

## Proposição de um método alternativo para estimativa da energia efetiva na cravação de estacas

André Querelli

Engenheiro civil, mestrando da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil,  
andre.querelli@gmail.com

Faiçal Massad

Professor Titular na Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, faissal@usp.br

**RESUMO:** O ensaio de carregamento dinâmico se popularizou fortemente no Brasil ao longo dos últimos 20 anos, com destaque ao período pós-publicação da NBR6122 de 2010. No entanto, o controle de qualidade executivo da capacidade resistente de estacas cravadas ainda envolve em grande medida a aplicação das chamadas “fórmulas dinâmicas”. A maioria das formulações consagradas, as quais se mantiveram no dia a dia prático por apresentarem normalmente os melhores resultados, contém um parâmetro essencial, porém de difícil adoção, mesmo que com auxílio de monitoração dinâmica: a eficiência do sistema de cravação. O presente artigo visa discorrer um pouco sobre a questão da aferição e adoção da eficiência com base no ensaio dinâmico e propor uma alternativa à estimativa da energia efetiva de cravação por meio das medidas de nega e repique elástico, cuja aplicação é aqui verificada em comparação com ensaios dinâmicos de três diferentes obras localizadas na região metropolitana da cidade de Rio de Janeiro.

**PALAVRAS-CHAVE:** energia efetiva, eficiência, estacas cravadas, ensaio dinâmico, PDA, nega, repique elástico.

**ABSTRACT:** The dynamic loading test became very popular in Brazil over the last 20 years, especially after the publication of Brazilian standard NBR6122, in 2010. However, the resistant capacities evaluation still involves the application of so-called "dynamic formulas". Most of the established formulas, which remain in the technical environment because of their reasonable results, contain a key parameter, of very difficult consideration even when supported by dynamic monitoring: the efficiency of the driving system. This paper aims to discuss about the measurement of the efficiency based on dynamic test and to propose an alternative method to estimate the effectively transferred energy by means of set and elastic rebound. Its application is verified in comparison with dynamic loading tests of three different sites located in Rio de Janeiro metropolitan area.

**KEYWORDS:** transferred energy, efficiency, driven piles, dynamic load test, PDA, set, elastic rebound.

## 1. Introdução

No que diz respeito ao controle da capacidade de carga de estacas cravadas, a prática brasileira pode ser classificada, basicamente, em dois grupos distintos: um amostral e outro universal. O modo amostral limita-se a uma pequena quantidade de estacas ensaiadas. Ele consiste em provas de carga, por vezes estáticas, mas majoritariamente dinâmicas. Os controles universais, por sua vez, são aqueles estendidos a todas as estacas da obra. Nessa abordagem, dois deles se destacam: as medidas de nega e repique elástico.

A nega refere-se ao deslocamento permanente da estaca em relação ao solo para um golpe do martelo de cravação (ABNT, 2010), enquanto o repique elástico diz respeito à porção elástica do deslocamento total da estaca após o golpe. Esse deslocamento (elástico) é composto por duas parcelas: o encurtamento elástico do elemento estrutural e o deslocamento elástico do solo sob a ponta da estaca (este último também denominado *quake* da ponta).

Ambas as medidas (nega e repique) podem ser obtidas simultaneamente e de modo muito simples e barato: apoiando-se um lápis em um gabarito indeslocável, com sua ponta encostada em um papel fixado à estaca e a golpeando com o martelo de cravação. Tal prática já está bem estabelecida na prática brasileira de cravação de estacas. Sobre tais medidas, a NBR6122, em seu Anexo D, delibera que: “a nega e o repique devem ser medidos em todas as estacas” (ABNT, 2010).

Uma das utilidades desses dois registros é a possibilidade de se estimar a carga resistente por meio de fórmulas dinâmicas – expressões já bastante familiares ao meio técnico e, ainda hoje, largamente utilizadas como ferramentas de projeto e controle de estacas cravadas. São formulações empíricas, semi-empíricas ou teóricas que associam às medidas de nega e/ou repique diversas outras grandezas, resultando em uma estimativa da resistência de reação estática do conjunto solo-estaca.

Há diversas críticas no meio técnico em relação às fórmulas dinâmicas, as quais não constituem o objetivo do presente artigo. No entanto, é de se destacar que, mesmo sob tais julgamentos, elas ainda permanecem como importante ferramenta auxiliar no controle de qualidade e desempenho de estacas cravadas.

