

Metodologia para Controle da Capacidade de Estacas Cravadas com base em ECD e Equações Dinâmicas Descritas por Crandall

Enrique Marchetti Rios

Engenheiro Civil, Larenge – Lauro Rios Engenharia Ltda, São Paulo, Brasil, ico.rios@gmail.com

RESUMO: O artigo descreve uma metodologia para caracterizar a resistência geotécnica em estacas cravadas, visando avaliar o desempenho global das estacas na obra. A metodologia se baseia na fórmula dinâmica proposta por Crandall (1936), dada por $r = eWh / (s + k)$, onde k é igual à metade do repique elástico, determinado por ensaios de carregamento dinâmico realizados nas estacas da obra. Essa fórmula deve ser aplicada ao final da cravação, com a realização dos ensaios de carregamento dinâmico nas estacas representativas, e após um período que permita a determinação do efeito de cicatrização ou relaxação ("setup") ao longo do tempo. Os parâmetros de aferição a serem determinados incluem a eficiência do martelo no final da cravação, o fator de amortecimento dinâmico e o efeito de "setup". O artigo discute a aplicação do método semiempírico, apresentado no item 6.2.1.2.1 da NBR 6122, para definir o fator de segurança utilizado na determinação da carga admissível ou força resistente de cálculo. Embora o artigo apresente exemplos de determinação desses parâmetros (em alguns casos de obras com a participação do autor), não se pretende recomendar parâmetros de ajuste pré-definidos para a fórmula dinâmica, enfatizando a necessidade de ajustá-los com base em estacas representativas cravadas com o equipamento utilizado na obra. Adicionalmente, com base em ensaios dinâmicos e medições de nega/repique em campo, observa-se fisicamente a ocorrência de tensões residuais decorrentes da cravação das estacas, corroborando com estudos anteriores (Costa, 1994; Massad, 1995). Fato que conduz a recomendação de se evitar critérios de parada com negas muito fechadas. A metodologia proposta utiliza fórmulas e teorias estabelecidas, não representando inovação específica. Dessa forma, busca-se oferecer um guia simples e eficaz para orientar o projeto, controle executivo e verificação de performance de estaqueamentos com estacas cravadas. As unidades de medida adotadas são consistentes com o Sistema Internacional, exceto pelas forças (em kN) e comprimentos (em mm) para facilitar a compreensão do leitor.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas, Fórmula Dinâmica, Repique Elástico, Controle de Desempenho, Ensaio de Carregamento Dinâmico, PDA (Pile Driving Analyzer)

ABSTRACT: The article describes a methodology for characterizing the geotechnical resistance of driven piles, aiming to evaluate the overall performance of the piles on-site. The methodology is based on the dynamic formula proposed by Crandall (1936), given by $r = eWh / (s + k)$, where k is equal to half of the elastic rebound, determined through dynamic load tests conducted on the piles at the site. This formula should be applied at the end of the driving process, with dynamic load tests carried out on representative piles, and after a period that allows for the determination of the setup effect (healing or relaxation) over time. The calibration parameters to be determined include the hammer efficiency at the end of driving, the dynamic damping factor, and the setup effect. The article discusses the application of the semi-empirical method, presented in item 6.2.1.2.1 of NBR 6122, to define the safety factor used in determining the allowable load or design resistance force. Although the article presents examples of determining these parameters (in some cases of projects involving the author's participation), it does not intend to recommend predefined adjustment parameters for the dynamic formula, emphasizing the need to adjust them based on representative piles driven with the equipment used on-site. Additionally, based on dynamic tests and field measurements of set/rebound, the physical occurrence of residual stresses resulting from the pile driving process is observed, corroborating previous studies (Costa, 1994; Massad, 1995). Reason leading to the recommendation to avoid stop criteria with very tight set requirements. The proposed methodology uses established formulas and theories, not representing specific innovation. Thus, it seeks to offer a simple and effective guide to direct the design, executive control, and performance verification of pile driving projects. The adopted units of measurement are consistent with the International System, except for forces (in kN) and lengths (in mm) to facilitate reader understanding.

KEYWORDS: Dynamic Formula, Elastic Rebound, Performance Control, Dynamic Loading Test, PDA (Pile Driving Analyzer).

