

## AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ESTACAS PRÉ MOLDADAS DE CONCRETO NA REGIÃO DE PONTA GROSSA ATRAVÉS DE ENSAIOS DE CARREGAMENTO DINÂMICO

Matheus Henrique Quadros Bloinski E-mail: mbloinski@gmail.com

Bianca Penteado de Almeida Tonus E-mail: bpatonus@uepg.br

Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger E-mail: cerlautenschlager@uepg.br

Luiz Henrique Felipe Olavo E-mail: luiz@ensolo.com.br

**Resumo:** No Brasil, os métodos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma são os mais utilizados para estimar a capacidade de carga de fundações profundas. Como tais métodos são correlações matemáticas com ensaios de campo determinadas de forma empírica, os resultados obtidos podem se distanciar da real resistência mobilizada pelo solo e pela estaca. Neste trabalho são avaliadas cinco estacas pré-moldadas de concreto armado de um edifício residencial de quinze pavimentos localizado na cidade de Ponta Grossa - Paraná, através de ensaios de carregamento dinâmico (ECD). As quatro sondagens à percussão (SPT) disponíveis mostram a presença de material argiloso em todo o terreno, que ganha resistência com o avanço da profundidade. A verificação de desempenho das estacas é realizada por meio de comparação dos valores estimados pelos métodos semiempíricos com os dados dos ensaios de carregamento dinâmico realizados. O estudo mostra que para esta obra os métodos semiempíricos são conservadores em relação aos resultados do ECD para a maioria das situações. No entanto, em outras situações os métodos semiempíricos podem superestimar a capacidade de carga das fundações, estando contra a segurança da obra.

**Palavras-chave:** Estacas pré-moldadas de concreto. Métodos semiempíricos. Capacidade de carga. Ensaio de carregamento dinâmico.

## PERFORMANCE EVALUATION OF PRECAST CONCRETE PILES IN PONTA GROSSA CITY THROUGH DYNAMIC LOADING TESTS

**Abstract:** Aoki-Velloso and Décourt-Quaresma methods are the most used correlations to estimate the load capacity of deep foundations in Brazil. As such methods are mathematical correlations empirically determined through field tests, the results obtained can be distanced from the actual resistance mobilized by the soil and the pile. In this work five precast concrete piles of a residential building of fifteen stories located in the Ponta Grossa City – Paraná were evaluate through dynamic load tests. The four available standard penetration test (SPT) show the presence of clay material in the whole field, which gains resistance with depth advancement. Pile performance verification is made by comparing the estimated values by the semiempirical methods with the data of the dynamic loading tests. The study shows that semiempirical methods are conservative in relation to dynamic loading tests results for the most situations. However, in other cases the semiempirical methods can overestimate the load capacity foundations, being against the safety of the work.

**Keywords:** Precast concrete piles. Semiempirical methods. Load capacity. Dynamic load test.

### 1. INTRODUÇÃO

A capacidade de carga de estacas é largamente estimada através de métodos semiempíricos, que se baseiam em ensaios *in situ* de penetração como a sondagem à percussão (SPT - *Standart Penetration Test*) e o ensaio de cone (CPT - *Cone Penetration Test*). Dentre os métodos mais utilizados no Brasil estão os de Aoki -Velloso e de Décourt-Quaresma (HACHICH *et al.*, 2012).

No entanto, métodos semiempíricos são válidos para as condições locais onde foram desenvolvidos e seu uso em diferentes condições geológicas e para diferentes métodos construtivos leva a incertezas nos valores de capacidade de carga obtidos.

Além disso, os próprios ensaios em que tais métodos se baseiam são pontuais e nem sempre é possível determinar um perfil geológico-geotécnico que seja representativo do subsolo da obra. Convém ressaltar que os ensaios mencionados, principalmente a sondagem à percussão (SPT),

podem apresentar incertezas em função do processo executivo, da energia aplicada e da qualificação das equipes executoras.

Soma-se à todas essas incertezas o fato de que o aprimoramento das técnicas construtivas e a verticalização das edificações aumenta cada vez mais as cargas transmitidas pelas estruturas ao solo. Portanto, o uso de métodos de dimensionamento simplistas pode tornar um projeto de fundações antieconômico em função dos valores de fatores de segurança que necessitam ser utilizados para minimizar todas as hipóteses adotadas.

Pelas razões descritas, os métodos de dimensionamento semiempíricos devem ser usados em conjunto com ensaios de carregamento estáticos e dinâmicos para verificação do desempenho real das fundações. Os ensaios de carregamento dinâmico (ECD) possuem execução mais rápida que os ensaios de carregamento estático e fornecem valores de capacidade de carga do conjunto estaca-solo, deslocamentos máximos, além de verificar a integridade do elemento de fundação.

O objetivo deste artigo é mostrar uma comparação entre os valores de capacidade de carga estimados através dos métodos de Aoki-Velloso e de Décourt-Quaresma com os valores obtidos através de ECD em estacas pré-moldadas de concreto em uma obra localizada na cidade de Ponta Grossa. Desta maneira será possível verificar o desempenho de tais estacas e evidenciar que os pontos acima mencionados afetam no dimensionamento de fundações, ressaltando a importância de uma análise mais aprofundada para que seja possível prever de maneira eficaz o comportamento do elemento de fundação e otimizar o projeto.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Investigação Geotécnica**

Para que um projeto de fundações possa ser desenvolvido de maneira de maneira segura, eficiente e econômica é necessário que se conheça as características do terreno em que a obra será executada. Estas informações são obtidas através de investigações geotécnicas. A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2010), através da NBR 6122, cita que independentemente do tipo de obra é necessário que se realize uma campanha de investigação geotécnica preliminar e que contemple pelo menos a execução de sondagens à percussão (SPT). Após uma campanha de sondagens inicial, novas campanhas adicionais podem ser realizadas, incluindo diferentes tipos de ensaios, de acordo com as particularidades da obra.

De acordo com Schnaid e Odebrecht (2012) o ensaio à percussão (SPT) é a ferramenta de investigação geotécnica mais utilizada em quase todo o mundo. Através dele são obtidos dados de resistência à penetração e posicionamento do nível d'água, além de tornar possível a definição de um perfil estratigráfico do terreno.

