



Ronald Vera Gallegos

**Aplicabilidade da equação de onda e de fórmulas  
dinâmicas na estimativa da capacidade de carga em  
estacas**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-  
graduação em Engenharia Civil do Departamento de  
Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Celso Romanel  
Co-Orientador: Prof. Pedrito Rocha Filho

Rio de Janeiro  
Setembro de 2014



**Ronald Vera Gallegos**

**Aplicabilidade da equação de Onda e de fórmulas  
dinâmicas na estimativa da capacidade de carga em  
estacas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Celso Romanel**  
Orientador  
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Pedrito Rocha Filho**  
Co-Orientador  
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Sergio Augusto Barreto da Fontoura**  
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Fernando Saboya de Albuquerque Jr.**  
Universidade Estadual do Norte Fluminense

**Prof. José Eugenio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 03 de Setembro de 2014

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

**Ronald Vera Gallegos**

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade San Antonio Abad do Cusco - UNSAAC em 2010. Principais áreas de interesse: Fundações Superficiais e profundas.

**Ficha Catalográfica**

Gallegos, Ronald Vera

Aplicabilidade da equação de onda e de fórmulas dinâmicas na estimativa da capacidade de carga em estacas / Ronald Vera Gallegos; orientador: Celso Romanel; co-orientador: Pedrito Rocha Filho. – 2014.

198 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2014.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Equação de onda. 3. Fórmulas dinâmicas. 4. Resistência mobilizada. 5. Ensaio dinâmico. I. Romanel, Celso. II. Filho, Pedrito Rocha. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

A Deus que me iluminou, me guiou e esteve sempre presente ,e que me permitiu chegar até aqui e meu deu forças em todos momentos difíceis.

## Agradecimentos

A Deus!

Aos professores Pedricto Rocha Filho e Celso Romanel, pela dedicação, paciência, atenção dispensada durante o desenvolvimento da tese, por o conhecimento compartido e a amizade.

A minha amada mãe Emperatriz Gallegos, pelos ensinamentos, amor infinito, carinho e dedicação.

A minha filha Alexandra Pierina é a razão de minha vida.

A minha amada esposa Yolanda, pelo amor, carinho e confiança.

A meus irmãos, Belisario, Alcioné, Wilbert, Jhon e Bernardino pelo apoio dado nos momentos difíceis.

Aos meus amigos e colegas de Post Graduação da PUC-Rio, Samuel Felipe, Jorge Lopez, Elvis Yuri, pela amizade e companheirismo e colaboração durante o curso.

Ao Eng. Reynaldo Luiz de Rosa por todo auxilio e sugestões que foram fundamentais.

Aos familiares, amigos do Perú e todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a realização de este trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

As pessoas que ajudaram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

## Resumo

Gallegos, Ronald Vera; Romanel, Celso (orientador); Filho, Pedrito Rocha (co-orientador). **Aplicabilidade da equação de Onda e de fórmulas dinâmicas na estimativa da capacidade de carga em estacas.** Rio de Janeiro, 2014. 198p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho apresenta inicialmente uma revisão bibliográfica sobre a aplicabilidade da teoria da equação de onda e fórmulas dinâmicas na estimativa da capacidade de carga em estacas. Como parte experimental deste trabalho, reuniram-se diversos relatórios de resultados de ensaios de carregamento dinâmico (CAPWAP) realizados em 29 estacas do tipo: Hélice contínua, raiz, estacas pré-fabricadas de concreto armado e metálicas. Foi analisada a eficiência da energia transferida (ETH), a máxima tensão de cravação gerada durante o ensaio, a resistência máxima mobilizada, a integridade da estaca assim como a influência do “damping” de amortecimento ( $J_c$ ). Além disso, foram utilizadas as chamadas fórmulas dinâmicas para calcular a previsão da resistência mobilizada das estacas, cujos resultados foram comparados com os valores do CAPWAP. Estas fórmulas dinâmicas analisadas foram: A fórmula de Weisbach, Hiley, Dinamarqueses, Janbu, Brix, Holandeses e Engineering News Record. Com o propósito de validar uma possível aplicabilidade das fórmulas dinâmicas em estacas escavadas, foi calculada a previsão da resistência mobilizada seguindo o mesmo procedimento das estacas cravadas. Estes resultados foram optimizados comparando-os com os valores do CAPWAP, através de uma análise estatística simples. Neste estudo constatou-se que através da revisão dos coeficientes (incluindo a aplicação da ferramenta ‘solver’ para a fórmula de Hiley), que as fórmulas dinamarquesas, Hiley e Weisbach apresentam uma melhor aproximação com os valores do CAPWAP para o caso de estacas cravadas, ao mesmo tempo em que para o caso de estacas escavadas a previsão obteve valores dispersos.