1. INTRODUÇÃO

"*La semplicità è l'ultima sofisticazione.*", nos ensina Leonardo da Vinci, um engenheiro à frente de seu tempo. O objetivo deste artigo é apresentar procedimentos de controle de resistência à compressão de estacas cravadas com base em fórmulas simples, teoricamente fundamentadas, evitando a introdução de parâmetros que, muitas vezes, se mostram imprecisos e dependem de informações eventualmente pouco precisas ou até indisponíveis.

A título de ilustração, pode-se apresentar o método CASE, que foi desenvolvido durante o final dos anos 1960 e 1970, na Case Western Reserve University e na Pile Dynamics (Pile Dynamics, Inc, 2009). O método é capaz de determinar a resistência dinâmica durante a cravação de uma estaca a partir da sua área de seção e do seu módulo de elasticidade, instrumentando apenas o topo da estaca, independentemente de qualquer informação referente ao solo onde se cravou a estaca. O método CASE, assim como as principais fórmulas dinâmicas, mede diretamente a resistência dinâmica, que é a soma da resistência estática e da resistência devido ao amortecimento viscoso (parcela dinâmica da resistência). Para estimar a resistência estática, o método CASE utiliza de um fator de amortecimento viscoso (J_c), uma incógnita estimada pelo operador e aferida por prova de carga estática levada até a ruptura ou com o processamento do programa CAPWAP®.

Observe-se que tanto a prova de carga estática quanto o programa CAPWAP® determinam a resistência geotécnica da estaca, independentemente do conhecimento dos parâmetros geotécnicos do solo. A prova de carga estática, a propósito, define a resistência última da estaca e, como as fórmulas dinâmicas, prescinde do conhecimento do tipo, área da seção, módulo de elasticidade e comprimento da estaca.

Pode-se dizer que a evolução observada entre as fórmulas pioneiras, como a fórmula de Wellington (1893), também conhecida como fórmula Engineering News-Record, e o os atuais ensaios de carregamento dinâmico residem na precisão da instrumentação no topo da estaca. Não é intenção do artigo descrever o estado atual da arte, poupando o leitor de uma seção com extensa revisão bibliográfica.

A metodologia proposta baseia-se em observações pessoais do autor, ensaios dinâmicos e controles de cravação realizados em algumas obras com sua participação, além das normas brasileiras pertinentes. Ela também se fundamenta em três obras bibliográficas: Crandall (1936), Wellington (1893) e Pile Dynamics, INC (1969), descritas no capítulo subsequente.

2. OBRAS BIBLIOGRÁFICAS APRESENTADAS

2.1. Discussão de Crandall (1936)

O texto de Crandall, em 25 linhas, descreve o essencial com relação à utilização de fórmulas dinâmicas no controle e verificação de capacidade de carga de estacas cravadas. A Fig.1 é uma reprodução do trecho de interesse do texto original¹.

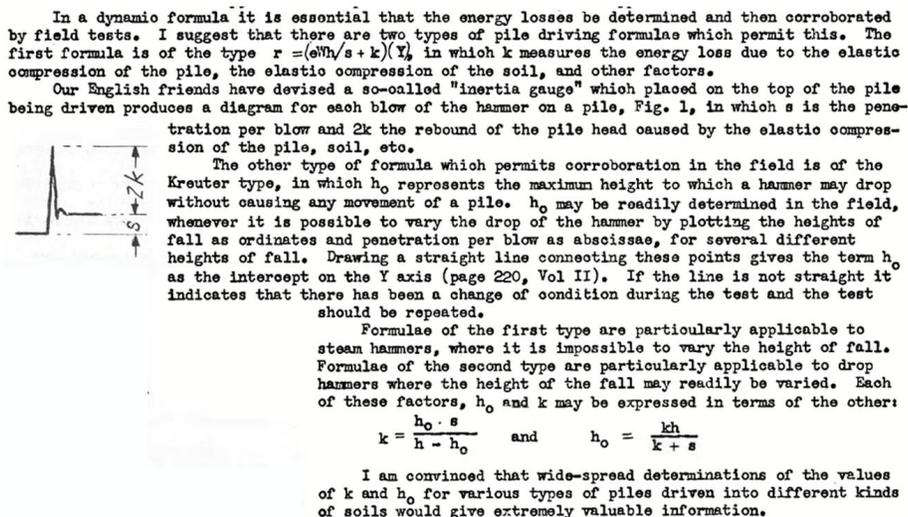


Figura 1. Reprodução do trecho de interesse do texto original de Crandall (1936)