O ensaio à percussão (SPT) é normalizado pela NBR 6484 (ABNT, 2001). Essa norma define as etapas a serem executadas durante o ensaio, que podem ser resumidas da seguinte maneira: primeiramente o solo é perfurado até 1 m de profundidade com o uso de um trado helicoidal; em sequência um amostrador é inserido no furo e é golpeado com um peso (martelo) solto em queda livre a uma altura pré-determinada; o amostrador é golpeado até que penetre 45 cm no solo (ou até que um dos critérios de parada definidos pela NBR 6484 seja atingido). A cada metro perfurado pelo amostrador, o mesmo é recolhido. Assim é possível realizar uma inspeção tátil e visual do solo, obtendo informações como coloração e consistência.

O chamado  $N_{SPT}$  diz respeito ao número de golpes necessários para cravar o amostrador nos 30 cm finais após uma cravação inicial de 15 cm. Tal valor é utilizado para diversas finalidades, dentre elas a estimativa de capacidade de carga de estacas pelo método de Décourt-Quaresma.

O método de Aoki-Velloso se baseia no ensaio de cone (CPT), que se destaca pela obtenção de informações contínuas de resistência à penetração ao longo do furo, diferentemente do SPT, e pela eliminação da influência do operador nas medidas de ensaio. No entanto, o método foi ajustado com base em correlações entre ensaio de cone (CPT) e sondagem à percussão (SPT), de modo a permitir o uso do SPT diretamente.

O ensaio de cone (CPT) é normalizado pela NBR 12069 (ABNT, 1991) e consiste em uma ponteira cônica, que gira em velocidade constante, penetrando no solo. A ponteira cônica é intrumentada com células de carga, que permitem medições de resistência do cone, atrito lateral e pressão de poros.

## 2.2 Métodos semiempíricos de estimativa de capacidade de carga

A capacidade de carga de estacas pode ser obtida através de métodos estáticos ou dinâmicos. Nos métodos estáticos a capacidade de carga é estimada considerando a mobilização de toda a resistência do solo. Tais métodos podem ser racionais ou teóricos, quando se baseiam nos parâmetros de resistência do solo; semiempíricos, quando se baseiam em ensaios de campo (sondagens) ou empíricos, quando se baseiam apenas nas características dos solos.

Nos métodos dinâmicos a capacidade de carga de uma estaca é realizada com base na observação da sua resposta à cravação, considerando a nega e o repique elástico da estaca, ou pela teoria da equação da onda, onde se enquadra o ensaio de carregamento dinâmico, que também pode ser utilizado para cálculo de nega de forma mais precisa e segura.

Devido ao grande uso de sondagens para investigação do subsolo, principalmente a percussão (SPT), os métodos semiempíricos de dimensionamento costumam ser os mais utilizados para a determinação da capacidade de carga em estacas. No Brasil, os métodos mais utilizados são Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma (HACHICH *et al.*, 2012).

O método Aoki-Velloso, desenvolvido em 1975 para estacas pré-moldadas de concreto, baseia-se nos valores de resistência de ponta e atrito lateral obtidos no ensaio de penetração de cone (CPT). A capacidade de carga total é dada pela Equação 1:

$$Q_{ult} = A_b \times \frac{q_{cone}}{F1} + U \times \sum \left( \frac{\tau_{cone}}{F2} \times \Delta L \right) \quad (1)$$

onde:  $A_b$  é a área da ponta da estaca,  $q_{cone}$  é a resistência unitária de ponta do ensaio de cone,  $F1$  e  $F2$  são os fatores de escala e execução,  $\tau_{cone}$  é a resistência unitária lateral do ensaio de cone,  $U$  é o perímetro da seção da estaca e  $\Delta L$  é o comprimento de cada camada distinta de solo.

Para que se faça a relação entre a ponteira utilizada no CPT e a estaca a ser dimensionada, existem fatores de escala e execução chamados de  $F1$  e  $F2$  que variam de acordo com o tipo de estaca. A Tabela 1 apresenta os valores de  $F1$  e  $F2$ .

Tipo de Estaca	F1	F2
Franki	2,5	5,0
Metálica	1,75	3,5

Pré-moldada	1,75	3,5
Escavada	3,0	6,0

Tabela 1 – Fatores de escala e execução.  
 FONTE: Aoki e Velloso (1975) apud Velloso e Lopes (2012)

Também é possível utilizar o método com os dados oriundos da sondagem à percussão (SPT), obtendo o  $q_{cone}$  e  $\tau_{cone}$  através das Equações 2 e 3.

$$q_c = k \times N_1 \tag{2}$$

$$\tau_c = k \times \alpha \times N_2 \tag{3}$$

onde:  $q_{cone}$  é a resistência unitária de ponta do ensaio de cone,  $\alpha$  e  $k$  são coeficientes de correlação em função do tipo de solo (Tabela 2),  $\tau_{cone}$  é a resistência unitária lateral do ensaio de cone,  $N_1$  é o  $N_{SPT}$  da ponta da estaca e  $N_2$  é a média dos valores de  $N_{SPT}$  ao longo da camada de solo considerada.

Solo	K (MPa)	$\alpha$ (%)
Areia	1,00	1,4
Areia siltosa	0,80	2,0
Areia siltoargilosa	0,70	2,4
Areia argilosa	0,60	3,0
Areia argilosiltosa	0,50	2,8
Silte	0,40	3,0
Silte arenoso	0,55	2,2
Silte arenoargiloso	0,45	2,8
Silte argiloso	0,43	3,4
Silte argiloarenoso	0,25	3,0
Argila	0,20	6,0
Argila arenosa	0,35	2,4
Argila arenossiltosa	0,30	2,8
Argila siltosa	0,22	4,0
Argila siltoarenosa	0,33	3,0

Tabela 2 – Fatores de correlação.  
 Fonte: Aoki e Velloso (1975) apud Cintra e Aoki (2010)

O método Décourt-Quaresma, desenvolvido em 1978 para estacas pré-moldadas de concreto, determina a capacidade de carga através do  $N_{SPT}$  obtido na sondagem à percussão (SPT). Neste método a capacidade de carga total é dada pela Equação 4.

$$Q_{ult} = C \times N_P \times A_b + 10 \times \left( \frac{N_L}{3} + 1 \right) \times U \times L \tag{4}$$

onde:  $C$  é um coeficiente característico do solo (Tabela 3),  $N_P$  é o valor médio de  $N_{SPT}$  entre o correspondente à cota de assentamento da estaca, o imediatamente anterior e o imediatamente posterior,  $A_b$  é a área da ponta da estaca,  $N_L$  é o valor do  $N_{SPT}$  médio ao longo de todo o fuste da estaca,  $U$  é o perímetro da seção da estaca e  $L$  é o comprimento do fuste da estaca.