## Palavras – chave

Equação de onda; fórmulas dinâmicas; resistência mobilizada; ensaio dinâmico.

## Abstract

Gallegos, Ronald Vera; Romanel, Celso (Advisor); Filho, Pedrito Rocha (Co-Advisor). **Applicability of the wave equation and formulas to estimate the dynamic load capacity in piles.** Rio de Janeiro, 2014. 198p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents, initially a review about the theoretical basis of the applicability of the wave equation and of dynamic formulas in the estimate of load capacity in piles. As experimental part of this work, it was used, results obtained from twenty nine dynamic loading tests (CAPWAP), carried in out on several types of piles: Continuous flight auger, grout intruded in place; reinforced concrete and steel piles. Was analyzed the efficiency of the energy transferred (ETH), the maximum value of the tension, the maximum value of the mobilized pile resistance, the integrity of the pile and the influence of damping (Jc). Furthermore, dynamic formulas were used to calculate the prediction of the resistance mobilized of the piles and the results were compared with the values of the CAPWAP. These dynamic formulas were analyzed: The formula of Weisbach, Hiley, Danes, Janbu, Brix, Holandeses and Engineering News Record. For the purpose to validate a possible applicability of dynamic formulas in the prediction of bored piles, mobilized resistance was calculated following the same procedure of driven piles. These results were optimized by comparing them with the values of CAPWAP through a statistical analysis simple. In this study it was found that by reviewing the coefficients (including the application of the tool 'solver' for the Hiley formula), that the Danish, Hiley and Weisbach formulas have a better approximation to the CAPWAP values for the case of piles driven, at the same time as in the case of bored piles prediction values obtained dispersed.

## Keywords

Wave equation; dynamic formulas; mobilized resistance; dynamic test.

# Sumário

1 Introdução	23
1.1. Motivação	24
1.2. Objetivos	24
1.3. Estrutura de dissertação	25
2 Revisão bibliográfica	26
2.1. Introdução	26
2.2. Fundações profundas	28
2.2.1. Conceito de fundações profundas	28
2.2.2. Classificação de estacas	28
2.3. Fórmulas dinâmicas de cravação de estacas	33
2.3.1. Introdução	33
2.3.2. Aplicabilidade e limitações das fórmulas dinâmicas	35
2.3.3. Tipos e principais fórmulas dinâmicas	36
2.3.3.1. Fórmula de Sanders (1850)	38
2.3.3.2. Fórmula de Weisbach	39
2.3.3.3. Fórmula dos Holandeses (1812) e Brix	40
2.3.3.4. A fórmula da Engineering News Record (ENR)	41
2.3.3.5. Fórmula de Hiley	42
2.3.3.6. Fórmula dos Dinamarqueses	46
2.3.3.7. Fórmula de Janbu	46
2.3.3.8. Fórmula de Gates	47
2.3.4. Controle de estakeamentos com medições de nega e repique	49
2.3.4.1. Fórmula de Chellis (1961)	51
2.3.5. Uma revisão de avaliações anteriores do uso das fórmulas dinâmicas	54
2.4. Ensaio dinâmico através da teoria de propagação de onda	59
2.4.1. Introdução	59

