



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CAMPUS ALTO PARAÓPEBA

CAIO ARAUJO MARINHO

**ANÁLISE DE PROVA DE CARGA ESTÁTICA COM CÉLULA
HIDRODINÂMICA BIDIRECIONAL-ARCOS X MÉTODOS SEMI-
EMPÍRICOS DE ESTIMATIVA DE CARGA DE RUPTURA**

OURO BRANCO - MG

AGOSTO – 2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CAMPUS ALTO PARAÓPEBA

CAIO ARAUJO MARINHO

**ANÁLISE DE PROVA DE CARGA ESTÁTICA COM CÉLULA
HIDRODINÂMICA BIDIRECIONAL-ARCOS X MÉTODOS SEMI-
EMPÍRICOS DE ESTIMATIVA DE CARGA DE RUPTURA**

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

Orientador: Leandro Neves Duarte

OURO BRANCO - MG

AGOSTO – 2018

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

M337a Marinho, Caio Araujo
Análise de prova de carga estática com célula hidrodinâmica bidirecional-arcos x métodos semi-empíricos de estimativa de carga de ruptura / Caio Araujo Marinho ; orientador Leandro Neves Duarte; coorientador Tales Moreira de Oliveira. -- Ouro Branco, 2018.
28 p.

Trabalho de Conclusão (Graduação - Engenharia Civil) --
Universidade Federal de São João del-Rei, 2018.

1. Célula Expansiva Hidrodinâmica Bidirecional-Arcos. 2. Capacidade de Carga. 3. Métodos Semi-Empíricos. 4. Prova de carga Bidirecional. I. Duarte, Leandro Neves , orient.
II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

Título: ANÁLISE DE PROVA DE CARGA ESTÁTICA COM CÉLULA HIDRODINÂMICA BIDIRECIONAL-ARCOS X MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS DE ESTIMATIVA DE CARGA DE RUPTURA.

Autores: Caio Araujo Marinho

Aprovado como parte das exigências para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof. Leandro Neves Duarte – UFSJ
(Orientador)

Prof. Tales Moreira de Oliveira – UFSJ
(Coorientador)

Prof. Douglas Henrique Santos Souza – UFSJ
(Avaliador)

Ouro Branco-MG, 07 de Agosto de 2018.

RESUMO

RESUMO: O presente trabalho tem por objetivo apresentar uma análise comparativa entre os principais métodos semi-empíricos de estimativa de carga de ruptura com os resultados obtidos em uma prova de carga bidirecional. A fundação estudada é do tipo estaca escavada, e os ensaios realizados para as referidas estimativas de carga de ruptura foram o ensaio pressiométrico de Ménard (PMT) e o ensaio de sondagem de simples reconhecimento (SPT). Após o processamento dos dados, avaliou-se as cargas de ruptura obtidas pelos métodos semi-empíricos e comparou-se com os resultados obtidos através da curva ajustada da prova de carga bidirecional. Os resultados obtidos nos métodos semi-empíricos, mostraram uma variabilidade, alternando entre 49,5% a 100,9%, quando comparados com o valor obtido pelo critério de carga de ruptura vinculado a prova de carga, sugerido pela NBR 6122.

PALAVRAS-CHAVE: Célula Expansiva Hidrodinâmica Bidirecional-Arcos, Capacidade de Carga, Métodos Semi-Empíricos, Prova de Carga Bidirecional.

ABSTRACT

The present work has the objective of presenting a comparative analysis between the main semi-empirical methods of estimation of geotechnical bearing capacity with the results obtained in a bidirectional load test. The foundation studied is the excavated pile type, and the tests performed for bearing capacity were the Ménard pressiometric test (PMT) and the standard penetration test (SPT). After the data were processed, the burst loads obtained by the semi-empirical methods were evaluated and compared with the bearing capacity through the bidirectional load test curve. The results obtained in the semi-empirical methods showed a variability, ranging from 49.5% to 100.9%, when compared to the value obtained by the criterion of load of rupture linked to the load test, suggested by NBR 6122.

KEYWORDS: Hydrodynamic Bidirectional Expansion Cell – Arcos, Bearing Capacity, Semi-empirical methods, Bidirectional Load Test

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Obtenção do fator de capacidade de carga (apud MÉNARD e GAMBIM, 1963)	14
Figura 2. Obtenção do fator de capacidade de carga (apud BUSTAMANTE e GIANESELLI, 1981).	15
Figura 3. Gráfico para obtenção do atrito lateral máximo (apud MÉNARD, 1963). ...	17
Figura 4. Gráfico para obtenção do atrito lateral máximo (apud BAGUELIN et al. 1978).	18
Figura 5. Gráfico para a obtenção do atrito lateral unitário (apud BUSTAMANTE e GIANESELLI, 1981).	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Categoria de solos para determinação de K_P (apud MÉNARD e GAMBIM, 1963).....	14
Tabela 2. Categoria de solos para determinação de K_P (apud BUSTAMANTE e GIANESELLI, 1981).	15
Tabela 3. Escolha da curva para determinação do atrito lateral unitário (apud BUSTAMANTE e GIANESELLI, 1981).....	19
Tabela 4. Fatores de correção F_1 e F_2 (VELLOSO e Lopes, 2010)	21
Tabela 5. Parâmetro K e α_{Aoki} (VELLOSO e LOPES, 2010)	21
Tabela 6. Fatores de correção F_1 e F_2 (MONTEIRO, 1997)	22
Tabela 7. Parâmetro K e $\alpha_{Monteiro}$ (MONTEIRO, 1997).....	22
Tabela 8. Parâmetro K (DÉCOURT, 1978)	23
Tabela 9. Fator α_{Dec} em função do tipo de estaca e solo	23
Tabela 10. Fator β_{Dec} em função do tipo de estaca e solo.....	23
Tabela 11. Valores dos parâmetros α e β (TEIXEIRA, 1996).....	24
Tabela 12. Valores aproximados de a , b , a' e b' (VELLOSO, 1981)	25

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Considerações Gerais	11
1.2	Objetivo Geral e Específicos	12
1.3	Organização do Trabalho	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	Capacidade de Carga	11
2.2	Métodos Semi-Empíricos para Estimativa de Capacidade de Carga	12
2.2.1	Métodos fundamentados no PMT – Ensaio pressiométrico de Ménard.	13
2.2.2	Métodos fundamentados no SPT– Sondagem de simples reconhecimento de solo 20	
2.3	Prova de Carga	25
2.4	Prova de Carga Bidirecional.....	26
3	ARTIGO	11
4	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O estudo geotécnico de um elemento de fundação necessita de um rigor na execução e no dimensionamento, uma vez que ambos fatores são essenciais para o seu comportamento. Por influenciar diretamente na qualidade da obra, o controle da qualidade do processo executivo de uma obra é de fundamental assegurar uma perfeita e segura transmissão das cargas ao elemento de fundação (CUNHA *et al*, 2002).

Um recurso utilizado tanto para controle da qualidade da execução da fundações, quanto para a verificação da capacidade de carga do sistema solo – estaca (SCHULZE, 2013). O ensaio visa, através de aplicações controladas de carga, em determinado intervalo de tempo, obter o deslocamento do elemento de fundação referente a carga aplicada.

Assim sendo, a realização de provas de carga estática é de fundamental importância para o desenvolvimento de projetos de fundação, sendo o mais preciso e confiável método para estabelecer cargas de trabalho por se aproximar das condições em que a fundação será submetida (HACHICH *et al.*, 1998).

Como alternativa à prova de carga estática convencional, que necessita de um sistema de reação externo, oneroso em custo e energia, o ensaio de prova de carga estática com célula expansiva hidrodinâmica bidirecional Arcos, proposto pelo Engenheiro Pedro Elísio Chaves A. F. da Silva e divulgado em Da Silva (1983) vem sendo adotado desde a década de 80 no Brasil. Na prova de carga Bidirecional, a aplicação de carga se dá pela expansão de uma célula de sacrifício hidrodinâmica posicionada ao longo da estaca, que ao ser acionada, solicitará o fuste superior à célula com uma tensão que reagirá contra a parte inferior da estaca, eliminando a necessidade de complexos sistemas de reação externo (DA SILVA, 1983).

1.2 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

Este trabalho tem como objetivo geral apresentar uma análise comparativa entre a capacidade de carga geotécnica para estaca escavada, tipo trado mecânico, obtida através de métodos semi-empíricos e prova de carga bidirecional.

Os objetivos específicos são:

- i. Avaliar os resultados obtidos para capacidade de carga geotécnica por métodos semi-empíricos via ensaio PMT e SPT.
- ii. Avaliar o gráfico carga x deslocamento da curva ajustada obtida pela prova de carga bidirecional.
- iii. Comparar e analisar os resultados supracitados.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se dividido em três partes, da seguinte forma:

No capítulo 1, faz-se uma breve introdução à temática discutida neste trabalho, referindo-se também aos objetivos gerais e específicos.

No capítulo 2, tem-se uma breve revisão da literatura. Apresenta-se os conceitos de capacidade de carga. Lista-se os métodos semi-empíricos de estimativa de carga para os ensaios PMT e SPT. Aborda-se de forma sucinta sobre provas de cargas estáticas, tendo um enfoque em provas de carga bidirecionais.

O capítulo 3 dedica-se a apresentação do artigo, onde é apresentada de forma sucinta uma introdução, os materiais e métodos utilizados para desenvolvimento do trabalho e os resultados para este estudo.

Finalmente, tem-se as referências bibliográficas, as quais, possibilitaram a realização do presente trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CAPACIDADE DE CARGA

Uma estaca submetida a um carregamento vertical resistirá a essa solicitação pelo somatório da resistência de cisalhamento gerado ao longo de seu fuste e por tensões normais à ponta da estaca (DÉCOURT, 1996).

