



APLICAÇÃO DE FÓRMULAS DINÂMICAS NA ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS

Ronald Vera Gallegos

Pedricto Rocha Filho

Celso Romanel

Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio

Rua Marquês de São Vicente 225, 22451-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Abstract. *Neste trabalho foram analisados os resultados de diversos ensaios de carregamento dinâmico (CAPWAP) executados em 29 estacas do tipo hélice contínua, raiz, de concreto e metálicas. A eficiência da energia, a tensão de cravação gerada durante o ensaio e a resistência máxima mobilizada foram investigadas. As chamadas fórmulas dinâmicas foram usadas para calcular a previsão da resistência mobilizada das estacas, cujos resultados foram comparados com os valores obtidos pelo método CAPWAP. Neste estudo constatou-se que, a despeito do pequeno número de estacas analisadas, as fórmulas dinamarquesas, de Hiley e Weisbach apresentaram uma melhor aproximação com os valores do CAPWAP determinados para o caso de estacas cravadas. Quanto às estacas escavadas, os valores previstos apresentaram grande dispersão, com resultados inconclusivos.*

Palavras-chave: *Equação da onda, Fórmulas dinâmicas, Método CAPWAP, Estacas*

1 INTRODUÇÃO

A tentativa de determinação da resistência mobilizada de estacas utilizando fórmulas dinâmicas de cravação sempre envolveu uma série de incertezas, tanto em relação à validade das teorias empregadas no desenvolvimento das mesmas, quanto em relação à representatividade dos resultados obtidos. Essas incertezas normalmente implicam na utilização de coeficientes de segurança mais elevados no projeto de fundações, o que muitas vezes prejudica aspectos econômicos do empreendimento.

É nesse contexto que nos anos 1930 foi proposto um ensaio dinâmico baseado na equação da onda P gerada no processo de cravação para verificação do desempenho de estacas carregadas axialmente. Na prática este tipo de ensaio somente iniciou sua aplicação nos anos 1960 quando dificuldades nos sistemas de aquisição de dados e na interpretação dos valores medidos foram removidas.

Este ensaio consiste basicamente na aplicação de energias crescentes no topo de uma estaca, seguido do registro de sinais das ondas de tensão refletidas e interpretação dos mesmos por meio da teoria 1D de propagação de ondas elásticas. No Brasil, há um predomínio praticamente absoluto dos métodos CASE e CAPWAP, regulamentados pela norma ABNT/NBR 13208/2007.

Neste trabalho é analisado o uso de algumas fórmulas dinâmicas para estimativa da resistência mobilizada em estacas carregadas axialmente, comparando os resultados previstos com aqueles determinados pelo método CAPWAP.

2 FÓRMULAS DINÂMICAS

As fórmulas dinâmicas são os métodos mais antigos usados na estimativa da capacidade de carga de estacas cravadas, as quais buscam correlacionar a energia de queda do martelo com a resistência à cravação da estaca. A maioria delas foi deduzida com base na lei de Newton referente ao impacto entre dois corpos rígidos, e igualam a energia de queda do martelo com a nega multiplicada pela resistência dinâmica à cravação.

A nega é um dos controles mais simples de ser verificado. Sua obtenção vem da fixação de uma folha de papel no próprio corpo da estaca; com auxílio de uma pena movimentando horizontalmente durante os golpes na estaca, obtém-se então o diagrama da Fig. 1. A nega caracteriza-se pelo deslocamento vertical da linha traçada, indicando o quanto a estaca penetrou no solo nos últimos golpes. Em geral é obtida como um décimo de penetração para dez golpes consecutivos.

Da mesma forma, quando se aplica um golpe de martelo ou pilão na cabeça de uma estaca, esta sofre um deslocamento. A parcela elástica desse deslocamento é chamada repique ou parcela elástica do deslocamento máximo de uma reação da estaca, sendo obtida pelo mesmo processo empregado na determinação da nega.

Analicamente as fórmulas derivadas da lei de impacto podem ser genericamente expressas pela Eq. (1), que relaciona a energia gerada pela queda do martelo com o trabalho desenvolvido para superar a resistência à cravação da estaca:

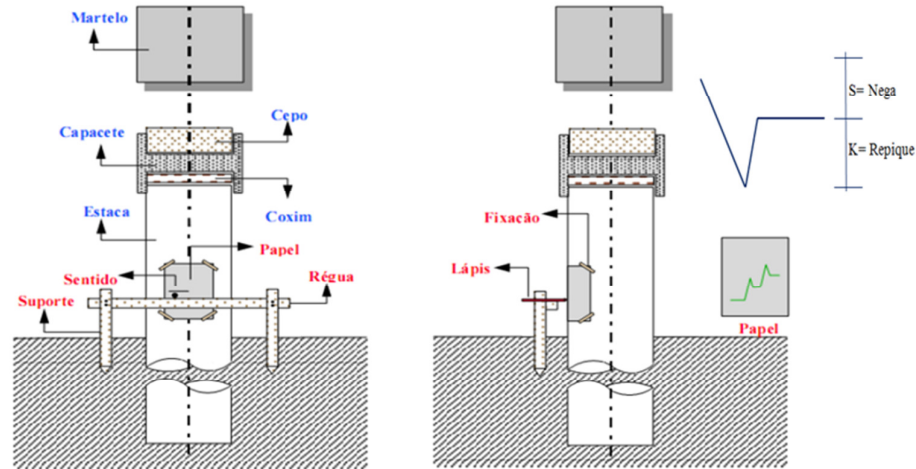


Figura 1. Vista frontal e lateral do esquema de ensaio para obtenção da nega e o repique elástico.

$$WH = RS + U \quad (1)$$

onde W indica o peso do martelo, H a altura de queda, R a carga de trabalho da estaca, que se mantém constante ao longo da distância de penetração permanente S (nega) e U a quantidade de energia fornecida pelo martelo, porém não aproveitada para cravação da estaca.

A carga de trabalho da estaca é definida como $R = R_d/FC$ onde R_d é a resistência do solo à cravação da estaca interpretada como a soma das resistências estática e dinâmica. Para estimativa da resistência estática mobilizada aplica-se em geral um fator de correção FC que varia entre 2 a 10, procedimento este que permite uma comparação entre valores previstos por formulações dinâmicas e a resistência estática mobilizada determinada pelo CAPWAP.

Fórmula de Weisbach

É assumido que durante o golpe a estaca deforma-se elasticamente como se estivesse submetida a um carregamento estático R e que a energia perdida U decorre somente da compressão elástica RL/AE onde L é o comprimento da estaca, A a área da seção transversal, E o módulo de elasticidade do material.

$$WH = RS + \frac{R^2 L}{2AE} \quad (2)$$

$$R = \frac{-SAE}{L} + \sqrt{\left(\frac{SAE}{L}\right)^2 + \frac{2WHA E}{L}} \quad (3)$$

Fórmula de Janbu (1953)

Considera-se novamente que a estaca deforma-se elasticamente ($U = R^2 L/2AE$) e que a energia realmente aplicada é $efWH$, onde $ef < 1$ representa a eficiência do martelo, que reflete perdas de energia no bate-estacas. Janbu (1953) incluiu perda de energia devido ao impacto, observada empiricamente, e sugeriu a seguinte adaptação da fórmula de Weisback:

$$\frac{efWH}{1.5 + 0.3P/W} = RS + \frac{R^2 L}{2AE} \quad (4)$$

onde P é o peso da estaca. Logo,

$$R = \frac{-SAE}{L} + \sqrt{\left(\frac{SAE}{L}\right)^2 + \frac{2efWHEA}{L\left(1.5 + 0.3\frac{P}{W}\right)}} \quad (5)$$

Fórmula de Sorensen e Hansen (1957)

Assume perda de energia no bate-estaca ($efWH$) e que a deformação elástica da estaca é aquela que ocorreria se toda esta energia aplicada produzisse uma compressão elástica da estaca com deslocamento S_0 calculado por

$$S_0 = \sqrt{\frac{2efWHL}{AE}} \quad (6)$$

Logo, a Eq. (1) pode ser escrita como

$$efWH = RS + \frac{RS_0}{2} = RS + \frac{R}{2} \sqrt{\frac{2efWHL}{AE}} \quad (7)$$

$$R = \frac{efWH}{S + \frac{1}{2}S_0} \quad (8)$$

A Eq. (1) é conhecida como fórmula dos dinamarqueses, geralmente aplicada em estacas metálicas.

Fórmula de Hiley

A fórmula de Hiley (1925) leva em consideração as perdas de energia devido à eficiência ef do martelo, devido ao impacto do bate-estaca e à compressão elástica da estaca, do capacete e do solo. A formulação genérica da Eq. (1) pode ser expressa como

$$efWH = RS + U \quad (9a)$$

$$Q = ef \frac{WHP(1-\eta^2)}{W+P} + \frac{R^2L}{2AE} + \frac{Rc_2}{2} + \frac{Rc_3}{2} \quad (9b)$$

onde $ef \frac{WHP(1-\eta^2)}{W+P}$ é a perda de energia no impacto sendo η o coeficiente de restituição;

$\frac{R^2L}{2AE} = \frac{Rc_1}{2}$ é a perda de energia por deformação elástica da estaca onde c_1 representa o deslocamento da estaca; $\frac{Rc_2}{2}$ é a perda de energia por deformação elástica do capacete, cepo

e coxim onde c_2 representa o deslocamento deste conjunto; $\frac{Rc_3}{2}$ é a perda de energia por deformação elástica do solo onde c_3 representa o deslocamento do solo. Logo,

$$R = \frac{efWH}{S + \frac{1}{2}(c_1 + c_2 + c_3)} \times \frac{W + \eta^2 P}{W + P} \quad (10a)$$

$$R = \frac{efWH}{S + \frac{K}{2}} \times \frac{W + \eta^2 P}{W + P} \quad (10b)$$

onde $K = c_1 + c_2 + c_3$ é o repique elástico medido em campo juntamente com a nega S . O valor do coeficiente de restituição de impacto η pode ser obtido de Chellis (1962).

