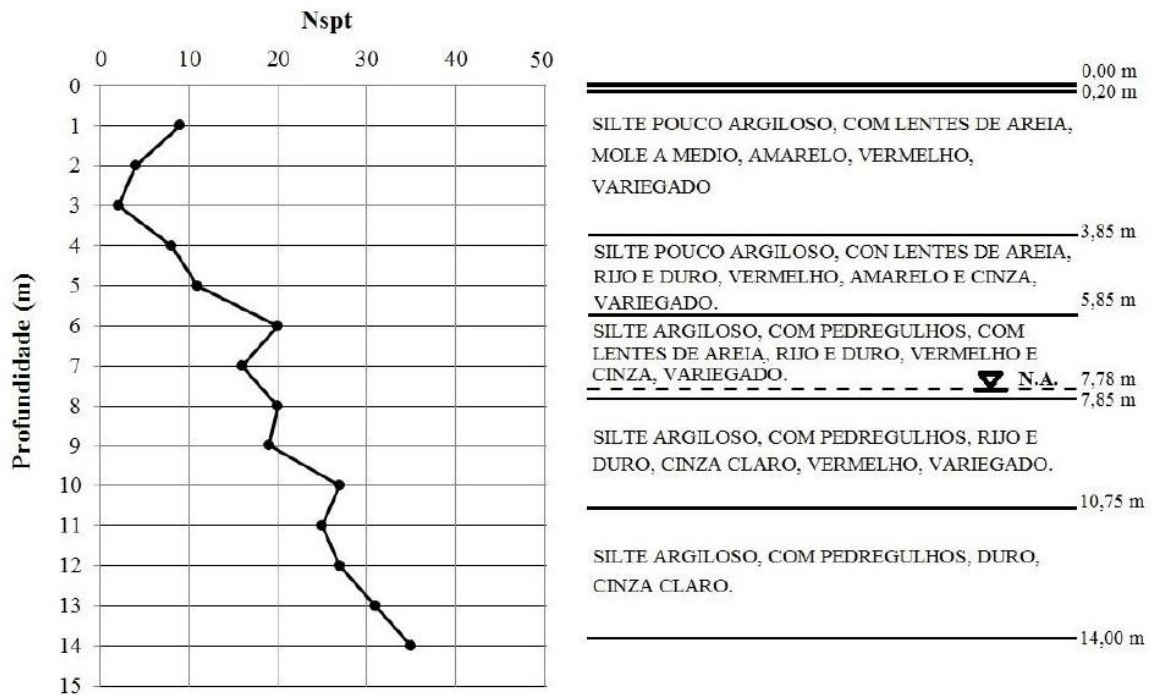
Figura 9: Laudo de sondagem SPT SP 03 – Rodriguez.



Fonte: Rodriguez (2015)



Figura 10: Laudo de sondagem SPT SP 05 – Rodriguez.



Fonte: Rodriguez (2015)

### 3.3.3 Perfis Geotécnicos Apresentados por Ana Paula Fontana Vianna

Vianna (2000) analisou 34 estacas e suas respectivas provas de carga e as comparou com os resultados obtidos com métodos semi-empíricos já consagrados, Aoki & Velloso (1975, Adaptado) e Décourt & Quaresma (1978, Adaptado), e, também, com o método Amaral (1982,1999). Este último é um método desenvolvido especificamente para a região de solo de formação Guabirotuba, presente na região metropolitana da capital paranaense. Coeficientes  $k$  e  $\alpha$  específicos para a formação local são adicionados aos cálculos das parcelas de resistência de base e lateral respectivamente, proporcionando o resultado da capacidade de suporte do elemento de fundação segundo o método.

Das 34 estacas apresentadas foram selecionadas as estacas 11, 21 e 30, mais bem detalhadas no trabalho, a fim de comparar seus resultados com os estimados neste trabalho. As estacas analisadas por Vianna são de dimensão longitudinal intermediária se comparadas às analisadas pelos demais autores, com baixa amplitude (variando entre 9,60 m e 12,00 m), mais longas que as de Rodriguez e bem mais curtas que as de Cabette.

Nas Figuras 11 a 13 seguem-se os laudos de sondagem SPTs que mostram mais detalhadamente a composição do subsolo.

Figura 11: Laudo de sondagem SPT E11 – Vianna.

D = 20 cm L = 12 m		
N <sub>SPT</sub>	Tipo de solo	
4/15	Aterro - Argila siltosa orgânica com areia fina, preta, muito mole	
3	Aterro - Argila orgânica, cinza escura	
3	Silte argiloso com areia fina e variegado, fofo	
2	Argila Siltosa com areia fina, variegada, muito mole à mole	
4		
5		
4		
2		
2		
5		
14		Consistência média
20		Argila Siltosa com areia fina, variegada, rija
22		
20	Argila Siltosa com areia fina, cinza, muito rija à dura	
25		
31		
36		
43		

Fonte: Vianna (2000)

Figura 12: Laudo de sondagem SPT E21 – Vianna.

D = 25 cm L = 11,50 m	
N <sub>SPT</sub>	Tipo de solo
4	Argila silto-arenosa, vermelha, muito mole a mole.
3	
5	
8	Argila silto-arenosa, vermelha, consistência média.
7	
15/8	
6	
6	Argila siltosa com areia grossa e pedregulho, variegada consistência média.
6	
7	
8	
7	
8	
15	
19	
31	
23	
21	Silte argilo-arenoso, variegado, compacto.
21	
30	
19	
20	
31/25	

Fonte: Vianna (2000)

Figura 13: Laudo de sondagem SPT E30 – Vianna.

D = 28 cm L = 10,60 m	
N <sub>spt</sub>	Tipo de solo
5	Aterro - argila siltosa, marron, mole.
4	
6	Argila siltosa, preta, média.
5	Argila siltosa, variegada, mole.
6	
7	
8	
5	
6	Argila siltosa, roxa, média.
7	Argila siltosa, variegada, rija.
6	
13	
13	Argila siltosa, variegada, rija.
16	
18	
20	
22	Silte arenoso com pedregulhos, variegado compacto.
25	
33	
30	
31	
59	

Fonte: Vianna (2000)

#### 4. METODOLOGIA DE PESQUISA

Este estudo visa avaliar, mediante o desenvolvimento e utilização de uma planilha eletrônica de rotina de cálculo, resultados de previsão de capacidade de suporte de elementos de fundações por estacas pré-moldadas de concreto, a partir de casos relatados em trabalhos já publicados. Para a estimativa da capacidade de suporte deste tipo de fundação, foram utilizados dois métodos semi-empíricos tradicionalmente difundidos, especialmente no Brasil, a saber: o método Aoki & Velloso (1975, Adaptado) e o método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado), ambos baseados nos resultados do SPT.

Inicialmente, foram realizadas pesquisas bibliográficas sobre casos de obras já publicados com relação a este tema. Foram selecionados 15 casos de três diferentes regiões do Brasil, a fim de avaliar as previsões dos métodos quando empregados para condições de subsolo bastante distintas.

A seleção dos casos dependeu de informações tais como (i) SPT e (ii) geometria das estacas pré-moldadas de concreto, pois de posse das informações (i) e (ii) foi possível prever (a partir das distintas metodologias) as capacidades de suporte dos elementos de fundação e compará-los aos resultados apresentados pelos autores das pesquisas.

Para as análises de dados, a partir dos métodos semi-empíricos, foi utilizada a planilha unificada desenvolvida no programa Excel, que contempla a rotina de cálculo para os dois métodos supracitados. Também foi desenvolvido um tutorial (Apêndice I) para auxiliar na utilização da mesma.

