



Ajuste de Fórmulas Dinâmicas em Estacas Pré-Moldadas de Concreto com Verificação do Efeito de Cicatrização “Set-Up”

Jean Felix Cabette

Benaton Specialist, São Paulo, Brasil, jeancabette@benaton.com.br

Daniel Kina Murakami

Benaton Specialist, São Paulo, Brasil, daniel.murakami@benaton.com.br

RESUMO: Os métodos de previsão de capacidade de carga de estacas cravadas que se baseiam na observação da sua resposta durante o processo de cravação são chamados de “métodos dinâmicos” (Velloso e Lopes, 2002). Este trabalho tem por objetivo mostrar a importância da calibração das fórmulas dinâmicas no início da obra para avaliação do efeito de cicatrização do solo “set-up” em diversas idades. No estudo em questão foi observada a cravação de estacas pré-moldadas de concreto com seção quadrada 265mm x 265mm na cidade do Guarujá, SP, inserida num subsolo composto por uma espessa camada de argila mole até cerca de 38 metros de profundidade, seguido por uma camada de solo arenoso até cerca de 40 metros de profundidade. No início da obra foi realizado o monitoramento “cravabilidade” com o equipamento PDA (Pile Driving Analyzer) para definição dos critérios de cravação para que atingisse a profundidade de projeto. Posteriormente foram realizados ensaios dinâmicos (ECD) em diversas idades (Término da cravação, 5 horas e 5 dias). Após a realização das análises tipo CAPWAP, verificou-se que a melhor correlação das cargas mobilizadas foi através da fórmula dinâmica “Energy Approach”

PALAVRAS-CHAVE: Fórmulas Dinâmicas, Ensaio de carregamento dinâmico, Estacas pré moldadas de concreto, PDA, efeito ‘set up’

ABSTRACT: The methods for predicting the load capacity of driven piles based on observing their response during the driving process are called “dynamic methods” (Velloso and Lopes, 2002). This paper aims to show the importance of calibrating the dynamic formulas at the beginning of the pile installation to evaluate the set-up effect on the soil at different ages. In this case study, precast concrete piles with a square section of 265mm x 265mm were driven in the city of Guarujá, SP, inserted in a subsoil composed of a thick layer of soft clay up to 38 meters depth, followed by a layer of sandy soil up to 40 meters depth. At the beginning of the strike, the monitoring of the pile installation (driveability) was carried out with the PDA (Pile Driving Analyzer) equipment to define the driving criteria to reach the design depth. Subsequently, dynamic load tests were carried out at different ages (End of driving, 5 hours, and 5 days). Furthermore, CAPWAP analyses were performed, and the best correlation of the mobilized loads with the dynamic formula was through the Energy Approach formula.

KEYWORDS: Dynamic Formulas, Dynamic loading test, Precast concrete piles, PDA, set-up effect

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



1 Introdução

As fórmulas dinâmicas são expressões que utilizam o princípio da conservação de energia, a teoria do choque de Newton e a lei de Hooke para corpos perfeitamente elásticos relacionando grandezas medidas durante a cravação com a resistência do conjunto estaca – solo;

No uso das fórmulas dinâmicas, deve se considerar que a resistência oferecida pelo solo à penetração da estaca não é a capacidade de carga estática da estaca, já que a cravação de uma estaca é o fenômeno dinâmico e, portanto, mobiliza resistências inercial e viscosa, além da resistência estática. Nas fórmulas estáticas, que fornecem a capacidade de carga estática, a carga de trabalho é obtida dividindo-se esta carga por um coeficiente que fará o devido desconto da resistência dinâmica. Este coeficiente de correção tem uma variabilidade muito grande porque depende da fórmula utilizada, já que estas são baseadas em hipóteses diferentes. Portanto, as fórmulas dinâmicas são melhor empregadas no controle do estaqueamento e recomenda-se o seguinte procedimento (Velloso e Lopes, 2002):

Cravar uma estaca, próximo a uma sondagem, até a profundidade prevista por método estático para esta sondagem, observando a nega e/ou repique;

Executar uma prova de carga (quanto mais provas de carga, melhor) para obter o coeficiente de correção para a fórmula escolhida;

Empregar a fórmula escolhida em todo o estaqueamento, com o coeficiente de correção obtido.