## 2. A Fórmula dos Dinamarqueses

Uma das fórmulas dinâmicas que o presente artigo deseja destacar a fim de dar suporte em algumas das conclusões é a conhecida “Fórmula dos Dinamarqueses”.

Ela foi proposta por Sorensen e Hansen (1957) baseada na fórmula do Engineering News Records, de 1888 – uma das equações dinâmicas mais utilizadas no século passado (Likins et al., 2012). A Fórmula dos Dinamarqueses é apresentada na equação (1):

$$R = \frac{\eta \cdot W \cdot h}{s + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \eta \cdot W \cdot h \cdot L}{A \cdot E}}} \quad (1)$$

Algo que se deseja ressaltar a respeito dessa formulação é o termo final contido no denominador. Sorensen e Hansen (1957) o definiram como a “compressão dinâmica de uma estaca com ponta fixa”,  $S_o$ :

$$S_o = \sqrt{\frac{2 \cdot \eta \cdot W \cdot h \cdot L}{A \cdot E}} \quad (2)$$

Tal termo ( $S_o$ ), portanto, refere-se ao deslocamento elástico da estaca, uma vez que o deslocamento permanente (a nega) e o *quake* da ponta são admitidos como nulos (ponta fixa).

Na equação (1), é possível observar que a fórmula dos Dinamarqueses contempla o tripé básico de grandezas ligadas ao evento de cravação, os quais estão presentes na maioria das fórmulas consagradas: a resistência ( $R$ ), os deslocamentos ( $s$ ,  $S_o$ ) e a energia efetiva ( $\eta \cdot W \cdot h$ ).

### 3. O ensaio de carregamento dinâmico e a prática brasileira

Acerca do ensaio dinâmico, não se pretende realizar uma análise completa sobre a teoria de propagação unidirecional da onda ou sobre os métodos de análise Case e CAPWAP, uma vez que esses assuntos já se encontram amplamente desenvolvidos e explorados na literatura técnica. Deseja-se, no entanto, introduzir brevemente o ensaio com destaque para suas funcionalidades e sua utilização voltada para a questão central do artigo: a energia efetivamente transferida à estaca.

O ensaio de carregamento dinâmico (ECD) é um dos ensaios de campo mais utilizados na engenharia de fundações para o controle de qualidade e desempenho de estacas. Ele é baseado na teoria unidimensional da propagação de onda e sua normalização no Brasil é dada pela NBR13208 (ABNT, 2007). Basicamente, o ensaio consiste na instrumentação e monitoramento de uma estaca em resposta a golpes aplicados por um martelo de cravação.

Dos dados provenientes desse monitoramento derivam diversas informações acerca do estado e desempenho instantâneo da estaca e do sistema de cravação, como: capacidade de carga, integridade estrutural do elemento, tensões de compressão e tração ao longo da estaca, eficiência do sistema de cravação, etc. Adicionalmente, também se destaca a possibilidade de, através do ensaio, avaliar o desenvolvimento da resistência do conjunto solo-estaca ao longo do tempo (cicatrização ou relaxação).

São fixados ao corpo da estaca dois tipos de sensores, próximos ao topo: extensômetros elétricos e acelerômetros. Os extensômetros medem a deformação específica no ponto instalado e os acelerômetros medem a aceleração de partícula da estaca. Para cada golpe do martelo aplicado, ambas as grandezas são registradas ao longo do tempo – o que possibilita traçar duas curvas: uma de força média, proveniente dos extensômetros, e outra da velocidade de partícula média multiplicada pela impedância da estaca. A velocidade média de partícula é calculada mediante integração das leituras dos acelerômetros no tempo.

No momento do ensaio, as curvas são processadas e convertidas em certas informações de saída, como: tensões de tração e compressão atuantes na estaca, verificações da integridade do elemento estrutural, energia efetivamente transferida e a resistência mobilizada no conjunto estaca-solo pela aplicação do golpe.

No Brasil, a prática majoritária do ensaio de carregamento dinâmico consiste na modalidade que Aoki nomeou como “prova de carga dinâmica de energia crescente” (Aoki, 1989). Ela é realizada após final de cravação, mas diferente do chamado “monitoramento de cravação” (onde golpes sequenciais possuem mesma energia), o comportamento da estaca é monitorado sob ação de golpes onde gradativamente se aumenta a energia aplicada (golpe a golpe) pela variação da altura de queda do martelo.