A validação da rotina de cálculo foi realizada mediante a submissão de dados de exercícios propostos na literatura, verificando-se resultados muito próximos dos apresentados nas resoluções destes exercícios. A seguir, o layout e o detalhamento da planilha são apresentados com dados retirados de um exercício disponível na obra de Cintra & Aoki (2010, p. 37 e 38) que apresenta uma estaca de 12 m com cota de base – 13 m e perfil geotécnico conforme disposto na Figura 12.

Tem-se, assim, a primeira etapa do processo de cálculo da estimativa de capacidade de suporte do sistema de fundação, onde os dados relacionados ao problema, tais como: (a) o diâmetro do fuste da estaca, (b) o tipo de solo e (c) o índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ ) devem ser inseridos na planilha. Com base no laudo de sondagem, as (d) camadas de solo devem ser distinguidas. Toda a planilha está programada para o cálculo da capacidade de suporte de fundações com estaca pré-moldada de concreto. As demais etapas dependem da exatidão dos dados informados nesta parte.

Figura 14: Planilha para previsão da capacidade de suporte de um elemento de fundação por estaca: dados necessários.

**Previsão da Capacidade de Suporte de um Elemento de Fundação por Estaca - Métodos Semiempíricos**

(d) ↓
(c) ↓
(b) ↓

Camada de solo	Cota [m]	N <sub>SPT</sub>	Tipo de Solo	Estaca
	0,00		Areia argilosa	
1	1,00	5	Areia argilosa	
1	2,00	2	Areia argilosa	
1	3,00	3	Areia argilosa	
1	4,00	2	Areia argilosa	
1	5,00	4	Areia argilosa	
2	6,00	4	Areia argilosa	
2	7,00	7	Areia argilosa	
2	8,00	9	Areia argilosa	
2	9,00	9	Areia argilosa	
2	10,00	7	Areia argilosa	
3	11,00	7	Areia argilosa	
3	12,00	9	Areia argilosa	
	13,00	14	Areia argilosa	
	14,00	16		
	15,00			
	16,00			
	17,00			

Tipo de Estaca	Φ Estaca [m]	Área Φ [m <sup>2</sup> ]	Perímetro Fuste [m]
Pré-moldada de Concreto Armado	0,33	0,085529859994	1,0367255756846

(a) ↑

**Memorial Descritivo**

Dados necessários    Parâmetros dos métodos    Aoki & Velloso (1975, Adap)    Décourt & Quaresma (1978, Adap)

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

As Figuras 13 e 14 mostram as tabelas de dados que são previamente estabelecidos por cada um dos métodos. Esta parte não necessita de alteração ou inserção de dados, pois traz os parâmetros técnicos sugeridos pelos autores de cada um dos métodos.

Figura 15: Planilha para previsão da capacidade de suporte de um elemento de fundação por estaca.

Dados necessários: parâmetros dos métodos (a).

MÉTODO AOKI & VELLOSO (1975) ADAPTADO - DADOS		
Coeficientes K e α - Aoki & Velloso		
Solo	K [kN/m <sup>2</sup> ]	α [%]
Areia	1000	1,4
Areia argilosa	600	3,0
Areia argilossiltosa	500	2,8
Areia siltoargilosa	700	2,4
Areia siltosa	800	2,0
Argila	200	6,0
Argila arenosa	350	2,4
Argila arenossiltosa	300	2,8
Argila siltoarenosa	330	3,0
Argila siltosa	220	4,0
Silte	400	3,0
Silte arenoargiloso	450	2,8
Silte arenoso	550	2,2
Silte argiloarenoso	250	3,0
Silte argiloso	230	3,4

Camada de solo
1 Máx
2 Máx
3 Máx
4 Máx
5 Máx
6 Máx
7 Máx
8 Máx
9 Máx
10 Máx
11 Máx
12 Máx
13 Máx
14 Máx
15 Máx

Fonte: Cintra & Aoki (2010)

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 16: Planilha para previsão da capacidade de suporte de um elemento de fundação por estaca.  
Dados necessários: parâmetros dos métodos (b).

MÉTODO DÉCOURT & QUARESMA (1978) ADAPTADO - DADOS									
<b>Solo</b>	<b>C (kN/m<sup>2</sup>)</b>						<b>Camada de</b>		
Areia	400						1 Máx		
Areia argilosa	400						2 Máx		
Areia argilossiltosa	400						3 Máx		
Areia siltoargiloso	400						4 Máx		
Areia siltosa	400						5 Máx		
Argila	120						6 Máx		
Argila arenosa	120						7 Máx		
Argila arenossiltosa	120						8 Máx		
Argila siltoarenosa	120						9 Máx		
Argila siltosa	120						10 Máx		
Silte	250						11 Máx		
Silte arenoargiloso	250						12 Máx		
Silte arenoso	250						13 Máx		
Silte argilarenoso	200						14 Máx		
Silte argiloso	200						15 Máx		
Fonte: Adaptado de Cintra & Aoki (2010)									
<b>Tipo de solo</b>	<b>Coefficiente <math>\alpha</math> em função do tipo de estaca</b>								
	<b>Pré-moldada</b>	<b>Metálica</b>	<b>Franki</b>	<b>Escavada em</b>	<b>Escavada (bento)</b>	<b>Hélice contínua</b>	<b>Raiz</b>	<b>Injetada sob alta</b>	
Argilas	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	0,30°	0,85°	1,00°	
Solos intermediários	1,00	1,00	1,00	0,60	0,60	0,30°	0,60°	1,00°	
Areias	1,00	1,00	1,00	0,50	0,50	0,30°	0,50°	1,00°	
Fonte: Cintra & Aoki (2010)									
<b>Tipo de solo</b>	<b>Coefficiente <math>\beta</math> em função do tipo de solo e do tipo de estaca</b>								
	<b>Pré-moldada</b>	<b>Metálica</b>	<b>Franki</b>	<b>Escavada em</b>	<b>Escavada (bento)</b>	<b>Hélice contínua</b>	<b>Raiz</b>	<b>Injetada sob alta</b>	
Argilas	1,00	1,00	1,00	0,80°	0,90°	1,00°	1,50°	3,00°	
Solos intermediários	1,00	1,00	1,00	0,65°	0,75°	1,00°	1,50°	3,00°	
Areias	1,00	1,00	1,00	0,50°	0,60°	1,00°	1,50°	3,00°	
Fonte: Cintra & Aoki (2010)									

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

As Figuras 16 e 17 mostram os layouts da planilha em que aparecem os resultados do método Aoki & Velloso (1975, Adaptado) e Décourt & Quaresma (1978, Adaptado).









Figura 19: Cálculo da capacidade de suporte de sistema de fundação pelo método Aoki & Velloso (1975, Adaptado).

Fatores de correção:

$$F_1 = 1 + \frac{0,33}{,80} = 1,41$$

$$F_2 = 2 \cdot 1,41 = 2,82$$

Resistência lateral:

$$A_L = \left( \frac{0,03 \cdot 600 \cdot \frac{16}{5}}{2,82} + \frac{0,03 \cdot 600 \cdot \frac{36}{5}}{2,82} + \frac{0,03 \cdot 600 \cdot \frac{16}{2}}{2,82} \right) \cdot \pi \cdot 0,33 \cdot 5 = 437 \text{ kN}$$

Resistência de base:

$$R_B = \frac{600 \cdot 14}{1,41} \cdot \frac{\pi \cdot 0,33^2}{4} = 510 \text{ kN}$$

Capacidade de suporte:

$$Q_{ult} = 437 + 510 = 947 \text{ kN}$$

Fonte: Cintra & Aoki (2010).

O mesmo exercício foi realizado manualmente, mas pelo método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado), cujo valor resultou em  $Q_{ult} = 800 \text{ kN}$ . O valor estimado pela rotina de cálculo foi de  $Q_{ult} = 800 \text{ kN}$ , também idêntico. Os cálculos do exemplo estão dispostos na Figura 20.