Na maioria das situações práticas, o peso da estaca pode ser desprezível, uma vez que o mesmo apresenta níveis de tensões muito inferiores a magnitude das forças aplicadas às fundações. Assim, a partir do equilíbrio entre a resistência oferecida pela interação solo - estaca com a carga aplicada, desprezando-se o peso próprio da estaca, pode-se definir a capacidade de carga como a soma das cargas máximas que podem ser suportadas pelo solo, sem a ruptura do mesmo, pelo somatório do atrito atrito lateral gerado ao longo do fuste e pela tensão normal ocasionada pela ponta (HACHICH *et. al.*, 1998)

$$Q_u = Q_L + Q_P = q_L \cdot A_L + q_P \cdot A_P \quad (1)$$

Em que:

Q_u = capacidade de carga da estaca;

Q_L = carga máxima suportada por atrito lateral;

Q_P = carga máxima suportada pela ponta da estaca;

q_L = tensão de cisalhamento limite ao longo do fuste da estaca;

A_L = área lateral da estaca;

q_P = tensão normal limite na base da estaca;

A_P = área da base da estaca.

Segundo Poulos e Davis (1980), a equação anterior assume, implicitamente, que o atrito lateral e resistência de ponta não são interdependentes. Mesmo não sendo uma afirmação estritamente correta, é amplamente difundida e usada para estacas usuais e propósitos práticos.

É necessário o entendimento do conceito de ruptura para um melhor entendimento dos resultados obtidos para capacidade de carga do sistema solo – estaca. Dois tipos de ruptura são definidos na bibliografia técnica: ruptura física e ruptura convencional. Segundo Décourt (1996), a ruptura física de um sistema solo – estaca é o ponto de rigidez nula, isto é, a relação entre a carga aplicada em uma estaca e o recalque produzido é uma resultante nula. Já a ruptura convencional é definida como a carga correspondente ao deslocamento igual a 30% do diâmetro da estaca no caso de ser escavada e solo granular e 10% do diâmetro para estacas escavadas em argila (DÉCOURT, 1998).

Segundo Scallet (2011), várias fórmulas teóricas para estimativa de capacidade de carga desenvolvidas na mecânica dos solos são encontradas na literatura. Porém, devido a grande limitação, aliado a confiabilidade dos resultados, diversos autores vêm criticando essa forma de estimativa de capacidade carga e sugerindo os métodos semi-empíricos, que são baseados em correlações de resultados de ensaio *in situ*.

2.2 MÉTODOS SEMI-EMPÍRICOS PARA ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE CARGA

De acordo com Amann (2010), os métodos semi-empíricos são aqueles que complementam as fórmulas teóricas com o estabelecimento das tensões limites máximas de atrito lateral e de ponta, que são resultados da análise e correlação dos valores obtidos nos ensaios *in situ*.

Mesmo existindo vários métodos semi-empíricos para estimativa da capacidade de carga para um sistema solo – estaca, incertezas devido a particularidade de cada tipo de solo ainda influenciam os resultados obtidos (DAS, 2007).

Segundo Décourt (1998), pode-se avaliar a capacidade de carga de uma estaca através de métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos utilizam correlações empíricas ou semi-empíricas com ensaios *in situ* para determinar os valores de resistência gerada pelo atrito lateral e pela ponta da estaca. Já os métodos indiretos fazem uso de ensaios laboratoriais e *in situ* para obter características de resistência ao cisalhamento e de rigidez do solo, que posteriormente, são utilizadas no cálculo da

capacidade de carga do sistema solo – estaca, através de fórmulas teóricas ou semi-empíricas.

A seguir são apresentados métodos semi-empíricos fundamentados em ensaio de campo: PMT e SPT.

2.2.1 Métodos fundamentados no PMT – Ensaio pressiométrico de Ménard

Segundo Araujo (2001), os métodos para determinação da capacidade de carga e estimativa de recalque para fundação que utilizam os resultados de ensaio pressiométrico, foram desenvolvidos por Ménard na França. Para tais métodos, os resultados dos ensaios pressiométricos são usados de maneira similar aos métodos que utilizam os resultados dos ensaios SPT proposta por Terzaghi e Peck.

A capacidade de carga de uma fundação profunda deve-se ao somatório das parcelas correspondentes à resistência do atrito lateral e de ponta.

i. Capacidade de carga da ponta

A capacidade de carga da ponta (Q_P) de uma fundação com ponta fechada é usualmente dada pela equação:

$$Q_P = A_P \cdot q_{m\acute{a}x.} = A_P \cdot (K_P \cdot l_{e^*} + \sigma_v) \quad (3)$$

Em que:

A_P = área da base (ponta) da estaca;

l_{e^*} = pressão limite líquida equivalente;

σ_v = tensão vertical total na cota da base da estaca;

K_P = fator de capacidade de carga.

O fator da capacidade de carga K_P é função do tipo de solo, tipo de fundação e profundidade de embutimento.

Como o fator de capacidade de carga é influenciado por uma gama de variáveis, curvas para a obtenção do parâmetro K_P têm sido calculadas para cada tipo de solo, considerando o tipo de fundação e a profundidade de embutimento.

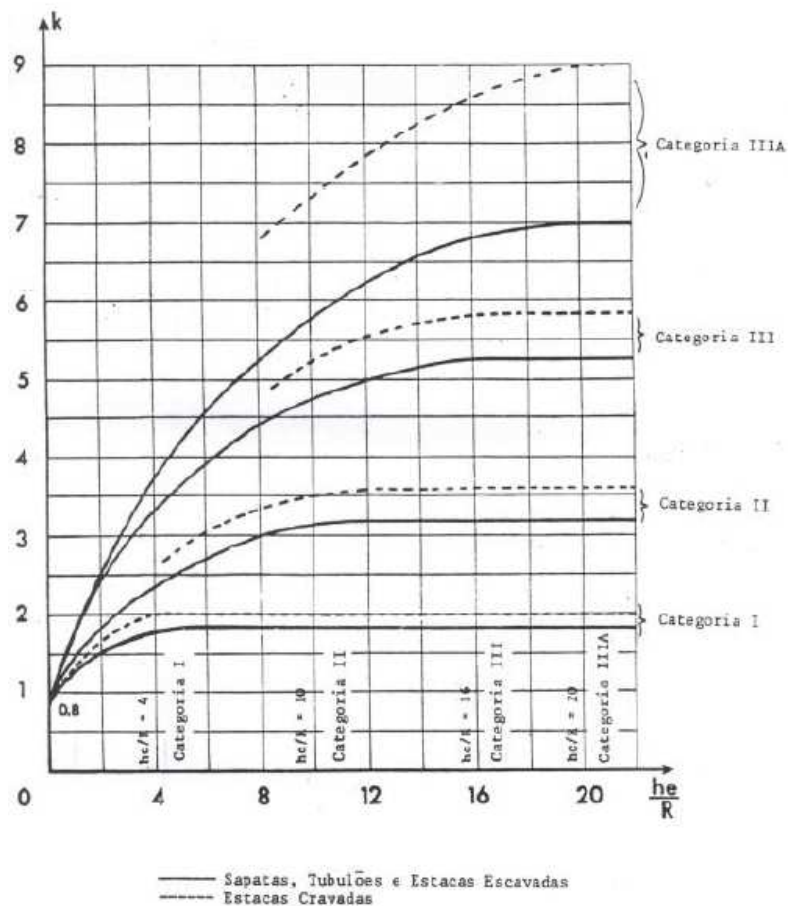
Na Tabela 2 estão dispostas as categorias de solo necessária para obtenção do fato K_P e a Figura 4 está representado a curva proposta por Ménard e Gambim para obtenção do parâmetro K_P .

Tabela 1. Categoria de solos para determinação de K_P (apud MÉNARD e GAMBIM, 1963).

Tipo de solo	Varição da pressão limite (kPa)	Categoria do solo
Argila Silte	0-1200	I
Argila rija ou marga Silte compactado	1200-3000	II
Areia compressível Rocha branda ou alterada	400-800 1000-3000	III
Areia e pedregulho Rocha	1000-2000 4000-10000	III
Areia muito compactada e pedregulho	3000-6000	III(A/IV)

Fonte: CLARKE (1995).

Figura 1. Obtenção do fator de capacidade de carga (apud MÉNARD e GAMBIM, 1963) .



Fonte: DICKRAN (1986).

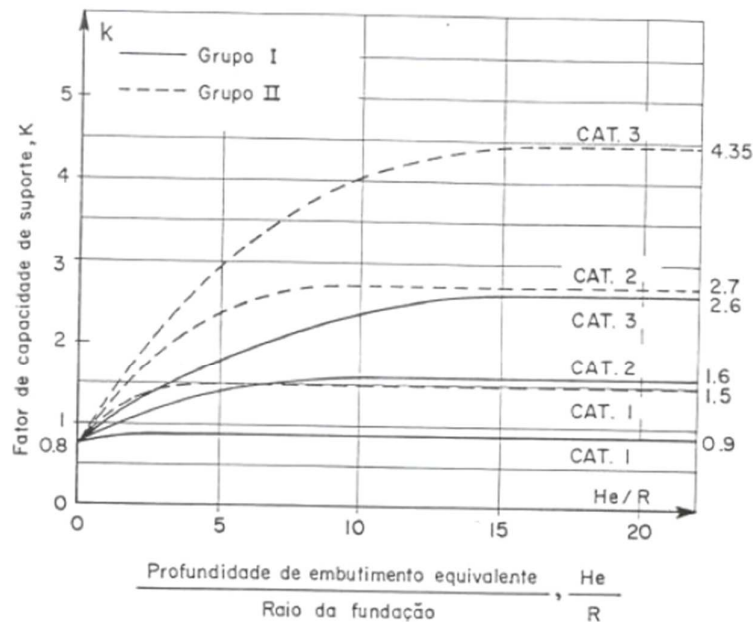
Já na Tabela 3 estão representadas as categorias de solo necessária para obtenção do fato K_P e a Figura 5 mostra a curva proposta por Bustamante e Gianceselli (1981) para obtenção do parâmetro K_P .