A grande maioria das fórmulas dinâmicas foi desenvolvida com base na lei de Newton referente ao impacto e modificada para levar em conta as perdas de energia. A rigor, a lei de Newton não se aplica a corpos que sofrem deformações da ordem de grandeza das observadas no impacto do martelo com a estaca e só é válida no caso de choque entre dois corpos livres. Uma estaca não pode ser considerada como corpo livre, em decorrência das forças de resistência desenvolvidas ao longo de sua superfície lateral e na sua ponta.

3 MODELO DE SMITH

Na aplicação das fórmulas dinâmicas, é assumido que uma força é aplicada instantaneamente em toda a extensão da estaca causada pelo impacto do martelo. Esta hipótese é fisicamente incorreta porque a cravação depende da transmissão de ondas de compressão (ondas P) ao longo do comprimento da estaca.

Smith (1960) desenvolveu um modelo numérico baseado no método das diferenças finitas para solução aproximada da equação da onda 1D (Eq. 11), assumindo a estaca como uma barra elástica com módulo de Young E e massa específica ρ

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (11)$$

onde u representa o deslocamento longitudinal da estaca, t o tempo e c a velocidade de propagação da onda P ($c = \sqrt{E/\rho}$).

Para a solução do problema, a estaca foi dividida em um número de elementos de igual comprimento e peso W_i , ligados entre si por molas elásticas com rigidez k_i (Fig. 2). O martelo, cepo, capacete, coxim foram representados por pesos e molas no topo da estaca.

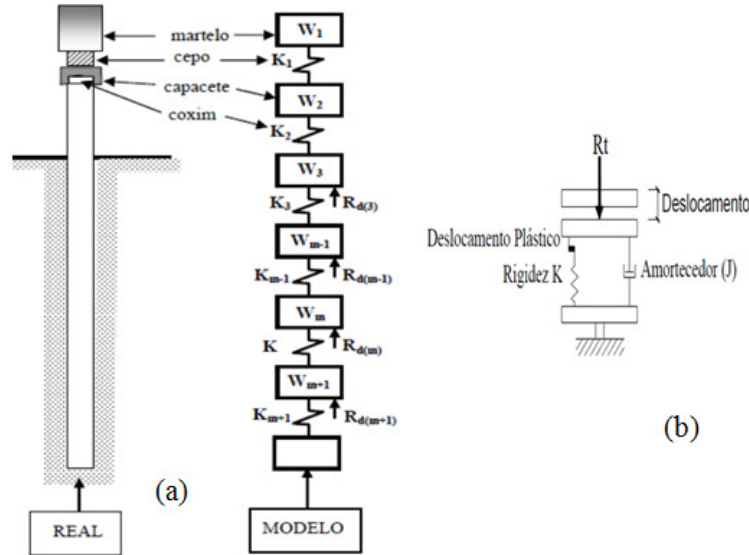


Figura 2. (a) representação do modelo da estaca e do sistema de cravação; (b) modelo para representação da resistência do solo (adaptado de Smith, 1960).

Resistências R_t são aplicadas aos elementos para simular as resistências lateral e de ponta da estaca. Smith (1960) considerou que estas resistências são compostas por duas parcelas (Eq. 12): a resistência estática R_E , proporcional ao deslocamento relativo do solo, e a resistência viscosa R_d , proporcional à velocidade relativa do elemento de estaca.

$$R_t = R_E + R_d \quad (12)$$

Referindo-se ao diagrama resistência estática vs deslocamento da Fig. 3 observa-se que o valor máximo da resistência R_{US} é atingido quando $R_{US} = K' \times Q$ onde K' é a constante de mola equivalente do solo e Q a recuperação elástica do deslocamento (*quake*), conforme Eq. (13). No modelo por diferenças finitas a resistência estática R_E do solo em cada elemento é calculada multiplicando-se K' pelo deslocamento relativo w da estaca em relação ao solo, o qual não poderá ultrapassar o valor Q .

$$R_E = K' w \quad \text{com } w \leq Q \quad (13)$$

A resistência viscosa do solo R_d devido ao movimento relativo do elemento de estaca é proporcional à sua velocidade relativa v . Logo em qualquer instante t esta deve ser somada à resistência estática R_E (Eq. 13), sendo calculada pela Eq. (14).

$$R_d = J' v \quad (14)$$

onde J' é o coeficiente de amortecimento viscoso correspondente aos elementos do fuste da estaca.