Figura 20: Cálculo da capacidade de suporte de sistema de fundação pelo método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado).

Resistência lateral:

$$R_L = 10 \left( \frac{5,5}{3} + 1 \right) \cdot 1,04 \cdot 12 = 353 \text{ kN}$$

Resistência de base:

$$R_B = 400 \cdot 13 \cdot 0,086 = 447 \text{ kN}$$

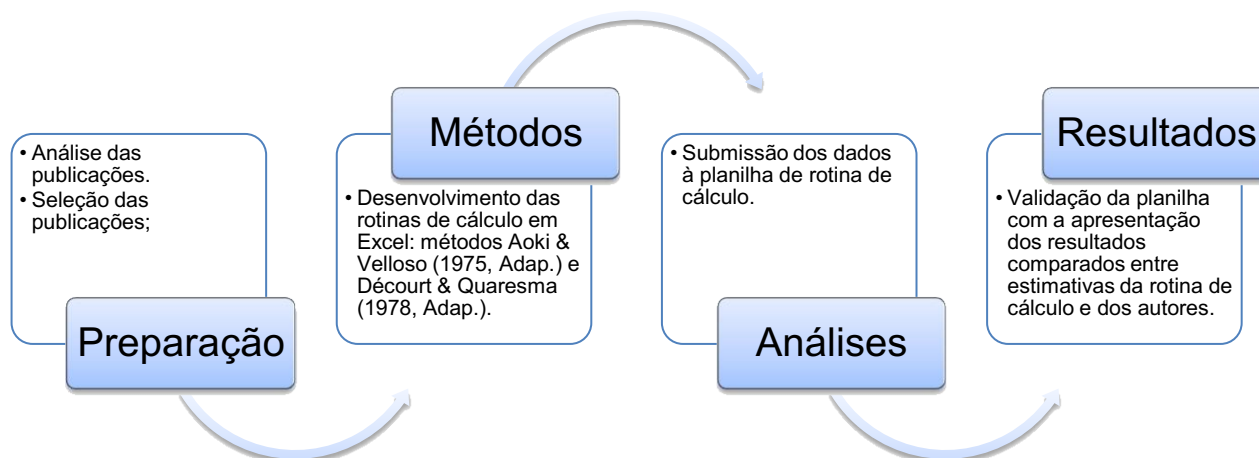
Capacidade de suporte:

$$Q_{ult} = 1 \cdot 347 + 1 \cdot 447 = 800 \text{ kN}$$

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A partir daí o processo de análise ao qual este estudo se propôs pôde ser realizado conforme fluxograma mostrado na Figura 21.

Figura 21: Fluxograma metodológico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Na etapa resultados foi possível verificar as discrepâncias e similaridades dos valores calculados com a rotina de cálculo das capacidades de suporte dos sistemas de fundações.

Algumas considerações devem ser destacadas para o melhor entendimento deste trabalho. Das publicações selecionadas, foram elencadas estacas que apresentam características diferentes já que, em um primeiro momento, isto não é relevante para o objetivo proposto, o qual visa analisar comparativamente a eficiência das previsões da rotina de cálculo desenvolvidas mediante os métodos semi-empíricos descritos e não a resistência em si do sistema de fundação. Têm-se, assim, estacas pré-moldadas de concreto com distintas seções transversais, com amplitude máxima longitudinal entre os fustes que chega a 25,1 m, e de seção transversal que atinge até 18 cm.

Apesar de, no sistema estaca-solo, o comprimento da estaca ter influência na sua resistência, eles não foram fator determinante na escolha dos casos analisados neste trabalho, isto é, não se buscou a uniformidade entre os elementos, mas a coerência dos métodos semi-empíricos no cálculo das capacidade de suporte do elemento de fundação.

## 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após a etapa de seleção dos trabalhos da literatura que compõem esta pesquisa, sucedeu-se as análises de dados e sua submissão à rotina de cálculo desenvolvida em Excel e, posteriormente, a comparação dos resultados obtidos com as respectivas pesquisas. A rotina de cálculo teve como fundamento a literatura reconhecida no meio acadêmico brasileiro, bem como as normas técnicas brasileiras. Vale destaque para a obra de Cintra e Aoki (2010) e para as normas ABNT NBR 12131:2006 e ABNT NBR 6122:2010, seguidas rigorosamente neste processo. A análise comparativa leva em consideração os dados fornecidos pelos autores e os resultados obtidos por meio da ferramenta desenvolvida.

A Tabela 6 traz estes dados e valores estimados que servem de parâmetros para a comparação, nela estão descritos cada caso utilizado com o número de estaca dado pelos próprios autores dos trabalhos técnicos.

Tabela 6: Dados obtidos e estimativas calculadas.

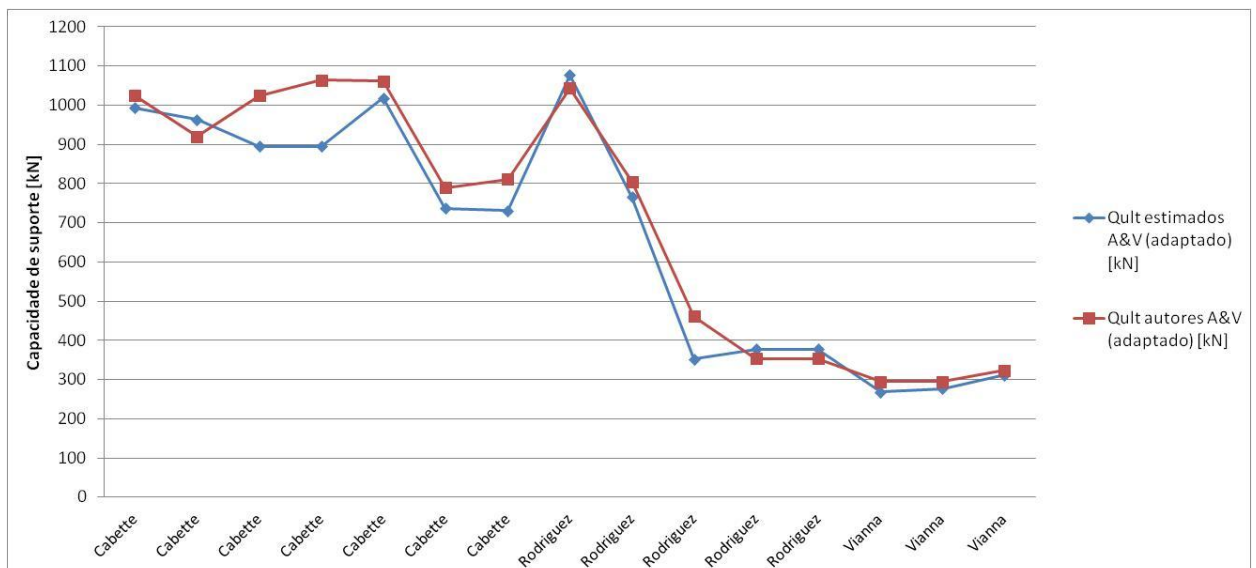
DADOS OBTIDOS E CALCULADOS							
Autor	Estaca	D [m]	L [m]	Q <sub>ult</sub> estimados		Q <sub>ult</sub> autores	
				Aoki & Velloso (adaptado) [kN]	Décourt & Quaresma (adaptado) [kN]	Aoki & Velloso (adaptado) [kN]	Décourt & Quaresma (adaptado) [kN]
Cabette	48-13	0,23	27,00	993	823	1024	868
Cabette	59A-13	0,23	26,00	963	767	920	845
Cabette	61-13	0,23	27,00	895	823	1024	868
Cabette	19-13	0,23	27,00	895	823	1064	868
Cabette	21-13	0,23	29,00	1018	884	1062	951
Cabette	9-14	0,23	26,00	737	660	790	682
Cabette	37-14	0,23	25,50	731	706	811	711
Rodriguez	1	0,30	7,00	1077	747	1044	827
Rodriguez	2	0,30	7,50	766	617	805	676
Rodriguez	3	0,30	3,90	352	291	461	308
Rodriguez	5	0,25	7,60	377	508	354	606
Rodriguez	6	0,25	7,60	377	508	354	606
Vianna	11	0,20	12,00	269	272	295	281
Vianna	21	0,25	11,50	277	289	295	317
Vianna	30	0,28	10,60	311	331	324	390

