

# ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO DE ENERGIA CRESCENTE EM ESTACAS DE ELEVADA CAPACIDADE RESISTENTE

## Dynamic Load Testing with Increasing Energy for High Bearing Capacity Piles

Sérgio Cançado Paraíso<sup>a</sup>, Jaime Alberto dos Santos<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Geomec Engenheiros Consultores, Brasil.

<sup>b</sup> CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal.

**RESUMO** – Este trabalho tem como objetivo apresentar uma nova metodologia de execução e interpretação de ensaios de carregamento dinâmico (ECD) de energia crescente em estacas escavadas de elevada capacidade resistente. A metodologia de execução consubstancia-se de critérios técnicos executivos pertinentes e da utilização de sistema de impacto apropriado para a realização de ensaios de carregamento dinâmico em estacas de elevada capacidade resistente. São descritos em detalhe os requisitos do martelo bem como os procedimentos para a preparação e execução do ensaio. Com base no conceito inovador de energia potencial normalizada apresenta-se uma nova proposta para a estimativa da energia potencial necessária em função da capacidade resistente a ser mobilizada. A metodologia de interpretação com base em análises numéricas CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program) para cada golpe de energia crescente, permite o traçado das curvas envoltórias das resistências lateral, de ponta e total em função dos deslocamentos. Esta metodologia proporciona todo um conjunto de informações relevantes que possibilitam avaliar de uma forma clara os mecanismos de transferência de carga entre o fuste e a ponta da estaca. Considera-se ainda a proposta de um deslocamento que corresponda à carga de ruptura convencional definido a partir do encurtamento elástico e do deslocamento da ponta da estaca.

**ABSTRACT** – This work aims to present a new methodology for the execution and interpretation of dynamic load tests (ECD) of increasing energy for cast-in-place bored high bearing capacity piles. The execution methodology demands specific technical criteria to define the impact system to perform the dynamic load test in order to carry out with increasing energy. The requirements of the hammer are described in detail, as well as the procedures for the preparation and execution of the test. Based on the innovative concept of normalized potential energy, a new proposal is presented to estimate the required potential energy according to the compressive resistance to be mobilized. The interpretation methodology based on CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program) numerical analysis for each blow of increasing energy, allows the drawing of envelope curves for the lateral, base and total resistances as a function of the displacements. This methodology provides a whole set of relevant information that makes it possible to clearly assess the mechanisms of load transfer between the shaft and the tip of the pile. It also considers the proposal of a displacement that corresponds to the conventional failure load defined from the elastic shortening and the displacement of the tip of the pile.

**Palavras Chave** – Ensaio de carregamento dinâmico, energia crescente, estaca escavada, estaca de elevada capacidade resistente.

**Keywords** – Dynamic load testing, increasing energy, bored pile, high bearing capacity pile.

---

E-mails: sergioparaiso@geomec.com.br (S. Paraíso), jaime.santos@tecnico.ulisboa.pt (J. Santos)

ORCID: ---, orcid.org/0000-0003-4231-5687

## 1 – INTRODUÇÃO

A utilização de fundações profundas por estacas remonta há muitos séculos atrás. Herodotus, 400 anos antes de Cristo, escritor e viajante grego também conhecido como “The Father of History”, proveu o primeiro documento da história universal que se refere à utilização de estacas como elementos de fundações. Sabe-se que os antigos egípcios, gregos, fenícios, romanos, chineses, mesopotâmios e outros também utilizaram estacas nas suas construções.

Fundações profundas por estacas continuam em frequente uso na Era Moderna, materializadas na metodologia executiva de estacas cravadas que provocam grandes deslocamentos no solo envolvente (*displacement piles*) e moldadas *in situ* que induzem deslocamentos muito reduzidos (*non displacement piles*). Estas últimas podem mobilizar elevada capacidade resistente e suportam todos os tipos de superestrutura e em variadas condições geológico-geotécnicas, em terra e em águas profundas.

Em razão do alto grau de responsabilidade transferida às fundações por estacas, e dos elevados custos envolvidos na construção das superestruturas, se torna imperativo e inexorável a execução de um “Controlo de Qualidade”, que qualifique as estacas através de provas de carga estáticas e/ou ensaios de carregamento dinâmicos com base na teoria da equação de onda unidimensional.

