

# ENERGY APPROACH EQUATION APLICADA A MARTELOS HIDRÁULICOS NA CRAVAÇÃO DE ESTACAS DE AÇO E PREMOLDADAS DE CONCRETO

Sérgio C. Paraíso – P.E.  
Geomec Engenheiros Consultores S/C Ltda  
sergioparaiso@geomec.com.br

Cláudia Maria Cunha da Costa – D.T.  
Geomec Engenheiros Consultores S/C Ltda  
claudia@geomec.com.br



## RESUMO

A previsão de carga ativada na interação solo-estaca de uma estaca cravada utilizando a equação Energy Approach Equation aplicada a Martelos Hidráulicos de elevado desempenho é apresentada neste trabalho. A equação Energy Approach Equation é calibrada em função da energia líquida transferida (EMX) através do fator FC para os casos de estacas de aço e premoldadas de concreto em geral. Os estudos para a estimativa de carga mobilizada no final da cravação em tempo real se baseiam em ensaios de carregamento dinâmico com tecnologia de instrumentação PDA (Pile Driving Analyser) realizados em 702 estacas premoldadas de concreto e 1627 estacas de aço representativos litologicamente das regiões Sul/Sudeste e Nordeste do Brasil.

## ABSTRACT

The use of the Energy Approach Equation for hydraulic hammers in the prediction of the activated load on soil-pile interaction at the job site is presented in this paper. Studies for the estimated mobilized load at the end of driving, in real time, are based on dynamic load tests done by PDA (Pile driving analyzer) technology. Dynamic load tests were performed on 702 precast concrete piles and 1627 steel piles all over Southern, Southwestern and Northeastern Brazil.

## INTRODUÇÃO

Martelos Hidráulicos de elevado desempenho se disponibilizam no mercado de fundações apresentando-se como opção relevante no que se refere a otimização de prazos na cravação gerando redução dos custos operacionais e capacitados a cravar estacas premoldadas de concreto e aço de qualquer tipo e de baixa a alta capacidade de carga.

Tendo em vista os elevados índices de eficiência e frequência de cravação dos Martelos Hidráulicos, torna-se necessário especificar critérios de cravabilidade, que sejam compatíveis ao trinômio estaca-solo-martelo, resultando na confortabilidade estrutural da estaca em cravação, funcionamento pleno do martelo e garantia de capacidade de carga estrutural e geotécnica.

Propõe-se portanto critério de cravabilidade com base na equação Energy Approach Equation, que permite no final da cravação e/ou recravação a obtenção da carga última ativada, com base no padrão de eficiência do Martelo Hidráulico em utilização.

## ENERGY APPROACH EQUATION (EAE)

Paikowsky e outros – 1992/2000, apresenta uma equação com base em energia líquida transferida nas estacas permitindo avaliação da carga ativada na cravação em tempo real associada a medidas de Repique Elástico e penetração permanente (nega).

A energia de deformação do sistema estaca-solo-martelo, define-se conforme Figura 1 abaixo:

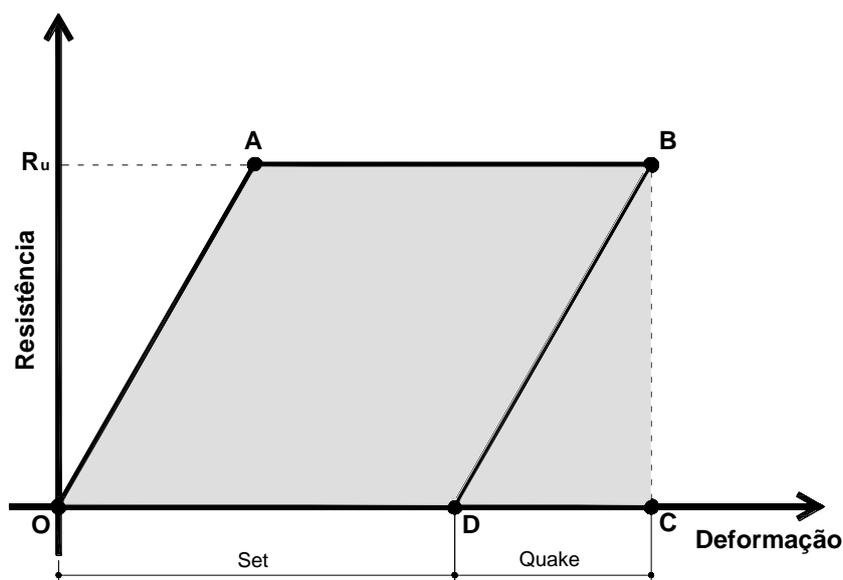


Figura 1 - Energia de Deformação do Sistema Estaca-Solo-Martelo

- $\overline{OABC}$  = Trabalho realizado (W) = Energia de Deformação ( $E_d$ ) = (EMX) – Energia Líquida Transferida na estaca;
- $\overline{OD}$  = Penetração permanente (nega) – Set;
- $\overline{CD}$  = Quake (Q) – parcela elástica do deslocamento total;
- $D_{m\acute{a}x} = (\overline{OD}) + (\overline{CD}) = DMX$  ;
- $R_u$ : carga última ativada (Paikowsky).

Da Figura 1, verifica-se:

$$\overline{OABC} = \frac{(Set + Quake) + (Set)}{2} \times R_u \therefore W = R_u \left( Set + \frac{Q}{2} \right) \therefore R_u = \frac{E_d}{Set + \frac{Q}{2}} \therefore \quad (1)$$

$$\therefore R_u = \frac{E_d}{Set + \frac{(D_{m\acute{a}x} - Set)}{2}} \therefore R_u = \frac{2E_d}{Set + D_{m\acute{a}x}} \therefore \quad (2)$$

$$\therefore R_u = \frac{2(EMX)}{Set + (DMX)} \quad (3)$$

Os valores de (EMX) e (DMX) são obtidos através de instrumentação dinâmica PDA (Pile Driving Analyser) e os valores de nega (Set) e deslocamento máximo ( $D_{m\acute{a}x}$ ) através da formatação gráfica do Repique Elástico materializado no próprio fuste das estacas conforme a Figura 2.

$R_u$  = Resistência última ativada na interação estaca-solo.

EMX = Energia transferida na estaca medida no nível de instalação dos sensores (PDA).

$$EMX = \int F(t)v(t)dt, \text{ sendo que:} \quad (4)$$

A força é obtida multiplicando-se a deformação específica pelo módulo de elasticidade (E) e pela área de seção (A) do material da estaca na região dos sensores:

$$F(t) = E A \varepsilon(t) \quad (5)$$

- $\varepsilon(t)$  é a média dos 2 ou mais sinais de deformação específica.

A velocidade é obtida integrando-se a aceleração:

$$V(t) = \int a(t) dt \quad (6)$$

- $a(t)$  é a média dos 2 ou mais sinais de aceleração.

O deslocamento é obtido integrando-se a velocidade:

$$D(t) = \int V(t) dt \quad (7)$$

Set = Penetração permanente da estaca após o impacto dinâmico (nega) via repique elástico.

$D_{m\acute{a}x} = DMX$

DMX = Deslocamento máximo medido no nível de instalação dos sensores (PDA).

$D_{m\acute{a}x}$  = obtido do repique elástico.

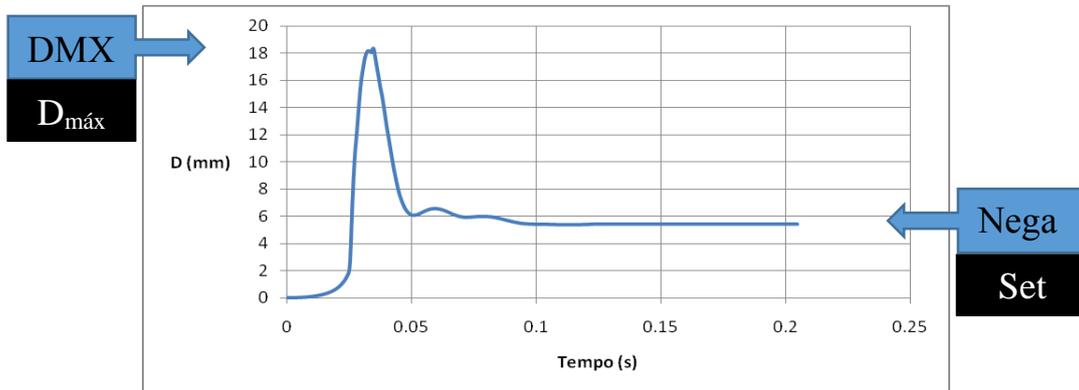


Figura 2 - Formatação Gráfica do Repique Elástico

Objetivando a calibração da equação (EAE) em tempo real, aplicada na cravação de estacas premoldadas de concreto e estacas de aço de qualquer tipologia, quando submetidas à ação de Martelos Hidráulicos, acrescenta-se o fator FC (Fator de Calibração) na equação 3 conforme a seguir:

$$RU = R_u \times FC \quad (8)$$

Os fatores de calibração  $FC_p$  e  $FC_a$ , respectivamente, para estacas premoldadas de concreto e aço, foram determinados considerando-se os valores de (EMX), Set, (DMX) e (RMX) obtidos na instrumentação dinâmica (PDA) representativos de 702 casos (estacas premoldadas de concreto) e 1627 casos (estacas de aço).

O fator (FC) é obtido da relação de  $(RMX / R_u)$ , sendo RMX carga máxima obtida pelo Método Case calibrado através das análises Capwap para um dado golpe de instrumentação PDA e  $R_u$  conforme equação 3.

A seguir apresentam-se as configurações gráficas estudadas de distribuição de frequências e ajustes de curvas conforme as Figuras 3 a 8.

As Figuras 3 e 4 mostram que a relação entre o valor de RMX e o valor de  $R_u$  segue uma linha de tendência com declive constante, igual ao Fator de Calibração, que vale 0,82 no caso de estacas de aço e 0,71 no caso de estacas pré-moldadas de concreto. Refira-se que dada a variabilidade de casos estudados, tanto em local como em tipo, considera-se os valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) encontrados bastante satisfatórios (cerca de 0,9 no caso de estacas de aço e 0,8 no caso das estacas premoldadas).

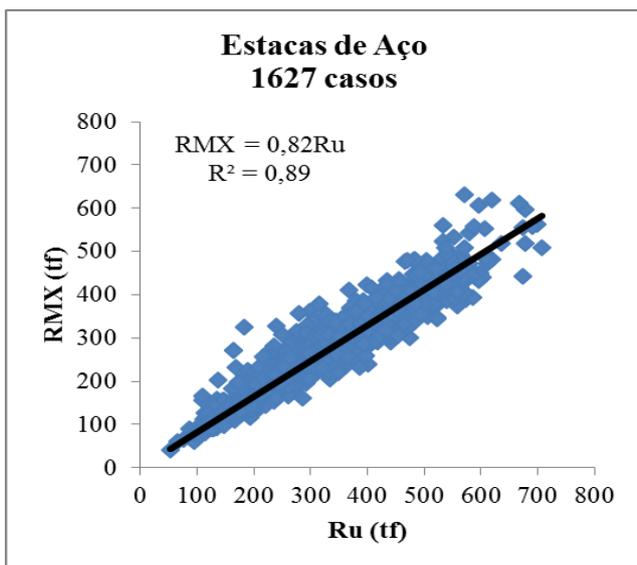


Figura 3- Avaliação do Fator de calibração  $FC_a$

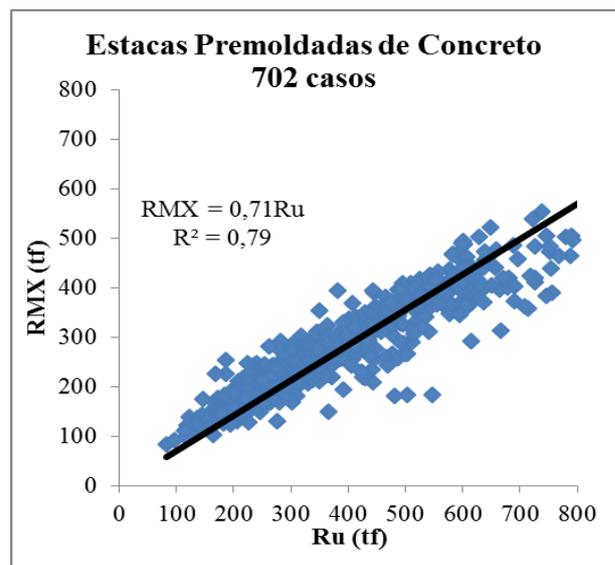


Figura 4- Avaliação do Fator de calibração  $FC_p$

Nas Figuras 5 e 6 apresentam-se os valores de RMX medidos, valores reais, e os valores calibrados para a nova proposta. Como se pode verificar os valores medidos e calibrados situam-se segundo uma reta de declive 1, mostrando-se desta forma a boa concordância entre os valores medidos e os valores calibrados.