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Com o desenvolvimento da rotina de cálculo foi possível o aprofundamento nos métodos mediante uma visão mais detalhada de cada etapa de suas constituições, o que é possível perceber nas Figuras 17 e 18, apresentadas no tópico 4 (Metodologia de Pesquisa). Note-se que há um detalhamento de cada etapa de cálculo, sendo possível aferir valores de cada momento, desde o  $N_{SPT}$ , passando pelas resistências lateral e de base até chegar à resistência última, isto é, à estimativa de capacidade de suporte dos sistemas de fundações, a partir dos métodos semi-empíricos de Aoki & Velloso (1975, Adaptado) e Décourt & Quaresma (1978, Adaptado).

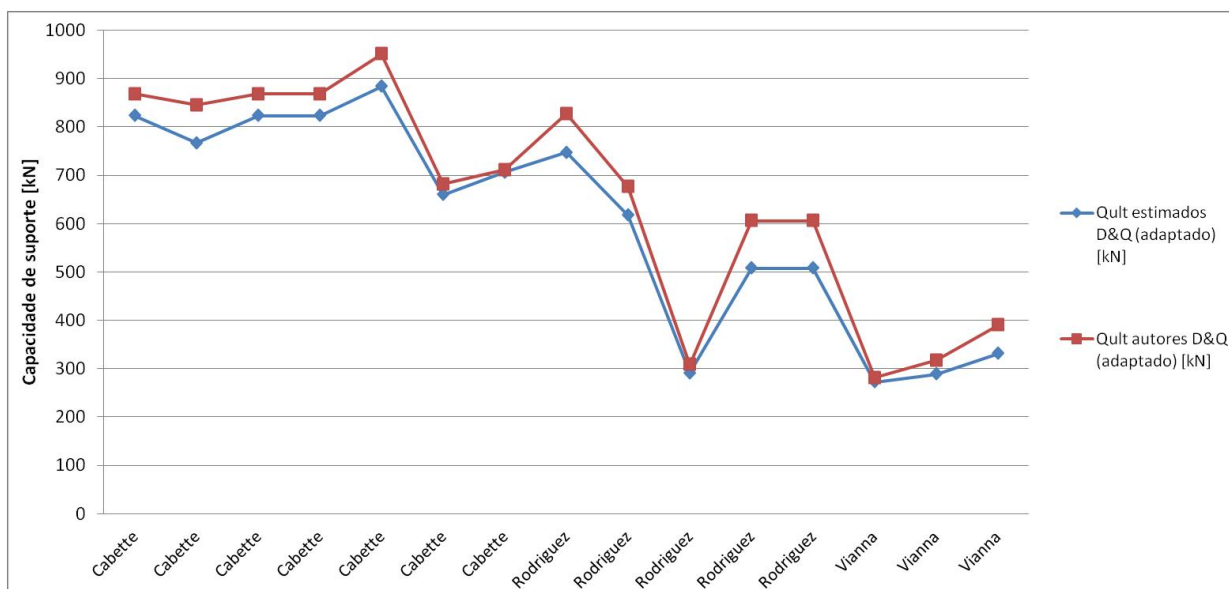
Os gráficos apresentados nas Figuras 22 e 23 refletem os dados da Tabela 6, mostrando as proximidades dos resultados estimados a partir de cada metodologia semi-empírica com os dados apresentados nos trabalhos analisados.

Figura 22: Comparação dos resultados estimados com os resultados apresentados pelos autores a partir do método Aoki & Velloso (1975, Adaptado).



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 23: Comparação dos resultados estimados com os resultados apresentados pelos autores a partir do método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado)



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

É possível perceber a manutenção de uma tendência da disposição dos valores estimados com os valores apresentados pelos autores nas duas metodologias, o que indica o bom funcionamento da rotina de cálculo elaborada. Também é perceptível que os trabalhos técnicos tendem a apresentar resultados mais otimistas quanto à capacidade de suporte, o que não invalida a planilha, mas abre margem para reflexão sobre as variáveis que compõem o sistema estaca-solo e a necessidade de constante aperfeiçoamento das metodologias.

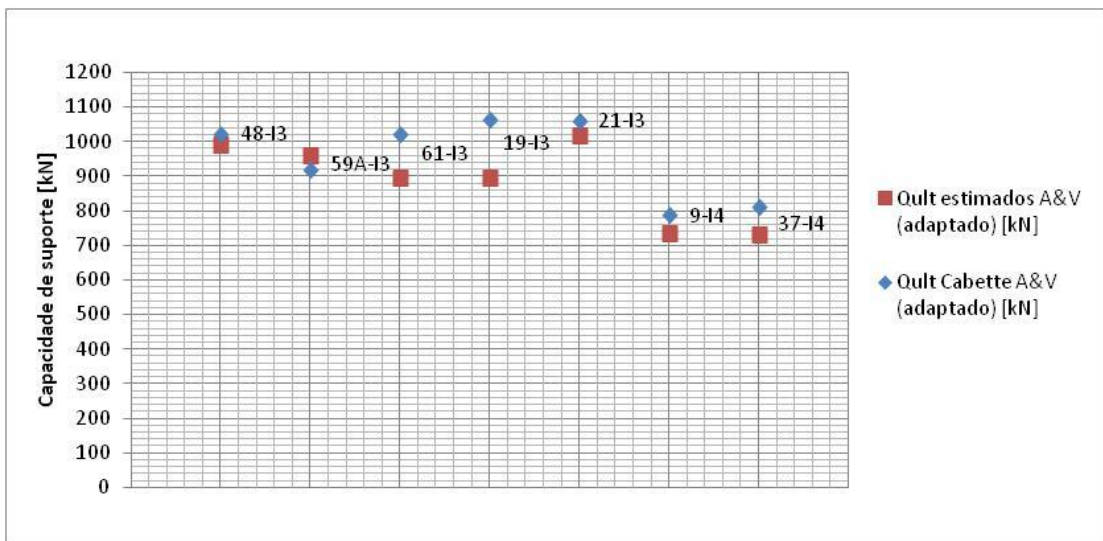
Variáveis tais como: composição do subsolo e sua mecânica nas várias regiões do país, qualidade da mão de obra na sondagem do subsolo e execução das fundações, precisão da estratigrafia, descrição do perfil geotécnico e mesmo, arredondamentos de cálculo, são fatores que contribuem para as pequenas diferenças nos resultados apresentados nas previsões. O nível de controle das empresas que realizaram as obras de fundações e que serviram de base fornecendo material para os respectivos autores dos trabalhos técnicos é, também, um fator desconhecido e que certamente influencia nos resultados.

A planilha desenvolvida, no entanto, mostra resultados, em geral, dentro da margem de erro (10%) aceitável, validando seus resultados neste campo bastante dinâmico como é o dos cálculos das capacidades de suporte dos sistemas de fundações.