A medição da nega, pode-se ser realizada ao prender uma folha de papel ao fuste da estaca e no momento do golpe passar um lápis na horizontal, com o auxílio de uma régua apoiada em pontos fora da estaca. Nesse caso, o lápis deixará marcado no papel o movimento da estaca ao receber o golpe do martelo. Este registro indicará a nega e o repique da estaca (Figura 1).

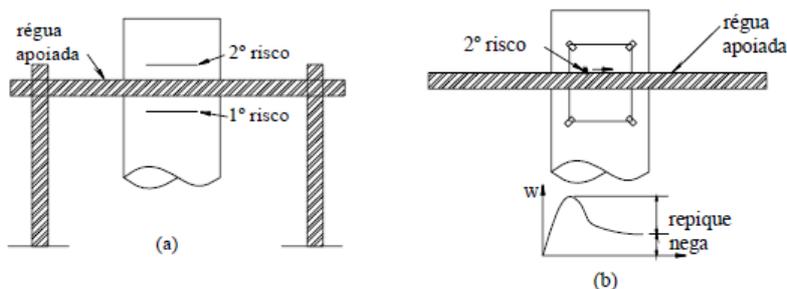


Figura 1. (a) Medida simples da nega e (b) medida de nega e repique (VELLOSO e LOPES, 2002).

2 Objetivos

Este artigo tem como objetivo mostrar a importância da calibração das fórmulas dinâmicas no início da obra para avaliação do efeito de cicatrização do solo “set-up” em diversas idades. No estudo em questão foi observada a cravação de estacas pré-moldadas de concreto com seção quadrada 265mm x 265mm na cidade do Guarujá, SP, inserida num subsolo composto por uma espessa camada de argila mole até cerca de 38 metros de profundidade, seguido por uma camada de solo arenoso até cerca de 40 metros de profundidade. No início da obra foi realizado o monitoramento “cravabilidade” com o equipamento PDA (Pile Driving

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





Analyzer) para definição dos critérios de cravação para que atingisse a profundidade de projeto. Posteriormente foram realizados ensaios dinâmicos (ECD) em diversas idades (Término da cravação, 5 horas e 5 dias), após a realização das análises tipo CAPWAP, verificou-se a melhor correlação das cargas mobilizadas foi através da fórmula dinâmica “Energy Approach”

3 Metodologia

Serão apresentadas as estimativas da carga mobilizada em estacas pré-moldadas de concreto através da utilização de fórmulas dinâmicas, posteriormente a realização da “cravabilidade” com o equipamento PDA para comparação e calibração das fórmulas em três idades (Término da cravação, 5 horas e 5 dias) com os valores obtidos através das análises CAPWAP.

O Ensaio de Carregamento Dinâmico (ECD), segundo a ABNT NBR 13208:2007, tem como objetivo avaliar as cargas mobilizadas na interface solo estaca, a eficiência do sistema de impacto, as tensões de compressão e de tração ao longo da estaca, a integridade estrutural e as características dinâmicas do sistema solo-estaca.

O ensaio de carregamento dinâmico ou prova de carga dinâmica, é um ensaio que objetiva principalmente determinar a capacidade de ruptura da interação estaca-solo, para carregamentos estáticos axiais. Ele difere das tradicionais provas de carga estática pelo fato do carregamento ser aplicado dinamicamente, através de golpes de um sistema de percussão adequado. A medição é feita através da instalação de sensores no fuste da estaca, em uma seção situada pelo menos duas vezes o diâmetro abaixo do topo da mesma. O sinal dos sensores são enviados por cabo ao equipamento PDA, que armazena e processa os sinais, através da Teoria da Equação de Onda aplicada à estaca, com base no modelo idealizado por Smith (1960).

3.1 Fórmula Energy Approach

Segundo Bilfinger (2002), pode-se determinar a resistência mobilizada através da energia aplicada e dos deslocamentos permanente e total.

$$R_u = \frac{e \times W \times h}{C_s + DMX} \quad (1)$$

Para esta fórmula sugere-se fator de correção igual a 2.

