

COMPORTAMENTO DE FUNDAÇÕES EM SOLOS SEDIMENTARES: SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE ENSAIOS DE CARREGAMENTO DINÂMICO

Neile Cristina Andraos*

Gabriella Bevervanço**

Alessander C. Morales Kormann***

RESUMO: O Ensaio de Carregamento Dinâmico é uma ferramenta para o controle de qualidade de fundações profundas, através de instrumentações. Essas instrumentações registram sinais de força e velocidade da onda de tensão provocada pelo impacto de um martelo. O ensaio nos oferece como resultado a verificação da capacidade de carga e também da integridade estrutural da estaca. Para a aplicação do ensaio em estacas moldadas *in loco* o sistema de aplicação de golpes deve ser selecionado. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do sistema de impacto e amortecimento através de simulações do ensaio, realizadas em estacas moldadas *in loco*. Partiu-se de um banco de dados contendo noventa estacas as quais foram utilizadas para a definição de três estacas modelos: curta, média e longa. Com isto foram realizadas simulações do ensaio empregando-se o método da equação da onda através do programa GRLWEAP™, tendo-se variado os parâmetros de entrada do sistema de impacto e amortecimento. Os resultados mostraram-se consistentes com o comportamento esperado a partir das teorias de propagação de onda unidimensional, com a tensão de compressão aumentando com o peso do martelo e a altura de queda e a tensão de tração diminuindo com o aumento do peso do martelo e aumentando com a altura de queda.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio de Carregamento Dinâmico; Estacas Moldadas *in loco*; Sistema de Impacto e Amortecimento.

BEHAVIOR OF FOUNDATIONS IN SEDIMENTARY SOIL: COMPUTER SIMULATIONS WITH HIGH-STRAIN DYNAMIC LOAD TEST

ABSTRACT. High-strain dynamic load test is a tool for deep foundations quality control by means of instruments which register force and velocity of the strain waves caused by hammer impact. The test verifies load capacity and the foundation's structural integrity. Application system of strokes has to be determined so that tests in cast-in-place piles could be applied. Current investigation evaluates the influence of impact and hammer-cushion systems by test simulations undertaken in cast-in-place piles. Data bank with ninety piles was used to determine the three model piles: short, medium and long. Assay simulations were undertaken by wave equation method with GRLWEAP™ program, featuring several parameters for impact and hammer-cushion systems. Results show consistency in the expected behavior according to the unidimension wave propagation theories, with an increasingly compression tension according to hammer weight and fall height and a decrease in traction tension according to increase in hammer weight and fall height.

KEYWORDS: High-strain Dynamic Load Test; Cast-in-place Piles; Impact and Hammer-cushion System.

* Docente do curso de Engenharia Civil no Departamento de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná – UFPR. E-mail: neileandraos@gmail.com

** Discente do curso de Engenharia Civil no Departamento de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná – UFPR. E-mail: ga_bevervanco@hotmail.com

*** Docente do curso de Engenharia Civil no Departamento de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná – UFPR. E-mail: alessander@ufpr.br

INTRODUÇÃO

O Ensaio de Carregamento Dinâmico (ECD), baseado na análise de cravação de estacas através de instrumentação e fundamentado na teoria da equação da onda (SMITH, 1960), objetiva determinar a capacidade de carga da interação estaca-solo. Fornece informações a respeito da integridade da estaca, do deslocamento máximo e das tensões máximas de compressão e de tração durante o golpe, dentre outros subsídios (ABNT, 2007).

O ensaio foi desenvolvido para estacas pré-moldadas inseridas no terreno através de um sistema de cravação. No entanto, segundo Likins e Hussein (1995), é comum a sua utilização em estacas moldadas *in loco* no mundo todo.

No caso de estacas cravadas um sistema de cravação definido em projeto encontra-se disponível e pode ser utilizado na realização dos ensaios. Já para estacas moldadas *in loco* há a necessidade da seleção de um sistema de impacto.

O presente trabalho pretende colaborar com o desenvolvimento de critérios para a execução de ensaios de carregamento dinâmico em estacas moldadas *in loco*, verificando através de simulações do ensaio, a influência de parâmetros relacionados ao sistema de impacto e amortecimento sobre as estacas.