Tabela 2. Categoria de solos para determinação de K_P (apud BUSTAMANTE e GIANESELLI, 1981).

Tipo de solo	Varição da pressão limite (kPa)	Categoria do solo
Argila mole	0-700	I
Silte e calcário mole	0-800	
Areia siltosa ou argila fôfa	0-700	
Areia mediamente densa e pedregulho	1000-2000	II
Argila e silte compacto	1200-3000	
Calcário argiloso	1500-4000	
Calcário alterado	1000-2500	
Calcário alterado	2500-4000	
Calcário fragmentado	> 3000	
Calcário argiloso muito compacto	> 4500	III
Areia densa a muito densa e pedregulho	> 2500	
Rocha fragmentada	> 4500	

Fonte: TOLEDO FILHO (1986).

Figura 2. Obtenção do fator de capacidade de carga (apud BUSTAMANTE e GIANESELLI, 1981).



Grupo I - Estacas escavadas
 Grupo II - Estacas cravadas

Fonte: TOLEDO FILHO (1986).

A pressão limite líquida equivalente (p_{le}^*) é obtido por meio de ensaios pressiométricos executados dentro de uma zona de $1,5 B$ abaixo e acima da base da estaca, sendo B o diâmetro da base da estaca, sendo calculado pela equação:

$$p_{le}^* = [(p_1^*)_1 \cdot (p_1^*)_2 \cdot (p_1^*)_n]^{(1/n)} \quad (4)$$

Em que:

p_{le}^* = média geométrica das diferenças entre a pressão limite e a pressão inicial ($p_l - p_0$) de n ensaios realizados dentro dessa zona correspondente a $1,5 B$

A profundidade de embutimento (H_e) é calculada de pela expressão:

$$H_e = [1 / (p_l - \sigma_{h0})_e] \cdot \sum (p_l - \sigma_{h0}) \cdot Z_L \quad (5)$$

Em que:

Z_L = espessura das camadas onde foram realizados os ensaios.

$(P_l - \sigma_{h0})$ = valores de pressão limite líquida obtidas em diversas profundidades.

ii. Capacidade de carga do atrito lateral

A parcela resistente do atrito lateral (Q_f) de uma fundação profunda é função do tipo de solo, método de instalação e material de confecção da estaca. Q_f pode ser calculada pela equação:

$$Q_f = \sum [f_{máx.} \cdot \pi \cdot B \cdot \Delta Z_i] \quad (6)$$

Em que:

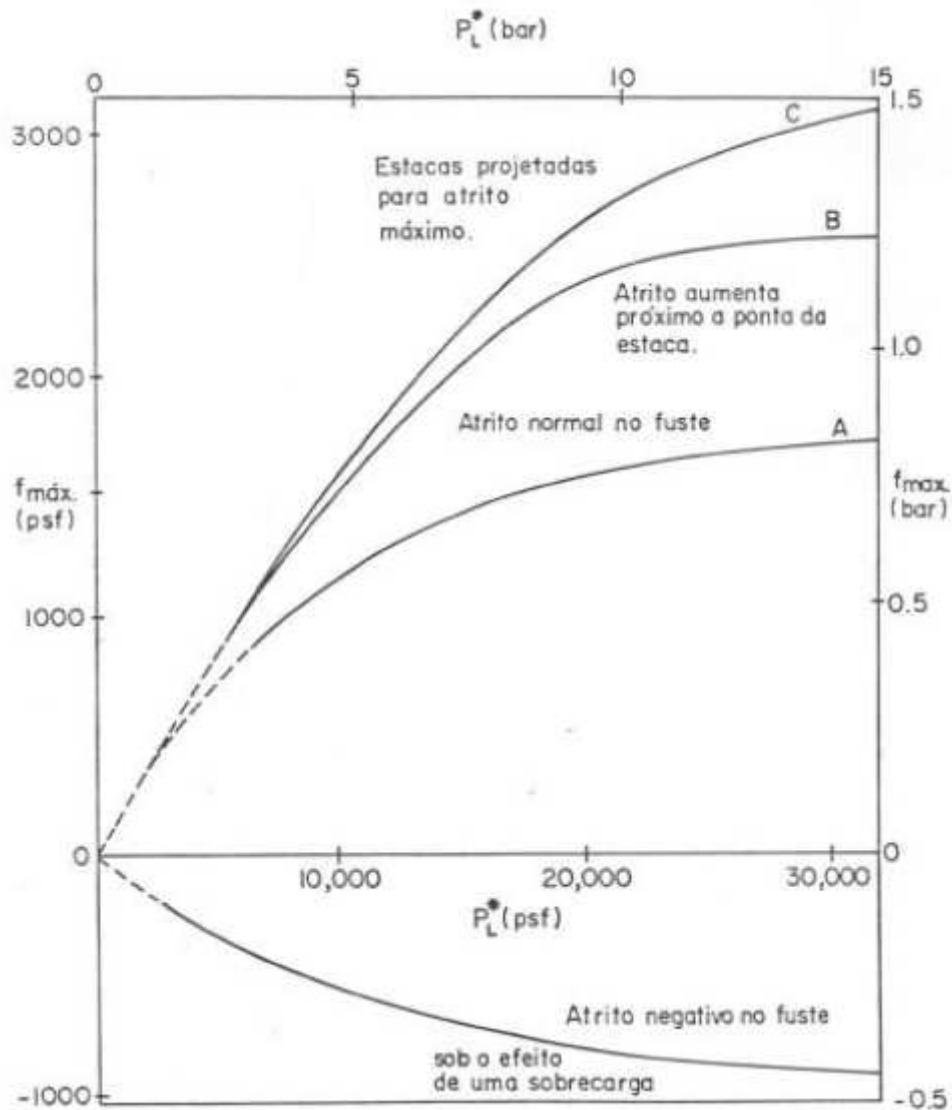
$f_{máx}$ = atrito lateral unitário máximo na camada i ;

B = diâmetro da estaca;

ΔZ_i = espessura da camada i ;

Na Figura 1 é representado o gráfico para obtenção do atrito lateral máximo em fundações da pressão limite líquida segundo Ménard (1963).

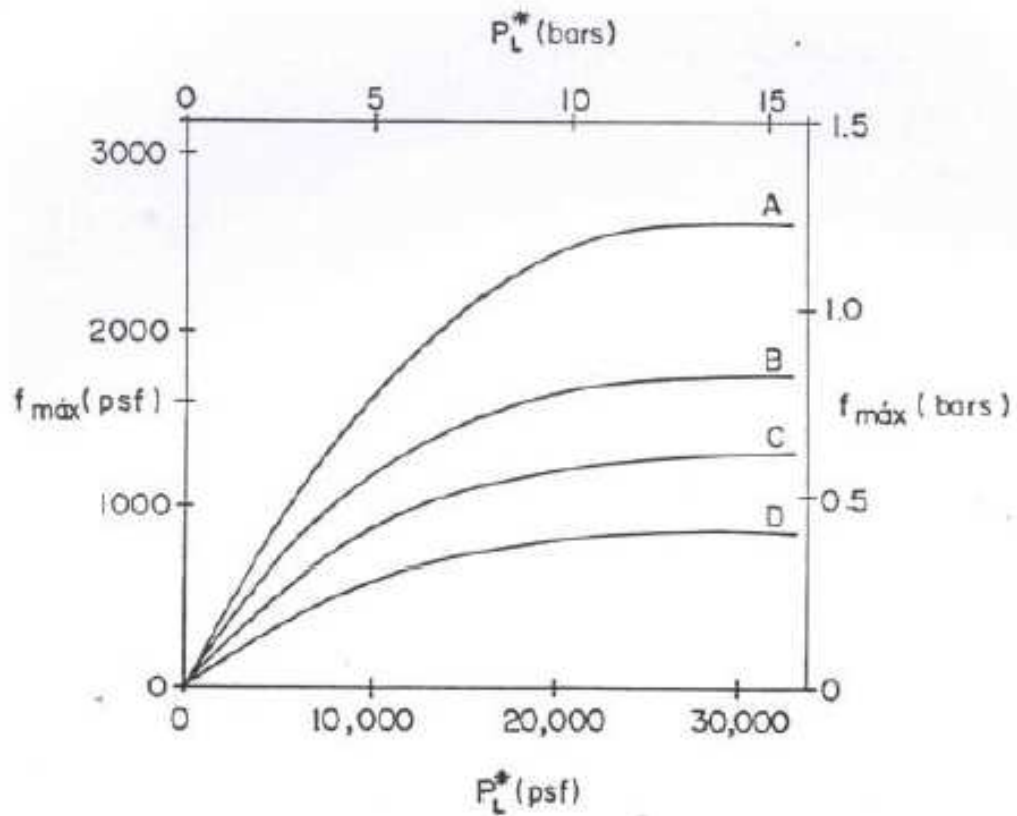
Figura 3. Gráfico para obtenção do atrito lateral máximo (apud MÉNARD, 1963).



Fonte: TOLEDO FILHO (1986).

Baguelin et al. (1978) propuseram a determinação de $f_{máx}$ através da utilização da Figura 2.

Figura 4. Gráfico para obtenção do atrito lateral máximo (apud BAGUELIN et al. 1978).