A principal função do ensaio com energia crescente é a obtenção da máxima resistência mobilizada da estaca, pois o registro de golpes com alturas de queda incrementais ocasiona deslocamentos crescentes, os quais possibilitam a total mobilização das resistências. Cuidados devem ser tomados no caso de estacas que atravessam argilas sensíveis, devido à perda de resistência lateral à medida que a energia aumenta. Para superar esse problema, Valverde e Massad (2018) sugeriram usar o conceito de envoltória de resistência lateral máxima, permitindo a recuperação da resistência mobilizada ao longo do fuste, perdida em golpes antes da máxima energia aplicada, especialmente em camadas próximas ao topo da estaca.

### 4. Máxima energia transferida e a calibração da eficiência

Das informações resultantes do ensaio dinâmico, destaca-se, pela importância ao presente artigo, a máxima energia efetivamente transferida à estaca, denominada no ensaio por EMX. Ela é obtida integrando o produto entre as medidas de força e velocidade de partícula no tempo (Pile Dynamics Inc., 2012), isto é:

$$EMX = \max \left[ \int F(t) \cdot v(t) \cdot dt \right] \quad (3)$$

Durante a execução do ensaio, uma das funções do EMX é confirmar ao operador que o nível de energia aplicado está adequado ao tipo de ensaio que se realiza (energia constante, crescente, etc). Além dessa questão prática, o EMX também contribui para que se calcule a eficiência do sistema de cravação ( $\eta$ ). Pile Dynamics Inc. (2012) descreve a eficiência ( $\eta$ ) pela relação entre a energia efetiva EMX e a energia

nominal aplicada (produto do peso do martelo e da altura de queda), como mostrado na equação (4).

$$\eta = \frac{EMX}{W \cdot h} \quad (4)$$

A eficiência ( $\eta$ ) é de grande valor, não só para avaliações instantâneas do sistema de cravação (no momento do ensaio), mas também para permitir que, após aferida, possa ser extrapolada a estacas que não serão instrumentadas pelo ensaio, mas sim avaliadas pela aplicação de fórmulas dinâmicas de estimativa de carga. Esse, inclusive, é um dos maiores obstáculos à extrapolação das fórmulas: garantir uma correta aferição da eficiência do sistema de cravação (calibrada amostralmente) para aplicá-la adequadamente ao universo total de estacas de uma obra, as quais, em sua maioria, não serão instrumentadas.

Goble e Likins (1996) citaram que as especificações de cada ensaio dinâmico, isto é, o modo como serão realizados, dependem do propósito ao qual os ensaios se destinam. Por isso, dizem os autores, ensaios para estimar o desempenho do martelo requerem procedimentos diferentes daqueles onde a questão é avaliação da capacidade de carga. Isso levanta críticas à metodologia de ensaio brasileira (energia crescente) para obtenção da eficiência do sistema de cravação.

No ensaio de energia crescente, existem dois principais problemas envolvidos no processo de aferição e adoção de um único valor de eficiência ( $\eta$ ): o primeiro é que nessa modalidade de ensaio são desferidos normalmente entre três e sete golpes à estaca, o que torna a amostragem estatística muito pequena para avaliação da eficiência. O segundo problema diz respeito a uma questão operacional dos bate estacas, pois é comum que no ensaio de energia crescente os golpes desferidos não tenham alturas exatamente iguais às aquelas solicitadas pelo operador do ensaio (interferindo no cálculo da eficiência), assim como também há perdas de eficiência muito variáveis nos golpes devido às operações de embreagem e freio do guincho dos martelos (em bate estacas de queda livre). Igualmente, em martelos hidráulicos, a necessidade de regulagem manual da pressão do óleo pelo operador faz com que a altura de queda não seja exatamente a desejada.

Portanto, a modalidade de ensaio com energia crescente pode aumentar significativamente a dispersão das eficiências obtidas para um mesmo sistema de cravação. Assim, quando se optar por adotar um único valor para a eficiência, extrapolando-o às demais cravações da obra (na aplicação de fórmulas dinâmicas), podem-se carregar grandes e indesejadas imprecisões às estimativas de capacidade de carga, potencializando os erros inerentes às próprias formulações.

O presente artigo apresenta uma metodologia alternativa que evita a necessidade de adoção da eficiência do sistema de cravação. Tal qual inicialmente apresentado por Querelli e Massad (2017), essa alternativa baseia-se em estimar indiretamente a energia efetivamente transferida à estaca por meio da nega, do repique elástico e das características da estaca (geométricas e do material).