2 ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO

O ECD é baseado na aquisição de sinais, através de instrumentação, de força e velocidade da onda provocada por um impacto, com auxílio de uma unidade específica. No Brasil, o equipamento mais difundido é o PDA® - *Pile Driving Analyzer*. Este equipamento realiza uma série de cálculos, inclusive a estimativa da capacidade de carga, através do Método CASE® - *Case Western Reserve Institute*, que consiste em uma solução matemática fechada. O método é baseado em hipóteses simplificadoras, tais como a homogeneidade e uniformidade da estaca, e deve ser confirmado posteriormente por uma análise numérica, tal como o processo iterativo de ajuste de parâmetros do modelo, realizado através de um programa do tipo CAPWAP® - *Case Pile Wave Analysis Program* (GOBLE; LINKINS; RAUSCHE, 1980).

Quando uma estaca é solicitada pelo impacto de um martelo uma zona do material é comprimida. Essa compressão causa uma tensão que será transmitida para camadas subsequentes. O processo contínuo de compressão desenvolve uma onda de tensão que se propaga ao longo da estaca (BERNARDES, 1989).

A Equação 1 descreve o deslocamento (u) de uma partícula no espaço, a uma distância (x) do topo da estaca, e no tempo (t), provocado pela propagação de uma onda de velocidade c.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{1}$$

A solução geral desta equação, inicialmente apresentada por D'Alembert (1747 *apud* BERNARDES, 1989), considera algumas hipóteses simplificadoras, tais como, seção transversal uniforme, material isotrópico, tensão axial uniformemente distribuída sobre a seção transversal, e pode ser expressa como a soma de duas funções:

$$u(x,t) = f(x - ct) + g(x + ct) \tag{2}$$

As funções f e g correspondem a duas ondas que se propagam com a mesma velocidade, mas em direções contrárias. As ondas se deslocam em direções opostas no tempo, mas não mudam de forma.

Smith (1960) desenvolveu um método matemático para a análise do carregamento dinâmico de estacas baseado na propagação de uma onda de tensão, o conjunto de equações utilizadas pelo autor pode ser encontrado no artigo original e em Velloso e Lopes (2002).

No modelo de Smith (1960), os componentes envolvidos, tais como martelo, estaca, sistemas de amortecimento, são representados como uma série de pesos e molas (Figura 1).

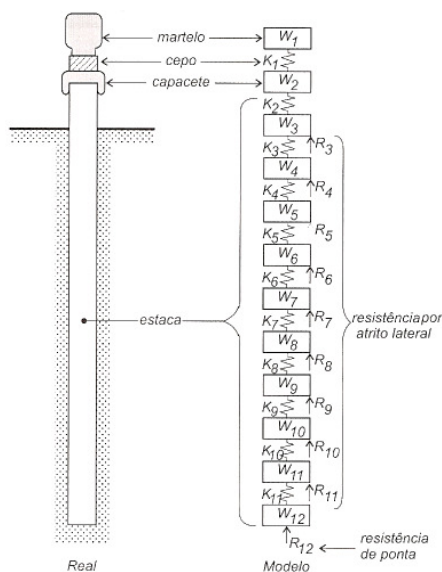


Figura 1 Esquema de pesos e molas proposto por Smith (1960)

Fonte: Velloso e Lopes (2002)

Para o cálculo, cada componente é considerado separadamente no intervalo de tempo. Para cada intervalo, são calculadas cinco variáveis: o deslocamento do peso, em relação à posição inicial, a compressão da mola, a força exercida pela mola, a força resultante atuante no peso e a velocidade do peso (VELLOSO; LOPES, 2002).

Com relação à resistência oferecida pelo solo, duas componentes podem ser destacadas: a estática e a dinâmica. A resistência estática, de comportamento elasto-plástico, proporcional ao deslocamento, é dada por uma mola; enquanto que a dinâmica, considerada viscosa, proporcional à velocidade de deslocamento e à resistência estática, é dada por um amortecedor (VELLOSO; LOPES, 2002).

Smith (1960) denominou a deformação elástica do solo de *quake* (Q). O *quake* define o deslocamento para o qual a resistência estática última (R_u) é atingida (VELLOSO; LOPES, 2002).

O solo oferece uma resistência instantânea quando submetido a movimentos, a resistência dinâmica. Para computá-la, introduz-se o conceito de *damping* viscoso (J), ou coeficiente de amortecimento (SMITH, 1960).