¹. Uma simples análise dimensional da fórmula da terceira linha do texto publicado permite pressupor que o autor cometeu um erro na colocação dos parênteses (à mão), corrigida na Eq. 4, onde adotou-se $Y=1$ (aqui presumido como um fator de correção).

Deste texto pode-se destacar:

- Em uma fórmula dinâmica é essencial que as perdas de energia sejam determinadas e corroboradas por ensaios de campo;
- Descreve uma fórmula baseada na Lei da Conservação de Energia que considera um fator “ k ” que mede a dissipação de energia devida à compressão elástica da estaca, compressão elástica do solo, e outros fatores;
- Informa que “nossos amigos ingleses” conceberam o chamado “inertia gauge”, que posicionado no topo da estaca sendo cravada, produz um diagrama para cada golpe do martelo onde s é a penetração por golpe e $2k$ é o repique da cabeça da estaca causado pela compressão da estaca, solo, etc.

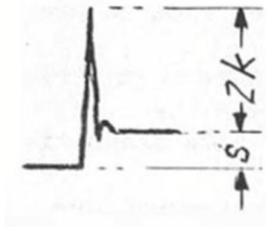


Figura 2 – Ilustração de repique apresentada por Crandall (1939)

Crandall ilustra o acima descrito com a figura reproduzida acima (Fig.2).

Chellis (1951) e Velloso (1987), sugerem que se calcule a resistência da estaca, não mais com o enfoque de conservação da energia, mas com base na lei de Hooke, utilizando a medida do repique como a soma da deformação elástica à compressão da estaca (C_2) com o “quake” do solo na ponta, introduzindo outros parâmetros a serem estimados (“quake”, distribuição da resistência lateral ao longo da profundidade e proporção entre resistência de ponta e lateral).

2.2. A Fórmula de Wellington (1893)

Dentre as fórmulas do tipo citado por Crandall, destaca-se a fórmula de Wellington, originalmente publicada na Engineering News de dezembro de 1888. Frequentemente tratada como uma fórmula puramente empírica, na verdade ela foi deduzida com base na Lei de Conservação de Energia.

O próprio Wellington (1893), provocado por Mr. Crowell, faz a defesa de sua fórmula. Por valor histórico, a Fig.3 reproduz trecho de interesse da citada defesa.

This formula was put forward as a purely empirical one, and its usefulness established only by comparing its results with known instances of resistance, and with the indications of other formulas, but, as a matter of fact, it was not purely empirical by any means; on the contrary, the general form,

$$L = \frac{fwh}{s + c}$$

was first deduced as the correct form for a theoretically perfect equation of the bearing power of piles, barring some trifling and negligible elements to be noted; and I claim in regard to that general form that it includes in proper relation to each other every constant which ought to enter into such a theoretically perfect practical formula, and that it cannot be modified by making it more complex, as Mr. Crowell proposes, or by making it less complex,

Figura 3 – Trecho da exposição de Wellington (1893)

Merece destaque o trecho, de tradução livre: “Reivindico em relação a essa forma geral que ela inclui em proporção adequada todas as constantes que devem fazer parte de uma fórmula teoricamente perfeita na prática, e que não pode ser modificada tornando-a mais complexa, como o Sr. Crowell propõe, ou tornando-a menos complexa.”

A fórmula de Wellington, também conhecida como fórmula ENR, foi proposta para duas situações:

- Capacidade última da estaca:

$$M = 12 \frac{Wh}{(s+1'')} \quad (1)$$

Onde,

M = resistência última, em qualquer unidade de força;

W = peso do martelo, na mesma unidade;

h = altura de queda do martelo, em pés;

s = penetração permanente da estaca sob o último golpe, em polegadas

$1''$ = uma constante que se torna necessária devido ao fato de haver uma resistência inicial adicional no processo de cravação de uma estaca, e tem como objetivo fornecer o equivalente mais próximo viável para o efeito dessa resistência adicional na modificação da resistência média à penetração. Com estacas individuais, ela pode ser um pouco maior ou menor, em polegada.