## 5. Proposta de método alternativo com estimativa direta da energia efetiva

A metodologia para estimativa direta da energia efetiva tem formato semelhante ao termo  $S_0$  da fórmula dos Dinamarqueses (Sorensen e Hansen, 1957), destacado na equação (2). Ela é escrita segundo a equação (5):

$$D = \lambda \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot W \cdot h \cdot L}{E \cdot A}} \quad (5)$$

Ou, isolando a energia efetivamente transferida ( $E_{ef}$ ):

$$E_{ef} = \eta \cdot W \cdot h = \frac{1}{\lambda^2} \cdot \frac{D^2 \cdot E \cdot A}{L} \quad (6)$$

Querelli e Massad (2017) apresentaram brevemente tal metodologia empírica, porém sem fazer referência ao coeficiente  $\lambda$  (equação (5)), chegando a valores desse coeficiente iguais a 1,28 e 1,29 para duas

obras vizinhas localizadas na cidade de Duque de Caxias (RJ). O valor médio obtido para a razão  $1/\lambda^2$  foi igual a 0,60. Se admitida a equivalência da equação (5) com o parâmetro  $S_0$  (equação (2)), desprende-se que a fórmula dos Dinamarqueses contém implicitamente um coeficiente  $\lambda$  igual a 1,41 e, portanto, razão  $1/\lambda^2$  igual a 0,50.

## 6. Metodologia e breve caracterização dos ensaios

O estudo dos três casos de obra apresentados a seguir utilizará como base a equação (5), apresentada anteriormente.

Pretende-se verificar a variabilidade do coeficiente de ajuste  $\lambda$  em relação aos resultados de 284 registros do ensaio dinâmico de energia crescente em estacas pré-moldadas de concreto.

Esses ensaios referem-se a três diferentes obras de padrão industrial, localizadas na região metropolitana da cidade de Rio de Janeiro (RJ).

Genericamente, o subsolo local das três obras é razoavelmente semelhante: há uma camada de aterro compactado com 6m de espessura sobre argila orgânica cinza escura e preta, mole, com 4 a 9m de espessura. Em seguida, há uma areia medianamente compacta ou argila arenosa rija com sedimentos marinhos, com 3 a 5m de espessura, terminando com outros 3 a 5m de areia muito compacta ou silte arenoso, residual, até o impenetrável à percussão. O nível d'água foi encontrado aos 3m de profundidade.

A Tabela 1 resume a distribuição dos ensaios dinâmicos por obra e as seções de estaca que constam em cada uma delas. Dentre as estacas avaliadas, os comprimentos cravados estão entre 14,3 e 23,4m. A Figura 1 apresenta a distribuição de frequência dos comprimentos de estaca, contemplando as três obras:

Tabela 1. Tabela resumo das obras analisadas

	Quantidade de registros dinâmicos	Faixa de comprimento das estacas (m)	Seções ensaiadas / Dimensão Principal
Obra 1	149	14.3 - 22.4	22 x ■ Q 26,0 / 29,5 127 x ○ CV 26 / 33 / 38 / 42 / 50 / 60
Obra 2	33	18.0 - 19.5	12 x ■ Q 26,5 / 29,5 9 x ○ HV 45 / 50 12 x ★ ETR 29.8 / 40.6 / 44.5
Obra 3	102	18.5 - 23.4	102 x ■ Q 19,5 / 26,5 / 29,5

Q = quadrada ; CV = circular vazada ; HV = hexagonal vazada ; ETR = seção estrela