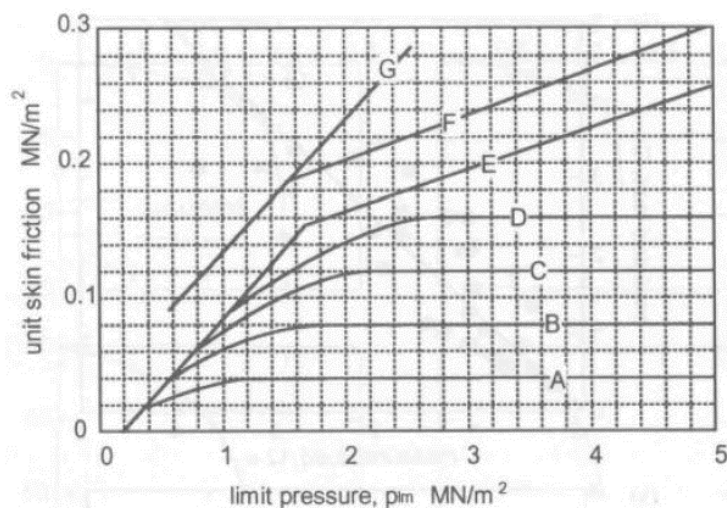


- A - Deslocamento/concreto/granular
- B - Sem deslocamento /concreto /solo qualquer ou
Deslocamento/aço/granular ou
Deslocamento/concreto/coesivo
- C - Deslocamento/aço/coesivo
- D - Sem deslocamento/aço/solo qualquer

Fonte: TOLEDO FILHO (1986).

Já Bustamante e Gianceselli (1981) recomendaram a utilização da Figura 3 em conjunto com a Tabela 1.

Figura 5. Gráfico para a obtenção do atrito lateral unitário (apud BUSTAMANTE e GIANESELLI, 1981).



Fonte: CLARKE (1995).

Tabela 3. Escolha da curva para determinação do atrito lateral unitário (apud BUSTAMANTE e GIANESELLI, 1981).

Tipo de Solo	P _l (kPa)	Estaca escavada sem revestimento		Estaca com revestimento		Estaca Cravada		Injetadas com pressão	
		Concreto	Aço	Concreto	Aço	Concreto	Aço	Baixa	Alta
Argila mole	0-700	A	A	A	A	A	A	B	-
Argila rija	1200-2000	A, (B)	A, (B)	A	A	A, (B)	A	B	E*
Argila dura	>2000	A, (B)	A, (B)	A	A	A, (B)	A, B	E*	-
Areia fôfa	0-700	A	A	A	A	A	A	B	-
Areia mediamente compactada	1000-2000	B, (C)	A, (B)	A	A	B, (C)	B	C	E
Areia compactada	>2500	C, (D)	B, (C)	B	B	C, (D)	C	D	E
Calcáreo completamente alterado	0-700	A	A	A	A	A	A	B	-
Calcáreo parcialmente alterado	>1000	C, (D)	B, (C)	B	B	C, (D)	C	E	E
Marga	1500-4000	D, (F)	C, (D)	C	C	F	F	F	G
Marga rija	>4500	F	-	-	-	-	-	G	G
Rocha alterada	2500-400	G	G	-	-	G	G	G	G
Rocha fraturada	>4500	G	-	-	-	-	-	G	G

Notas:

- As curvas entre parênteses se aplicam apenas às estacas bem executadas (baixo amolgamento do solo durante a fase de escavação) ou para solo que será densificado em torno da estaca cravada
- E* apenas se a pressão limite < 1500 kPa

Fonte: CLARKE (1995).

2.2.2 Métodos fundamentados no SPT– Sondagem de simples reconhecimento de solo

O ensaio de sondagem de simples reconhecimento de solo (SPT) é normatizado no Brasil pela NBR 6484 (ABNT, 2001) com a finalidade de determinar os horizontes do solo e suas respectivas cotas no perfil, a posição do nível de água e o índice de resistência à penetração (N_{spt}) a cada metro avançado.

Apesar de sua larga utilização no Brasil para o cálculo da estimativa de carga do sistema solo – estaca, o SPT confere certa subjetividade nos resultados obtidos. Quando é feita uma análise completa do solo da região estudada, as incertezas dos resultados diminuem, aumentando assim sua confiabilidade para a aplicação dos métodos de estimativa de capacidade de carga do sistema solo – estaca (FELLENIUS, 2006).

i. Método Aoki e Velloso (1975)

O método de Aoki e Velloso foi o primeiramente desenvolvido utilizando valores obtidos do ensaio de penetração de cone *in situ* (CPT). Posteriormente foi adaptado para utilização do N_{spt} , obtido através do ensaio SPT (CINTRA e AOKI).

A carga de ruptura da estaca pelo método pode ser calculada pela seguinte equação:

$$R = R_p + R_L = r_p \cdot A_p + R_L \cdot A_L \quad (7)$$

A equação (7) pode ser reescrita como:

$$R = \left(\frac{K \cdot N_p}{F_1} \right) \cdot A_p + \frac{u}{F_2} \cdot \sum_1^n (\alpha_{Aoki} \cdot K \cdot N_L \cdot \Delta L) \quad (8)$$

Em que:

r_p = tensão limite normal no nível da ponta;

r_L = tensão limite de cisalhamento ao longo do fuste;

α_{Aoki} = razão de atrito;

K = coeficiente dependente do tipo de solo;

N_p = índice de resistência à penetração na cota de apoio da ponta da estaca;

N_L = índice médio de resistência à penetração na camada de solo de espessura ΔL ;
 F_1 e F_2 = fatores de correção, ajustados a partir de provas de cargas realizadas em
várias regiões do Brasil;

u = perímetro da estaca;

ΔL = espessura da camada de solo;

Na Tabela 4 estão representados os valores de F_1 e F_2 , já na Tabela 5 estão dispostos os valores de K e α_{Aoki} .

Tabela 4. Fatores de correção F_1 e F_2 (VELLOSO e Lopes, 2010)

Tipo de Estaca	F1	F2
Franki	2,5	5
Metálica	1,75	3,5
Pré-Moldada de Concreto	1,75	3,5
Escavada	3	6

Tabela 5. Parâmetro K e α_{Aoki} (VELLOSO e LOPES, 2010)

Tipo de Solo	k (kgf/cm ²)	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

ii. Método de Monteiro (1997)

Com base em sua experiência na execução de estacas, Monteiro (1997) estabeleceu valores diferentes, tanto para F_1 e F_2 , representados na Tabela 6, quanto para K e α , mostrados na Tabela 7, para a equação (8) desenvolvida por Aoki e Velloso (1975).

Tabela 6. Fatores de correção F1 e F2 (MONTEIRO, 1997)

Tipo de Estaca	F1	F2
Franki	2,3	3
Metálica	1,75	3,5
Pré-Moldada de Concreto	2,5	3,5
Escavada	4,5	4,5

Tabela 7. Parâmetro K e α_{Monteiro} (MONTEIRO, 1997)

Tipo de Solo	k (kgf/cm ²)	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	2,5	5,5

iii. Método Décourt e Quaresma (1978)

O método Décourt e Quaresma foi desenvolvido para utilizar N_{spt} ou N_{eq} obtidos através dos ensaios SPT e SPT-T, respectivamente. O método foi desenvolvido principalmente para estacas de deslocamento, mas pode ser utilizado também para outros tipos de estacas (DÉCOURT, 1998)

A carga de ruptura da estaca pelo método pode ser calculada pela seguinte equação:

$$R = R_p + R_L = r_p \cdot A_p + R_L \cdot A_L \quad (9)$$

A equação (9) pode ser reescrita como:

$$R = A_p \cdot \alpha_{Dec} \cdot K \cdot N_p + \beta_{Dec} \cdot 10 \cdot \left(\frac{N_1}{3} + 1 \right) \cdot u \cdot L \quad (10)$$

Em que:

r_p = tensão limite normal no nível da ponta;

r_L = tensão limite de cisalhamento ao longo do fuste;

K = coeficiente característico do solo;

α_{Dec} = fator aplicado à parcela de ponta, de acordo com o tipo de solo e o tipo de estaca;

β_{Dec} = fator aplicado à parcela de atrito lateral de acordo com o tipo de solo e o tipo de estaca;

L = comprimento da estaca

N_p = índice de resistência à penetração na cota de apoio da ponta da estaca;

N_L = índice médio de resistência à penetração na camada de solo de espessura ΔL ;

Apresenta-se na Tabela 6 os valores do coeficiente característico para os solos K para estacas escavadas.

Tabela 8. Parâmetro K (DÉCOURT, 1978)

Valores k - Décourt e Quaresma	
Tipo de Solo	k (kN/m ²)
Argila	100
Silte Argiloso	120
Silte Arenoso	140
Areia	200

Na Tabela 7 e Tabela 8 estão os valores de α_{Dec} e β_{Dec} de acordo com o tipo de solo e estaca.

Tabela 9. Fator α_{Dec} em função do tipo de estaca e solo

Tipo de solo	Tipo de Estaca - α_{Dec}				
	Escava em geral	Escavada (bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetada sob altas pressões
Argila	0,85	0,85	0,30	0,85	1,00
Solo intermediários	0,60	0,60	0,30	0,60	1,00
Areia	0,50	0,50	0,30	0,50	1,00

Tabela 10. Fator β_{Dec} em função do tipo de estaca e solo

Tipo de solo	Tipo de Estaca - β_{Dec}				
	Escava em geral	Escavada (bentonita)	Hélice contínua	Raiz	Injetada sob altas pressões
Argila	0,80	0,90	1,00	1,50	3,00
Solo intermediários	0,65	0,75	1,00	1,50	3,00
Areia	0,50	0,60	1,00	1,50	3,00

iv. Método de Teixeira (1996)

Para Teixeira (1996), a capacidade de carga à compressão de uma estaca pode ser estimada em função dos parâmetros α e β da equação geral:

$$Q_{l,ult} = \alpha \cdot N_b \cdot A_b + U \cdot \beta \cdot N_L \cdot L \quad (11)$$

Em que:

N_b = valor médio do índice de resistência obtido no intervalo de 4 diâmetros acima da ponta da estaca a 1 diâmetro abaixo;

N_L = valor médio do índice de resistência ao longo do fuste da estaca ;

A_b = área da ponta ou base;

L = comprimento da estaca;

Na Tabela 11 estão dispostos os valores dos parâmetros α e β de acordo com o tipo de solo e tipo de estaca.