Vale reparar que o fator 12 é um fator de conversão para compatibilizar a altura de queda, em pés com a nega, em polegadas (1 pé = 12”).

- Carga admissível:

$$\text{Carga admissível} = 2 \frac{Wh}{(s+1'')} = \frac{M}{6} \quad (2)$$

Novamente vale ressaltar que o fator 2 é o fator de conversão do item anterior dividido por 6 que é o fator de segurança proposto por Wellington.

Compatibilizando as dimensões de comprimento em milímetros, como adotado neste artigo, a Eq. 2 passa a ser:

$$Ru = \frac{Wh}{(s+25,4)} \quad (3)$$

Assim, ela retoma a fórmula descrita por Crandall, que passa a ser chamada “fórmula geral”:

$$Ru = \frac{eWh}{s+k} \quad (4)$$

Onde,

Ru é a resistência da estaca mobilizada no instante do golpe;

e é o fator de eficiência do martelo no golpe;

Y é um fator de correção da fórmula típica de Crandall, aqui adotado igual a 1.

Pode-se dizer que a fórmula da ENR adota $k = 25,4$ mm e, com base na Fig.2, conclui-se que ela equivale à fórmula geral com um repique de valor constante igual a 50,8 mm. Quem convive com cravação de estacas sabe que um repique de 50,8 mm é muito elevado e a probabilidade de que ocorra em obras corriqueiras é quase nula. Para quem correlaciona repique alto com resistência elevada parece um valor arrojado, entretanto, no contexto da fórmula geral, para uma mesma energia aplicada no golpe, quanto maior o repique, menor a resistência mobilizada, o que confere uma condição conservadora para esta fórmula.

2.3. Método Case e CAPWAP® – Pile Dynamics, Inc. (2009)

Os ensaios de carregamento dinâmico partem da instrumentação do topo da estaca submetida ao impacto do martelo pelo sistema PDA, inicialmente produzido na Case Western Reserve University por volta de 1968 sob supervisão do Dr. G. G. Goble. Em 1972, a Pile Dynamics (PDI) introduziu seu primeiro modelo

comercial, seguido por outros modelos que a partir de 1974 passaram a ser conhecidos por “Pile Driving Analyzer®” ou simplesmente PDA.

Conforme manual do PDA, soluções em forma analítica baseadas na Teoria da Elasticidade de Timoshenko foram aplicadas às medições do Método CASE.

O Método CASE permite uma avaliação do sistema martelo-estaca-solo, que mede diretamente a força máxima aplicada na seção instrumentada e determina com precisão a resistência dinâmica da estaca mobilizada no golpe. Entretanto, para a determinação da resistência estática, depende da estimativa do valor de um fator de amortecimento dinâmico (J_c), que é uma incógnita do método. Os dados colhidos pelo PDA podem ser analisados com o programa CAPWAP® para aferir ajustar o J_c estimado pelo CASE e avaliar a distribuição da resistência do solo ao longo do fuste e ponta da estaca.

O PDA, por meio das medições de força e integrações da aceleração, ambas medidas diretamente na seção instrumentada no topo da estaca, calcula a máxima energia efetivamente transferida à estaca (EMX), e portanto, fornece a eficiência do martelo no golpe analisado, o que permite aferir o parâmetro de eficiência do martelo utilizado nas fórmulas dinâmicas tradicionais.

Vale salientar que um dos métodos de cálculo do PDA aplica a fórmula dinâmica baseada na Lei da conservação da energia descrita por Crandall, utilizando valores de energia medidos efetivamente. Essa inovação, conforme o manual do PDA, é chamada de Energy Approach e não é parte do Método CASE original, mas vem sendo descrita por outros, como por exemplo, Paikowsky (1992).

3. CONSIDERAÇÕES SOBRE O ITEM 6.2.1.2.1 DA NBR 6122 (2022)

O item 6.2.1.2.1 – Resistência determinada por método semiempírico da NBR 6122 (2022) estabelece que o fator de segurança global a ser utilizado para determinação da carga admissível é 2,0. Para se chegar à força resistente de cálculo o ponderador deve ser 1,4.