Tipo de solo	C (kPa)
Argila	120
Silte argiloso	200

Silte arenoso	250
Areia	400

Tabela 3 – Coeficiente  $C$  característico do solo.  
 FONTE: Cintra e Aoki (2010)

Mais tarde introduziram-se os fatores de ponderação  $\alpha$  e  $\beta$  para que o método pudesse ser utilizado para diferentes tipos de estacas e de solos, sendo que o fator  $\alpha$  é multiplicado pela resistência de ponta e o  $\beta$ , pelo atrito lateral. Como no caso em estudo as fundações são de estacas pré-moldadas de concreto, o uso desses fatores não se faz necessário.

Nota-se que as variáveis utilizadas para a aplicação dos métodos são basicamente os valores obtidos nos ensaios de penetração (SPT e CPT) e as dimensões da estaca (área e perímetro da seção e comprimento do fuste). Através deles, estima-se a resistência de ponta da estaca e a resistência por atrito lateral separadamente e, conseqüentemente, a resistência ou capacidade de carga total.

Pesquisas e avanços tecnológicos na área de fundações permitiram que os métodos fossem revisados e tivessem alguns coeficientes complementados ou corrigidos. Em alguns lugares, empresas e profissionais com grande experiência adaptaram as formulações de acordo com seus conhecimentos a respeito do solo em suas regiões, de tal maneira que é possível ter uma estimativa de capacidade de carga mais próxima da realidade.

Vianna (2000) comparou o resultado de capacidades de carga obtidas por provas de carga executadas na cidade de Curitiba com o resultado dos métodos de Aoki-Velloso e Décout-Quaresma. Na Figura 1 é possível perceber que a maioria dos valores de capacidade de carga obtidos através de ambos os métodos semiempíricos está abaixo da capacidade de carga real da prova de carga. No entanto, nota-se uma grande dispersão nos valores calculados, que pode acarretar em uma grande probabilidade de se obter valores de capacidade de carga menores que os reais nos métodos semiempíricos de dimensionamento, o que estaria contra a segurança.

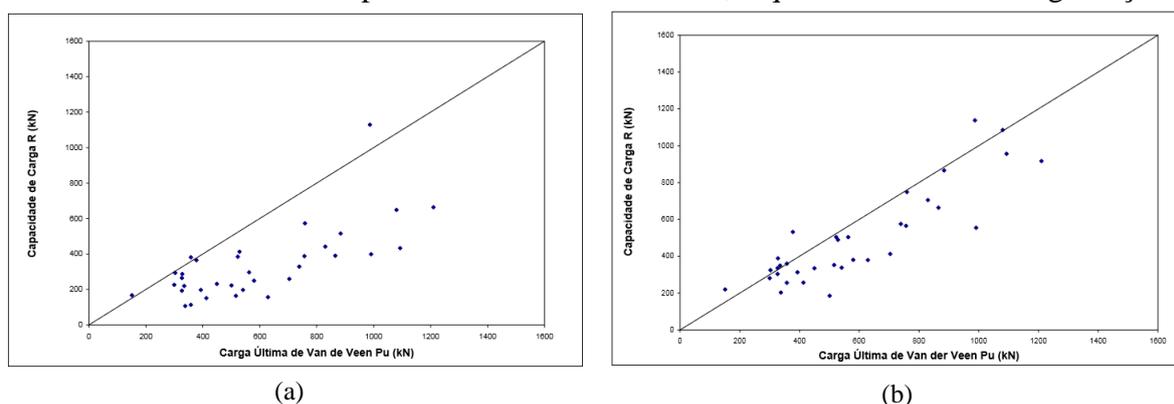


Figura 1 – Comparação entre métodos semiempíricos e provas de carga – (a) Aoki-Velloso, (b) Décout-Quaresma.

FONTE: Vianna (2000)

## 2.1 Verificação de desempenho de fundações

Segundo Hachich *et al.* (2012), a verificação de desempenho em estacas nada mais é que a comprovação de que os valores obtidos a partir dos métodos de estimativa de capacidade de carga estão de acordo com o comportamento do conjunto estaca-solo. No entanto, a dificuldade de realizar verificações de desempenho em fundações é maior quando comparada às demais etapas da obra devido a alguns fatores, como: a complexidade e heterogeneidade dos solos e de

suas características, a impossibilidade de visualização das fundações após sua execução e as incertezas e dificuldades inerentes aos ensaios de campo. Tais fatores reforçam ainda mais a importância da realização da verificação de desempenho em fundações.

Uma das principais técnicas de verificação de desempenho em estacas é o ensaio de carregamento estático, mais conhecido por prova de carga. Esta técnica é realizada aplicando-se cargas de valores conhecidos sobre o topo da estaca de maneira progressiva através de um macaco hidráulico com medição dos respectivos recalques. Quando se atinge a carga desejada, ou quando ocorre a ruptura, a estaca é descarregada. No Brasil esse ensaio é normalizado pela NBR 12131 (ABNT, 2006).

A NBR 6122 (ABNT, 2010) estabelece como obrigatória a execução de prova de carga estática para controle de desempenho de fundações em obras que tenham quantidade de estacas superior a 50, 75 ou 100 dependendo do tipo de estaca. Para as estacas pré-moldadas o valor limite é 100. Outra situação que torna a prova de carga obrigatória, é quando a tensão de trabalho supera um valor pré-fixado, que para estacas pré-moldadas é 7MPa.

Uma alternativa dada pela norma para realizar a verificação de desempenho em estacas é através de ensaios de carregamento dinâmico. Este ensaio se baseia no princípio de que a cravação de uma estaca é um fenômeno dinâmico: o impacto gerado pelo martelo que cai sobre a estaca gera uma onda de compressão que se propaga para baixo ao longo da estaca. A resistência oferecida pelo solo ao longo da estaca faz a onda refletir ascensionalmente (CINTRA, et al., 2013).

Em 1960, Smith propôs uma solução para a teoria da equação de onda. Segundo Velloso e Lopes (2012) o modelo de Smith representa o martelo do sistema de cravação como uma massa, a estaca como uma série de pesos separados por molas e o solo como molas e amortecedores. Desta forma, as molas elastoplásticas representam a resistência estática e os amortecedores representam a resistência dinâmica, proporcional à velocidade relativa estaca-solo. Na Figura 2 é possível visualizar esse modelo.

O desenvolvimento da computação e da eletrônica aliado à solução proposta por Smith facilitou a execução e interpretação do ensaio, tornando-o globalmente conhecido. No Brasil, o procedimento executivo do ECD é normalizado pela NBR 13208 (ABNT, 2007).