Tabela 11. Valores dos parâmetros α e β (TEIXEIRA, 1996)

	Solo	Tipo de estaca			
		I	II	III	IV
Valores de α (tf/m ²) em função do tipo de solo ($4 < N < 40$)	Argila siltosa	11	10	10	10
	Silte Argiloso	16	12	11	11
	Argila arenosa	21	16	13	14
	Silte arenoso	26	21	16	16
	Areia Argilosa	30	24	20	19
	Areia siltosa	36	30	24	22
	Areia	40	34	27	26
	Areia com pedregulhos	44	38	31	29
Valores de β em função do tipo de estaca		0,4	0,5	0,4	0,6

* Tipo de estaca: I - Estaca pré-moldadas de concreto e perfis metálicos; II - Estacas tipo Franki; III - Estacas escavadas a céu aberto; IV - Estaca Raiz

v. Método de Velloso (1981)

Segundo Velloso (1981), a capacidade de carga de uma estaca de comprimento L , diâmetro B , pode ser estimada a partir da equação:

$$Q_{l,ult} = A_b \cdot q_{p,ult} + U \cdot \sum \tau_{l,ult} \cdot \Delta L \quad (12)$$

Em que:

A_b = área da ponta ou base da estaca;

$Q_{p,ult}$ = resistência de ponta unitária;

U = perímetro da estaca;

$\tau_{l,ult}$ = resistência lateral (unitária);

ΔL = espessura da camada de solo onde $\tau_{l,ult}$ se aplica

Quando utiliza-se os resultados de SPT, pode-se adotar:

$$\tau_{l,ult} = a'.N^{b'} \quad (13)$$

$q_{p,ult} = a.N^b$	(14)
---------------------	------

As incógnitas a , b , a' e b' são parâmetros de correlação entre o SPT e o CPT, que viriam de acordo com o solo. Os valores para as incógnitas estão mostrados na Tabela 12

Tabela 12. Valores aproximados de a , b , a' e b' (VELLOSO, 1981)

Tipo de Solo	Ponta		Atrito	
	a (tf/m ²)	b	a' (tf/m ²)	b'
Areia sedimentares submersas ⁽¹⁾	60	1	0,50	1
Argilas sedimentares submersas ⁽¹⁾	25	1	0,63	1
Solos residuais de gnaiss areno-siltoso submersos ⁽¹⁾	50	1	0,85	1
Solos residuais de gnaiss silto-arenosos submersos	40 ⁽¹⁾	1 ⁽¹⁾	0,80 ⁽¹⁾	1 ⁽¹⁾
	47 ⁽²⁾	0,96 ⁽²⁾	1,21 ⁽²⁾	0,74 ⁽²⁾

⁽¹⁾ Dados obtidos na obra da Refinaria Duque de Caixias (RJ); ⁽²⁾ Dados obtidos na obra da AÇO-MINAS (MG)

2.3 PROVA DE CARGA

A prova de carga é o meio mais realista para se avaliar o comportamento de um elemento de fundação, sendo um recurso utilizado tanto para o controle de qualidade da execução das estacas, quanto para verificar a capacidade de carga do sistema solo-estaca, previamente calculada para o dimensionamento do projeto (SCALLET,2011). O ensaio visa, através de aplicações controladas de cargas no eixo da estaca, obter o deslocamento no sistema provocado pela tensão aplicada correspondente.

O ensaio tem o objetivo de simular os carregamentos futuros que solicitarão a estrutura de fundação ao longo dos anos de uso, com a diferença de ocorrer em intervalos entre os incrementos de carga muito menor que o real. Se for realizada corretamente, a prova de carga é o método mais correto, eficiente e confiável para a determinação da capacidade de carga real do sistema solo-estaca (ALBUQUERQUE et al, 2004)

A execução da prova de carga estática é normatizado pela NBR 12131 (ABNT, 2006) e a sua obrigatoriedade é descrita na norma NBR 6122 (ABNT, 2010)

De acordo com Fleming et al. (1992), os objetivos da prova de carga estática podem ser listados como:

- i. Segurança contra a ruptura para certa carga admissível;
- ii. Análise da integridade estrutural do elemento de fundação;
- iii. Determinação da carga de ruptura;
- iv. Obtenção do comportamento da curva carga x recalque;

2.4 Prova de Carga Bidirecional

Segundo Fellenius (2006) em uma prova de carga convencional é difícil determinar a parcela da carga aplicada na ponta de uma estaca. Mesmo quando a ponta é instrumentada com pares de células de carga para determinação da carga aplicada e *tell-tales* são usados para aferir os deslocamentos da estaca, a interpretação dos dados do ensaio para a ponta, em provas de carga convencionas, ainda são muito complexos. Enquanto a carga aplicada na estaca é conhecida, a real solicitação da ponta é desconhecida devido a força residual presente na ponta da estaca antes do começo do ensaio de prova de carga.

Essa dificuldade associada com o interesse de ser obter a carga responsável para determinado deslocamento da ponta da estaca impulsionou as primeiras pesquisas sobre os ensaios bidirecionais. As primeiras células expansivas hidrodinâmicas que possibilitaram as primeiras provas de cargas bidirecionais foram propostas pelo

Engenheiro Pedro Elísio Chaves A. F. da Silva e divulgado em Da Silva (1983 e 1986), na década de 80 no Brasil. Na mesma época, nos Estados Unidos, o Dr. Jorg Osterberg propunha um trabalho semelhante (FELLENIOUS, 2006).

O método bidirecional, em provas de carga, consiste basicamente na aplicação de carga pela célula expansiva hidrodinâmica, que ocorre via pressurização do fluido hidráulico, que solicita o segmento superior à célula (fuste), fazendo-o reagir contra o segmento inferior (parcela do fuste abaixo da célula e ponta). O funcionamento do método é regido pelo princípio elementar de ação e reação. A força que mobiliza o fuste é de mesma intensidade que a força que solicita o segmento inferior da estaca, porém de sentido oposto. Esse princípio de ação e reação é mantido até que a carga de ruptura de algum dos segmentos (fuste ou ponta) rompa. O processo de ruptura é caracterizado quando observa-se um contínuo deslocamento para cargas constantes (SILVA, 1986).

Segundo Rocha e Gomes (2017), a ruptura isolada do fuste ou do segmento inferior da estaca para uma determinada carga não representa a carga máxima de suporte do elemento de fundação. Quando um elemento rompe isoladamente, o outro elemento ainda não atingiu o nível de carga máxima suportado. Por essa razão, a escolha da cota de instalação da célula é determinante para a prova de carga bidirecional, sendo necessário um estudo prévio para o correto posicionamento gere a ruptura simultânea do fuste e da ponta, considerando-se o estado da arte do ensaio.

A definição da cota de instalação da célula expansiva hidrodinâmica bidirecional é definida pela busca do equilíbrio entre a resistência lateral do fuste do segmento superior à célula, acrescido do peso próprio da estaca e o segmento inferior, que apresenta resistência lateral e de ponta. Essas resistências são calculadas, geralmente, por métodos semi-empíricos com os dados da investigação geotécnica preliminar (ROCHA e GOMES, 2017, apud PEREIRA, 2016)

Com os resultados do ensaio, é possível desenhar três curvas, sendo elas:

- i. Curva carga x deslocamento do fuste da estaca, cuja solicitação varia do estágio zero uma carga final.

- ii. Curva carga x deslocamento do segmento inferior da estaca, cuja solicitação também variou de zero a uma carga final.
- iii. Curva carga x deslocamento da estaca, onde soma-se os efeitos do segmento superior e inferior à célula conhecida como curva final ajustada. Ação e reação fornecem variações de carga que iniciam-se na carga zero e vão até uma carga final (somatório da carga final para o fuste e para ponta) que provocam deformações totais.

O procedimento de somar os deslocamentos correspondentes a cada estágio de incremento de carga é uma solução simples e irreal, uma vez que, para uma mesma carga, os deslocamentos do fuste e da ponta serão diferentes. Para situação mais realista da curva final, proposta por Silva (1986), deve-se:

- i. Verificar a curva carga x deslocamento do fuste, para um deslocamento Δf .
- ii. Procurar a curva carga x deslocamento da ponta, a força correspondente a esse deslocamento (Δp).
- iii. A curva final ajustada é obtida pela somatória das cargas que provocam o mesmo deslocamento para o fuste e para a ponta da estaca.

3 ARTIGO

Análise de Prova de Carga Estática com Célula Hidrodinâmica Bidirecional-Arcos x Métodos Semi-Empíricos de Estimativa de Carga de Ruptura

RESUMO: O presente trabalho tem por objetivo apresentar uma análise comparativa entre os principais métodos semi-empíricos de estimativa de carga de ruptura com os resultados obtidos em uma prova de carga bidirecional. A fundação estudada é do tipo estaca escavada, e os ensaios realizados para as referidas estimativas de carga de ruptura foram o ensaio pressiométrico de Ménard (PMT) e o ensaio de sondagem de simples reconhecimento (SPT). Após o processamento dos dados, avaliou-se as cargas de ruptura obtidas pelos métodos semi-empíricos e comparou-se com os resultados obtidos através da curva ajustada da prova de carga bidirecional. Os resultados obtidos nos métodos semi-empíricos, mostraram uma variabilidade, alternando entre 49,5% a 100,9%, quando comparados com o valor obtido pelo critério de carga de ruptura vinculado a prova de carga, sugerido pela NBR 6122.