Na Engenharia de Fundações, e mais em particular para o caso de fundações profundas por estacas, a capacidade resistente às ações verticais é, sem dúvida, o aspeto principal a ser estudado. Esta verificação do desempenho engloba a parte da resistência e da integridade do próprio elemento estrutural (estaca) e também da resistência do terreno de fundação.

A integridade da estaca pode ser verificada por métodos destrutivos (carotagem) ou não destrutivos, após a sua execução (ensaios sínicos, diagrfias sínicas, etc.).

É prática corrente especificar-se no projeto de fundações uma carga ou tensão em termos de valor admissível ou, segundo a metodologia do Eurocódigo 7, em termos de valores característico e de cálculo. A comprovação do valor dessa carga ou tensão pode ser realizada através de provas de carga estática e/ou dinâmica.

As provas de carga estática constituem, sem dúvida, uma contribuição importante para a compreensão do problema complexo de interação solo-estaca. São reconhecidos como sendo a forma mais fiável para a comprovação do desempenho das fundações, mas apresentam a desvantagem no que concerne à morosidade e aos elevados custos inerentes à realização destes ensaios. Em Portugal, as provas de carga estática têm sido apenas aplicadas em obras de grande importância. Nas obras correntes e na ausência de provas de carga, é usual preconizar-se um encastramento da estaca da ordem de 2 a 3 diâmetros em formações com  $N_{SPT}$  igual ou superior a 60 e a consideração de valores conservativos da ordem de 5 a 6MPa para a tensão admissível.

No Brasil os ensaios de carregamento dinâmico em estacas de elevada capacidade resistente são realizados rotineiramente para avaliação do desempenho estrutural e de interação solo-estaca em fundações de qualquer tipo de superestrutura. As provas de carga estática, na prática, são realizadas apenas eventualmente em razão do alto custo operacional de implantação e tempo de materialização.

Como alternativa às provas de carga estática, e na ideia de se aplicar uma técnica de ensaio expedita que possa ser realizada em quantidade e em tempo útil compatíveis com a programação das obras, surgiu o ensaio de carregamento dinâmico. Esta técnica de ensaio requer, em termos de aplicação de carga, uma instrumentação de simples instalação no fuste das estacas quando comparada com a das provas de carga estática, entretanto de abordagem complexa na análise e interpretação de dados recolhidos do impacto dinâmico.

Salienta-se que esta técnica de ensaio tem sido aplicada com bastante sucesso desde a década de 70, e se encontra já bastante disseminada em todo o mundo. A tecnologia da instrumentação e ensaio de carregamento dinâmico se desenvolveu, inicialmente, para avaliação do comportamento de estacas tubulares de aço para o suporte de plataformas offshore destinadas à prospeção de petróleo em águas profundas e, no decorrer do tempo, é empregada nos dias de hoje, rotineiramente, em estacas cravadas e moldadas *in situ* em obras *on shore*.

As dificuldades mais importantes na aplicação desta nova técnica residem na correta interpretação dos dados recolhidos durante o ensaio, dada a grande complexidade do problema de interação solo-estaca e os múltiplos fatores que podem afetar a resistência mobilizada. A realização do ensaio requer o acompanhamento de uma equipa experiente que conheça os fundamentos teóricos que estão por detrás desta técnica de ensaio.

Acrescenta-se ainda que a experiência brasileira com a técnica de ensaio de carregamento dinâmico iniciou-se pelas fundações offshore, por volta de 1980, com o início das instalações de plataformas de exploração de petróleo na bacia de Campos, ao contrário de outros países onde a experiência inicial realizou-se em fundações em terra. Tais tratativas foram materializadas pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo) com a coordenação do engenheiro Sussumu Niyama (Niyama, 1983; Niyama et al., 1984; Niyama, 1985).

Aoki (1989, 1997) apresentou o conceito de ensaio de carregamento dinâmico de energia crescente em estacas cravadas e medições das resistências ativadas através do equipamento PDA (*Pile Driving Analyser*) e considerando análise numérica CAPWAP para o golpe de maior carga mobilizada.