O ensaio consiste na aplicação de golpes (pelo próprio martelo de cravação) no topo da estaca. A intenção é gerar ondas de impacto que serão monitoradas através de transdutores de deformação e aceleração instalados no topo da estaca que são registrados e processados por um equipamento chamado PDA (*Pile Driving Analyser*). Na Figura 3 é possível visualizar o sensor de deformação, o qual é utilizado para se obter a força na seção e o acelerômetro, o qual é utilizado para se obter a velocidade da partícula da seção.

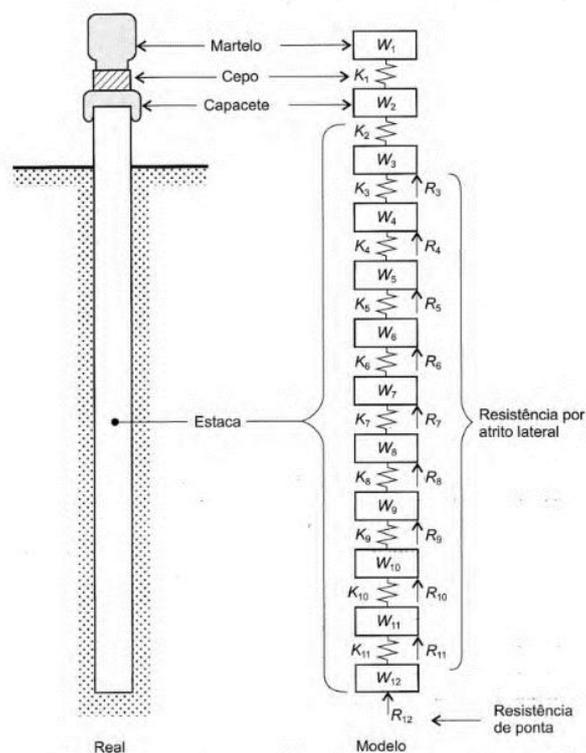


Figura 2 – Representação da estaca e do sistema de cravação segundo Smith (1960).  
 FONTE: Velloso e Lopes (2012)



Figura 3 – Seção de estaca instrumentada para a realização de ensaios de carregamento dinâmico.  
 FONTE: Dynamis Techne (2018)

O equipamento se utiliza da teoria da equação de onda para calcular diversos resultados, tais como resistência estática mobilizada e deslocamento máximo da estaca durante o impacto (CINTRA, et al., 2013). A NBR 13208 (ABNT, 2007) recomenda que sejam utilizados os métodos CASE<sup>®</sup> e CAPWAP<sup>®</sup> para o processamento e interpretação dos dados.

O método CASE<sup>®</sup> é um método simplificado pois, de acordo com Gonçalves (2007), ele se baseia em algumas hipóteses simplificadas, como o comportamento plástico e ideal do solo, a

estaca ser elástica e uniforme e o atrito lateral ser mobilizado de maneira igual para as ondas descendentes e ascendentes.

O software CAPWAP<sup>®</sup> é um método que, assim como o método CASE<sup>®</sup>, utiliza os dados de força e velocidade obtidos com o PDA. A análise feita por ele segue o mesmo princípio do modelo proposto por Smith (a estaca é representada por massas e molas) tornando possível determinar os deslocamentos de cada “massa” e as respectivas reações do solo. O processo permite prever a carga que é mobilizada no solo durante o golpe do martelo ao longo do fuste da estaca (GONÇALVES, 2007). A resistência total mobilizada é dada pela Equação 5.

$$R_t = \frac{[(F_{t1} + F_{t2}) + \left(\frac{E \times A}{c}\right) \times (v_{t1} - v_{t2})]}{2} \quad (5)$$

onde:  $R_t$  é a resistência total (estática e dinâmica),  $F_{t1}$  é a força medida no instante  $t_1$  (primeiro pico de força - quando o pulso passa pelos sensores),  $F_{t2}$  é a força medida no instante  $t_2$  (pico de força refletida - quando chega a força refletida da ponta da estaca),  $A$  é a área da seção transversal do elemento de fundação,  $E$  é o módulo de deformabilidade do material da fundação,  $c$  é a velocidade da onda,  $v_{t1}$  é a velocidade medida em  $t_1$  e  $v_{t2}$  é a velocidade medida em  $t_2$ .

A Equação 5 também é utilizada no método CASE<sup>®</sup>, no entanto, a resistência dinâmica é obtida usando um fator aplicado à parcela da velocidade, que diz quanto daquela parcela é a resistência estática e quanto é a dinâmica. Este fator é maior para solos finos e quanto maior, maior a parcela dinâmica e menor a estática.

A rapidez de execução do ensaio e seu custo em relação à prova de carga estática se mostram como sendo as principais vantagens da utilização do ECD para verificação de desempenho de estacas. Além disso, a NBR 6122 permite que provas de carga estáticas sejam substituídas por ensaios de carregamento dinâmico na proporção de cinco para um (nas condições definidas pela própria norma).

### 3. METODOLOGIA

O elemento de estudo deste artigo é uma obra de um edifício residencial de 15 pavimentos, que se localiza no bairro de Oficinas na cidade de Ponta Grossa, Paraná, assente sobre a formação Ponta Grossa, que pertence à grande bacia sedimentar do Paraná.

Em relação à investigação geotécnica, foram realizadas quatro sondagens à percussão (SPT) distribuídas no terreno. As informações obtidas em cada furo são apresentadas na Figura 4.

Através das sondagens realizadas, notou-se que, de forma geral, as primeiras camadas de solo, em média 5 metros de profundidade, são compostas de uma argila de consistência mole a muito mole de coloração marrom. Aos 6 metros, a argila passa a ter uma consistência média a rija de coloração variegada (cinza, amarela e rosada). A partir dos 7 metros, todos os furos já apresentam uma argila dura, ainda de coloração variegada. Por volta dos 16 metros de profundidade essa argila dura torna-se apenas cinza, característica típica de folhelhos da formação Ponta Grossa. O nível d'água foi observado entre 6 e 7,5 metros de profundidade em todos os furos.