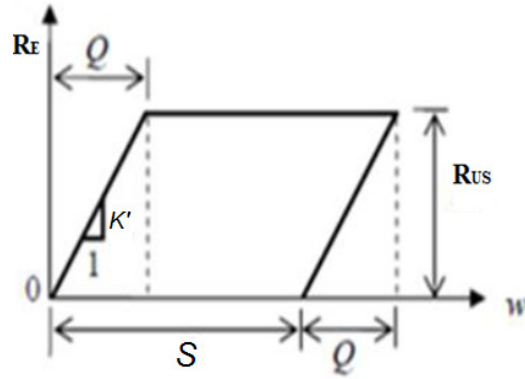


Figura 3. Parcela estática da reação do solo (adaptado de Smith, 1960).

No caso do elemento da ponta da estaca um coeficiente de amortecimento específico J deve ser empregado. Como primeira aproximação pode ser utilizado o valor $J = 0.5$ s/m (Smith, 1960) e $J' = J/3$ (Forehand e Reese, 1964).

Smith (1960) observou que a resistência assim determinada é válida apenas para o instante da cravação. Para obter a capacidade de carga da estaca em qualquer outro tempo posterior, um método de cálculo alternativo deve ser utilizado.

4 MÉTODO CASE

O método CASE tem como objetivo a determinação da resistência estática mobilizada pelo golpe de um martelo sobre o topo de uma estaca. Trata-se de uma solução analítica da equação de onda 1D, na qual são utilizados os sinais de força (F_t) e velocidade (V_t) registrados em uma determinada seção transversal da estaca, nos tempos t_1 , no qual o golpe atinge maior intensidade na seção dos sensores, e t_2 , onde a onda refletida na ponta da estaca retorna à seção instrumentada (Fig. 4). O método ainda utiliza o fator de amortecimento dinâmico do solo (J_v) e de parâmetros da estaca como o módulo de elasticidade (E), a área de seção transversal (A), impedância da estaca ($Z=EA/c$) e a velocidade de propagação (c) da onda P.

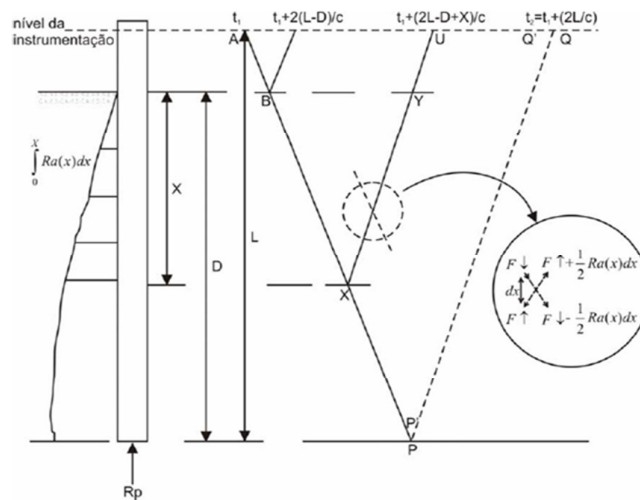


Figura 4. Método CASE e diagrama de propagação das ondas de tensão (Janz et al., 1976).

A resistência total da estaca $R = R_p + \Sigma R_A$ pode ser determinada dos registros de força e velocidade medidos na cabeça da estaca por meio da Eq. (15):

$$\frac{F_{t1} + Z \cdot V_{t1}}{2} + \frac{F_{t2} - Z \cdot V_{t2}}{2} = R_p + \Sigma R_A \quad (15)$$

onde R_p é a resistência de ponta e ΣR_A o somatório das resistências laterais dos elementos do fuste.

O método CASE utiliza um amortecimento adimensional J_c correspondente ao amortecimento viscoso J_v dividido pela impedância Z da estaca (Eq. 16).

$$J_{Case} = J_c = \frac{J_v}{Z} \quad (16)$$

A parcela dinâmica da resistência R_d é obtida de forma simplificada como sendo proporcional à velocidade da ponta da estaca v_p , conforme Eq. (17)

$$R_d = J_v \cdot v_p \quad (17)$$

enquanto que a resistência estática é obtida como,

$$R_s = (1 - J_c) \left[\frac{F_{t1} + Z \cdot v_{t1}}{2} \right] + (1 + J_c) \left[\frac{F_{t2} - Z \cdot v_{t2}}{2} \right] \quad (18)$$

Os valores de $F_{t1}, F_{t2}, V_{t1}, V_{t2}$ utilizados nesta equação são obtidos por meio dos sensores de deformação específica e de velocidade (Fig. 4). Rausche et al. (1985) sugeriram os valores da Tabela 1 para a constante de amortecimento J_c .