3.2 Fórmula de Chellis (1951) – Velloso (1987)

O método proposto por Chellis (1951) estima a resistência mobilizada (R_u) equação (2) e Velloso (1987) elaborou uma modificação do método proposto por Chellis, com relação a estimativa da resistência mobilizada (R_u) equação (3), durante a cravação da estaca seja diretamente proporcional à compressão elástica do fuste (C_2) equação (4). Portanto, a própria estaca funcionaria como medidor da resistência mobilizada, sendo que os valores obtidos de C_2 durante a cravação e em seu final, seriam utilizados como parâmetros para aferição da resistência que o solo impõe à penetração da estaca.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



$$R_u = \frac{C_2 \times A \times E}{L} \quad \text{(Chellis) (2)}$$

$$R_u = \frac{(K - C_3) \times A \times E}{\alpha_r \times L} \quad \text{(Velloso) (3)}$$

$$C_2 = K - C_3 \quad \text{(4)}$$

3.3 Fórmula proposta por Rosa (2000)

Segundo Rosa (2000), foi apresentado um estudo e sugestões para modificações das formulas de UTO (1985) e Chellis (1951), objetivando a obtenção de resultados mais precisos. Este autor, estudando o assunto e realizando análises estatísticas dos parâmetros envolvidos nas formulações apresentadas pelo método simplificado de CASE (fundamentado na Teoria de Propagação da Onda), propôs o que denominou de “Fórmula de Chellis Modificada”.

Rosa (2000), mostra que as modificações sugeridas na fórmula de Chellis convencional, resultam na seguinte formulação:

$$R_{CM} = \frac{\Omega \times kK \times E \times A}{\alpha \times L} = \frac{(0,03 \times L + 0,5) \times C_2 \times E \times A}{0,8 \times L} \quad \text{(5)}$$

3.4 Fórmula dos Dinamarqueses

A fórmula dos Dinamarqueses, desenvolvida por Sorensen e Hansen (1957), considera a eficiência do martelo (e), e a perda de energia na compressão elástica da estaca. Recomenda-se um fator de correção igual a 2.

$$R_u = \frac{\frac{e \times W \times h}{s + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2 \times e \times W \times h \times L}{A \times E}}}}{C_s} \quad \text{(6)}$$

3.5 Fórmula de Hiley

$$R_u = \frac{\frac{e \times W \times h}{s + \frac{1}{2} (C_1 + C_2 + C_3)} \times \frac{W + \eta^2 \times P}{W + P}}{C_s} \quad \text{(7)}$$

A Fórmula de Hiley, proposta em 1925, presuppõe fator de correção entre 2 e 6

Legenda;

A (Área de concreto da seção transversal da estaca);

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





C1, C2 e C3 (Compressões elásticas (repiques) do capacete, estaca e do solo abaixo da ponta da estaca (quake) respectivamente);
CS (Coeficiente de segurança a adotar conforme proposto pelo autor);
DMX (Deslocamento máximo sofrido durante a aplicação do golpe);
e (Eficiência do impacto);
E (módulo de elasticidade do material da estaca);
h (Altura de queda do pilão);
K (valor do repique elástico da estaca);
 $kK = C2$ (Deformação elástica (repique) da estaca, admitindo-se a existência de fase perfeitamente elástica do solo);
L (Comprimento da Estaca);
RCM (Resistência estática mobilizada pelo golpe aplicado);
Ru (resistência mobilizada na cravação);
s (Penetração da estaca por golpe (nega));
W (Peso do pilão);
 $\Omega = 0,03L + 0,5$ (Fator de correção, cujo objetivo é corrigir a tendência de crescimento da relação RCASE / RFÓRMULA em função do comprimento cravado da estaca);
 α (Fator de redução ($0 < \alpha < 1$), propõe fixar o valor médio de 0,8);
 αr (coeficiente que exprime a relação entre a parcela de carga da ponta e carga total da estaca) (adotado com valor de 0,7 quando a estaca trabalha tanto por atrito quanto por ponta).
 η (Coeficiente de restituição igual a 0,25 para estacas de concreto cravadas com capacete com coxim de madeira);

4 Caso de Obra

4.1 Descrição da obra

O caso de obra se refere à construção de tanques para armazenamento de produtos localizada na cidade de Guarujá, SP. O projeto de fundações foi desenvolvido através de 600 estacas pré-moldadas de concreto, cuja seção transversal possuía geometria quadrada de lado 265mm para carga de trabalho de até 90tf.