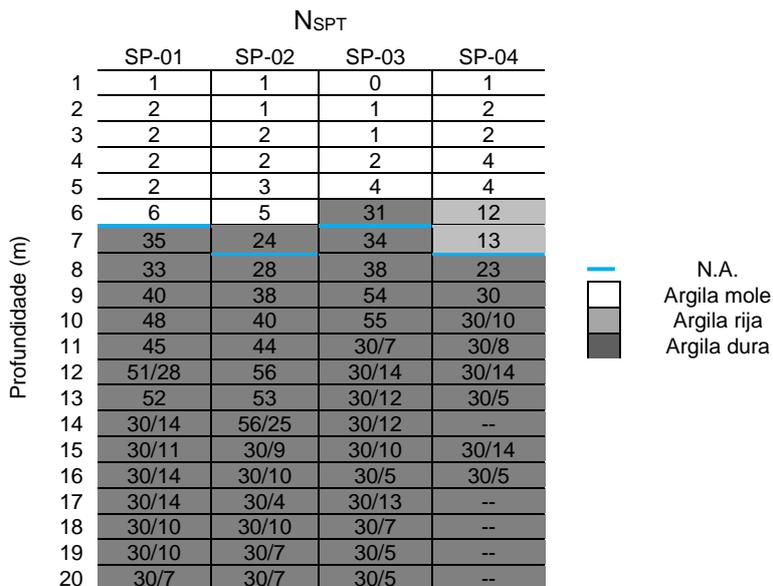


Figura 4 - Esquema com os números de golpes de cada sondagem SPT.

A fundação do edifício é composta por 142 estacas pré-moldadas de concreto armado com seções quadradas que variam de 14 a 40 cm de lado. O pilar mais carregado da obra possui carga de 330tf. Cinco estacas da obra foram ensaiadas através de carregamento dinâmico. A Figura 5 mostra um esquema com as estacas da obra e os furos das quatro sondagens realizadas.

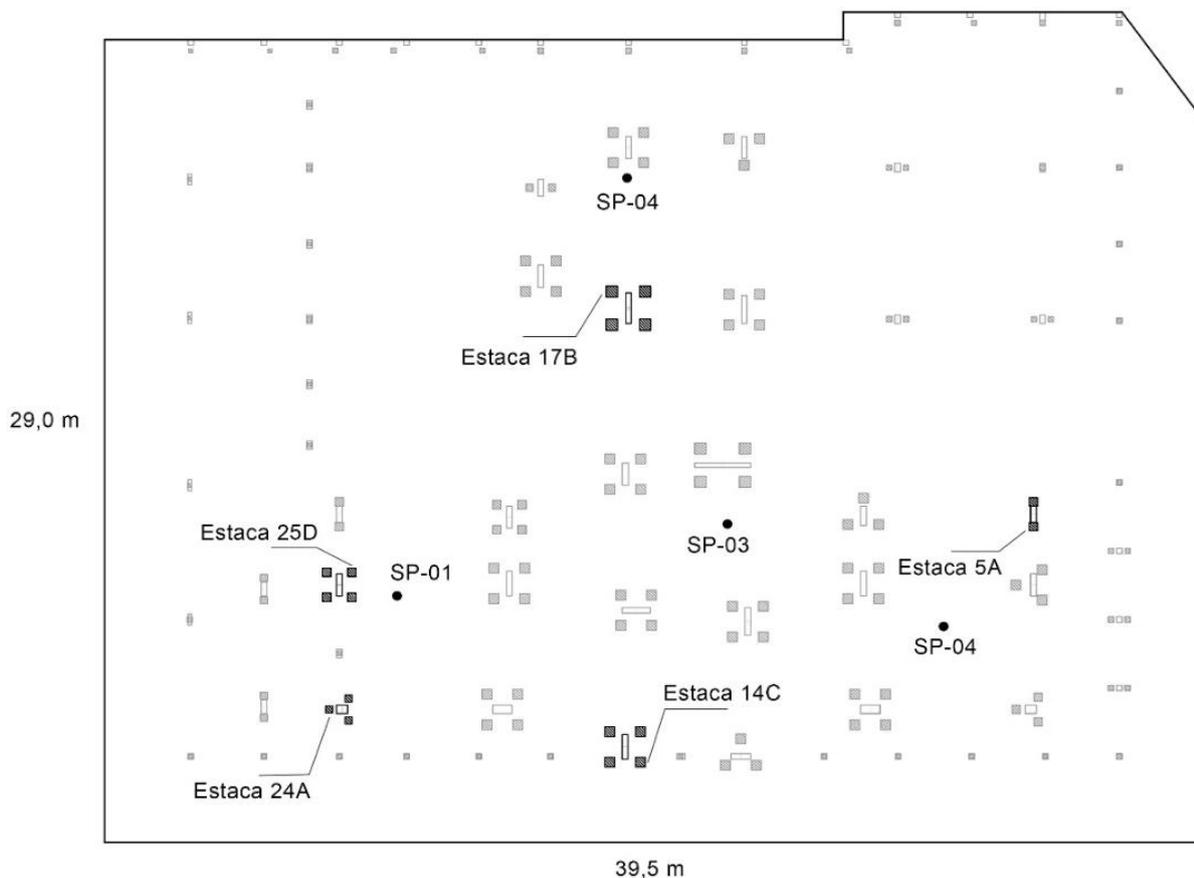


Figura 5 – Esquema com a locação das estacas e dos ensaios SPT realizados.

Os ensaios de carregamento dinâmico foram realizados por recravação, ou seja, dias após a cravação das estacas. A Tabela 4 apresenta as características geométricas das estacas ensaiadas e o carregamento recebido pelas mesmas.

Estaca	Seção (m)	Compr. Cravado (m)	Carga (tf)
P5A	0,30x0,30	11,0	48,5
P14C	0,35x0,35	11,1	63,5
P17B	0,40x0,40	9,0	82,5
P24A	0,25x0,25	8,0	39,3
P25D	0,30x0,30	10,1	53,5

Tabela 4 - Esquema com os números de golpes de cada sondagem SPT.

O dimensionamento dessas estacas foi realizado através dos métodos semiempíricos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma, com o objetivo de comparação das estimativas totais de capacidade de carga, bem como as parcelas de ponta e atrito lateral, com os valores obtidos nos ensaios de carregamento dinâmico.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 5 apresenta os valores de capacidade de carga total obtidos pelos métodos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma e pelo ensaio de carregamento dinâmico. Para facilitar as comparações entre os valores de capacidade de carga estimados pelos métodos semiempíricos com os resultados dos ensaios de carregamento dinâmico, foi construído um gráfico de barras, como mostrado na Figura 6.

Estaca	Aoki-Velloso	Décourt-Quaresma	ECD
P5A	92,98	90,09	177,10
P14C	195,28	180,73	242,70
P17B	126,54	108,30	228,90
P24A	52,03	41,67	125,30
P25D	119,73	101,38	181,80

Tabela 5 – Capacidade de carga total das estacas ensaiadas (tf).