2.4.2. Equação unidimensional da Onda	61
2.4.2.1. Proporcionalidade	63
2.4.2.2. Velocidade de propagação de onda “c” e velocidade de partícula “v”	64
2.4.2.3. Equação geral da onda	64
2.4.2.4. Influencia das condições de contorno	69
2.4.2.5. Influencia da variação de impedância da estaca	72
2.4.3. Modelo de Smith	75
2.5. Aplicações das medições dinâmicas	79
2.5.1. Introdução	79
2.5.2. Medições dinâmicas dos sinais obtidas pelo PDA	79
2.5.2.1. Método de CASE	82
2.5.2.2. Método CAPWAP	89
2.5.2.3. Energia transferida, tensões de cravação e integridade da estaca durante o monitoramento do Ensaio de Carregamento Dinâmico	96
3 Apresentação dos dados coletados	99
4 Descrição dos ensaios de carregamento dinâmico	102
4.1. Resultados do ensaio de carregamento dinâmico	104
4.1.1. Interpretação dos resultados	108
4.1.1.1. Eficiência na transferência de energia ‘ETH’	108
4.1.1.2. Tensões máximas durante o ensaio	109
4.1.1.3. Resistência máxima mobilizada (RMX)	111
4.1.1.4. Integridade da estaca	113
4.1.1.5. Coeficiente de amortecimento ( $J_c$ )	114
5 Previsão de resistência mobilizada pelas fórmulas dinâmicas	116
5.1. Comparação dos resultados das fórmulas dinâmicas, com os valores do CAPWAP	122
5.1.1. Análise estatística	126
5.2. Recálculo da Previsão da resistência mobilizada pelas fórmulas dinâmicas	132

5.2.1. Análise estatística	137
5.3. Comparação dos resultados das fórmulas dinâmicas e valores do CAPWAP, para valores iniciais e, revisão de coeficientes	143
5.4. Comparação dos resultados das fórmulas dinâmicas usandomódulo de elasticidade dinâmico e estático do concreto, com os resultados do CAPWAP	150
5.5. Previsão da resistência mobilizada pelas fórmulas, sem fator de correção, usando módulo de elasticidade dinâmico	154
6 Conclusões e recomendações	160
6.1. Fórmulas dinâmicas	160
6.2. CAPWAP	163
6.3. Sugestões para pesquisas futuras	165
7 Referências Bibliográficas	167
ANEXO 01	173
ANEXO 02 Previsão da resistência pelas fórmulas dinâmicas usando módulo de elasticidade dinâmico do concreto e, parâmetros básicos (peso do martelo, peso da estaca, altura de queda, etc.).	174
ANEXO 03 Previsão da resistência pelas fórmulas dinâmicas usando módulo de elasticidade estático e parâmetros básicos (peso do martelo, peso da estaca, altura de queda, etc.).	180
ANEXO 04	185
ANEXO 05	186
ANEXO 06	188

## Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Classificação de fundações profundas (Ferreira,1998).	29
Tabela 2.2 - Compressão temporária $C_1$ do capacete, coxim e cepo (em polegadas e milímetros) Chellis, (1961).	45
Tabela 2.3 - Compressão temporária do solo valores de ' $C_3$ ' em polegadas (Chellis, 1967).	45
Tabela 2.4 - Resumo de fórmulas dinâmicas mais comuns usadas na cravação de estacas (Poulos & Davis, 1980 e Washington State Transportation Center USA, 1985).	48
Tabela 2.5 - Previsão da resistência mobilizada pela fórmula dinâmica modificada da 'ENR' versus medições do PDA. (Vulcanhammer. net, 1997).	55
Tabela 2.6 - Análises estatísticas das comparações.	55
Tabela 2.7 - Sumário das análises estatísticas (Poulos & Davis, 1980).	58
Tabela 2.8 - Ondas refletidas pela descontinuidade da haste (G. Bernardes, et al. 1989).	74
Tabela 2.9 - Coeficiente de amortecimento dinâmico do método CASE ( $J_c$ ) (Goble et al., 1996 ).	86
Tabela 2.9a - Valores de $J_c$ , sugeridos pela PDI, fonte manual do PDA.	87
Tabela 2.10 - Relação típica da energia transferida para diferentes tipos de martelo.	97
Tabela 2.11 - Recomendações dos limites de tensões de cravação (fonte: PDI, 2000).	97
Tabela 2.12 - Grau de intensidade do dano da estaca (Rausche and Goble, 1979).	98
Tabela 3.1 - Informações das estacas ensaiadas.	101
Tabela 4.1 - Resumo das análises "CAPWAP".	107
Tabela 4.2 - Relação entre o coeficiente de amortecimento ( $J_c$ ) e a resistência mobilizada da estaca P17D-G.	115