## 5.1 RESULTADOS COMPARADOS A PARTIR DE CABETTE (2014)

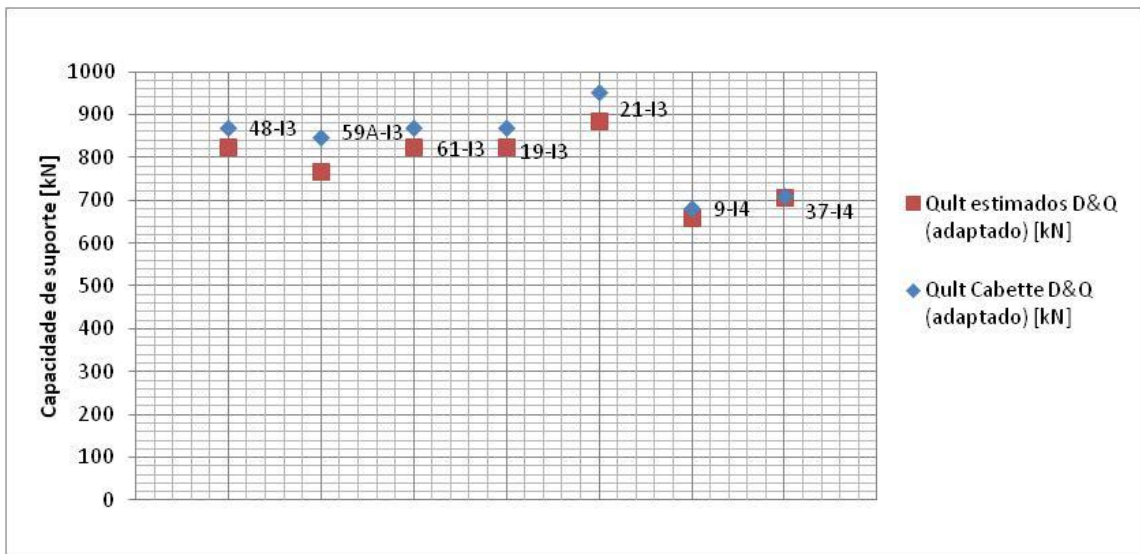
As Figuras 24 e 25 apresentam os resultados comparados entre as estimativas obtidas pela planilha de rotina de cálculo e os apresentados na pesquisa de Cabette (2014). As estimativas mostram grande proximidade com os resultados apresentados pelo autor. Pelo método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado), obteve-se 100% dos resultados estimados dentro do esperado. No caso de Aoki & Velloso (1975, Adaptado), ocorreram discrepâncias nos resultados das estacas 61-I3 (13%) e 19-I3 (16%).

Figura 24: Comparação dos resultados estimados com os resultados apresentados em Cabette (2014) a partir do método Aoki & Velloso (1975, Adaptado).



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 25: Comparação dos resultados estimados com os resultados apresentados em Cabette (2014) a partir do método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado).



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

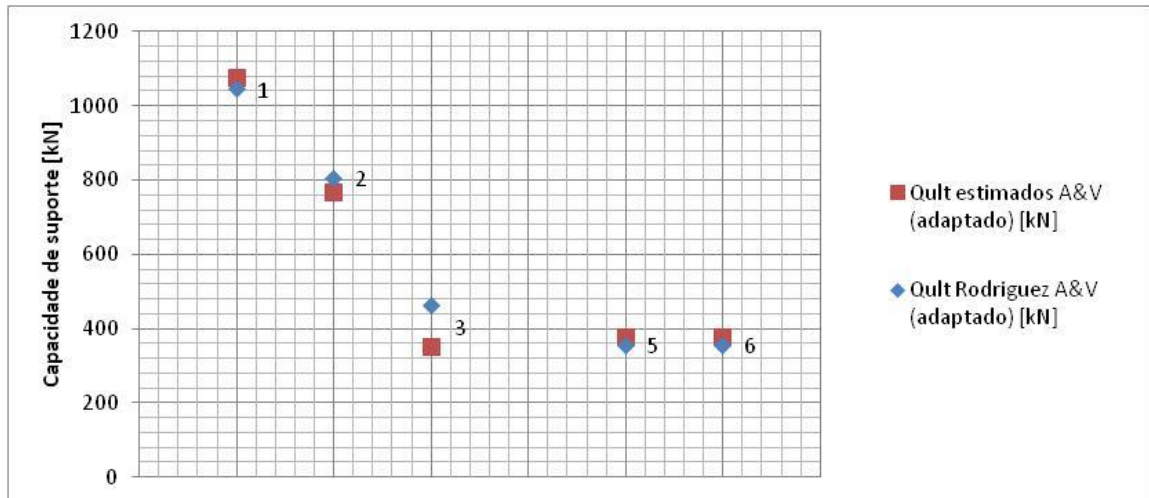
Cabe ressaltar que o trabalho de Cabette (2014) se dá a partir de dados produzidos por uma empresa de engenharia civil na construção de um conjunto habitacional. São centenas de estacas calculadas, das quais foram extraídas algumas para análise pormenorizada. Nesse sentido, não é possível saber o grau de controle que se tem neste ambiente de obra, informação também não abordada no trabalho. Entretanto, o autor aponta que, a partir das previsões das metodologias empregadas, entre 79% e 87% dos resultados obtidos são convergentes com os valores experimentais, o que mostra possíveis erros nos próprios cálculos da empresa, atenuando as discrepâncias de resultado entre a planilha de rotina de cálculo e os valores apresentados.

## **5.2 RESULTADOS COMPARADOS A PARTIR DE RODRIGUEZ (2015)**

As Figuras 26 e 27 apresentam os resultados comparados entre as estimativas obtidas pela planilha de rotina de cálculo e os apresentados na pesquisa de Rodriguez (2015). Pelo método Aoki & Velloso (1975, Adaptado) é possível observar que o sistema de fundação representado pela estaca 3 apresenta comportamento muito discrepante dos demais. O erro no valor estimado pela planilha e o apresentado pelo autor está na casa dos 24%, enquanto nas demais estacas o erro não ultrapassa 6%. Dado tal diferença, pode ser que tenha havido incongruência no processo de cálculo apresentado no trabalho técnico.

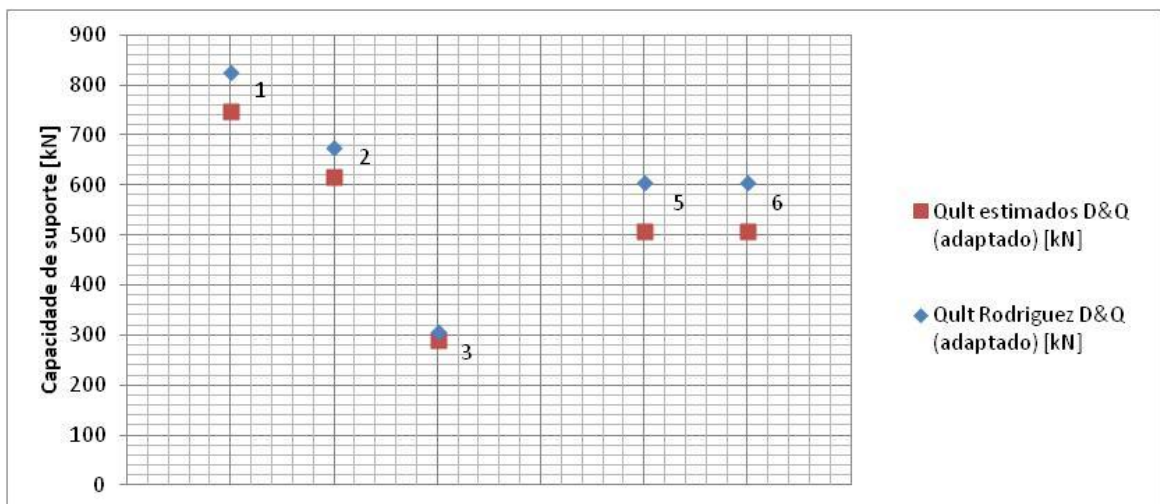
Os valores conferidos aos sistemas de fundação representados pelas estacas 5 e 6 pelo método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado), por sua vez, apresentam erro acima dos valores aceitáveis (16%), de maneira que os casos apresentados por Rodriguez (2015) com este método destoam bastante dos resultados apresentados nos demais autores. Ainda assim, a planilha de rotina de cálculo desenvolvida e testada com casos apresentados na literatura, apresentou-se eficiente no cálculo de 80% dos casos trazidos nesse trabalho.