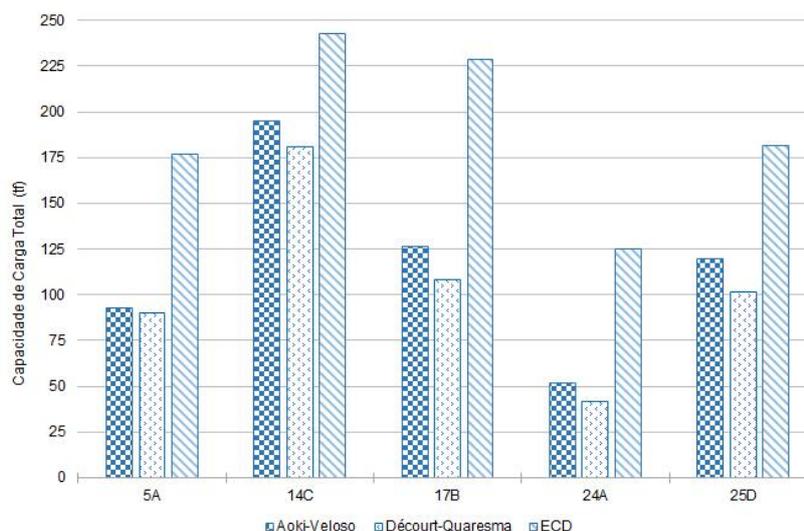


Figura 6 – Valores de capacidade de carga total.

É possível verificar que em relação aos métodos semiempíricos, o método Aoki-Velloso mostrou resultados superiores aos de Décourt-Quaresma para todas as estacas. Ao comparar ambos os métodos com os resultados do ECD, nota-se que a real resistência mobilizada pela estaca é superior aos respectivos valores calculados pelos métodos semiempíricos: Aoki-Velloso representa em média 59% dos valores de resistência obtidos pelo ensaio dinâmico; já Décourt-Quaresma, 52%.

A Tabela 6 e a Figura 7 apresentam a comparação da resistência de ponta calculada pelos métodos semiempíricos com a obtida nos ensaios ECD para as 5 estacas ensaiadas.

Estaca	Aoki-Velloso	Décourt-Quaresma	ECD
P5A	30,86	32,40	48,30
P14C	70,00	73,50	134,20
P17B	69,49	67,84	116,80
P24A	23,57	27,00	45,70
P25D	49,37	47,88	35,00

Tabela 6 – Resistência de ponta das estacas ensaiadas (tf).

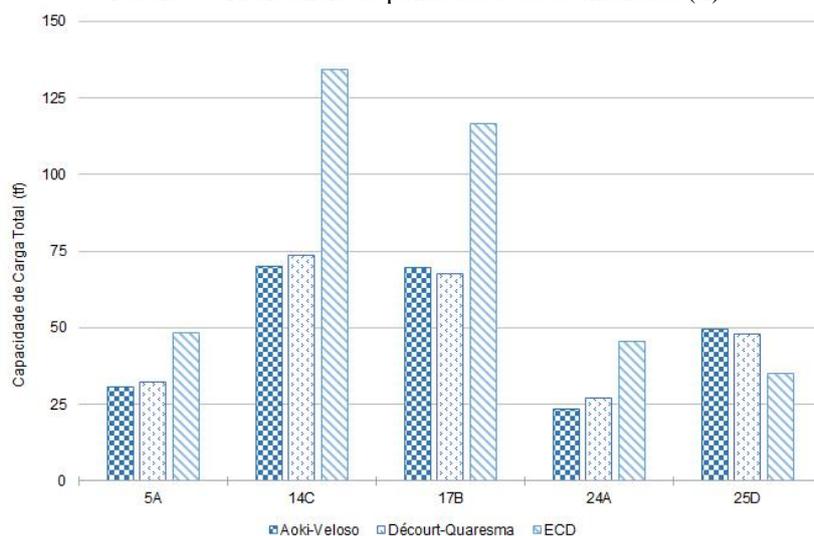


Figura 7 – Resistência de ponta das estacas ensaiadas (tf).

Nota-se que, com exceção da estaca P25D, a resistência de ponta calculada pelos métodos semiempíricos foi inferior a resistência de ponta obtida no ECD para todas as estacas. Sendo que esses valores representam de 52 a 67% dos valores reais ensaiados. Percebe-se também, ao comparar os dois métodos semiempíricos, que os valores obtidos são semelhantes entre si.

A estaca P25D foi dimensionada com os dados da sondagem SP-01, devido à proximidade da estaca com esse furo. Essa estaca tem 10,1 m de comprimento e sua ponta encontra-se em uma camada de solo com  $N_{SPT}$  bastante elevado igual a 48 golpes. Como o ECD mostrou um valor de resistência de ponta inferior ao calculado com os dados da sondagem, é provável que na região da estaca houvesse um solo com resistência menor a considerada.

A Tabela 7 e a Figura 8 apresentam a comparação da resistência por atrito lateral calculada pelos métodos semiempíricos com a obtida nos ensaios ECD para as 5 estacas ensaiadas.

Estaca	Aoki-Velloso	Décourt-Quaresma	ECD
P5A	62,13	57,69	128,80
P14C	125,28	107,23	108,50
P17B	57,05	40,46	112,10
P24A	28,46	14,67	79,60
P25D	70,35	53,50	146,80

Tabela 7 – Resistência por atrito lateral das estacas ensaiadas (tf).

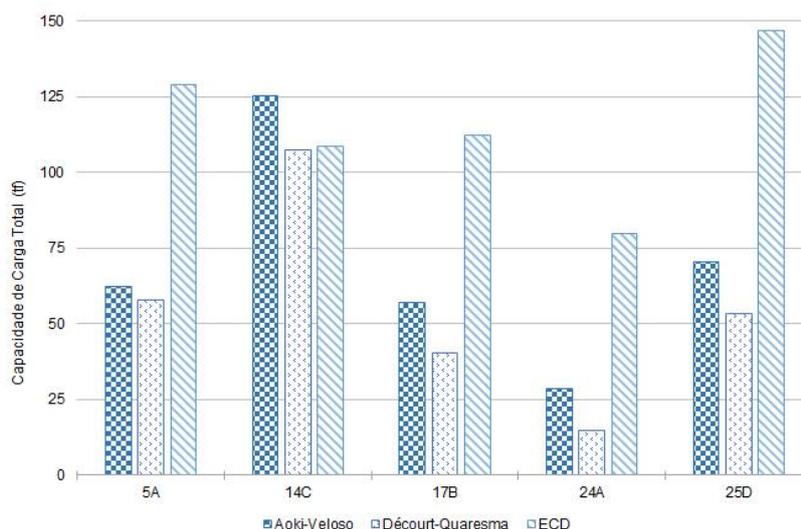


Figura 8 – Resistência por atrito lateral das estacas ensaiadas (tf).