No segundo parágrafo, admite a redução do fator de segurança global ou do coeficiente de ponderação das ações, desde que se reconheçam regiões representativas e que se utilizem resultados de ensaio de campo nessas regiões.

Mas quais seriam esses ensaios de campo? A resposta é fornecida pela Tabela 1 (Tabela 2 da norma):

Tabela 1. Tabela 2 da NBR 6122.

Tabela 2 – Valores dos fatores ξ_1 e ξ_2

n ^a	1	2	3	4	5	6	≥ 10
ξ_1 ^b	1,42	1,35	1,33	1,31	1,29	1,27	1,27
ξ_2 ^b	1,42	1,27	1,23	1,20	1,15	1,13	1,11

^a n = número de perfis de ensaios por região representativa do terreno.
^b Os valores de ξ_1 e ξ_2 podem ser multiplicados por 0,9 no caso de execução de ensaios complementares à sondagem a percussão.

$$R_k = \min [(R_{se})_{\text{méd}}/\xi_1; (R_{se})_{\text{mín}}/\xi_2] \quad (5)$$

Onde,

R_k é a resistência característica;

$(R_{se})_{\text{méd}}$ é a resistência determinada com base em valores médios dos resultados dos ensaios de campo;

$(R_{se})_{\text{mín}}$ é a resistência determinada com base em valores mínimos dos resultados dos ensaios de campo;

X_1 e X_2 são os fatores de minoração de resistência;

Quando utilizado o método de valores admissíveis, a carga admissível deve ser:

$$P_{adm} = R_k/FS_g \quad (6)$$

Com $FS_g = 1,4$

A nota b, abaixo da tabela, determina que os valores de X_1 e X_2 podem ser reduzidos no caso de **ensaios complementares à sondagem a percussão**. Portanto, na ausência de ensaios complementares, com “n” perfis

de sondagem à percussão em regiões representativas permite-se aplicar os fatores de minoração da resistência especificados na tabela 2 da NBR 6122.

Os projetistas e consultores geotécnicos têm adotado com frequência a redução do fator de segurança global de 2,0 para 1,60 nas condições definidas no item 6.2.1.2.2 da norma – *Resistência determinada por prova de carga estática executada na fase de elaboração e adequação do projeto*.

O autor do presente artigo entende que a redução dos fatores de minoração da resistência conforme a Tabela 2 é absolutamente conforme, e propõe que se execute, como ensaios complementares, um mínimo de 5 (cinco) ensaios de carregamento dinâmico (ECD) em estacas cravadas na mesma locação de 5 (cinco) sondagens à percussão realizadas em região representativa. Isso permite a multiplicação dos coeficientes ξ_1 e ξ_2 por 0,9 (conforme nota *b* da tabela). Os ensaios propostos devem ser executados ao final da cravação de cada estaca. Quando se espera uma cicatrização significativa ou relaxação do solo, os ECD's devem ser repetidos, nas mesmas estacas, após um período mínimo de 5 (cinco) dias, ou menos, a critério do projetista ou consultor geotécnico. As sondagens a percussão devem ser realizadas na fase de projeto e os ECD's nas primeiras estacas cravadas na região de cada sondagem.

Atendidas as condições acima propostas, os coeficientes de minoração da resistência a serem adotados, conforme a norma, são:

$$\xi_1 = 1,29 \times 0,9 = 1,17 \quad (7)$$

$$\xi_2 = 1,15 \times 0,9 = 1,04 \quad (8)$$

Da Eq. 6, resulta:

$$Rk/Padm = 1,4 \quad (9)$$

Se,

$$Rk = \frac{(Rse)méd}{\xi_1} = \frac{(Rse)méd}{1,17} \quad (10)$$

$$Padm = \frac{(Rse)méd}{1,17 \times 1,4} = \frac{(Rse)méd}{1,638} \quad (11)$$

Se,

$$Rk = \frac{(Rse)mín}{x_2} = \frac{(Rse)mín}{1,04} \quad (12)$$

$$Padm = \frac{(Rse)mín}{1,04 \times 1,4} = \frac{(Rse)mín}{1,456} \quad (13)$$

Com base nas Eq. 12 e 13, de forma conservadora, propõe-se a utilização de um fator de segurança global FS=1,7 sobre cada ensaio de controle de cravação a ser efetuado na totalidade das estacas da obra:

$$Padm,i = Rse,i / 1,7 \quad (14)$$

$R_{se,i}$ é a resistência determinada com base em ensaio de campo (nega e repique) da estaca *i*;

$P_{adm,i}$ é a carga admissível da estaca *i*.