Programas computacionais baseados no modelo discreto de equação da onda proposto por Smith (1960), conhecidos como Equação da Onda "*Wave Equations*" (GOBLE; LINKINS; RAUSCHE, 1980), foram desenvolvidos para a simulação da cravação de estacas. Entre eles estão WEAP (PDI, 2002) e TTI (HIRSCH *et al.*, 1976 apud PDI, 2002), utilizados nos Estados Unidos. O programa WEAP, *Wave Equations Analysis of Piles* (GOBLE; RAUSCHE, 1976), foi utilizado neste trabalho.

O GRLWEAP™ (PDI, 2002), versão atual do WEAP, simula os movimentos e as forças produzidas pelo impacto de um martelo em uma estaca através da teoria da equação da onda.

Em geral, os dados de entrada das simulações referem-se às características do sistema de impacto, dados da estaca e do solo. Fornecidos esses dados e a capacidade de carga estimada, o programa calcula o número de golpes necessários para a obtenção de um deslocamento permanente, as tensões axiais na estaca e a energia transferida do sistema para a estaca (PDI, 2002).

Em resumo, de acordo com Likins e colaboradores (1996), uma análise de equação da onda, através do GRLWEAP™, necessita dos seguintes parâmetros:

Dados do martelo: peso, condições de queda, altura da queda e eficiência;

Dados do amortecimento: área, espessura, módulo de elasticidade e coeficiente de restituição;

Dados do capacete: peso;

Características da estaca: comprimento, área, densidade e módulo de elasticidade;

Características do solo: valor e distribuição da resistência estática, valores de quake e damping ao longo do fuste e na ponta.

O martelo é o mais simples e mais importante componente do modelo (PDI, 2002). Geralmente, uma única massa, de peso W , é o suficiente para representá-lo.

A eficiência do martelo (η) é a variável que traduz as perdas de energia que ocorrem em função de atritos internos ao equipamento. Dentre os parâmetros do sistema de aplicação de impacto, é o que mais afeta os resultados, tendo grande efeito na intensidade das ondas geradas na estaca em decorrência do impacto do pilão (KORMANN, 1993).

De acordo com PDI (2002) o coeficiente de restituição (e) é uma propriedade do material que indica a fração de energia temporariamente armazenada durante a compressão. Para elementos de madeira, usualmente é recomendado o valor de 0,5.

De acordo com Kormann (1993), a rigidez (k) exerce influência sobre a ordenada máxima do sinal de força, sendo importante no controle das tensões impostas pelo martelo à estaca.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa GRLWEAP™ permite a seleção de diversos modelos e parâmetros para a realização das análises. Em todas as simulações realizadas nesta pesquisa fez-se uso do modelo original proposto por Smith (1960) com as modificações introduzidas no *software*.

Os dados do martelo a serem inseridos são: peso, comprimento, diâmetro, número de segmentos, altura de queda e eficiência. Um único segmento foi adotado. A altura de queda (H), a eficiência (η) e o peso (W) foram variados.

Para a modelagem das chapas de madeira compensada, utilizadas como amortecimentos nos ensaios, foram considerados a rigidez (k) e o coeficiente de restituição (e).

O efeito destes parâmetros foi verificado sobre as simulações. Para isso, adotaram-se três estacas: curta, média e longa.

As 90 estacas pertencentes a um banco de dados foram divididas em três categorias: curta, média e longa. Sendo assim consideradas de acordo com a relação L/D (comprimento/diâmetro): curta, L/D menor que 30; média, L/D entre 30 e 45; longa, L/D maior que 45. Esses valores foram definidos com

base no banco de dados.

Os valores médios de comprimento e diâmetro de cada categoria definiram a geometria de três estacas modelo. Um resumo de suas características pode ser visualizado no Quadro 1.

Quadro 1 Características das estacas modelo

Estaca	L (m)	D (cm)	L/D
Curta	9	60	15
Média	15	50	30
Longa	20	40	50

Os dados necessários para a realização das análises, ou seja, de capacidade de carga, módulo de elasticidade, peso específico, *quake* lateral e de ponta, *damping* lateral e de ponta, bem como a distribuição das resistências, foram assumidos de acordo com as estacas mais usuais, segundo o banco de dados. Não foi considerado um determinado tipo de solo na concepção das estacas.