Figura 26: Comparação dos resultados estimados com os resultados apresentados em Rodriguez (2015) a partir do método Aoki & Velloso (1975, Adaptado).



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 27: Comparação dos resultados estimados com os resultados apresentados em Rodriguez (2015) a partir do método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado).



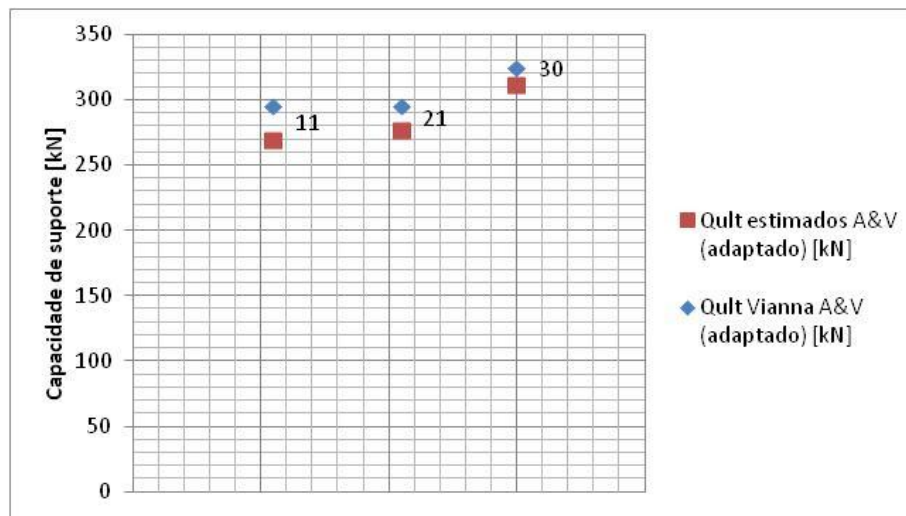
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

### 5.3 RESULTADOS COMPARADOS A PARTIR DE VIANNA (2000)

As Figuras 28 e 29 apresentam os resultados comparados entre as estimativas obtidas pela planilha de rotina de cálculo e os apresentados na pesquisa de Vianna (2000). Note-se que há proximidade dentro dos limites de erro pelo método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado), exceto no caso do sistema de fundação representado pela estaca 30, que apresenta erro de 15%. Pelo método Aoki & Velloso, os valores se apresentaram dentro do esperado em todos os casos, com ótimas convergências de resultados.

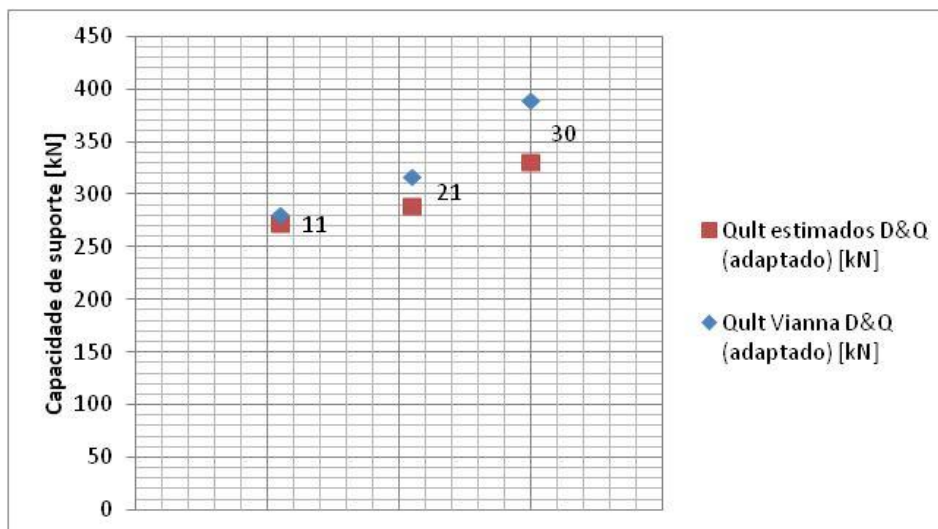


Figura 28: Comparação dos resultados estimados com os resultados apresentados em Vianna (2000) a partir do método Aoki & Velloso (1975, Adaptado).



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 29: Comparação dos resultados estimados com os resultados apresentados em Vianna (2000) a partir do método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado).



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

## **6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

### **6.1. CONCLUSÕES**

Este trabalho é resultado do desenvolvimento de uma planilha eletrônica de rotina de cálculo de capacidade de suporte de fundações por estaca pré-moldada utilizando duas metodologias semi-empíricas: Aoki & Velloso (1975, Adaptado) e Décourt & Quaresma (1978, Adaptado). Mediante o estudo destas metodologias e das normas técnicas referentes ao assunto, pôde-se chegar a uma ferramenta eficiente para a realização das previsões.

Instrumentalizado pela planilha e baseado nos dados apresentados em três trabalhos técnicos sobre o assunto, estes dados foram submetidos à rotina de cálculo, gerando resultados que foram analisados e considerados, de forma geral, apropriados por estarem em consonância com os resultados apresentados pelos autores.

A confluência dos resultados levou esta pesquisa ao seu objetivo maior, isto é, a validação da planilha de rotina de cálculo mediante a constatação de seu bom funcionamento. Há que se observar, entretanto, que alguns erros ao longo do percurso foram encontrados e merecem ser melhor analisados para se ter um melhor funcionamento deste instrumento.

### **6.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Com base na experiência da formulação e utilização da planilha de rotina de cálculo neste trabalho, algumas sugestões podem ser feitas para pesquisas futuras:

- Adicionar outros tipos de estacas disponíveis no mercado além da pré-moldada;
- Adicionar outras metodologias semi-empíricas à rotina de cálculo;
- Desenvolver modelo em que as cotas mínimas sejam inferiores a 1 m a fim de detalhar ainda mais os resultados.

## REFERÊNCIAS

AMANN, Kurt A. P. *Metodologia semiempírica unificada para a estimativa da capacidade de cargas de estacas*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12131: Estacas – Prova de carga estática – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6122: Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6484: Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2001.

CABETTE, Jean Felix. *Análise dos métodos semi-empíricos utilizados para a estimativa da capacidade de carga de estacas pré-fabricadas com base em resultados de ensaios de carregamento dinâmico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

CINTRA, José Carlos A; AOKI, Nelson. *Fundações por estacas: projeto geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MICROSOFT Office Excel 2007. [S. l.]: Microsoft Corporation, 1995. 1 CD.

RODRIGUEZ, Yan Carlos Chiu. *Avaliação preliminar da previsão da capacidade de carga e do recalque em estacas pré-moldadas de concreto em perfis de solos granulares*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Fortaleza – CE, 2015.