Tabela 1- Intervalos de valores do coeficiente de amortecimento J_c no método CASE

Solo	J_c
Areia	0.10 a 0.15
Areia siltosa ou silte arenoso	0.15 a 0.25
Silte	0.25 a 0.40
Argila siltosa ou silte argiloso	0.40 a 0.70
Argila	0.70 a 1.00

5 MÉTODO CAPWAP

Goble et al. (1970) e Rausche (1972) apresentaram um método analítico (CAPWAP) que substitui a energia liberada pela queda do martelo na equação da onda pela utilização de medidas feitas dos sinais de força e de velocidade coletadas no topo da estaca. No modelo CAPWAP uma estaca é simulada matematicamente pelo modelo mecânico de interação solo-estaca proposto por Smith (1960), considerando três incógnitas para cada elemento que subdivide a estaca (Niyama, 1983): a) resistência mobilizada última (R_{ult}); b) deformação elástica máxima ou *quake* (Q); c) constante de amortecimento J .

No modelo CAPWAP os valores da resistência lateral R_A e de ponta R_p são inicialmente assumidos em função da medida experimental dos sinais de força capturados durante a cravação. Em seguida com a curva de velocidades determina-se novos valores de força que são iterativamente ajustados até obter-se uma distribuição satisfatória dos valores de R_A e R_p na estaca.

6 RESULTADOS DE ENSAIOS EM ESTACAS INSTRUMENTADAS

Como parte experimental deste trabalho, foram analisados 29 resultados de provas de carga dinâmicas, fornecidos pela empresa Brascontec (www.brascontec.com.br), conforme Tabela 2. Em cada relatório do ensaio de carregamento dinâmico, constavam medições do PDA (*pile driver analyzer*) através do método de CASE aferidos pelo CAPWAP.

Tabela 2 – Número de estacas ensaiadas

Estacas cravadas ou de deslocamento										Estacas escavadas															
Estacas metálicas tipo trilho					Estacas pré fabricadas de concreto armado ou pré-moldadas					Est. Raiz	Estaca tipo Raiz			Est. Exc. Em	Estaca Hélice										
134A	132A	127A	126A	121A	113A	112A	E130	E123	E101	E84	E70	E64	E53	E10	E01	E4A	E3	E1	C33	B39	P26D-B	P25D-A	P24D-B	P17D-G	P17D-I

O objetivo dos ensaios de carregamento dinâmico foi obter a resistência mobilizada (RMX) do sistema solo-estaca no momento do ensaio, além de outras informações como as tensões máximas de compressão (CSX) induzidas nas estacas e a eficiência de energia transferida (ETH), definida como a razão entre a energia transferida à estaca (EMX) e a energia potencial disponível (Fig. 5).

Os valores das tensões máximas de compressão (CSX) na cabeça das estacas (Fig. 6) para as estacas de concreto armado e escavadas ‘in situ’ foram inferiores a 85% da resistência do concreto à compressão (fck) e para as estacas metálicas não ultrapassaram 90% do limite de escoamento f_y .

A resistência mobilizada (RMX) obtida pelo CAPWAP no final do ensaio deverá ser no mínimo equivalente a 1.6 vezes a carga de trabalho, conforme exigido pela norma NBR/ABNT 6122/2010. As estacas P24DB, P26DB, E01, E3, e E70 apresentaram uma resistência média de 1.38 vezes a carga de trabalho, inferior ao valor requerido (Fig. 7).

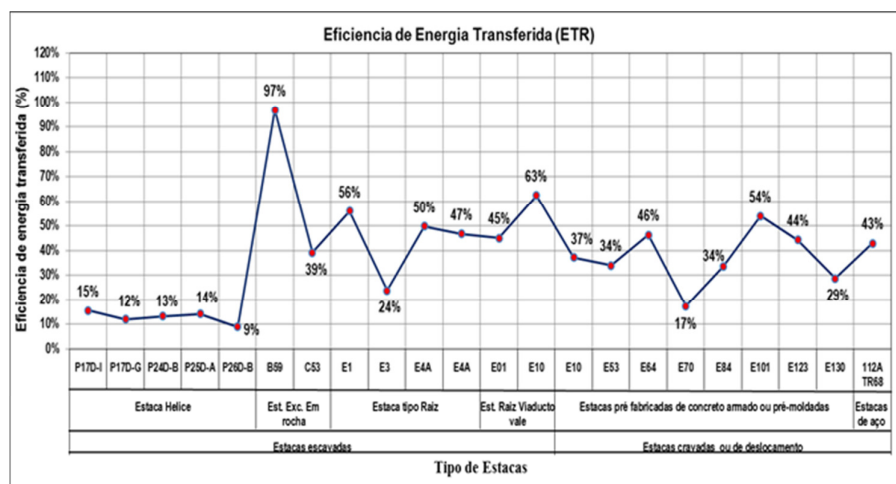


Figura 5. Eficiência da energia transferida para as 29 estacas ensaiadas.