Para as simulações efetuadas sobre as três estacas adotadas foram variados:

Os pesos do martelo (W), definidos a partir do peso da estaca (W_p), variando de $0,1 W_p$ a $1,0 W_p$.

As eficiências do martelo (η), considerando-se o intervalo de 30 % e 65 %.

A rigidez do amortecimento (k), considerando-se um limite superior de 1200 kN/mm.

As resistências (Quadro 2), assumindo-se três valores para cada estaca, cuja escolha foi baseada nas estacas pertencentes ao banco de dados e na capacidade estrutural.

Quadro 2 Resistências últimas impostas nas simulações

Estaca	R_{u1} (kN)	R_{u2} (kN)	R_{u3} (kN)
Curta	1000	2000	3000
Média	800	1800	2800
Longa	600	1600	2600

As alturas de queda (H), definidas de acordo com o banco de dados, variando de 0,5 a 3,0 m.

Um resumo dos dados de entrada das análises para as simulações das diversas combinações pode ser visualizado na Tabela 1.

Os resultados são gerados no GRLWEAP™ de acordo com o peso e eficiência do martelo, altura de queda e rigidez. Desta forma, foram separados em quatro grupos, por eficiência do

martelo e rigidez do amortecimento. Os quatro grupos gerados para cada estaca, em resumo, são:

Baixa eficiência do martelo e baixa rigidez do amortecimento;

Baixa eficiência do martelo e alta rigidez do amortecimento;

Alta eficiência do martelo e baixa rigidez do amortecimento;

Alta eficiência do martelo e alta rigidez do amortecimento.

Tabela 1 Entrada das simulações

Dados das Simulações	Estaca		
	Curta	Média	Longa
Características da Estaca			
L (m)	9,0	15,0	20,0
D (m)	60	50	40
L/D	15	30	50
W_p (kN)	61,1	70,7	60,3
Dados do Martelo			
Peso (kN)	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 e 1,0 W_p		
Altura	Ajustada para cada peso		
Diâmetro	Ajustado para cada peso		
Altura de queda (m)	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0		
Eficiência (%)	Baixa (30%) e Alta (65%)		
Dados do Amortecimento			
C.O.R.	0,5	0,5	0,5
Rigidez (kN/mm)	100 e 1200	80 e 1200	50 e 1200
Dados da Estaca			
Comprimento (m)	9	15	20
Penetração (m)	8	14	19
Área (cm ²)	2827	1963	1257
Módulo de Elasticidade (MPa)	25500	25500	25500
Peso Específico (kN/m ³)	24	24	24
f_{ck} (MPa)	20	20	20
Dados do Solo			
Quake Lateral (mm)	2,5	2,4	1,0
Quake de Ponta (mm)	3,0	5,0	3,0
Damping Lateral (s/m)	1,0	0,8	0,3
Damping de Ponta (s/m)	1,0	0,8	0,8
RI/Ru (%)	60	70	60

Os resultados das análises, em resumo, são: a resistência mobilizada, a energia transmitida, as tensões de compressão e tração, o número de golpes por metros ou nega. Estas informações foram transferidas para planilhas Excel, com a finalidade de facilitar a visualização e a comparação entre os resultados.

A eficiência do sistema, relação entre a energia potencial e a energia líquida transferida à estaca, foi calculada para cada simulação.

Em síntese, gerou-se para cada estaca quatro planilhas, cada uma delas contendo os resultados de dez martelos e seis alturas de queda analisadas para cada martelo.

Essas combinações foram assumidas a fim de traduzir as diversas condições que podem vir a ocorrer em campo, abrangendo: martelos dos mais leves aos mais pesados, alturas de queda das menores até as maiores, baixa e alta eficiência do martelo, baixa e alta rigidez do amortecimento.

4 RESULTADOS

Os resultados das simulações foram registrados em planilhas Excel, tal como o exemplo mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 Exemplo do registro dos resultados

W (kN)	42,7 kN		
H (m)	0,5		
Ru (kN)	1000	2000	3000
SET (mm)	4,37	1,45	0,20
Golpe/m	228,8	688,5	5043,6
FMX (kN)	2978,7	3000,3	3022,7
CSX (MPa)	10,775	11,074	11,378
TSX (MPa)	0,362	0,554	0,689
ENTHRU (kJ)	11,8	11,4	10,8
Res. Ativ. (kN)	1000	2000	2959
Eficiência (%)	55	53	51

Quanto à influência dos parâmetros nos resultados, observa-se que as tensões de compressão aumentam com o aumento do peso do martelo, com o aumento da altura de queda, com o aumento da rigidez e da eficiência do martelo.