PALAVRAS-CHAVE: Célula Expansiva Hidrodinâmica Bidirecional-Arcos, Capacidade de Carga, Métodos Semi-Empíricos, Prova de Carga Bidirecional.

1 INTRODUÇÃO

A realização de provas de carga estática é de fundamental importância para o desenvolvimento de projetos de fundação, sendo o mais preciso e confiável método para estabelecer cargas de trabalho por se aproximar das condições em que a fundação será submetida (HACHICH et al., 1998).

Como alternativa à prova de carga estática convencional, que necessita de um sistema de reação externo, oneroso em custo e energia, o ensaio de prova de carga

estática com célula expansiva hidrodinâmica bidirecional Arcos, proposto pelo Engenheiro Pedro Elísio Chaves A. F. da Silva e divulgado em Da Silva (1983) vem sendo adotado desde a década de 80 no Brasil. Na prova de carga Bidirecional, a aplicação de carga se dá pela expansão de uma célula de sacrifício hidrodinâmica posicionada ao longo da estaca, que ao ser acionada, solicitará o fuste superior à célula com uma tensão que reagirá contra a parte inferior da estaca, eliminando a necessidade de complexos sistemas de reação externo (DA SILVA, 1983).

Neste contexto e com base nessas discussões, o presente trabalho tem por objetivo trazer contribuições ao meio geotécnico apresentando uma análise comparativa entre os principais métodos semi-empíricos propostos para cálculo de carga de ruptura geotécnica via ensaio pressiométrico de Ménard (PMT) e ensaio de sondagem de simples reconhecimento (SPT) com o resultado obtido pelo ensaio de prova de carga bidirecional.

Para análise dos métodos semi-empíricos, foi executado um SPT e um PMT no campo experimental, sendo estes ensaios próximos à estaca ensaiada pela prova de carga bidirecional.

Após o processamento dos dados, comparou-se a carga de ruptura calculada pelos métodos semi-empíricos com a carga de ruptura obtida através da curva ajustada da prova de carga bidirecional. As análises foram realizadas levando-se em consideração a estaca como um elemento único.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Campo Experimental

O objeto de estudo encontra-se em um campo experimental, destinado a pesquisas e estudos geotécnicos, situado na Universidade Federal de São João Del Rei, Campus Alto Paraopeba, localizado no km 7 da rodovia MG 433, da cidade de Ouro Branco – MG, como destacado na Figura 1.



Figura 1. Localização do Campo experimental.

2.2 Análise Geológica Geotécnica

O campo experimental foi submetido à investigação geológica geotécnica para caracterização de seu solo. A análise do solo foi baseada no ensaio pressiométrico de Ménard, de acordo com a norma americana ASTM D4719 (2007), e no ensaio de sondagem de simples reconhecimento a percussão, conforme NBR 6484 (ABNT, 2001).

Da sondagem de simples reconhecimento a percussão, foram recolhidas amostras a cada metro de profundidade, para testes complementares de identificação do solo como teste de sujar as mãos, resistência do solo seco na forma de torrão e dispersão em água.

2.3 Estaca Teste Bidirecional

A Estaca Teste Bidirecional (E3) foi escavada com o uso de um trado mecânico portátil de diâmetro 0,15 m até a profundidade de 6,15 m, disposta no campo experimental conforme a Figura 2.

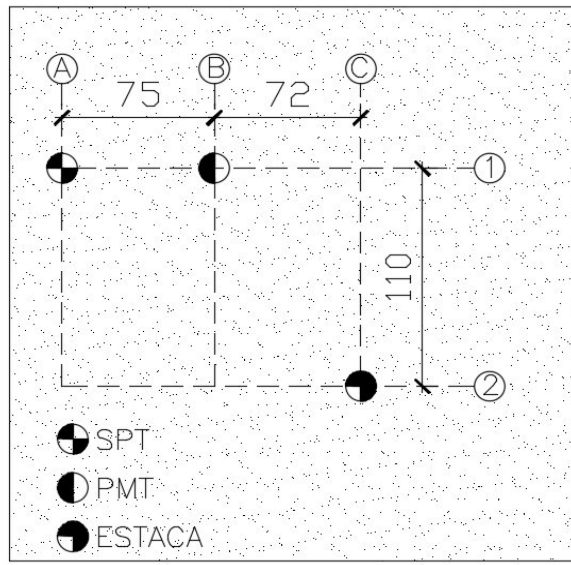


Figura 2. Disposição das estacas no campo experimental (cm)

A posição de projeto da célula expansiva hidrodinâmica – Arcos foi calculada buscando o equilíbrio entre a resistência por atrito lateral do fuste superior (a) e a resistência de ponta aliada ao fuste do segmento inferior (b), possibilitando uma reação aproximadamente igual para porção superior e inferior da estaca. Assim, determinou-se a instalação da célula a uma distância de 3,75 m do topo e 2,40 m da base da estaca, de acordo com a Figura 3.

A argamassa utilizada foi homogeneizada em betoneira e lançada ao pré-furo de forma manual. Optou-se pelo uso da argamassa em função das condições de lançamento, uma vez que a estaca possui altura relevante e pequeno diâmetro.

O traço escolhido para argamassa foi o mesmo usado em estacas raiz: AF1 – C600, proposto por VERNÂNCIO (2008), sendo o cimento usado CP2 – E32 e o agregado miúdo areia fina AF1. O traço confere resistência à compressão de 22 MPa, prevista aos 28 dias.

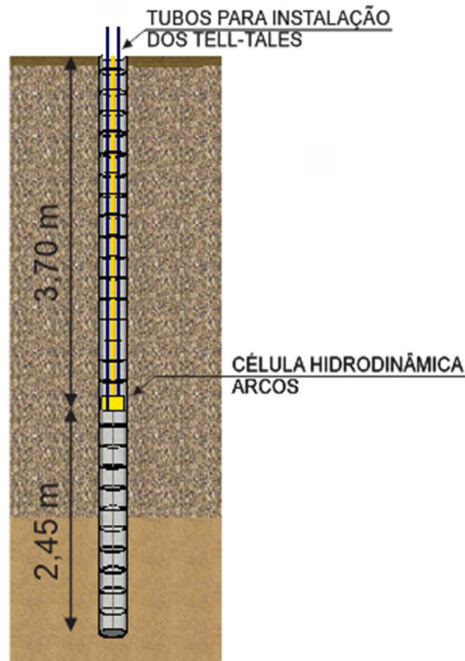


Figura 3. Esquematização da estaca E1.

2.4 Estimativa da Capacidade de Carga

Segundo a NBR 6122 (ABNT, 2010) a carga de ruptura de uma fundação profunda é definida como a força aplicada sobre o elemento de fundação que não provoca seu colapso ou o escoamento do solo que lhe confere sustentação. A estimativa da carga de ruptura em engenharia de fundações pode ser determinada através de prova de carga, aferindo-se diretamente o comportamento do elemento de fundação pela interpretação das curvas carga x recalque, ou por métodos semi-empíricos nos quais as propriedades do solo são obtidas por correlações entre parâmetros encontrados via ensaios de campo ou métodos teóricos.

2.4.1 Prova de Carga Bidirecional

A prova de carga bidirecional foi executada pelo método de carregamento rápido, proposto pela NBR 12131 (ABNT, 2006).

O ensaio consiste basicamente na aplicação de carga pela célula expansiva hidrodinâmica, que ocorre via pressurização do fluido hidráulico, que solicita o segmento superior à célula (fuste), fazendo-o reagir contra o segmento inferior

(parcela do fuste abaixo da célula e ponta). Essa solicitação ocorre por forças iguais, porém, de sentido contrário.

Durante o ensaio, foram atingidos 28 estágios de carregamento, sendo cada estágio igual a 1tf. Inicialmente, a ruptura geotécnica foi observada pelo grande deslocamento do segmento inferior da estaca. Depois, observou-se uma abrupta ruptura do segmento superior da estaca, caracterizado por um grande deslocamento. Para a etapa de descarregamento, foram realizados 5 estágios, sendo 5,6 tf cada estágio.

Os níveis de carga foram controlados por manômetro analógico e bomba hidráulica manual. O macaco hidráulico escolhido para o ensaio foi o de carga de ruptura de 30 tf.

O ensaio foi instrumentado por dois tell-tales (testemunhos) e três relógios comparadores de 0,01mm de precisão. Os relógios comparadores foram posicionados sobre o topo da estaca e sobre os tell-tales, que estavam fixados ao topo e à base da célula expansiva hidrodinâmica Arcos. Os deslocamentos do segmento inferior foram aferidos através de um tell-tale conectado à base da célula. Os deslocamentos da porção superior da estaca foram medidos através do movimento ascendente do fuste, sendo medidos por um tell-tale conectado à parte superior da célula e um relógio comparador posicionado diretamente no topo da estaca.

O sistema de aferição dos deslocamentos está representado na Figura 4.

Os valores aferidos durante a instrumentação do ensaio de prova de carga bidirecional necessitam de correção diante do peso próprio dos segmentos da estaca. Nas cargas corrigidas, o peso flutuante do segmento superior foi descontado das cargas mobilizadas para o fuste, no carregamento ascendente. No segmento inferior, acrescentou-se o peso próprio referente à parcela da estaca abaixo da célula expansiva hidrodinâmica.

O gráfico da curva x recalque final, no qual avalia-se o comportamento da estaca, é conhecido como curva ajustada. Esse gráfico é obtido através do somatório das cargas que provocam os mesmos recalques do fuste e da ponta da estaca (DA SILVA, 1983).



Figura 4. Relógios comparadores utilizados para medir os deslocamentos do segmento inferior, fuste e topo da estaca, ordenados da esquerda para direita.