Nota-se que, com exceção da estaca P14D, a resistência por atrito lateral calculada pelos métodos semiempíricos foi inferior a resistência por atrito lateral obtida no ECD para todas as estacas. Sendo que esses valores representam de 18 a 51% dos valores reais ensaiados. Percebe-se também, ao comparar os dois métodos semiempíricos, que o método de Décourt-Quaresma apresentou resultados mais conservadores para todas as estacas.

Para uma melhor análise do desenvolvimento do atrito lateral ao longo do fuste da estaca, foram desenvolvidos gráficos ao longo da profundidade com ambos os métodos semiempíricos e os valores de  $N_{SPT}$  representativos do local da estaca. Na Figura 9 se encontra o gráfico para a estaca 5A.

É possível notar que até os 8 metros de profundidade, os valores de resistência calculados pelos métodos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma são bem próximos aos obtidos através do ECD. Nessa profundidade, baseado no SP-04, percebe-se um aumento brusco do  $N_{SPT}$ , coerente ao significativo ganho de resistência por atrito lateral abaixo dessa profundidade observado pelo ECD.

Tal comportamento também é observado na estaca 25D e 17B, a resistência por atrito lateral obtida no ECD começa a se distanciar das calculadas pelos métodos semiempíricos quando os valores de  $N_{SPT}$  aumentam significativamente. Isso ocorre a partir de 7 metros de profundidade, visualizando o SP-01 e o SP-02, respectivamente. As Figuras 10 e 11 apresentam essas comparações.

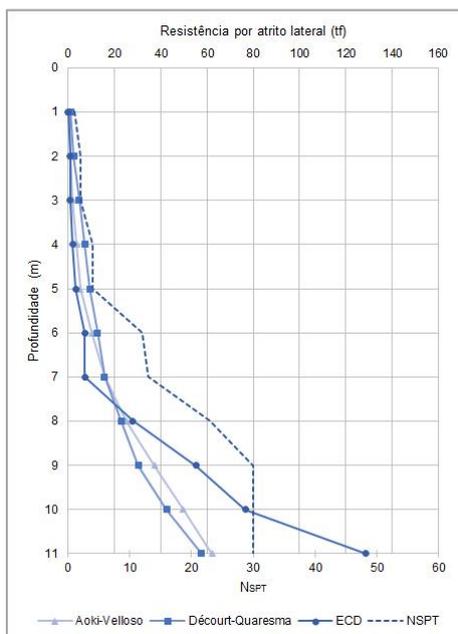


Figura 9 – Resistência por atrito lateral por metro de profundidade – Estaca 5A (SP-04).

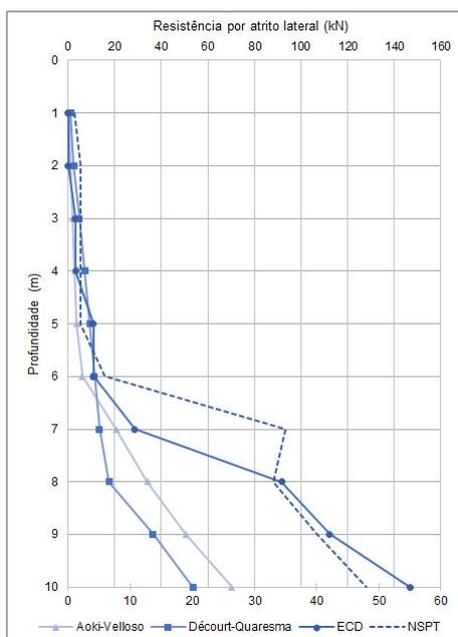


Figura 10 – Resistência por atrito lateral por metro de profundidade – Estaca 25D (SP-01).

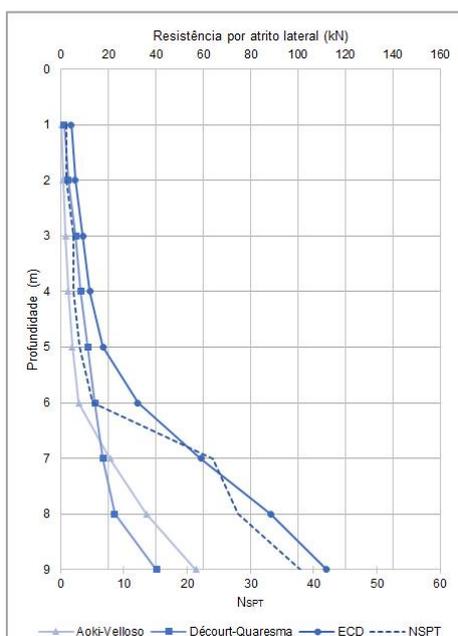


Figura 11 – Resistência por atrito lateral por metro de profundidade – Estaca 17B (SP-02).

Já nos resultados da estaca 24A percebe-se que os valores do ECD superam os métodos de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma já alguns metros antes do acréscimo no número de golpes ( $N_{SPT}$ ). O gráfico com os resultados para a estaca é mostrado na Figura 12.

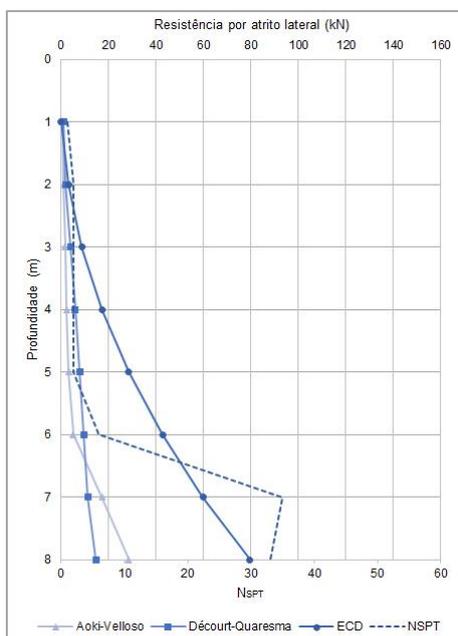


Figura 12 – Resistência por atrito lateral por metro de profundidade – Estaca 24A (SP-01).