Tabela 5.1 - Seleção dos tipos de estacas ensaiadas, de acordo ao tipo de execução.	117
Tabela 5.2 - Parâmetros de obtenção da previsão da resistência mobilizada pelas fórmulas dinâmicas.	118
Tabela 5.3 - Resultados da aplicação das fórmulas dinâmicas.	119
Tabela 5.4 - Resumo das retas de melhor ajuste e do coeficiente de determinação dos gráficos de resistência mobilizada.	125
Tabela 5.5 - Valores da média ( $u$ ), desvio padrão, coeficiente de correlação e, coeficiente de variação da relação das fórmulas dinâmicas sobre os valores estimados pelo CAPWAP.	126
Tabela 5.6 - Valores da média da diferença percentual entre os resultados das fórmulas dinâmicas e valores do CAPWAP.	128
Tabela 5.7 - Resumo dos coeficientes revisados para cada fórmula dinâmica	133
Tabela 5.8 - Resumo das retas de melhor ajuste e do coeficiente de determinação dos gráficos de resistência mobilizada.	136
Tabela 5.9 - Valores da média ( $\hat{u}$ ), desvio padrão, coeficiente de correlação e, coeficiente de variação da relação das fórmulas dinâmicas sobre os valores estimados pelo CAPWAP. Para uma revisão dos coeficientes.	138
Tabela 5.10 - Valores da média da diferença percentual entre os resultados das fórmulas dinâmicas e valores do CAPWAP, para revisão dos coeficientes.	139
Tabela 5.11 - Sumário total das equações da reta de melhor ajuste (coeficiente angular e intercepto 'y'), com coeficiente de determinação, média da relação ( $\hat{u}$ ), desvio padrão, coeficiente de variação e, diferença percentual. Para uma revisão de coeficientes e valores iniciais dos coeficientes.	144
Tabela 5.12 - Sumário estatístico das fórmulas dinâmicas mais acuradas, com melhor aproximação aos valores do CAPWAP.	146

## **Lista de figuras**

Figura 2.1- Hipótese adotada na fórmula de Sanders (Araújo, 1988).	39
Figura 2.2 – Gráfica resistência x deslocamento do topo da estaca para um golpe (Whitaker, 1976).	42
Figura 2.3 - Gráfico altura de queda x deslocamento (Chellis, 1961).	44
Figura 2.4 - Vista frontal e lateral do esquema para obter a nega e o repique elástico.	50
Figura 2.5 - Posição do topo e da base da estaca antes do golpe (a) e os deslocamentos máximos após o golpe (b) (Aoki, 1991 – modificado).	51
Figura 2.6 - Traçado da curva resistência x deslocamento (Niyama e Aoki 1991).	53
Figura 2.7 - Determinação da proporcionalidade entre a velocidade de partícula ‘v’ e a propagação de onda ‘c’ (Goble et al., 1986).	62
Figura 2.8 - Deformações de um elemento de estaca devido à propagação de onda (Niyama, 1983).	65
Figura 2.9a - Comportamento das ondas no instante “t” (Timoshenko & Goodier, 1970 ).	66
Figura 2.9b - Comportamento das ondas no instante “t+dt” (Timoshenko & Goodier, 1970).	66
Figura 2.10 - Estaca (a) com ponta livre, (b) com ponta fixa, (c) com resistência de ponta.	69
Figura 2.11 - Estaca com atrito lateral e diagrama de trajetórias de onda descendentes e ascendentes.	72
Figura 2.12 - Registro típico de curvas de Força e Velocidade x Impedância (Gonçalves, 1996).	72
Figura 2.13 - Diagrama de trajetória de ondas (Niyama, 1983).	73
Figura 2.14 - (a) Representação do modelo da estaca e do sistema de cravação, (b) modelo para representação da resistência do solo (Smith, 1960).	76