No total da obra foram cravadas cerca de 600 estacas com essa seção, totalizando cerca de 25.000 metros e foram observadas 10 quebras de estacas o que representa cerca de 1,7%.

Este caso de obra também foi estudado por Murakami e Cabette (2023a, 2023b)

4.2 Resultados e Procedimento de Controle (Protocolo Benaton)

No início da obra foi realizado o monitoramento da cravação da estaca (cravabilidade) com o uso do PDA (Pile Driving Analyzer) da fabricante Pile Dynamics, Inc., com intuito de verificar a altura de queda ideal do martelo minimizando as tensões de compressão e tração conoforme já observado por Murakami e Cabette (2014, 2022), assim como ensaios de carregamento dinâmico (ECD) com posterior análise CAPWAP na estaca E31 (Tanque 6) nas seguintes idades: Término da Cravação, após 5 horas e após 5 dias, vide tabela 3.

O Objetivo deste procedimento foi verificar o ganho de capacidade de carga geotécnica ao longo do tempo, assim como definir a padronização de execução das estacas. Na estaca E31 (Tanque 6), se verificou que após 5 (cinco) dias da data da cravação foi atendida a carga solicitada em projeto com fator de segurança global superior a 2,0 (NBR 6122:2022);

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



A estaca E31 do tanque 6, foi executada por equipamento de bate estacas com martelo queda livre com massa equivalente a 6.000kg, na qual obteve comprimento cravado de 38,7 metros com seção quadrada com lado 265 mm para carga de trabalho de até 90 tf

Tabela 3 – Verificação do efeito Set-UP – Estaca Prova (E31 do Tanque 6)

Estaca	H (cm) (CAPWAP)	Nega (golpe) (CAPWAP)	Repique (mm)	EMX (tf.m)	Pmob Fuste (tf)	Pmob Ponta (tf)	Pmob CAPWAP (tf)	FS
Tanque 6 – E31 (Término da Cravação)	60	4,0	21,0	1,89	58,8	42,0	100,8	1,1
Tanque 6 – E31 (5 horas)	50	1,0	21,2	2,03	124,5	23,0	147,5	1,6
Tanque 6 – E31 (5 dias)	90	0,1	21,2	2,53	186,0	15,0	201,0	2,2

Desta forma, para cravação das estacas dos tanques com seção 26,5x26,5cm foi padronizada a altura de queda de 0,40m do martelo de tipo queda livre com massa equivalente a 6.000kg para cravação das estacas, seguindo o critério de paralização quando a nega p/ 10 golpes fosse inferior a 10mm e Repique mínimo de 17mm.

Nas figuras de 2 (Término da Cravação), figura 3 (Após 5 horas) e figura 4 (Após 5 dias) é possível verificar os gráficos gerados pelas análises CAPWAP.