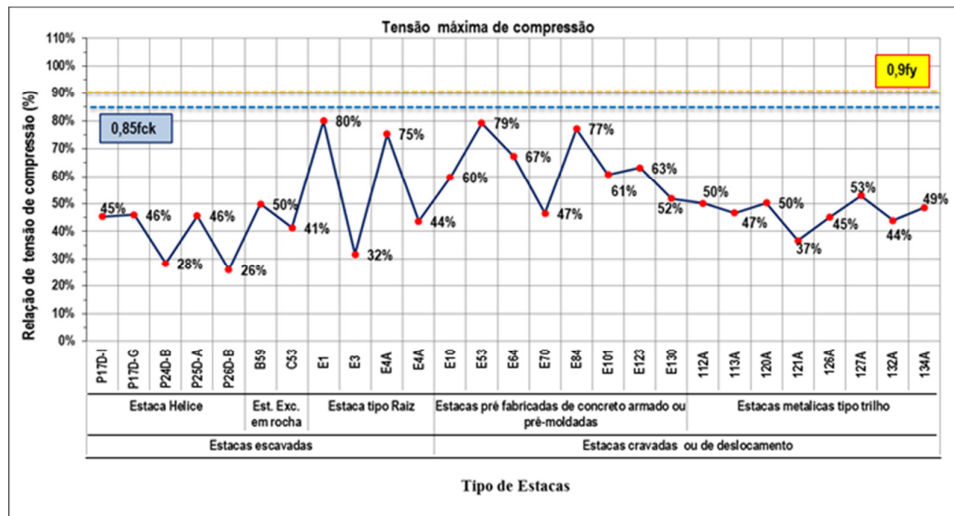


Figura 6. Tensões máximas de compressão (CSX) no carregamento dinâmico nas estacas.

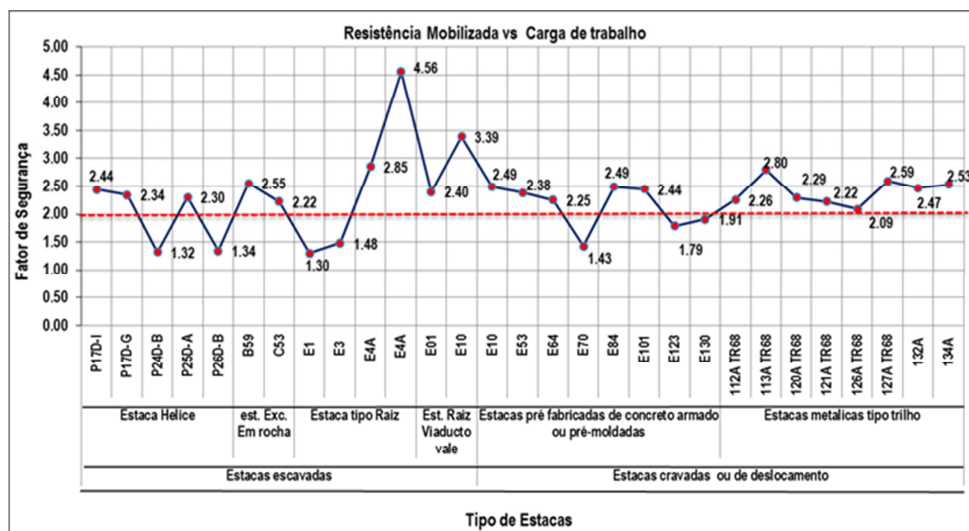


Figura 7. Resistência mobilizada versus carga de trabalho.

É importante novamente ressaltar que as fórmulas dinâmicas foram desenvolvidas apenas para estacas cravadas. Neste estudo, estacas escavadas (ou moldadas in loco) foram também incluídas para em princípio verificar se a formulação, com adaptação de coeficientes, poderia ser utilizada dentro de certas condições. Cálculos para estacas cravadas também foram feitos, considerando valores dos módulos de elasticidade dinâmico (utilizado no CAPWAP) e estático do concreto.

O valor médio μ da razão entre os resultados de resistência mobilizada obtidos por formulação dinâmica e o modelo CAPWAP para estacas de concreto estão apresentados nas Figs. 8 a 10. Para cada uma das diferentes fórmulas dinâmicas analisadas, além do valor médio são também apresentados nestas figuras os valores mínimo e máximo obtidos.