Em obras com um total superior a 200 (duzentas) estacas, além dos ensaios acima sugeridos, recomenda-se que a prova estática obrigatória por norma seja realizada conforme especificado em seu item 6.2.1.2.2 – *Resistência determinada por provas de carga estáticas executadas na fase de elaboração ou adequação do projeto*. Neste caso, pode-se adotar fator de segurança global FS=1,6.

4. METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia descrita a seguir aplica-se em obras de fundação com estacas cravadas, com cravação finalizada com martelo de impacto e submetidas a cargas de compressão. Verificações adicionais devem ser previstas em caso de ações horizontais significativas, ocorrência de atrito negativo, efeito de grupo de estacas, e outras ações diversas da compressão simples.

4.1. Fórmula dinâmica utilizada

$$Ru = \frac{eWh}{s+k} \quad (4)$$

Conforme Fig.2, o repique (K) é igual a 2k:

$$K = 2k ; k = K/2 \quad (15)$$

$$Ru = \frac{eWh}{\left(s+\frac{K}{2}\right)} \quad (16)$$

Utilizando a nomenclatura do CASE, onde S (nega em mm/golpe) e $DMX = (K+S)$:

$$Ru = \frac{eWh}{s+\frac{K}{2}} = 2 \frac{eWh}{2s+K} = 2 \frac{eWh}{S+DMX} \quad (17)$$

$$Ru = \frac{2\alpha ETR \times EMX}{(S+DMX)} = \frac{\rho ETR \times EMX}{(S+DMX)} \quad (18)$$

Onde,

Ru é a resistência da estaca mobilizada no instante do golpe;

EMX é a energia transmitida pelo golpe na cabeça da estaca;

ETR é o fator de eficiência do sistema de cravação (EMX/Wh), a ser aferido pelo PDA;

$\rho=2\alpha$ é um fator de ajuste, a ser determinado por regressão linear entre RMX obtido em análises CAPWAP® e a função $ETR \times EMX / (S+DMX)$.

4.2. Metodologia proposta

A metodologia descrita a seguir aplica-se em obras de fundação com estacas cravadas, com cravação finalizada com martelo de impacto e submetidas a cargas de compressão. Verificações adicionais devem ser previstas em caso de ações horizontais significativas, ocorrência de atrito negativo, efeito de grupo de estacas, e outras ações diversas da compressão simples.

- 1- Executar pelo menos cinco sondagens a percussão para cada região representativa da obra, na fase de projeto, preferencialmente em locação coincidente com estacas previstas no projeto;
- 2- Elaborar o estudo da resistência geotécnica última utilizando método estático teórico ou empírico;
- 3- Determinar as profundidades teóricas para a condição de fator de segurança global $FS = 1,7$;
- 4- Se o projeto tiver um total de estacas superior a duzentas, programar uma prova de carga estática a ser realizada logo no início da obra ou, se possível, antes. Neste caso FS pode ser igual 1,6;
- 5- O(s) martelo(s) mobilizado(s) deve(m) ter capacidade de mobilizar a resistência geotécnica última de projeto com negas da ordem de 30 mm/10 golpes;
- 6- Registrar nega e repique dos 10 últimos golpes de cravação de cada estaca. Caso a cravação da estaca for interrompida antes da finalização da estaca, com posterior retomada da cravação, registrar nega e repique dos últimos 10 golpes antes da paralisação e dos 10 primeiros golpes da retomada;
- 7- A resistência mobilizada no instante da cravação para a estaca pode ser considerada utilizando Eq. 18;
- 8- Até que se obtenha os parâmetros de aferição para estimativa de ETR e ρ , pode-se utilizar o valor de ETR fornecido em base de dados do martelo utilizado e $\rho = 1,08$ ($\alpha = 0,54$), obtido por regressão linear em base de dados com 160 análises CAPWAP® (dados completos da análise de regressão linear podem ser obtidos, mediante solicitação, pelo email ico.rios@gmail.com);
- 9- Com base nos ECD iniciais, 5 (cinco) ensaios ao final da cravação e 5 (cinco) após um período suficiente para se estimar o efeito de cicatrização, calcular os parâmetros de aferição por meio de regressão linear. Importante considerar que a equação proposta determina a resistência mobilizada no instante da aplicação dos respectivos golpes, de forma que o efeito da cicatrização deve ser considerado para a fixação de critérios de nega para controle de profundidade de finalização de cravação.