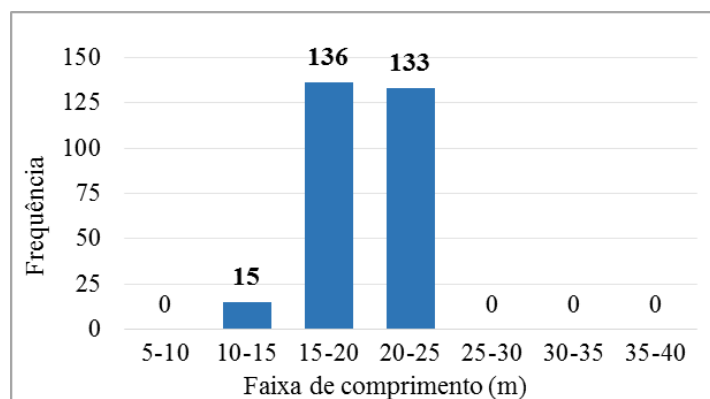


Figura 1. Distribuição de frequência de comprimentos para todas as três obras

Para avaliação dos valores de  $\lambda$ , foram plotados gráficos de mesmo formato aos de Querelli e Massad (2017), onde são contrapostos os dois lados da equação (5), isto é, “ $D \times [(\eta.W.h.L)/(E.A)]^{0.5}$ ”, onde  $D$  é o deslocamento máximo calculado no ensaio dinâmico (DMX), ‘ $\eta.W.h$ ’ também provém do ensaio pela energia efetivamente transferida (EMX), assim como o módulo de elasticidade  $E$ , que é calculado por meio da velocidade de onda e do peso específico do material. O comprimento  $L$  e a área da seção transversal da estaca  $A$  são dados disponíveis acerca da geometria das estacas do estudo.

Portanto, quando avaliadas as regressões lineares dos gráficos de forma “ $D \times [(\eta.W.h.L)/(E.A)]^{0.5}$ ”, segue-se logicamente que seu coeficiente angular é numericamente igual ao coeficiente de ajuste  $\lambda$  médio.

## 7. Resultados

### 7.1. Coeficiente $\lambda$ médio geral

O gráfico de forma “ $D \times [(\eta.W.h.L)/(E.A)]^{0.5}$ ”, para todos os 284 ensaios contidos no presente artigo, está apresentado na Figura 2.

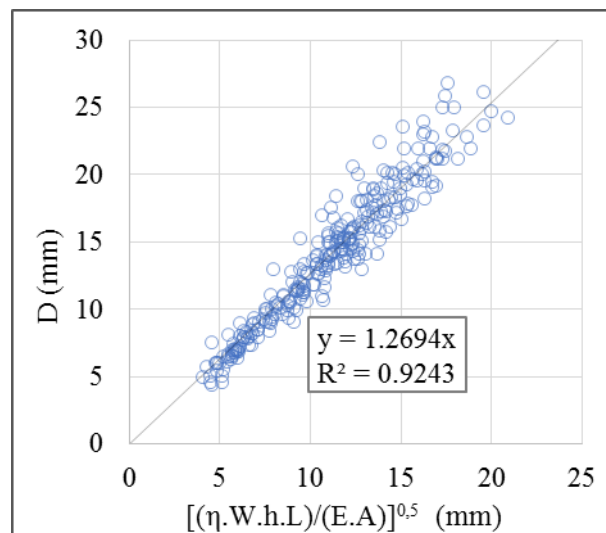


Figura 2. “ $D$ ” versus “ $[(\eta.W.h.L)/(E.A)]^{0.5}$ ”

Pela regressão da Figura 2, o valor médio de ajuste do coeficiente  $\lambda$  foi igual a 1,27. Portanto, baseada na equação (6), a estimativa da energia efetiva em estacas pré-moldadas de concreto dessa região poderá ser calculada pela equação média:

$$E_{ef} = 0,62 \cdot \frac{D^2 \cdot E \cdot A}{L} \quad (7)$$

### 7.2. Coeficiente $\lambda$ para cada obra

Uma segunda abordagem é avaliar regressões de gráficos do mesmo tipo, porém agora analisando separadamente cada uma das três obras (Figuras 3 a 5). Os gráficos estão apresentados na sequência (Figuras 3 a 5), acompanhados da Tabela 2, que reúne os valores médios obtidos para  $\lambda$ .