A estaca 14C, que apresentou valores de resistência por atrito lateral semelhantes entre os métodos semiempíricos e ECD, é apresentada na Figura 13. Nota-se que o  $N_{SPT}$  cresce muito por volta dos 6 metros de profundidade, mas que o atrito lateral obtido não acompanha tal crescimento. Essa estaca foi dimensionada pelo SP-03, que apesar de ser o furo mais próximo a essa estaca, localiza-se a aproximadamente 9 metros de distância da mesma e provavelmente não representa o real perfil do solo no local da estaca.

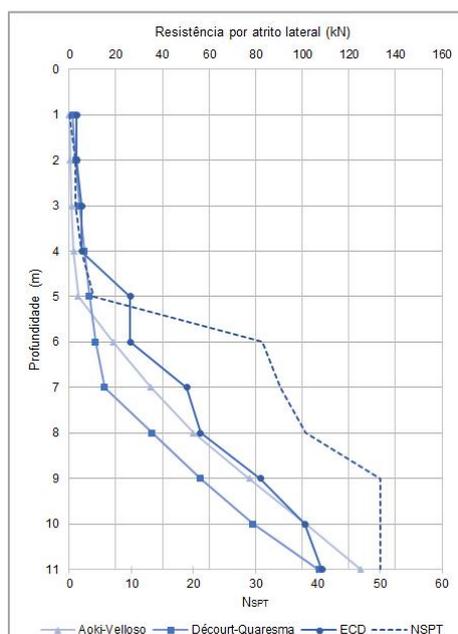


Figura 13 – Resistência por atrito lateral por metro de profundidade – Estaca 14C (SP-03).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTA DE CONTINUIDADE

Através das comparações realizadas entre os resultados calculados pelos métodos semiempíricos e os dados dos ensaios de carregamento dinâmico, pode-se afirmar que todas as estacas tiveram seu desempenho comprovado quanto à capacidade de carga, uma vez que em todas elas a real resistência mobilizada no solo pela estaca foi superior à resistência do dimensionamento. Os valores de Aoki-Velloso e Décourt-Quaresma representam, em média, 56% dos valores obtidos no ECD.

Apesar dos valores de capacidade de carga total do ECD serem superiores aos valores dos métodos semiempíricos para todas as estacas, ao separar resistência de ponta e atrito lateral o mesmo não se verifica. Em um dos casos avaliados, a estaca P25D apresentou resistência de ponta menor no ECD, enquanto que para outra estaca, P14C, foi observada menor resistência por atrito lateral no ECD do que no método de Aoki-Velloso. De qualquer forma, a maioria das estacas ensaiadas apresentou valores superiores de resistência de ponta e atrito lateral quando ensaiadas em campo do que nos métodos de dimensionamento semiempíricos.

Ao se analisar os dados de resistência por atrito lateral por metro de profundidade, percebe-se que os métodos semiempíricos se aproximam mais dos valores do ECD para valores mais baixos de  $N_{SPT}$  para a maioria das estacas ensaiadas. Quando o  $N_{SPT}$  atinge valores da ordem de 30 golpes, a resistência obtida no ECD se distancia significativamente dos cálculos semiempíricos, fornecendo valores superiores. Tal fato pode ocorrer devido à geologia local, pois o folhelho da Formação Ponta Grossa apresenta uma resistência bastante elevada, fazendo que os resultados dos métodos semiempíricos sejam mais conservadores nesse material.

Os métodos semiempíricos quando comparados entre si apresentaram resultados muito próximos para a resistência de ponta e uma maior diferença no atrito lateral, sendo que o método de Décourt-Quaresma se mostrou mais conservador nessa situação.

Foi possível observar a grande influência dos valores de  $N_{SPT}$  nos dimensionamentos semiempíricos, o que é uma desvantagem desses métodos, pois esse ensaio possui incertezas e

nem sempre é representativo para todas as estacas da obra. Isso reforça a necessidade da comprovação do desempenho das estacas em campo através de ensaios de carregamento estático ou dinâmico, já que muitas vezes as estacas são dimensionadas por métodos semiempíricos, que tem sua validade comprovada apenas para a situação na qual eles foram desenvolvidos. O dimensionamento baseado em ensaios dinâmicos pode prover resultados mais realísticos, baseados na condição existente em cada situação.

Os ensaios de carregamento dinâmico (ECD) se mostraram como uma ferramenta adequada para a análise de desempenho de estacas em função das informações obtidas e da rapidez de execução. No entanto, a NBR 6122 não permite a redução de coeficientes de segurança no dimensionamento de fundações com ensaios de carregamento dinâmico realizados no início da obra, para isso são necessárias provas de carga. Normas internacionais, como o Eurocode, permitem essa redução, que pode melhorar a viabilidade econômica do empreendimento. Tal fato pode ser uma sugestão para a NBR 6122, que se encontra em revisão.

## REFERÊNCIAS

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 13208: Estacas – Ensaio de Carregamento Dinâmico.* Rio de Janeiro. 2007.

\_\_\_\_\_. *NBR 6122: Projeto e execução de fundações.* Rio de Janeiro. 2010.

\_\_\_\_\_. *NBR 6484: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio.* Rio de Janeiro. 2001.

\_\_\_\_\_. *NBR 12069: Solo – Ensaio de penetração de cone in situ (CPT) - Método de ensaio.* Rio de Janeiro. 1991.

\_\_\_\_\_. *NBR 12131: Estacas - Prova de carga estática - Método de ensaio.* Rio de Janeiro. 2006.

**CINTRA, José Carlos A. et al.** *Fundações: ensaios estáticos e dinâmicos.* São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

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

**DYNAMIS TECHNE.** Disponível em <https://dynamistechne.com/nossos-servicos/prova-de-carga-dinamica-em-estacas/>. Acesso em 11 de outubro de 2018.

**GONÇALVES, Cláudio; BERNARDES, Georges de Paula; NEVES, Luis Fernando de Seixas.** *Estacas Pré-Fabricadas de Concreto: Teoria e Prática.* 1. ed. São Paulo: Pini. 2007.

**HACHICH, Waldemar et al.** *Fundações: Teoria e Prática.* 2. ed. São Paulo: Pini, 2012.

**SCHNAID, Fernando; ODEBRECHT, Edgar.** *Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações.* 2 Ed. São Paulo: Oficina dos Textos, 2012.

**VELLOSO, Dirceu A; LOPES, Francisco R.** *Fundações: Critério de projeto – Investigação do subsolo – Fundações superficiais – Fundações profundas.* São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

**VIANNA, Ana Paula F.** *Análise de Provas de Carga Estática em Estacas Pré-Moldadas Cravadas na Cidade de Curitiba e Região Metropolitana.* Dissertação de Mestrado. EESC USP. São Carlos, 2000.