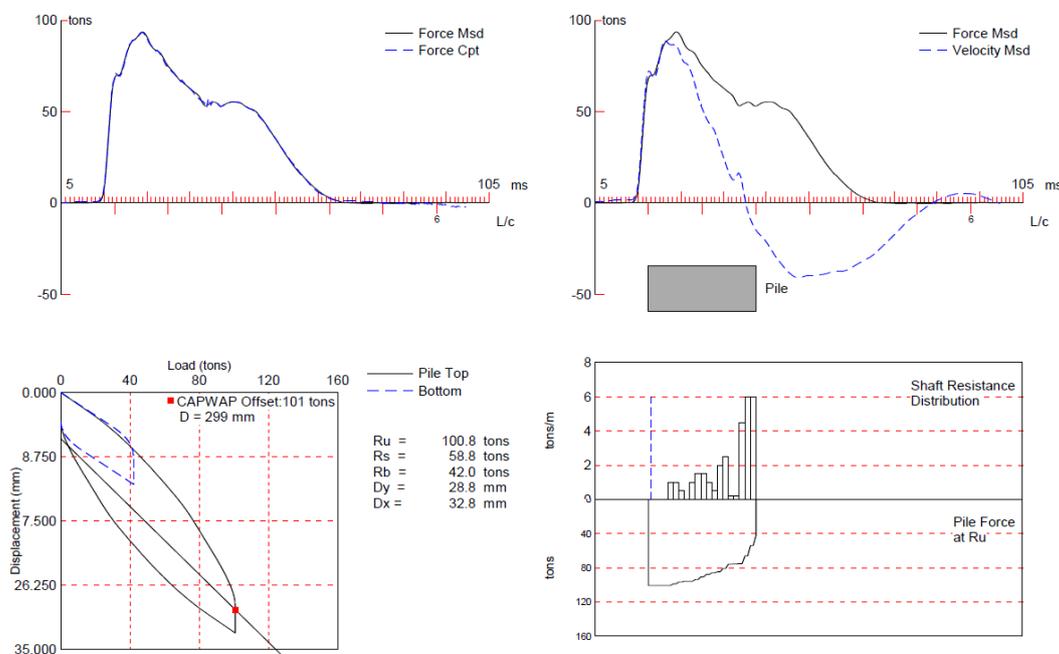


Figura 2. Ensaio Dinâmico Estaca E31 – Tanque 6 – No final da cravação, sem considerar cicatrizaçao do solo

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



De acordo com a figura 2, observa-se a carga máxima mobilizada ao término da cravação foi de 100,8 tf, porém o limite de Davisson "Offset Line" foi ultrapassado pois a estaca não possuía muito atrito lateral e carga estava concentrada na ponta da estaca (58,8 tf (Atrito Lateral) e 42,0 tf (Ponta)), (CAPWAP match quality = 1,03);

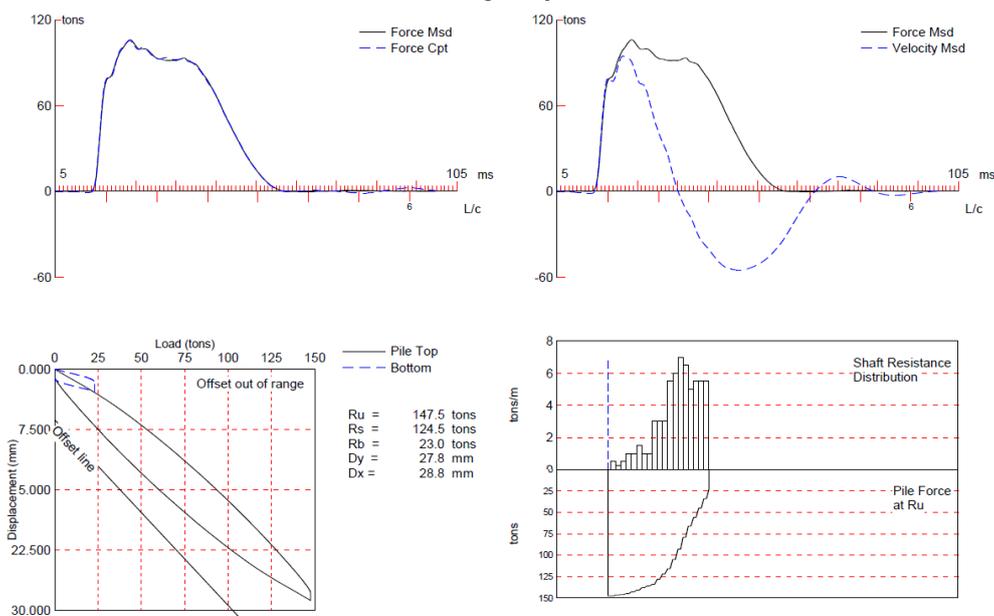


Figura 3. Ensaio Dinâmico Estaca E31 – Tanque 6 – 5 horas de repouso após a cravação