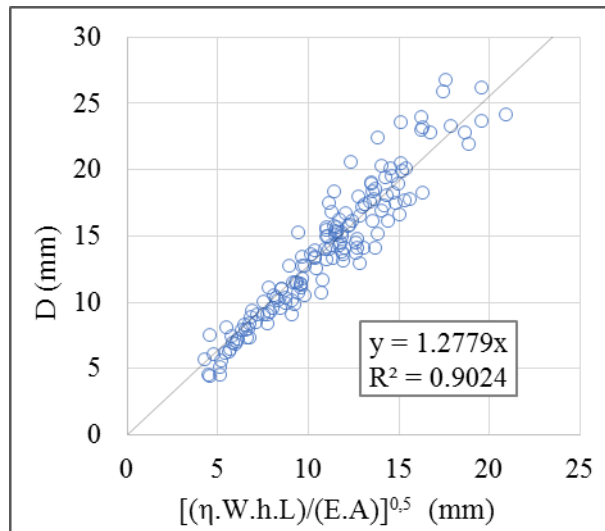


Figura 3. “ $D \times [(\eta.W.h.L)/(E.A)]^{0.5}$ ” - Obra 1

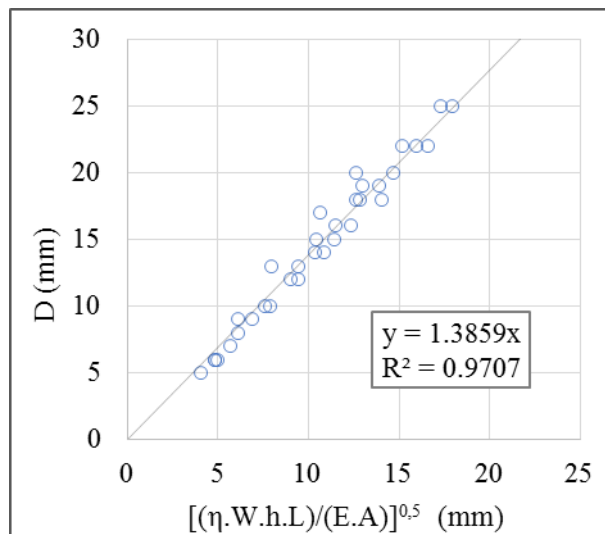


Figura 4. “ $D \times [(\eta.W.h.L)/(E.A)]^{0.5}$ ” - Obra 2

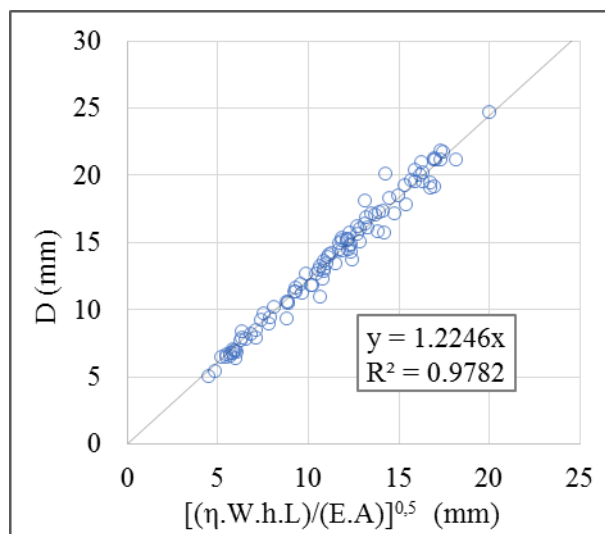


Figura 5. “ $D \times [(\eta.W.h.L)/(E.A)]^{0.5}$ ” - Obra 3

Tabela 2. Resumo de  $\lambda$  médio por obra analisada

Obra	Coefficiente $\lambda$ (médio)	$R^2$ (regressão linear)
Obra 1	1,28	0,90
Obra 2	1,39	0,97
Obra 3	1,22	0,98

Por meio dos valores da Tabela 2, foram calculadas as razões  $1/\lambda^2$ , que é o coeficiente angular da equação da energia efetivamente transferida (equação (6)). Os resultados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de  $1/\lambda^2$  por obra analisada

Obra	Razão $1/\lambda^2$ (média)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)	$R^2$ (regressão linear)
Obra 1	0,61	0,143	11,2	0,90
Obra 2	0,52	0,106	7,6	0,97
Obra 3	0,67	0,061	5,0	0,98

## 8. Conclusões

A proposta de estimativa da energia efetivamente transferida à estaca no golpe do martelo (equação (6)) traz uma contribuição prática ao controle de qualidade de estacas cravadas, uma vez que se utiliza de dois registros de simples obtenção – a nega e o repique elástico – e prescinde do conhecimento da eficiência do sistema de cravação quando da aplicação dessa grandeza na avaliação de estacas não instrumentadas.

Pode-se considerar implícito na fórmula dos Dinamarqueses,  $\lambda$  igual a 1,41. No cálculo geral, para as três obras avaliadas, o coeficiente  $\lambda$  resultou em um valor menor, sendo igual a 1,27. Esse resultado é muito próximo aos obtidos por Querelli e Massad (2017) para as duas obras de Duque de Caxias (cidade integrante da região metropolitana do Rio de Janeiro). Esses autores obtiveram  $\lambda$  iguais a 1,28 e 1,29.