2.4.2 Métodos Semi-Empíricos

Segundo Cintra (2010), os métodos de previsão de capacidade de carga em fundações podem ser baseados em correlações empíricas com resultados de ensaios in situ. Assim sendo, foram analisados métodos consagrados de predição de capacidade de carga via ensaio PMT, incluindo os desenvolvidos pelos autores Ménard (1963), Bustamante e Gineselli (1981) e Baguelin et al. (1978). Já para o ensaio de simples reconhecimento de solo, tipo SPT, foram usados os métodos propostos por Velloso (1981), Teixeira (1996), Decourt e Quaresma (1978), Aoki e Velloso (1975), Monteiro (1997).

Os métodos semi-empíricos de estimativa de capacidade de carga foram desenvolvidos e aperfeiçoados para corroborar com a metodologia de prova de carga. Assim sendo, para comparação quantitativa entre a prova de carga bidirecional e os métodos semi-empíricos, dividiu-se a estaca em um segmento superior à célula expansiva hidrodinâmica, tendo um comportamento de um fuste isolado, isto é, apenas contribuição da resistência por atrito lateral, e por um segmento inferior à célula, sendo interpretado como uma estaca convencional, possuindo resistência por atrito lateral e pela ponta.

Também neste trabalho, procurou-se um valor de carga de ruptura representativo, englobando todos os resultados calculados através dos métodos semi-empíricos, tal fato tem a finalidade de comparar o referido valor com o obtido no gráfico de prova de carga bi-direcional ajustada. Para tanto, foi proposto um valor mínimo estatístico para o cálculo da carga de ruptura, para o universo de métodos consagrados, utilizando a metodologia de “Distribuição t de Student”, com nível de confiança de 95% para suporte ao estudo.

3 RESULTADOS

3.1 Investigação Geológica Geotécnica

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados para o ensaio pressiométrico de Ménard (PMT) já corrigidos.

Tabela 1. Resultado do ensaio PMT

Cota	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m
P_0 (kPa)	1.00	73.08	43.15	0.44	30.68
V_0 (cm ³)	197.48	52.65	97.65	49.91	42.83
P_f (kPa)	444.20	746.40	453.94	611.49	806.87
V_f (cm ³)	391.24	183.55	182.82	179.64	138.97
P_l (kPa)	818.35	1006.40	971.26	902.87	1101.99
E_m (MPa)	18.02	22.03	20.14	18.04	25.51
E_m/P_l	22.02	21.89	20.74	19.99	23.15
P_l/P_f	1.84	1.35	2.14	1.48	1.37

Com o ensaio de sondagem de simples reconhecimento a percussão tipo SPT obteve-se os resultados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultado do ensaio SPT

Profundidade (m)	NSPT 30 cm	Tipo de solo
1	19	MSCmc
2	11	MSCm
3	8	MSCm
4	8	MSCm
5	7	MCSm
6	93	MCSm

Sendo S – areia, M – silte, C - argila, m – marrom e c – claro.

3.2 Prova de Carga Bidirecional

A carga atingida no último estágio da prova de carga bidirecional e os valores correspondentes corrigidos estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3. Cargas no estágio final da prova de carga

Elemento	Carga (tf)	
	Aplicada	Corrigida
Segmento Superior	14,00	13,90
Segmento Inferior	14,00	14,11
Total	28,00	28,01

Com os resultados tratados dos estágios de carregamento e descarregamento da prova de carga, é possível traçar o gráfico carga x deslocamento da prova de carga bidirecional, sendo uma curva carga x deslocamento do fuste da estaca e uma curva carga x deslocamento para a ponta da estaca, demonstrado na Figura 5.

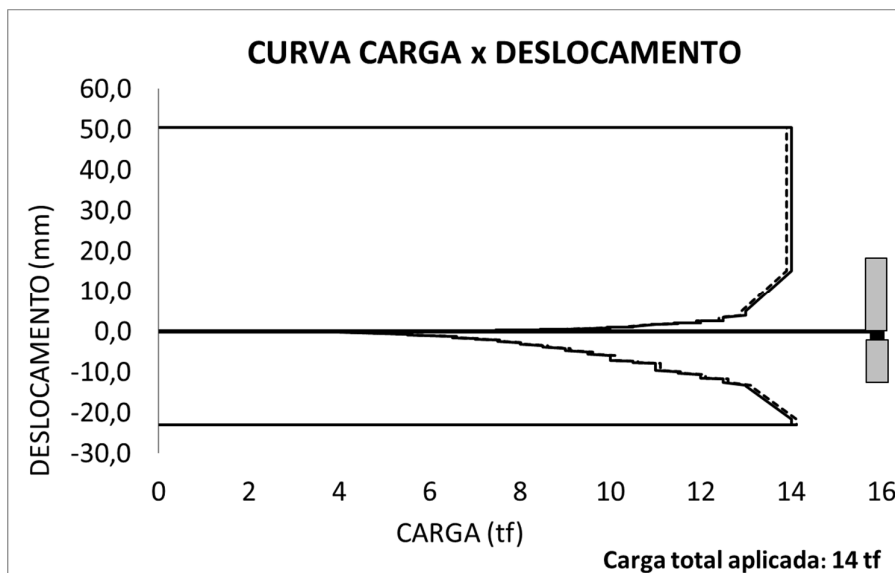


Figura 5. Curva carga x deslocamento – Prova de carga Bidirecional

Também se pode obter a curva ajustada, conforme explicitado no tópico 2.4.1, obtendo um gráfico carga x deslocamento final para a estaca E3, conforme Figura 6 abaixo:

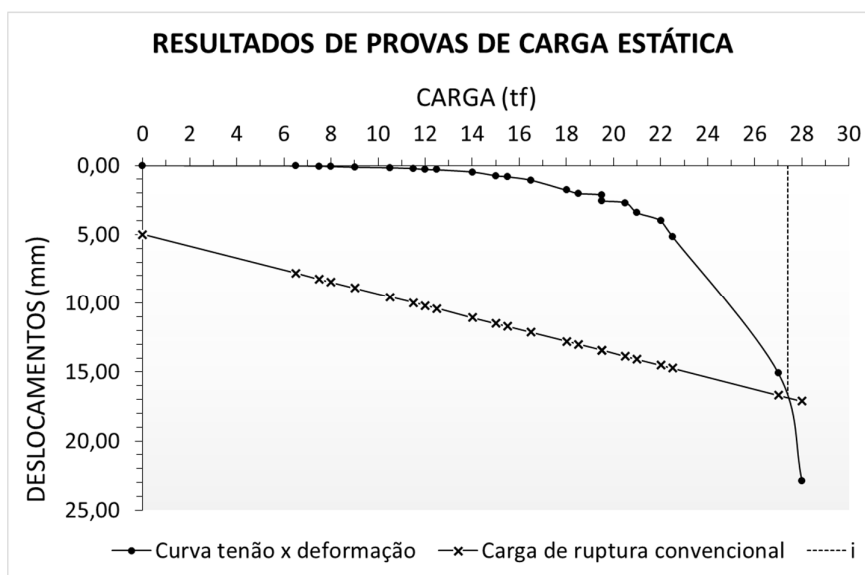


Figura 6. Curva Ajustada carga x deslocamento – Prova de carga Bidirecional

3.3 Estimativa da Capacidade de Carga por Métodos Semi-Empíricos

De posse dos parâmetros obtidos na execução dos ensaios de reconhecimento geológico geotécnico executados in situ no campo experimental, calculou-se a capacidade de carga da estaca como uma peça inteiriça.

Os resultados de capacidade de carga obtidos para estaca E3 estão representados na Tabela 4.

Tabela 4. Estimativa de capacidade de carga obtidas por métodos semi-empíricos para estaca E3.

Métodos	Q _{ponta} (tf)	Q _{fuste} (tf)	Q _{ult} (tf)
Aoki e Velloso	5,25	8,30	13,55
Décourt e Quaresma	5,29	8,55	13,85
Monteiro	5,60	15,96	21,56
Teixeira	6,93	19,90	26,84
Velloso	12,93	14,38	27,31
Ménard	3,22	20,26	23,48
Bustamante e Gineselli	2,79	21,52	24,31
Baguelin et l.	3,38	24,28	27,66

A Tabela 5 mostra os dados do tratamento estatístico, considerando como universo a carga de ruptura da estaca admitida como inteiriça.

Tabela 5. Tratamento estatístico para os resultados das estimativas de capacidade de carga.

Segmento	Q _{med} (tf)	S	t _{0,90}	Q _{proj} (tf)
E3	22,32	5,72	1,42	19,45

De posse de todos resultados de carga de ruptura calculados pelos métodos semi-empíricos e resultado obtido pelo tratamento estatístico, pode-se fazer um

comparativo com a carga de ruptura obtida através da curva ajustada. Os resultados estão demonstrados na Tabela 6.

Tabela 6. Comparativo entre carga de ruptura da curva ajustada com os resultados obtidos pelos métodos semi-empíricos.

Método	Q_{ult} (tf)	$Q_{ult,NBR}$ (tf)	$Q_{ult}/Q_{ult,NBR}$
Aoki e Velloso	13,55		0,495
Décourt e Quaresma	13,85		0,505
Monteiro	21,56		0,787
Teixeira	26,84		0,980
Velloso	27,31	27,4	0,997
Ménard	23,48		0,857
Bustamante e Gineselli	24,31		0,887
Baguelin et al.	27,66		1,009
E3	19,45		0,710

4 DISCUSSÕES

O campo experimental apresenta um horizonte de solo silto arenoargiloso até a cota 4 m e um horizonte de solo silto argiloarenoso, sendo este alcançado apenas pela sondagem de simples reconhecimento.

Os valores do NSPT indicam uma diminuição no índice de resistência à penetração dinâmica até a cota de 5 m, a partir desse ponto encontrou-se uma camada de alta resistência.

Ao tratar os dados da prova de carga bidirecional Arcos, observa-se uma variação insignificante na carga aplicada proveniente do peso próprio dos elementos da estaca, para os níveis de cargas aplicadas, como previsto em Alves (2014).