De acordo com a figura 3, observa-se a carga máxima mobilizada após 5 horas da cravação foi de 147,5 tf, e o limite de Davisson "Offset Line" não foi ultrapassado, porém o ensaio teve que ser paralisado pois a tensão de tração estava elevada, sendo assim o resultado que foi obtido não é máximo (124,5 tf (Atrito Lateral) e 23,0 tf (Ponta)), (CAPWAP match quality = 1,31);

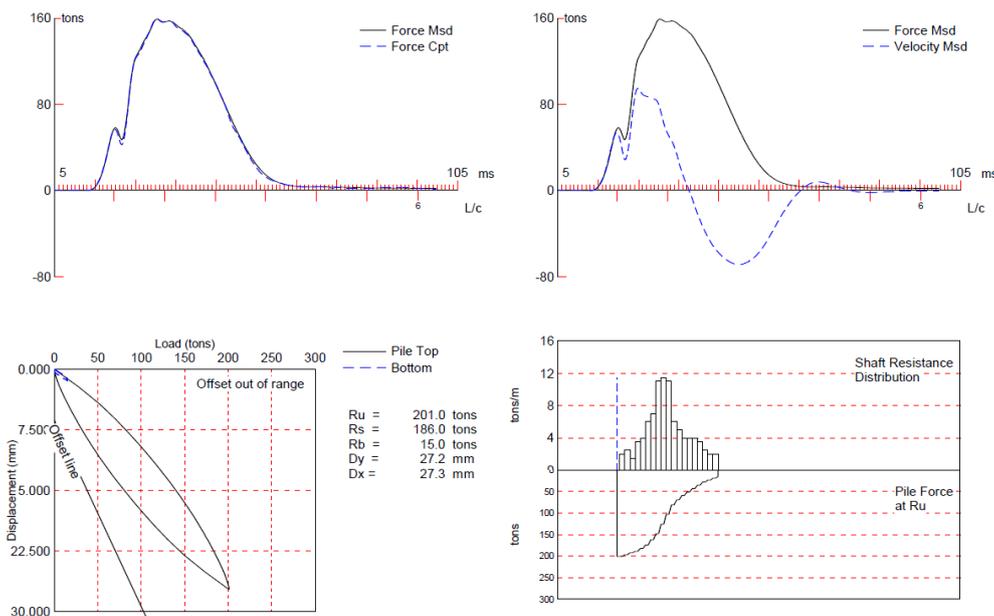


Figura 4. Ensaio Dinâmico Estaca E31 – Tanque 6 – 5 dias de repouso após a cravação

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



De acordo com a figura 4, observa-se a carga máxima mobilizada após 5 dias da cravação foi de 201,0 tf, e o limite de Davisson “Offset Line” não foi ultrapassado, porém o ensaio teve que ser paralisado pois a tensão de tração estava elevada, sendo assim o resultado que foi obtido não é máximo (186,0 tf (Atrito Lateral) e 15,0 tf (Ponta)), (CAPWAP match quality = 1,27);

De acordo com a tabela 4 é possível verificar o valor médio da resistência obtida por cada fórmula dinâmica comparada com o resultado da análise CAPWAP e sua calibração;

Tabela 4 – Análise de cargas e correlação (r)

Analise Fórmulas Dinâmicas	CAPWAP	Energy Approach (2002)	Chellis - Velloso (1987)	Rosa (2000)	Dinamarqueses (1957)	Hiley (1925)
Ru média (tf)	149,8	86,3	141,8	133,7	165,9	118,9
Correlação (r ²) - Cargas	-	1,00	0,87	0,79	0,95	0,90
Fator de Correção - CAPWAP	-	0,57	0,95	0,96	1,13	0,79
Ru média (tf) - Corrigida	-	150,3	141,8	138,6	146,5	150,3

De acordo com os gráficos das figuras 5 e 6 é possível avaliar a correlação entre as fórmulas dinâmicas com as análises CAPWAP, antes e depois da calibração.