Pode-se delas observar e concluir que:

- para estacas escavadas de concreto, a formulação dinâmica realmente não é aplicável tendo em vista a grande dispersão dos resultados obtidos;

- b) para estacas cravadas de concreto, comparando os resultados das Figs. 9 e 10, percebe-se que os valores médios μ são ligeiramente melhores para o caso de utilização do módulo de elasticidade dinâmico (Fig. 9), embora uma menor dispersão dos resultados tenha ocorrido para a situação de módulo de elasticidade estático (Fig. 10).

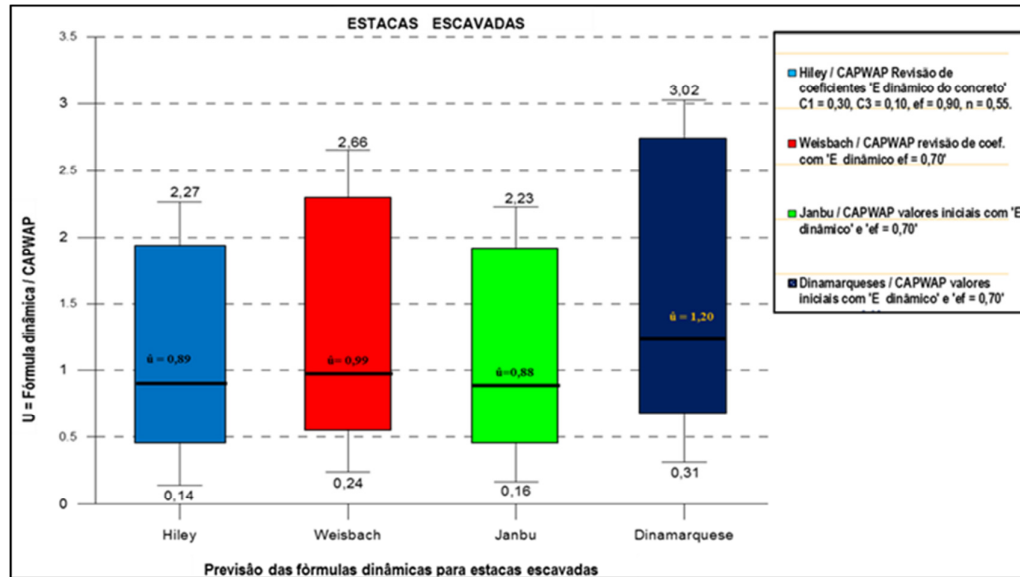


Figura 8. Valores médios μ , máximo e mínimo da razão entre a resistência mobilizada determinada por formulação dinâmica e o modelo CAPWAP para estacas escavadas de concreto.

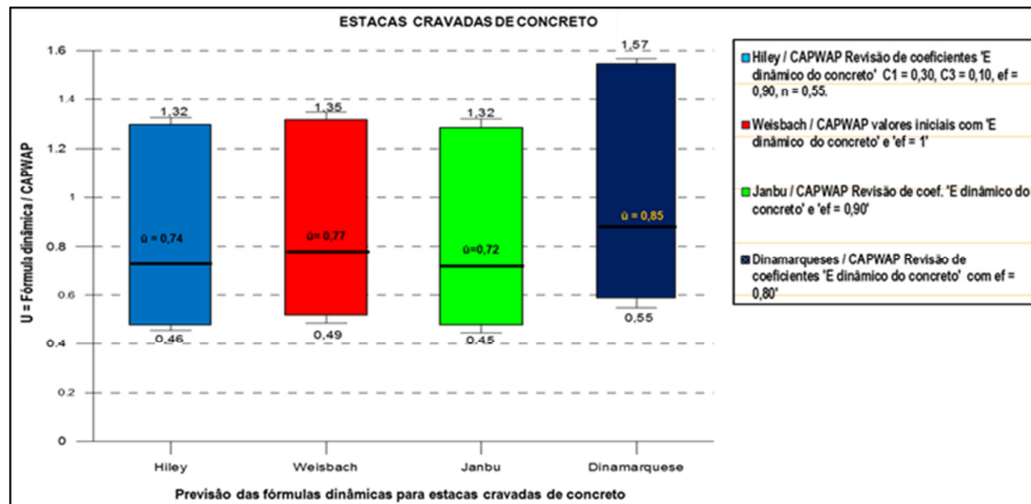


Figura 9. Valores médios μ , máximo e mínimo da razão entre a resistência mobilizada determinada por formulação dinâmica e o modelo CAPWAP para estacas cravadas de concreto considerando o módulo de elasticidade dinâmico.