Pela Figura 5 é possível observar que uma mesma carga aplicada gera deslocamentos diferentes para o segmento inferior e superior à célula expansiva hidrodinâmica, ou seja, a curva x recalque mostra uma maior rigidez do segmento superior em relação ao segmento inferior da estaca, a menor rigidez do segmento inferior pode ser associada ao processo executivo, uma vez que não se procedeu com

a limpeza da base do furo da estaca. Esse comportamento, também indica um mau posicionamento da célula de sacrifício. Sendo assim, a determinação do posicionamento da célula na estaca, é de suma importância para que o ensaio bidirecional não se distancie, em termos de previsão de comportamento carga x recalque, dos resultados obtidos em ensaios convencionais.

Conforme demonstrado na Tabela 6, os resultados estimados para carga de ruptura pelos métodos semi-empíricos, utilizando o SPT, apresentaram similaridade, quando comparados ao valor obtido pela curva ajustada. Vale ressaltar que método proposto por Velloso (1981) apresentou uma aproximação de 99,7 % do valor da carga de ruptura obtida pela curva ajustada. Já o método Aoki e Velloso (1975) apresentou o resultado mais conservador, ou seja, igual a 49,5 % do valor da carga de ruptura obtida pela curva ajustada.

Analisando os resultados obtidos via ensaio PMT, observou-se que os métodos tiveram uma boa aproximação dos valores obtidos para previsão de estimativa de carga, destacando um valor ligeiramente superior à carga de ruptura calculado pelo método proposto por Baguelin et al. (1978).

O valor representativo de carga de ruptura, aplicando pelo método de análise estatística t de Student, para os valores obtidos pelos métodos semi-empíricos, também se aproximaram com o valor obtido pela prova de carga, haja vista, que o mesmo diferenciou-se em menos de 30% do valor da carga de ruptura obtida pelo gráfico da curva ajustada.

5 CONCLUSÕES

Os resultados estimados para carga de ruptura pelos métodos semi-empíricos, utilizando tanto os parâmetros obtidos no ensaio SPT quanto no ensaio PMT, apresentaram valores satisfatórios para a estimativa da carga de ruptura, quando comparados ao valor obtido pela curva ajustada.

O valor representativo de carga de ruptura, aplicando pelo método de análise estatística t de student, representa a confiabilidade da estimativa da carga de ruptura obtidos pelos métodos semi-empíricos, uma vez que o valor calculado foi próximo ao encontrado pela prova de carga.

AGRADECIMENTOS

Os autores prestam agradecimento à Arcos – Engenharia de Solos, ao Grupo de Pesquisa INFRAGEO – Infraestrutura de Vias Terrestres e Obras Geotécnicas e ao DTECH – Departamento de Tecnologia em Engenharia Civil, Computação e Humanidades da Universidade Federal de São João Del-Rei - Campus Alto Paraopeba.

REFERÊNCIAS

- ALVES, D. F. **estudo da previsão da carga de ruptura de estacas pré-moldadas de concreto**. Dissertação de Mestrado. Natal-RN, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D4719-07. **Standard test method for pressuremeter testing in soils**. Philadelphia, 2007.
- AOKI, N. VELLOSO, D. A. **An approximate method to estimate bearing capacity of piles**. In: PAN AMERICAN CSMFE, Buenos Aires, 1975.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT **NBR 6122**. Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT **NBR 12131**. Estacas – Prova de carga estática – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.
- BAGUELIN, F.; JÉZEQUEL, J.F.; SHIELDS, D. H.. **The pressuremeter and Foundation Engineering**. Trans Tech Publication S.A., 1978.

- BUSTAMANTE, M.; GIANESELLI, L. **Observed and predicted bearing capacity of isolated pile under axial loads. Pressuremeter Method**, Rev. Fr. Geotech, nº. 16, 1981.
- CINTRA, J.C.A.; AOKI, N. **Fundações por estacas : projetos geotécnicos**. 1. Ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- DA SILVA, P.E.C.A.F. **Célula expansiva hidrodinâmica – Uma nova maneira de executar provas de carga**. VIII COBRAMSEF, 1996.
- DECOURT, L; QUARESMA, A.R. **Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT**. In: CBMSEF, 6., Anais, Rio de Janeiro, 1978.
- HACHICH, W.; FALCONI, F.F.; SAES, J.L.; FROTA, R.G.Q.; CARVALHO, C.S; NIYAMA, S. **Fundação: Teoria e Prática**. 2. ed., São Paulo: PINI, 1998.
- MÉNARD, L. **Calcul de la force portante des fondations sur la base des resultants des essais pressiométriques**. Sols Soils, nº. 5, Juin, Paris, 1963
- MONTEIRO, P. F. **Capacidade de carga de estacas – método Aoki-Velloso**. Relatório interno de Estacas franki Ltda, Rio de Janeiro, 1997.
- TEIXEIRA, A. H. **Projeto e execução de fundações**. In: SEFE, 3, São Paulo. Anais, São Paulo. 1996.
- VELLOSO, P.P.C. **Estacas em solo: dados para estimativa do comprimento**. Ciclo de Palestras sobre Estacas Escavadas, Clube de Engenharia, Rio de Janeiro, 1981.
- VENÂNCIO, P.B.F. **Dosagem de Argamassa para Estaca Raiz**. Dissertação de Mestrado em Estrutura e Construção Civil, Publicação E.D.M – 013 A/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental de Brasília, Brasília, DF, 2008.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, P. J. R.; Carvalho, D.; FERREIRA, C. V. e LOBO, A. S. **Determinação da carga de ruptura de fundação avaliada com base no conceito de rigidez e método de Van der Veen.** Congresso Argentino de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. 17. Sinergia Córdoba, (2004).

ALVES, D. F. **estudo da previsão da carga de ruptura de estacas pré-moldadas de concreto.** Dissertação de Mestrado. Natal-RN, 2014.

AMANN, K. A. P. **Metodologia semi-empírica unificada para a estimativa da capacidade de carga de estacas.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas Geotecnicas, São Paulo, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D4719-07. **Standard test method for pressuremeter testing in soils.** Philadelphia, 2007.

AOKI, N. VELLOSO, D. A. **An approximate method to estimate bearing capacity of piles.** In: PAN AMERICAN CSMFE, Buenos Aires, 1975.

ARAUJO, S. P. M. **O ensaio pressiométrico de ménard e sua utilização na estimativa da capacidade de carga e recalque de fundações assentes em solo residual de gnaiss.** Dissertação de mestrado. Departamento de engenharia civil. Universidade Federal de Viçosa. 2001

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484:** Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 17p.

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

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

BAGUELIN, F.; JÉZEQUEL, J.F.; SHIELDS, D. H.. **The pressuremeter and**

Foundation Engineering. Trans Tech Publication S.A., 1978.

BUSTAMANTE, M.; GIANESELLI, L. **Observed and predicted bearing capacity of isolated pile under axial loads. Pressuremeter Method**, Rev. Fr. Geotech, nº. 16, 1981.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **Carga Admissível em Fundações Profundas.** EESC/USP, São Carlos, SP, 1999.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **Fundações por estacas : projetos geotécnicos.** 1. Ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

CUNHA, R.P.; CAMAPUM de C. e Silva, C.M. **Controle de Qualidade e Aceitação de Estacas Moldadas In Loco Via Utilização de Ensaios de Integridade de Estacas (PIT).** In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. XII COBRAMSEG2002. São Paulo/SP, 2002.

DAS, B. M. **Principles of Foundation Engineering: Pile Foundations.** 6th ed. United States of America: Thomson Canada Limited, 2007.

DAS, B. M. **Fundamentos da Engenharia Geotécnica.** São Paulo: Thomson Learning. 2007

DA SILVA, P.E.C.A.F. **Célula expansiva hidrodinâmica – Uma nova maneira de executar provas de carga.** VIII COBRAMSEF, 1996.

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

DÉCOURT, L. **Análise e Projeto de Fundações Profundas – Estacas.** In: Fundações: Teoria e Prática. São Paulo. 1996

DÉCOURT, L. **A Ruptura de Fundações Avaliada com Base no Conceito de Rigidez.** In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS, 3., 1996,.São Paulo.Anais... São Paulo: ABEF/ABMS, 1996. p.215-224, v.1

DÉCOURT, L. **Análise e Projeto de Fundações Profundas**. In: HACHICH, W. et al. *Fundações Teoria e Prática*. 2.ed. São Paulo: PINI, 1998. cap. 8, p.265-301.

FELLENIOUS, B. H. **Basic of Foundation Design**. Electronic Edition. Canada, 2006. cap.7. Disponível em: <<http://www.Fellenius.net>>. Acesso em: [17 jul. 2018].

HACHICH, W.; FALCONI, F. F.; SAES, J. L.; FROTA, R. G. Q.; CARVALHO, C. S.; NIYAMA, S. **Fundações: teoria e prática**. 2ª EDIÇÃO. SÃO PAULO/SP: PINI LTDA, 1998.

ROCHA, S. A., GOMES, T. B. G. **Análise geotécnica de prova de carga bidirecional com célula expansiva hidrodinâmica Arcos e P&P**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Universidade Federal de São João Del Rei, Ouro branco, MG, 2017.

SCALLET, M. M. **Comportamento de estacas escavadas de pequeno diâmetro em solos lateríticos e colapsível da região de Campinas/SP**. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. 2011.

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

TOLEDO FILHO, R. D. **Estudo da compressibilidade de solos residuais através de ensaios pressiométricos e prova de carga em estaca instrumentada**. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1986.

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

VENÂNCIO, P.B.F. **Dosagem de Argamassa para Estaca Raiz**. Dissertação de Mestrado em Estrutura e Construção Civil, Publicação E.D.M – 013 A/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental de Brasília, Brasília, DF, 2008.