Figura 2.15 - Parcela estática da reação do solo (Smith, 1960).	76
Figura 2.16 - Parcela dinâmica de reação (Smith, 1960).	77
Figura 2.17 - Relação carga-deslocamento idealizado por Smith (1960) - Apud Poulos & Davis (1980).	78
Figura 2.18 - Instrumentação com acelerômetros e transdutores de deformação.	81
Figura 2.19 - Posição dos sensores com respeito ao topo da estaca e analisador de sinal tipo PDA (Pile Driving Analyzer).	81
Figura 2.20 - Método de CASE, diagrama das trajetórias das ondas de tensão (Janz et al., 1976).	83
Figura 2.21 - Método de CASE, padrão (Hannigan et al., 1998).	87
Figura 2.22 - Método CASE máximo (Hannigan et al., 1998).	88
Figura 2.23 - Fluxograma do programa CAPWAP (Alves, 2004).	90
Figura 2.24 - Processo de interação de um ajuste falho, razoável e bom entre a força medida (linha cheia) e a força calculada linha tracejada no topo da estaca (Goble, 1986).	90
Figura 2.25 - Modelo de combinação solo-estaca pelo CAPWAP (manual do CAPWAP, 2006).	91
Figura 2.26 - Modelo estendido do CAPWAP de resistência de ponta e lateral do solo (Goble et al., 1996).	92
Figura 2.27 - Diagrama de resistência estática lateral x deslocamento (Manual do CAPWAP, 2006).	92
Figura 2.28 - Diagrama de resistência dinâmica lateral x velocidade de deslocamento (De Rosa, 2000).	93
Figura 2.29 - Diagrama de resistência estática na ponta x deslocamento (Manual do CAPWAP, 2006).	93
Figura 2.30 - Diagrama de resistência dinâmica do solo na ponta da estaca x velocidade de deslocamento (De Rosa, 2000).	93
Figura (4.1) - Curva carga x recalque da estaca P17D-G. Ensaio dinâmico (fonte: relatórios).	104
Figura 4.2 - Curva de força e velocidade medidas para a estaca Hélice contínua P17D-G.	105
Figura 4.3 - Ajuste das curvas de força e velocidade obtidas	

pelo CAPWAP apresentando um bom ajuste para estaca Hélice contínua P17D-G.	106
Figura 4.4 - Eficiência da energia transferida para as 29 estacas ensaiadas.	108
Figura 4.5 - Tensões máximas de compressão (CSX) durante o ensaio de carregamento dinâmico nas estacas.	110
Figura 4.6 - Tensões máximas de tração (TSX) durante o ensaio de carregamento dinâmico nas estacas.	111
Figura 4.7 - Gráfica da resistência mobilizada requerida.	112
Figura 4.8 - Parcela da resistência de ponta e lateral para cada estaca.	112
Figura 4.9 - Representação da integridade das estacas ensaiadas.	113
Figura 4.10 - Resistência mobilizada versus coeficiente de amortecimento (Jc), na estaca Hélice contínua P17D-G.	114
Figura 5.1- Comparação das fórmulas dinâmicas e resultados do (CAPWAP), para as diferentes estacas ensaiadas.	120
Figura 5.2 - Previsão da resistência mobilizada por Hiley, Weisbach vs. resistência mobilizada pelo CAPWAP.	123
Figura 5.3 - Previsão da resistência mobilizada por Janbu, Dinamarqueses vs. resistência mobilizada pelo CAPWAP.	124
Figura 5.4 - Diferença percentual entre os resultados das fórmulas dinâmicas com os valores do CAPWAP, para estacas escavadas.	129
Figura 5.5 - Diferença percentual entre os resultados das fórmulas dinâmicas com os valores do CAPWAP, para estacas cravadas de concreto.	130
Figura 5.6 - Diferença percentual entre os resultados das fórmulas dinâmicas com os valores do CAPWAP, para estacas metálicas.	131
Figura 5.7 - Previsão da resistência mobilizada por Hiley, considerando a variação dos valores dos coeficientes revisados e usando a ferramenta 'solver'.	134
Figura 5.8 - Previsão da resistência mobilizada por Weisbach	