5. SOBRE A INFLUÊNCIA DE TENSÕES RESIDUAIS NA TOMADA DA NEGA

Com base em ensaios dinâmicos e medições de nega/repique em campo, observa-se fisicamente a ocorrência de tensões residuais decorrentes da cravação da estaca, conforme apontado por Costa (1994), Massad (1995) e outros. Basicamente, em estacas muito longas, o primeiro golpe impõe uma deformação elástica além de um deslocamento permanente da estaca. Após o impacto cessar, ocorre a restituição de parte da deformação elástica do solo e do fuste da estaca. Entretanto, o deslocamento de baixo para cima da estaca em relação ao solo desperta ações de atrito que se opõem a este movimento, provocando um estado de tensões residuais. Após o último golpe, a estaca atinge um estado de equilíbrio antes de retornar totalmente à posição inicial. Com o passar do tempo, ocorre a drenagem do solo e vibrações externas, inclusive devido à cravação de estacas próximas, promovendo o alívio das tensões residuais e a cabeça da estaca apresenta um movimento ascendente. A Figura 4 ilustra o fenômeno. Note-se que a nega medida é de 6 mm a cada 10 golpes, porém nos últimos 7 golpes ela é aproximadamente zero.

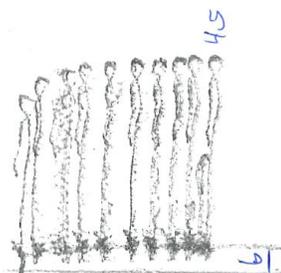


Figura 4. diagrama típico de nega tomado de uma estaca metálica longa (46m), após um período de descanso

Interpretação: com o alívio de tensões no período de descanso, a estaca apresentou um movimento ascendente. Apesar da estaca estar em uma condição de nega zero, no primeiro golpe não ocorreu a completa restituição da deformação elástica do solo e do fuste e a cabeça da estaca “parou” ~ 6mm abaixo, registrando-se uma falsa nega. Este efeito é um dos motivos para se evitar critérios de parada com negas muito fechadas (<30mm/10g).

AGRADECIMENTOS

À Cofco Intl, TEG/TEAG, Zortéa Construções e G2Base que permitiram importantes pesquisas em campo relacionadas ao presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6122 – *Projeto e execução de fundações*.
- Chellis, R. D. (1951). *Pile Foundations: Theory, Design, Practice*. McGraw-Hill.
- Velloso, D. A., & Lopes, F. R. (1987). *Fundações por Estacas: Teoria e Prática*. Oficina de Textos.
- Costa, L.M. (1994). *Previsão do Comportamento de Estaca Considerando as Tensões Residuais de Cravação*. Dissertação de Mestrado, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
- Crandall, J. S. (1936). *Bearing capacity of piles. Opening discussion*. No. H-7, 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Harvard.
- Massad, F. (1995). *The Analysis of Piles Considering Soil Stiffness and Residual Stresses*. In Proceedings of the 10th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (pp. 1199-1210). Guadalajara: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica.
- Paikowsky, S.G., & Chernauskas, L.R. (1992). *Energy Approach for capacity evaluation of driven piles*. In Proceedings of the 4th International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles (pp. 21-24). Philadelphia.
- Pile Dynamics, Inc. (2009). *Pile Driving Analyser Manual, PDA-W*, Cleveland.
- Wellington, A. M. (1893). *Piles and Pile-Driving* – Engineering News Publishing CO.