Estas influências foram exemplificadas com a estaca média para a resistência última de 1800 kN. A Figura 2 mostra o aumento da tensão de compressão com o aumento do peso do martelo, para a altura de queda de 2,0 m.

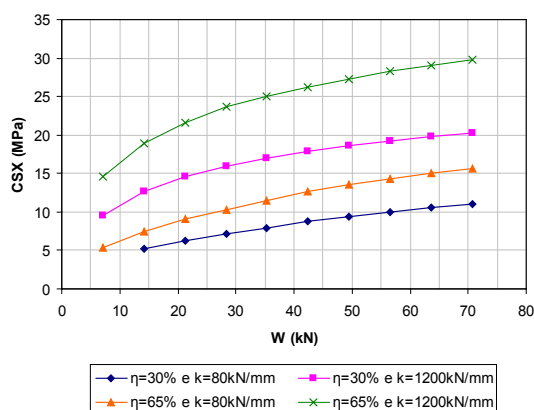


Figura 2 Peso do martelo versus tensões de compressão

Na Figura 3 pode-se verificar o aumento da tensão de compressão com a altura de queda, para o martelo de 35,3 kN. Em ambas as ilustrações pode-se verificar a influência da rigidez.

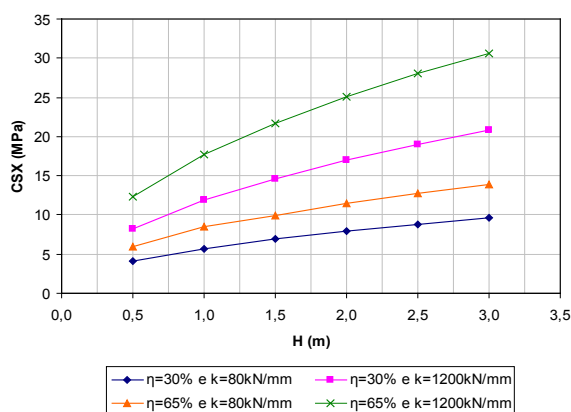


Figura 3 Altura de queda versus tensões de compressão

Com relação às tensões de tração, as mesmas tendem a diminuir com o aumento do peso do martelo, a aumentar com o aumento da altura de queda e a aumentar com o aumento da rigidez.

As influências foram exemplificadas com a estaca média para a resistência última de 1800 kN. A Figura 4 mostra a diminuição da tensão de tração com o aumento do peso do martelo, para a altura de queda de 2,0m.

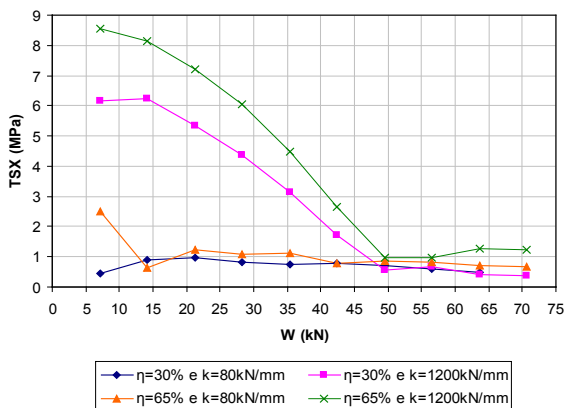


Figura 4 Peso do martelo versus tensões de tração

Esse comportamento se deve ao fato de que os martelos de relação W/W_p variando de 0,6 a 1,0 em geral mobilizam a resistência imposta. A parcela de resistência devida ao atrito lateral, quando mobilizada, tende a absorver a energia e, conseqüentemente, as tensões provocadas pelo golpe.

Na Figura 5 pode-se verificar o aumento da tensão de tração com a altura de queda, para o martelo de 35,3 kN. Em ambas as ilustrações pode-se verificar a influência da rigidez.