VELLOSO, Dirceu de Alencar; LOPES, Francisco de Rezende. *Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas*. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

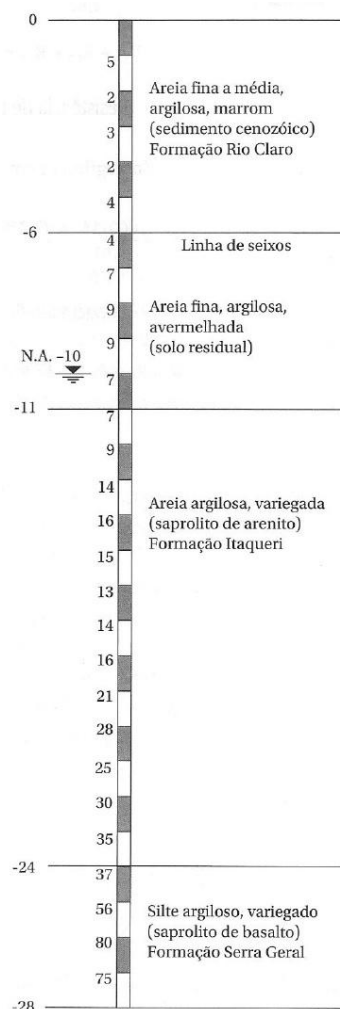
VIANNA, Ana Paula F. *Análise de provas de carga estática em estacas pré-moldadas cravadas na cidade de Curitiba e Região Metropolitana*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos – SP, 2000.

## APÊNDICE I

### MEMORIAL DESCRITIVO RELACIONADO COM A UTILIZAÇÃO DA PLANILHA ELETRÔNICA

Este memorial traz orientações ao usuário da planilha de rotina de cálculo de capacidade de suporte de sistemas de fundações acerca de suas funcionalidades e dados necessários para sua utilização. Seu funcionamento demanda a existência prévia de perfil geotécnico do subsolo obtido mediante sondagem SPT. De posse desta informação, seguem-se os passos para a obtenção da estimativa das capacidades de suporte pelos métodos semi-empíricos Aoki & Velloso (1975, Adaptado) e Décourt & Quaresma (1978, Adaptado).

#### 1. Perfil geotécnico obtido por meio de sondagem SPT



Fonte: Cintra & Aoki (2010).

#### 2. Dados necessários para funcionamento da planilha

2.1 Planilha "Dados necessários" (nesta planilha serão inseridos os dados obtidos no perfil geotécnico)

2.1.1 “N<sub>SPT</sub>”

2.1.1.1 Inserir os valores de N<sub>SPT</sub> (até a segunda camada de solo abaixo da cota de apoio da estaca)

Camada de solo	Cota [m]	N <sub>SPT</sub>	Tipo de Solo	Estaca
7	0,00			
8	1,00	5		
9	2,00	2		
10	3,00	3		
11	4,00	2		
12	5,00	4		
13	6,00	4		
14	7,00	7		
15	8,00	9		
16	9,00	9		
17	10,00	7		
18	11,00	7		
19	12,00	9		
20	13,00	14		
21	14,00	16		
22	15,00			
23	16,00			
24	17,00			

Tipo de Estaca	Φ Estaca [m]	Área Φ [m²]	Perímetro Fuste [m]
Pré-moldada de Concreto Armado	0,33	0,085529859994	1,0367255756846

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

2.1.2 “Tipo de Solo” (há uma lista de tipos de solo pré-programada em que o usuário poderá escolher o tipo de solo)

2.1.2.1 Selecionar o tipo de solo que mais se aproxima do solo descrito no perfil geotécnico

2.1.2.2 Inserir os tipos de solo até uma cota imediatamente posterior à cota de apoio da estaca

Camada de solo	Cota [m]	N <sub>SPT</sub>	Tipo de Solo	Estaca
7	0,00	0	Areia argilosa	
8	1,00	5	Areia argilosa	
9	2,00	2	Areia argilosa	
10	3,00	3	Areia argilosa	
11	4,00	2	Areia argilosa	
12	5,00	4	Areia argilosa	
13	6,00	4	Areia argilosa	
14	7,00	7	Areia argilosa	
15	8,00	9	Areia argilosa	
16	9,00	9	Areia argilosa	
17	10,00	7	Areia argilosa	
18	11,00	7	Areia argilosa	
19	12,00	9	Areia argilosa	
20	13,00	14	Areia argilosa	
21	14,00	16	Areia argilosa	
22	15,00			
23	16,00			
24	17,00			

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

### 2.1.3 “Camada de Solo”

2.1.3.1 Identificar cada camada de solo descrita no perfil geotécnico com um número específico e em ordem crescente (ver exemplo da figura abaixo)

Previsão da Capacidade de Suporte de um Elemento de Fundação por Estaca - Métodos Semiempíricos					
2.1.3	Camada de solo	Cota [m]	N <sub>SPT</sub>	Tipo de Solo	Estaca
7		0,00		Areia argilosa	█
8	1	1,00	5	Areia argilosa	
9	1	2,00	2	Areia argilosa	
10	1	3,00	3	Areia argilosa	
11	1	4,00	2	Areia argilosa	
12	1	5,00	4	Areia argilosa	
13	2	6,00	4	Areia argilosa	
14	2	7,00	7	Areia argilosa	
15	2	8,00	9	Areia argilosa	
16	2	9,00	9	Areia argilosa	
17	2	10,00	7	Areia argilosa	
18	3	11,00	7	Areia argilosa	
19	3	12,00	9	Areia argilosa	
20		13,00	14	Areia argilosa	
21		14,00	16		
22		15,00			
23		16,00			
24		17,00			
25		18,00			

Tipo de Estaca	Φ Estaca [m]	Área Φ [m <sup>2</sup> ]	Perímetro Fuste [m]
Pré-moldada de Concreto Armado	0,33	0,085529859994	1,0367255756846

**Memorial Descritivo**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

2.1.4 “Diâmetro da Estaca” (esta informação gerará, automaticamente, a área da seção transversal e o perímetro do fuste da estaca)

2.1.4.1 Inserir o diâmetro da estaca, em metros

Previsão da Capacidade de Suporte de um Elemento de Fundação por Estaca - Métodos Semiempíricos					
2.1.4	Camada de solo	Cota [m]	N <sub>SPT</sub>	Tipo de Solo	Estaca
7		0,00		Areia argilosa	█
8	1	1,00	5	Areia argilosa	
9	1	2,00	2	Areia argilosa	
10	1	3,00	3	Areia argilosa	
11	1	4,00	2	Areia argilosa	
12	1	5,00	4	Areia argilosa	
13	2	6,00	4	Areia argilosa	
14	2	7,00	7	Areia argilosa	
15	2	8,00	9	Areia argilosa	
16	2	9,00	9	Areia argilosa	
17	2	10,00	7	Areia argilosa	
18	3	11,00	7	Areia argilosa	
19	3	12,00	9	Areia argilosa	
20		13,00	14	Areia argilosa	
21		14,00	16		
22		15,00			
23		16,00			
24		17,00			
25		18,00			

Tipo de Estaca	Φ Estaca [m]	Área Φ [m <sup>2</sup> ]	Perímetro Fuste [m]
Pré-moldada de Concreto Armado	0,33	0,085529859994	1,0367255756846

**Memorial Descritivo**

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

## 2.2 Método Aoki & Velloso (1975, Adaptado)

2.2.1 Selecionar qualquer célula da tabela principal da planilha

2.2.2 Clicar no menu “Dados”; grupo “Estrutura de Tópicos”, item “Subtotal”

2.2.2

Camada de solo [maior valor]	Resistência Lateral (A <sub>L</sub> ) [kN]	Resistência da Base (R <sub>B</sub> ) [kN]	Capacidade de Suporte do Elemento de Fundação (Q <sub>ult</sub> ) [kN]
1 Máx	99	510	947
2 Máx	232		
3 Máx	106		