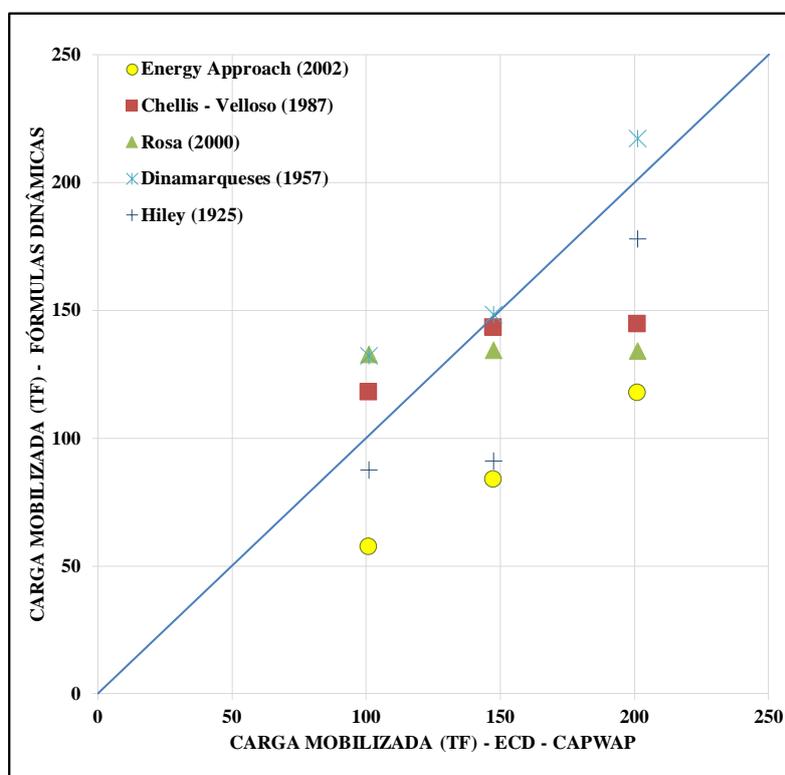


Figura 5. Comparação entre as fórmulas dinâmicas e as análises CAPWAP sem correção

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



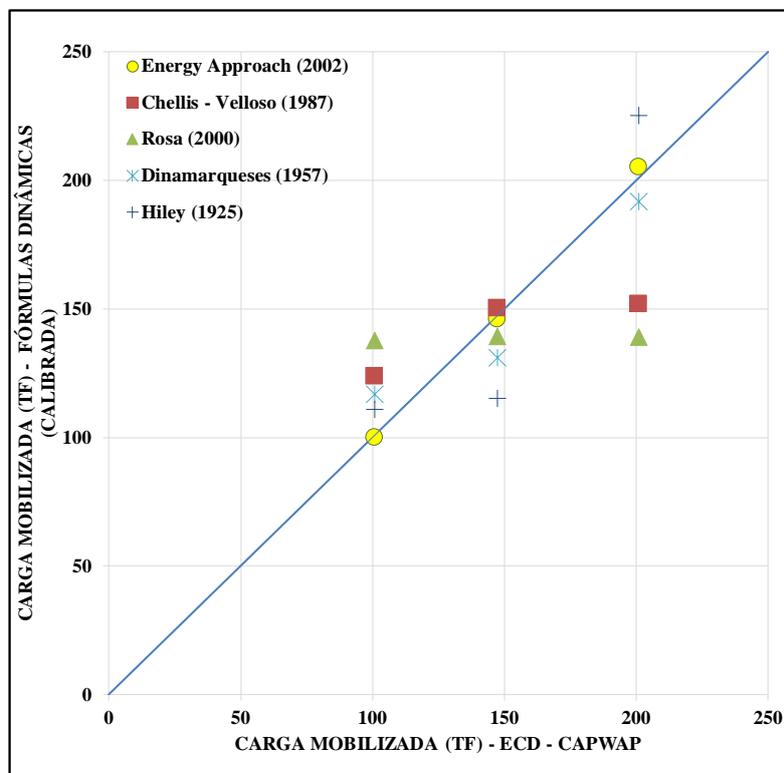


Figura 6. Comparação entre as fórmulas dinâmicas e as análises CAPWAP com calibração