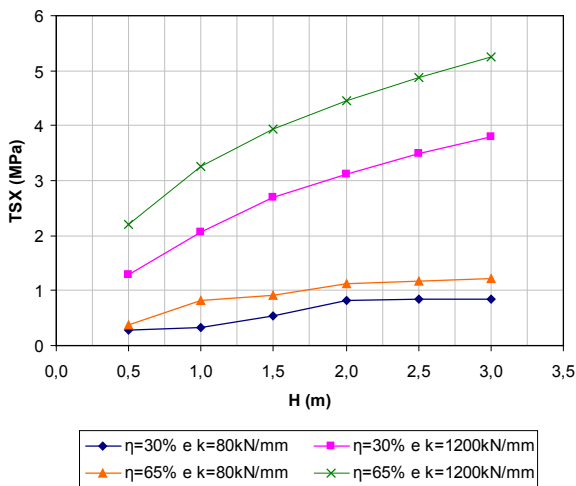


Figura 5 Altura de queda versus tensões de tração

Através dos resultados obtidos pode-se verificar a grande influência da rigidez do amortecimento sobre as tensões impostas às estacas, que, na maioria dos casos, supera o efeito da eficiência do martelo.

Observa-se também, a importância do peso do martelo na mobilização das resistências.

5 CONCLUSÕES

As análises realizadas mostram-se consistentes com tendências de comportamento que podem ser inferidas a partir dos mecanismos básicos do fenômeno de propagação das ondas.

As tensões de compressão aumentam com o aumento do peso do martelo, da altura de queda, da rigidez e da eficiência do martelo. Por sua vez, as tensões de tração tendem a diminuir com o aumento do peso do martelo e a aumentar com o aumento da altura de queda, da rigidez e da eficiência do martelo.

Menores pesos de martelo podem não mobilizar a resistência desejada, além de gerarem riscos de danos à estaca por tensões de tração. Já os maiores pesos podem causar danos por tensões de compressão. Geralmente, esse comportamento estará ligado a uma rigidez mais alta do amortecimento.

Baixas alturas de queda podem não mobilizar a resistência desejada. Enquanto as maiores mobilizam a resistência mais facilmente, porém, podem causar danos por tensões de tração e compressão, principalmente quando associadas aos amortecimentos mais rígidos.

Uma baixa rigidez do amortecimento pode não mobilizar a resistência quando combinadas às baixas eficiências do martelo. Já uma maior rigidez pode provocar danos por tensões de tração.

REFERÊNCIAS

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

BERNARDES, G. P. **Dynamic and Static Testing of Large Model Piles in Sand**. Tese (Doutorado) - Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Noruega, 1989.

GOBLE, G. G.; RAUSCHE, F. **Wave Equation Analysis of Pile Driving**, WEAP Program. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC: Report FHWA-IP-76-13, 1976.

GOBLE, G. G.; LINKINS JR., G.; RAUSCHE, F. **The Analysis of Pile Driving – A State of Art**. Seminar on Application of Stress-Wave Theory on Piles. Stockholm: Royal Institute of Technology, 1980.

KORMANN, A. C. M. **Comportamento de estacas durante a cravação em areia calcária**. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1993.

LIKINS, G. E.; HUSSEIN, M. H. High-Strain Dynamic Testing of Drilled and Cast-In-Place Piles. In: ANNUAL MEMBERS CONFERENCE AND MEETING DEEP FOUNDATIONS INSTITUTE, 20, Charleston, South Carolina, 1995. **Anais...** Charleston, South Carolina: Deep Foundations Institute, 1995. p. 127-142.

LIKINS, G. E. et al. CAPWAP Correlation Studies. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF STRESS-WAVE THEORY TO PILES, 5, Orlando, Florida, 1996. **Anais...** Orlando, Florida: [S. n.], 1996. p. 447-464.

SMITH, E. A. L. Pile Driving Analysis by the Wave Equation. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, N.SM4**, v. 86, p. 35-61, aug. 1960.

PDI - Pile Dynamics, Inc. **GRLWEAP Wave equation analysis of pile driving: Procedures and models**. Cleveland: Pile Dynamics, Inc., 2002.

VELLOSO, D. A.; LOPES, F. R. **Fundações**: Fundações Profundas. Rio de Janeiro, RJ: COPPE-UFRJ, 2002.

Recebido em: 31 Julho 2009

Aceito em: 14 Junho 2010