e Janbu vs. resistência mobilizada pelo CAPWAP, considerando revisão de coeficientes.	135
Figura 5.9 - Previsão da resistência mobilizada por Dinamarqueses vs. resistência mobilizada pelo CAPWAP, considerando revisão de coeficientes.	136
Figura 5.10 - Diferença percentual entre os resultados das fórmulas dinâmicas com os valores do CAPWAP, com revisão dos coeficientes, para estacas escavadas.	140
Figura 5.11 - Diferença percentual entre os resultados das fórmulas dinâmicas com os valores do CAPWAP, com revisão dos coeficientes, para estacas cravadas de concreto.	141
Figura 5.12 - Diferença percentual entre os resultados das fórmulas dinâmicas com os valores do CAPWAP, com revisão dos coeficientes, para estacas metálicas.	142
Figura 5.13 - Relação ( $u =$ Fórmula dinâmica/CAPWAP) das melhores fórmulas dinâmicas, para estacas escavadas.	147
Figura 5.14 - Relação percentual, das fórmulas dinâmicas com melhor aproximação aos valores do CAPWAP, para estacas escavadas.	147
Figura 5.15 - Relação ( $u =$ Fórmula dinâmica/CAPWAP) das melhores fórmulas dinâmicas, para estacas cravadas de concreto.	148
Figura 5.16 - Relação percentual, das fórmulas dinâmicas com melhor aproximação aos valores do CAPWAP, para estacas cravadas de concreto.	148
Figura 5.17 - Relação ( $u =$ Fórmula dinâmica/CAPWAP) das melhores fórmulas dinâmicas, para estacas metálicas.	149
Figura 5.18 - Relação percentual, das fórmulas dinâmicas com melhor aproximação aos valores do CAPWAP, para estacas metálicas.	149
Figura 5.19 - Relação ( $u =$ Fórmula dinâmica/CAPWAP) das melhores fórmulas dinâmicas, para estacas escavadas com módulo de elasticidade estático.	151

Figura 5.20 - Relação percentual, das fórmulas dinâmicas com melhor aproximação aos valores do CAPWAP, para estacas escavadas considerando módulo de elasticidade estático.	151
Figura 5.21 - Relação ( $u =$ Fórmula dinâmica/CAPWAP) das melhores fórmulas dinâmicas, para estacas cravadas de concreto, com módulo de elasticidade estático.	152
Figura 5.22 - Relação percentual, das fórmulas dinâmicas com melhor aproximação aos valores do CAPWAP, para estacas cravadas de concreto, considerando módulo de elasticidade estático.	153
Figura 5.23 - Relação ( $u =$ Fórmula dinâmica/CAPWAP) das melhores fórmulas dinâmicas, para estacas escavadas, sem fator de correção.	155
Figura 5.24 - Relação percentual, das fórmulas dinâmicas com melhor aproximação aos valores do CAPWAP, para estacas escavadas, sem fator de correção.	156
Figura 5.25 - Relação ( $u =$ Fórmula dinâmica/CAPWAP) das melhores fórmulas dinâmicas, para estacas cravadas de concreto, sem fator de correção.	157
Figura 5.26 - Relação percentual, das fórmulas dinâmicas com melhor aproximação aos valores do CAPWAP, para estacas cravadas de concreto, sem fator de correção.	157
Figura 5.27 - Relação ( $u =$ Fórmula dinâmica/CAPWAP) das melhores fórmulas dinâmicas, para estacas metálicas, sem fator de correção.	158
Figura 5.28 - Relação percentual, das fórmulas dinâmicas com melhor aproximação aos valores do CAPWAP, para estacas metálicas, sem fator de correção.	158

## **Lista de Símbolos**

$\eta$	Coeficiente de restituição.
$\lambda$	Coeficiente que modifica o fator de cravação.
$\psi$	Coeficiente que é função da forma de distribuição do atrito lateral ao longo da profundidade.
$\beta$	Razão entre a resistência de ponta e a resistência lateral.
$\varepsilon$	Deformação específica.
$\Sigma RA$	Somatório do atrito lateral
'f' e 'g'	Duas funções que se propagam em sentidos opostos.
A	Área da seção transversal da estaca.
A'	Área do capacete.
c	Velocidade de propagação de onda.
C <sub>1</sub>	Deformação elástica do capacete, coxim e cepo.
C <sub>2</sub>	Deformação elástica da estaca.
C <sub>3</sub>	Deformação elástica do solo.
C <sub>d</sub>	Coeficiente de cravação.
C <sub>s</sub> e C <sub>t</sub>	Relacionam respectivamente os 'quakes' de descarregamento lateral e ponta aos 'quakes' de carregamento.
CSX	Máxima tensão de compressão na região de sensores
CV	Coeficiente de variação
DMX	Deslocamento.
E	Módulo de elasticidade da estaca.
E'	Módulo de elasticidade do capacete.
E <sub>e</sub>	Energia dissipada na compressão elástica da estaca.
e <sub>f</sub>	Eficiência do martelo.
e <sub>iv</sub>	Fator de eficiência do impacto.