Muito embora as três obras apreciadas no presente artigo façam parte da mesma região geográfica, de mesma formação geológica e perfil de subsolo bastante semelhante entre si, ocorreu que, quando analisadas separadamente, o coeficiente  $\lambda$  apresentou significativa variação, tendo extremos inferior e superior em 1,22 e 1,39, respectivamente (Tabela 2). Assim, o maior valor da razão  $1/\lambda^2$  (0,67) se mostrou quase 30% superior ao seu menor valor (0,52), como apresentado na Tabela 3.

Essa diferença entre os extremos de  $1/\lambda^2$ , associada às altas correlações lineares ( $R^2$  superiores a 0,90) quando as três obras foram analisadas separadamente (Tabela 3), mostram que o método proposto será ainda mais efetivo quando forem realizadas calibrações prévias do coeficiente  $\lambda$  para cada obra (por meio de ensaios dinâmicos).

Ainda: como houve divergência de  $\lambda$  de uma obra para outra, caso a área da obra que se deseja aplicar o método seja muito extensa ou o seu subsolo demasiadamente heterogêneo, torna-se recomendável setorizá-la em regiões menores e realizar mais de uma calibração de  $\lambda$  (na mesma obra) a fim de que todas as particularidades locais sejam contempladas.

A estimativa da energia efetivamente transferida por meio do método proposto pode ser de grande utilidade prática para o controle de qualidade de campo. No entanto, como destacado por Whitaker (1976), é necessário ser prudente com modelos demasiadamente simplificados na representação de eventos complexos, como é a cravação de uma estaca.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2007). NBR 13208: Estacas – Ensaio de Carregamento Dinâmico – Método de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, Brazil.
- ABNT (2010). NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, Brazil.
- Aoki, N. (1989). A new dynamic load test concept. Proc. XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Brazil.
- Goble, G. G. & Likins, G. E. (1996). On the Application of PDA Dynamic Pile Testing. Proc. Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Orlando, United States, p. 263-273.
- Likins, G. E.; Fellenius, B. H. & Holtz, R. D. (2012). Pile driving formulas: past and present. Proc. ASCE Geoinstitute Geo-Congress, Full-Scale Testing in Foundation Design, State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering, Oakland, United States, p. 25-29.
- Pile Dynamics Inc. (2012). Appendix A. Manual of the Pile Driving Analyzer®, Cleveland, United States, 46 p.
- Querelli, A. & Massad, F. (2017). Simplified Hiley's formula calibration for precast concrete piles in Duque de Caxias. Proc. International Conference on Advances in Structural and Geotechnical Engineering, ICASGE17, Hurghada, Egypt, march 2017.
- Sorensen, T. & Hansen, B. (1957). Pile driving formulae – an investigation based on dimensional considerations and a statistical analysis. Proc. 4th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, England, p. 61-65.
- Valverde, R. & Massad, F. (2018). Maximum Envelope of Lateral Resistance through Dynamic Increasing Energy Test in Piles. Soils & Rocks. v.41. p.75 - 89. 2018.
- Whitaker, T. (1976). The Design of Piled Foundations, 2<sup>nd</sup> Edition. Elsevier.

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $s$  - nega; deslocamento permanente no golpe
- $R$  - resistência estática do conjunto estaca-solo
- $\eta$  - eficiência do sistema de cravação
- $W$  - peso do martelo
- $h$  - altura de queda
- $L$  - comprimento da estaca
- $A$  - área da seção transversal
- $E$  - módulo de elasticidade dinâmico
- $S_o$  - compressão dinâmica (elástica) de uma estaca com ponta fixa (Sorensen and Hansen, 1957).
- $EMX$  - energia efetivamente transferida à estaca (calculada no ensaio dinâmico)
- $F(t)$  - força medida ao longo do tempo
- $v(t)$  - velocidade de partícula medida ao longo do tempo
- $E_{ef}$  - energia efetivamente transferida à estaca (análogo ao  $EMX$ )
- $D$  - máximo deslocamento da estaca após o golpe (nega + repique elástico)
- $\lambda$  - *lambda*; coeficiente de ajuste do método de estimativa da energia
- $DMX$  - máximo deslocamento da estaca após o golpe (calculado no ensaio dinâmico; análogo ao  $D$ )
- $R^2$  - coeficiente de determinação (regressão linear)