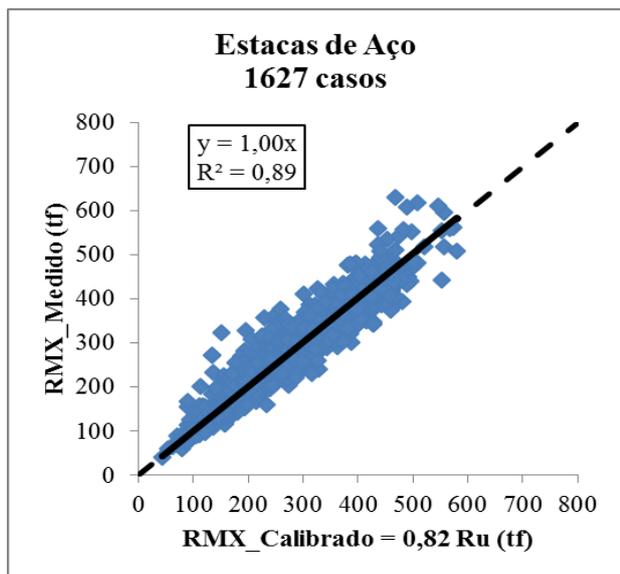


Figura 5- Relação entre o RMX medido e calibrado Estacas de aço

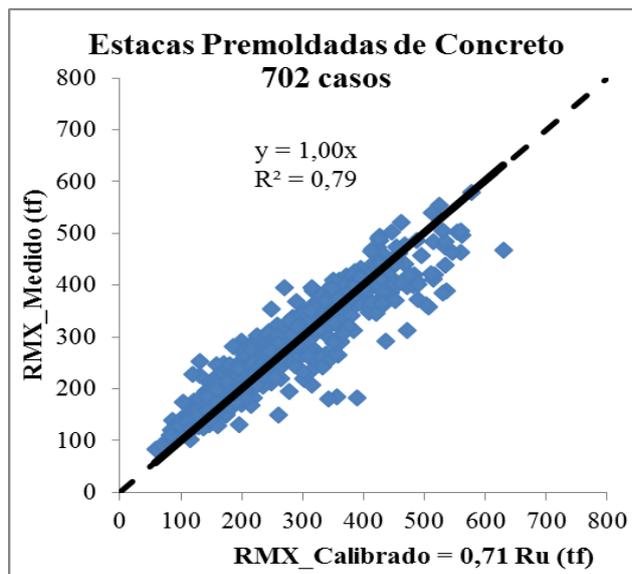


Figura 6 – Relação entre o RMX medido e calibrado Estacas de concreto

As Figuras 7 e 8 apresentam a distribuição de frequência dos valores de FC e como se pode verificar, os valores dos Fatores de Calibração propostos, estão incluídos na variação de valores que ocorrem com maior frequência, mostrando-se mais uma vez a boa qualidade do ajuste efetuado.