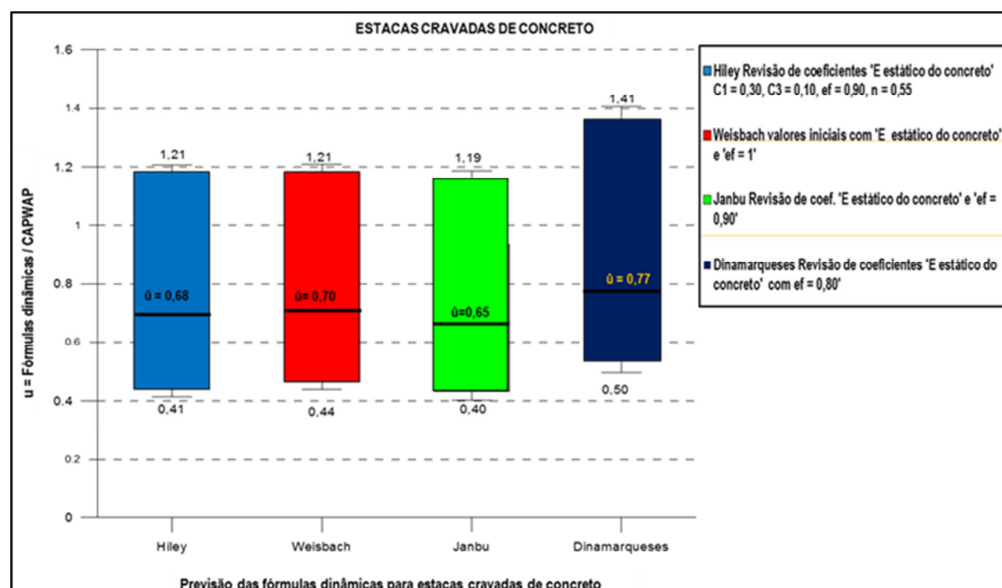


Figura 10. Valores médios μ , máximo e mínimo da razão entre a resistência mobilizada determinada por formulação dinâmica e o modelo CAPWAP para estacas cravadas de concreto considerando o módulo de elasticidade estático.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho constatou-se que os valores da eficiência de energia transferida (ETH) às estacas ensaiadas, inferiores a 100%, indicam que as alturas reais de queda do martelo são menores do que alturas de quedas nominais do ensaio.

Novamente verificou-se que as fórmulas dinâmicas não são aplicáveis para o caso de estacas escavadas, devido aos resultados muito dispersos obtidos. No caso de estacas cravadas de concreto, a utilização do módulo de elasticidade dinâmico produziu valores médios de resistência mobilizada mais próximos dos calculados pelo modelo CAPWAP, porém a dispersão dos resultados foi ligeiramente menor quando comprado ao caso de utilização do módulo de elasticidade estático.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, NBR 13208/2007 - *Estacas – Ensaio de carregamento dinâmico*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2007.
- ABNT, NBR 6122/2010 – *Projeto e execução de fundações*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 91 p., 2010.
- Chellis, R. D. *Pile Foundation*, McGraw-Hill Book Company, p. 1-43 e 559-567, 1962.
- Forehand, P.W. e Reese, J.L. Jr. Prediction of pile capacity by the wave equation, *J. Soil Mech. and Fdns. Div. Am. Soc. Civ. Engrs*, 90, pp. 1-26, 1964.
- Goble, G. G., Rausche, F., and Moses, F. *Dynamic studies on the bearing capacity of piles*, Phase III, Report No. 48, Vol. 1 and Vol. 2, Division of Solid Mechanics, Structural and Mechanical Design, Case Western Reserve University, 325 p., 1970.

- Janbu, N. *An energy analysis of pile driving with the use of dimensionless parameters*, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Publication 3, 1953.
- Janz, J.W.; Van Hamme; G.E.J.S.L.; Gerritse, A. and Bomer, H. Controlled pile driving above and under water with a hydraulic hammer, *Proceedings, Offshore Technology Conference*, Dallas, paper 2477, pp. 593-609, 1976.
- Hiley, A. Rational pile driving formula and its application in piling practice explained, *Engineering*, pp. 657, 721, 1925.
- Niyama, S. *Medições dinâmicas na cravação de estacas*, Dissertação M.Sc., EP-USP, São Paulo, 1983.
- Rausche, F., Moses, F., and Goble, G.G. Soil resistance predictions from pile dynamics, ASCE, *Journal of Soil Mechanics and Foundations*, SM9, September, 917-937, 1972.
- Rausche, F.; Goble, G.G. and Likins, G.E. Dynamic determination of pile capacity. *JGED*, ASCE, vol. 111, n° 3, pp. 367-383, 1985.
- Smith, E. A. L. Pile Driving Analysis by the Wave Equation, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division* (ASCE), p. 35-61, 1960.
- Sorensen, T. e Hansen, B. Pile driving formulae, an investigation based on dimensional considerations and a statistical analysis, *5th ICSMFE*, Paris, v.2, pp. 61-65, 1957.