Pelo exposto acima é possível verificar que para comparação da estaca E31 – Tanque 6, a fórmula dinâmica intitulada de Fórmula Energy Approach, apresentou melhor correção dentre as demais fórmulas dinâmicas analisadas quando foi realizada a calibração da mesma, haja visto que o fator r^2 ficou arredondado de 1,0 (praticamente perfeito);

5 Considerações Finais

Foi verificado neste artigo a importância de ajustar as fórmulas dinâmicas para previsão da capacidade de carga das estacas com objetivo de uniformizar o estaqueamento. Deve-se sempre realizar ensaios de carregamento dinâmico previamente para adoção do fator de calibração de cada fórmula dinâmica, assim como utilizar sempre mais de uma fórmula dinâmica, já que as mesmas possuem grandes variações.

Destaca-se no caso de cravação de estacas em solos litorâneos que apresentam grande cicatrização, deve-se realizar ensaios em diversas idades para avaliação do efeito “set-up”. No caso desta obra foi observado ganho de carga de aproximadamente 99%, ou seja, se fosse utilizada apenas a fórmula dinâmica para previsão da capacidade de carga da estaca sem auxílio da cravabilidade com o PDA, seria necessário forçar mais a cravação o que inevitavelmente aumentaria o risco de quebra de estacas sem necessidade. Uma vez estabelecido o protocolo de trabalho, a obra pode seguir de forma mais tranquila e com segurança, porém sempre alerta para os casos onde o critério pré estabelecido não fosse atendido para realizar ensaios complementares.

AGRADECIMENTOS

Realização:



Avenida Rebouças, 353, Sala 74 A
Cerqueira César, São Paulo/SP, 05401-900
Telefone: (11) 3052-1284
E-mail: abef@abef.org.br

Organização:



Avenida T-9, 2310 - Ed. Inove Intelligent Place
Sala B701, Jardim América, Goiânia/GO, 74255-220
E-mail: secretaria@qeeventos.com.br
Site: www.qeeventos.com.br

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Os autores agradecem a Benaton Specialist e a Construtora Manara pela autorização dos dados necessários para a elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16903. Solo- Prova de carga estática em fundação profunda. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 13208; Estacas Ensaio de carregamento dinâmico, Rio de Janeiro, 2007.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6122; Projeto e Execução de Fundações, Rio de Janeiro, 2022.
- Avelino, J. D., Análise de Desempenho de Estacas de Fundação em um Terreno com Presença de Solos Moles. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- Bilfinger (2002), Critérios de Segurança de Fundações em Estacas Cravadas com Considerações de Controle Executivos. Tese de Doutorado, EPUSP.
- Gonçalves, C., Bernades, G. P., Neves, L. F. S., (2007) Estacas Pré-Fabricadas De Concreto, Teoria E Prática, 1ª edição.
- Hiley A., (1925) “A rational pile driving formula and its application in piling practice explained”. Engineering (London) (119), pp. 657-721.
- Likins, et al (2012), Pile Driving Formulas – Past and Present. Full Scale Testing and Foundation Design ASCE Geo-Institute Geotechnical special publication n°227, pp. 650-663.
- Murakami, D. K., Cabette, J. F. (2014) Pile driving difficulties in soils with large quakes. Seminar presented in "Workshop - Ensaios de Carregamento Dinâmico e Monitoração de Cravação de Estacas (Pile Driving Analyzer e CAPWAP)", Carmix do Brasil, São Paulo, pp 1-8 (in Portuguese).
- Murakami, D. K., Cabette, J. F.; (2022) Pile Driving Difficulties in Soils with Large Toe Quakes. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Campinas, SP
- Murakami, D. K., Cabette, J. F.; (2023a) Quake Values Over Time Determined By The High Strain Dynamic Pile Test. SEFE 10, São Paulo, SP (artigo submetido)
- Murakami, D. K., Cabette, J. F.; (2023b) The Reliability of the Dynamic Load Test to Detect Pile Damage . SEFE 10, São Paulo, SP (artigo submetido)
- PILE DYNAMICS, INC. CAPWAP manual, Cleveland, 2006.
- Velloso, D.A., Lopes, F.R. (2002), Fundações Vol. 2. Editora COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