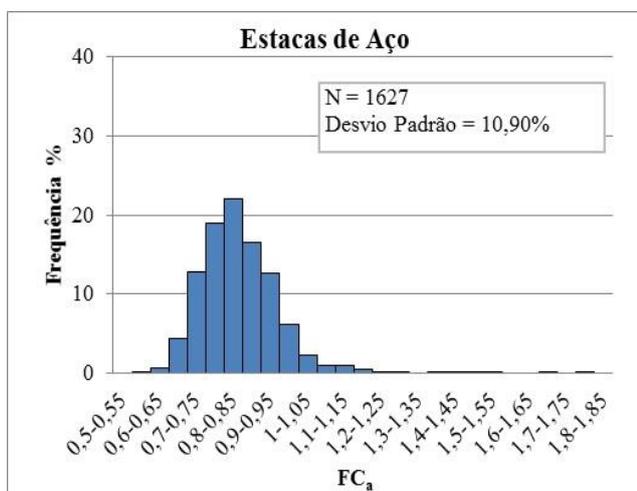


Figura 7- Distribuição de frequências de FC<sub>a</sub>

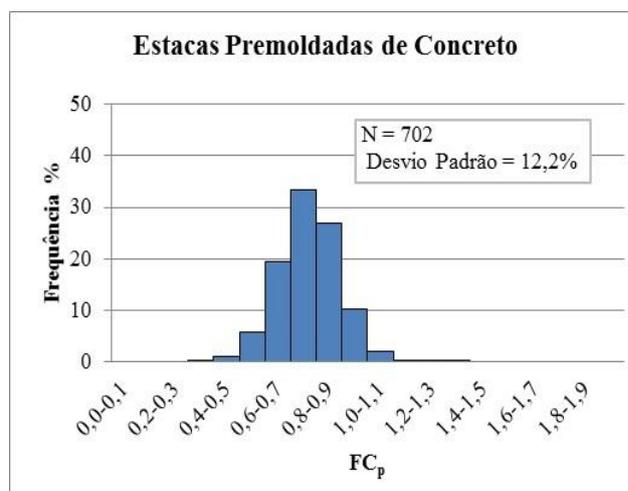


Figura 8 - Distribuição de frequências de FC<sub>p</sub>

Conclui-se dos resultados das análises gráficas apresentadas conforme as Figuras 3 a 8, os seguintes valores de (FC) conforme a tabela abaixo:

Tabela 1 – Fator de Calibração (FC)	
Tipo de estaca	(FC)
Aço	0,82
Premoldada de concreto	0,71

## COMENTÁRIOS PERTINENTES

- A sugestão e proposta da utilização da equação “Energy Approach Equation” se consubstancia na oportunidade de se usar dados obtidos da instrumentação PDA no final da cravação e recravação, calibrando o valor de  $R_u$  em função de  $R_{MX}$ . Uma vez estabelecido em uma determinada obra o padrão de  $EMX$  referente a um determinado martelo Hidráulico cria-se o instrumento para se avaliar a carga última ativada  $R_u$  para as estacas não instrumentadas a partir dos valores do deslocamento total e penetração permanente (nega) para um determinado golpe específico.
- Observa-se com importância que o coeficiente de amortecimento dinâmico de Case ( $j_c$ ) calibrado através das análises Capwap para a obtenção dos valores de  $R_{MX}$ , situa-se em patamar médio de 0,54 para ambos os casos estudados neste trabalho.
- Paikowsky (1992), sugere coeficiente  $K_{sp}$  de 0,80 para calibração da equação EAE no final da cravação e início da recravação para 14 casos estudados ( $R_s = K_{sp} \times R_u$ ). Não há menção do tipo de martelo utilizado.
- A proposição de utilização da equação Energy Approach Equation, baseia-se fundamentalmente em dados obtidos de instrumentação com a tecnologia PDA, portanto com base fundamentada na teoria da equação da onda unidimensional e não objetivando comparações com fórmulas dinâmicas de cravação consubstanciadas na teoria de impacto de corpos rígidos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às engenheiras Sandra Ferreira e Paula Federico da divisão de projetos e consultoria da Geomec Engenheiros Consultores pela organização, manipulação e análises estatísticas dos dados utilizados neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Paikowsky, S. G. e Chermauskas, L. R. Energy approach for capacity evaluation of driven piles, Application of Stress Wave Theory to Piles, Balkema, Rotterdam, 1992 ISBN 90 5410 0826.
- [2] Paikowsky, S. G. e Sternersen, K.L. Keynote lecture: The performance of the dynamic methods, their controlling parameters and deep foundation specifications – Application of stress-wave theory to piles, Niyama & Beim, Balkema, Rotterdam, 2000 ISBN 90 5809 1503.
- [3] Paraíso, S.C. e Costa, C.M.C. Avaliação de desempenho de sistemas de cravação – SEFE 7 – 2012 – Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia.
- [4] GEOMEC ENGENHEIROS CONSULTORES – Banco de dados de Ensaio de Carregamento Dinâmico em estacas cravadas (1995 a 2011).
- [5] Fellenius, B., Basics of Foundation Design, February, 2014.