Camada de solo	Cota limite [m]	N <sub>SPT</sub> (estaca lateral)	N <sub>SPT</sub> (estaca base)	K [kN/m³]	α	ΔL	Fator Correção - Tipo de	Fator Correção - Tipo de	Tensão Resist. do Fuste (σ <sub>s</sub> ) [kN/m²]	Tensão Resist. da Base (σ <sub>b</sub> ) [kN/m²]	Resistência Lateral (A <sub>L</sub> ) [kN]	Resistência da Base (R <sub>B</sub> ) [kN]
	<=0,00	#DIV/0!	0	600	0,03	1	1,41	2,82	#DIV/0!	0,0	#DIV/0!	0
	<=1,00	5	5	600	0,03	1	1,41	2,82	31,9	2127,7	33	182
	<=2,00	4	2	600	0,03	2	1,41	2,82	25,5	851,1	53	73
	<=3,00	3	3	600	0,03	3	1,41	2,82	19,1	1276,6	60	109
	<=4,00	3	2	600	0,03	4	1,41	2,82	19,1	851,1	79	73
	<=5,00	3	4	600	0,03	5	1,41	2,82	19,1	1702,1	99	146
1 Máx												
	<=6,00	4	4	600	0,03	1	1,41	2,82	25,5	1702,1	26	146
	<=7,00	6	7	600	0,03	2	1,41	2,82	38,3	2378,7	79	255
	<=8,00	7	9	600	0,03	3	1,41	2,82	44,7	3829,8	139	320
	<=9,00	7	9	600	0,03	4	1,41	2,82	44,7	3829,8	185	329
	<=10,00	7	7	600	0,03	5	1,41	2,82	44,7	2978,7	232	255
2 Máx												
	<=11,00	7	7	600	0,03	1	1,41	2,82	44,7	2978,7	46	255
	<=12,00	8	9	600	0,03	2	1,41	2,82	51,1	3829,8	106	329
											106	
3 Máx												
	<=13,00	14	14	600	0,03	1	1,41	2,82	89,4	5367,4	33	510
	<=14,00	15	16	#N/D	#N/D	1	1,41	2,82	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

2.2.2.1 Clicar em “Remover todos” para limpar as operações da planilha

2.2.2.2 Selecionar “Camada de solo” da lista “a cada alteração em”

2.2.2.3 Selecionar “Máx” da lista “Usar função”

2.2.2.4 Selecionar “Resistência Lateral (R<sub>L</sub>)” da lista “adicionar subtotal a”

2.2.2.5 Deixar marcadas as opções “Substituir subtotais atuais” e “Resumir abaixo dos dados” e clicar em “OK”





Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

2.2.3 “Camada de Solo (maior valor)” (nesta seção será inserido o comando que gerará os maiores valores de resistência lateral de cada camada do solo)

2.2.3.1 Selecionar tantas opções “n Máx” quantas forem as camadas de solo

MÉTODO AOKI & VELLOSO (1975) ADAPTADO												
2.2.3		Camada de solo (maior valor)	Resistência Lateral (R <sub>L</sub> ) [kN]	Resistência da Base (R <sub>B</sub> ) [kN]	Capacidade de Suporte do Elemento de Fundação (Q <sub>ult</sub> ) [kN]							
2.2.3.1		1 Máx	99	510	947							
		2 Máx	232									
		3 Máx	106									
Camada de solo	Cota limite [m]	N <sub>SPT</sub> (médio_lateral)	N <sub>SPT</sub> (médio_base)	K [kN/m <sup>2</sup> ]	α	ΔL	Fator Correção - Tipo de Estaca (F1)	Fator Correção - Tipo de Estaca (F2)	Tensão Resist. do Fuste (r <sub>f</sub> ) [kN/m <sup>2</sup> ]	Tensão Resist. da Base (r <sub>b</sub> ) [kN/m <sup>2</sup> ]	Resistência Lateral (R <sub>L</sub> ) [kN]	Resistência da Base (R <sub>B</sub> ) [kN]
	<=0,00	#DIV/0!	0	600	0,03	1	1,41	2,82	#DIV/0!	0,0	#DIV/0!	0
1	<=1,00	5	5	600	0,03	1	1,41	2,82	31,9	2127,7	33	182
1	<=2,00	4	2	600	0,03	2	1,41	2,82	25,5	851,1	53	73
1	<=3,00	3	3	600	0,03	3	1,41	2,82	19,1	1276,6	60	109
1	<=4,00	3	2	600	0,03	4	1,41	2,82	19,1	851,1	79	73
1	<=5,00	3	4	600	0,03	5	1,41	2,82	19,1	1702,1	99	146
1 Máx											99	
2	<=6,00	4	4	600	0,03	1	1,41	2,82	25,5	1702,1	26	146
2	<=7,00	6	7	600	0,03	2	1,41	2,82	38,3	2978,7	79	255

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).



2.3 Método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado)

2.3.1 Os resultados serão calculados automaticamente a partir da inserção dos dados na planilha “Dados necessários”

2.3.2 A utilização do comando “Subtotal” na planilha do método Décourt & Quaresma (1978, Adaptado) é facultativa, servindo apenas para verificar os maiores valores de resistência lateral de cada camada

MÉTODOS DE CÁLCULO DE RESISTÊNCIA LATERAL DE FUNDAÇÕES													
MÉTODO DÉCOURT & QUARESMA (1978) ADAPTADO													
3	Camada de solo		Resistência Lateral (R <sub>L</sub> ) [kN]		Resistência da Base (R <sub>B</sub> ) [kN]		Capacidade de Suporte do Elemento de Fundação (Q <sub>u</sub> ) [kN]						
4	1 Máx		#N/D		445		800						
5	2 Máx		#N/D										
6	3 Máx		#N/D										
7			0,0000										
8			0,0000										
9			0,0000										
10			0,0000										
11	Camada de solo	Cota limite [m]	N <sub>SPT</sub> (méd. lateral)	N <sub>SPT</sub> (méd. base)	N <sub>SPT</sub> (efetiva lateral)	C [kN/m <sup>2</sup> ]	α	β	Tensão Resist. do Fuste (r <sub>f</sub> ) [kN/m <sup>2</sup> ]	Tensão Resist. da Base (r <sub>B</sub> ) [kN/m <sup>2</sup> ]	Resistência Lateral (R <sub>L</sub> ) [kN]	Resistência da Base (R <sub>B</sub> ) [kN]	Capacidade de Suporte do Elemento de Fundação
13	0	<=0,00							0,0	0,0	0	0	#VALOR!
14	1	<=1,00	5,00	3,33	5,00	400	1,00	1,00	26,7	1333,3	55	114	114
15	1	<=2,00	4,00	2,33	3,00	400	1,00	1,00	23,3	933,3	72	80	135
16	1	<=3,00	3,67	3,00	3,00	400	1,00	1,00	22,2	1200,0	92	103	175
17	1	<=4,00	3,50	3,33	3,00	400	1,00	1,00	21,7	1333,3	112	114	206
18	1	<=5,00	3,60	5,00	4,00	400	1,00	1,00	22,0	2000,0	137	171	283
19	2	<=6,00	3,67	6,67	4,00	400	1,00	1,00	22,2	2666,7	161	228	365
20	2	<=7,00	4,14	8,33	7,00	400	1,00	1,00	23,8	3333,3	197	285	446
21	2	<=8,00	4,75	8,33	9,00	400	1,00	1,00	25,8	3333,3	241	285	482
22	2	<=9,00	5,22	7,67	9,00	400	1,00	1,00	27,4	3066,7	284	262	503
23	2	<=10,00	5,40	7,67	7,00	400	1,00	1,00	28,0	3066,7	319	262	546
24	3	<=11,00	5,55	10,00	7,00	400	1,00	1,00	28,5	4000,0	355	342	661
25	3	<=12,00	5,83	13,00	9,00	400	1,00	1,00	29,4	5200,0	396	445	800
26	0	<=13,00	6,46		14,00				0,0	0,0	0	0	#VALOR!
27	0	<=14,00	7,07		15,00				0,0	0,0	0	0	#VALOR!

2.3

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).