EMX	Máxima energia transferida.
$E_s$	Energia dissipada na compressão elástica do solo.
ETR	Eficiência de energia transferida durante o golpe.
F	Força.
F.S.	Fator de segurança.
$F_{\uparrow}$	Força ascendente.
$F_{\downarrow}$	Força descendente.
$F_{ck}$	Resistência à compressão do concreto.
$F_{t1}$	Força na seção instrumentada no instante ' $t_1$ '.
$F_{t2}$	Força na seção instrumentada no instante ' $t_2$ '.
$F_y$	Tensão de escoamento do aço.
$H$	Altura de queda do martelo.
$J_c$	'Damping' fator de amortecimento dinâmico CASE.
$J_m$	'Damping' do solo lateral.
$J_p$	'Damping' do solo na ponta da estaca.
$J_s$	'Damping' do Smith
$J_v$	'Damping' fator de amortecimento dinâmico do solo
$k$	Repique elástico.
$K_s$	Rigidez do sistema solo
$K_u$	Fator global.
$L$	Comprimento total da estaca.
$L'$	Comprimento total do capacete.
$l'$	Comprimento efetivo.
$L_c$	Comprimento cravado.
$M$	Massa da estaca.
$P$	Peso da estaca.
$Q$	Perdas de energia.
$Q$	'Quake'.
$q_s$	'quake' lateral
$q_t$	'quake' de ponta
$R$	Resistência oposta pelo solo à penetração.
$R_A$	Atrito lateral.
$R_d$	Resistência dinâmica

RMX	Resistência máxima mobilizada segunda na nomenclatura utilizada no ensaio de carregamento dinâmico.
$R_s$	Resistência estática
$R_t$	Resistência total
$R_u$	Resistência última.
$R_{ub}$	Resistência última da ponta.
$R_{un}$	Resistência no descarregamento.
$R_{us}$	Resistência estática última.
$R^2$	Coeficiente de determinação
$r$	Coeficiente de correlação
$s$	Penetração permanente da estaca para cada golpe 'nega'.
$S_0$	Perda de energia na compressão elástica da estaca pela fórmula de Sorensen e Hansen (1957).
$T$	Energia líquida que alcança o sistema solo estaca.
$t_1$	Instante de ocorrência de força máxima (impacto)
$t_2$	Instantes de retorno das ondas refletidas na ponta da estaca
TSX	Máxima tensão de tração calculada ao longo do fuste
$u$	Deslocamento total.
UN	Fator multiplicativo relaciona a resistência última de descarregamento com a resistência ult. de carregamento
$V$	Velocidade da partícula.
$V\uparrow$	Velocidade ascendente.
$V\downarrow$	Velocidade descendente.
$V_i$	Velocidade inicial do impacto do martelo
$\beta$	Grau de Impedância do dano na estaca
$V_p$	Velocidade de deslocamento na ponta da estaca.
$V_{t1}$	Velocidade na seção instrumentada no instante ' $t_1$ '
$V_{t2}$	Velocidade na seção instrumentada no instante ' $t_2$ '

$W$	Peso do martelo.
$W_d$	Ondas descendentes 'wave down'
$W_u$	Ondas ascendentes 'wave up'
$X$	Distancia do nível do terreno a uma determinada profundidade
$z$	Distancia entre o nível de terreno e o estrato 'indeslocável'.
$Z$	Impedância da estaca.
$\alpha$	Coeficiente de comprimento efetivo.
$\Delta t$	Espaço infinitesimal de tempo.
$\Delta u$	Deslocamento infinitesimal.
$\mu$	Media da relação "fórmula dinâmica/CAPWAP"
$\rho$	Massa específica da estaca.
$R_E$	Parcela estática

## **Lista de Abreviatura e Siglas**

Gap	Abertura entre a ponta da estaca e o solo
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAPWAP	Case Pile Wave Analysis Program
ENR	Engineering News Record
NBR	Norma Brasileira Registrada
PDA	Pile Driving Analyzer
CASE	Case Institute of Technology
ECD	Ensaio de Carregamento Dinâmico
BOR	Ensaio de Carregamento Dinâmico no inicio da recrevação
EOD	Ensaio de Carregamento Dinâmico no final da cravação