De Mello e Paraíso (1998) apresentaram um estudo experimental de ensaio de carregamento dinâmico de energia crescente em estacas moldadas *in loco* tipo CFA (*Continuous Flight Auger*), diâmetro de 1000mm, realizado com sistema de impacto desenvolvido especificamente para testar estacas escavadas de elevada capacidade resistente com aquisição dos dados utilizando a tecnologia PDA.

Em Portugal, a investigação nesta área iniciou-se em 1997 no âmbito do convénio ICCTI/CNPq (Instituto de Cooperação Científica e Tecnológica Internacional de Portugal/Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil).

A investigação prosseguiu com a implementação de vários campos experimentais envolvendo uma boa caracterização geotécnica e ensaios de carregamento dinâmico validados através de provas de carga estática (Gouveia Pereira, 2003; Santos e Gouveia Pereira, 2005; Santos et al., 2006; Viana da Fonseca et al., 2007; Fellenius et al., 2007; Viana da Fonseca e Santos, 2008; Gouveia Pereira et al., 2009). Estes campos experimentais proporcionaram dados fundamentais para a investigação da capacidade resistente do terreno para estacas à compressão, considerando carregamento estático e/ou cíclico, tendo sido desenvolvidos diversos estudos numéricos para a interpretação dos resultados dos ensaios de carga (Gouveia Pereira et al., 2004; Gouveia Pereira et al., 2008; D’Aguiar et al., 2008; Duarte, 2009; D’Aguiar et al., 2011a e 2011b).

**Tabela 1** – Conferências realizadas e quantificação de publicações.

Conferências	Ano	Cidade/País	Publicações	Editor
1 <sup>a</sup>	1980	Estocolmo (Suécia)	24	Bredenberg (1980)
2 <sup>a</sup>	1984	Estocolmo (Suécia)	54	Holm et al. (1984)
3 <sup>a</sup>	1988	Otawa (Canadá)	88	Fellenius (1988)
4 <sup>a</sup>	1992	Haia (Holanda)	116	Barends (1992)
5 <sup>a</sup>	1996	Orlando (EUA)	101	Townsend et al. (1996)
6 <sup>a</sup>	2000	São Paulo (Brasil)	100	Niyama e Beim (2000)
7 <sup>a</sup>	2004	Petaling-Jaya (Malásia)	58	Mun (2004)
8 <sup>a</sup>	2008	Lisboa (Portugal)	101	Santos (2008)
9 <sup>a</sup>	2012	Kanazawa (Japão)	111	Matsumoto (2012)
10 <sup>a</sup>	2018	San Diego (EUA)	41	Bullock et al. (2018)

A Tabela 1 apresenta a lista das conferências internacionais realizadas a cada 4 anos com a consolidação desta tecnologia a partir da década de 1980.

## **2 – NOVA METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DE ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO EM ESTACAS ESCAVADAS DE ELEVADA CAPACIDADE RESISTENTE**

Provas de carga estática em estacas de elevada capacidade de carga são raramente utilizadas na prática da engenharia de fundações em razão dos elevados custos operacionais e excessivo período de tempo necessário para a realização das mesmas.

Com base nesta realidade, associada ao desafio de testar fundações profundas de elevada capacidade de carga de maneira rápida, segura, confiável e a custos operacionais atraentes, idealizou-se a fabricação de um Martelo Hidráulico Autopropulsor (MHAP-20) exclusivamente para esta finalidade.

As Figuras 1 e 2, apresentadas a seguir, configuram martelo hidráulico autopropulsor, denominado MHAP-20 nos casos, respectivamente, de obras em terra e com lâmina d'água.

### **2.1 – Características do martelo**

O sistema de impacto MHAP-20 é constituído de uma base circular de aço solidarizada à camisa de aço que veste a estaca a ensaiar, equipada com dispositivos de auto-ajuste em relação ao topo e fuste na variação de diâmetro de 70cm a 250cm.



**Fig. 1** – ECD – obras em terra.



**Fig. 2** – ECD – obras com lâmina de água.

Sobreposto à base circular de apoio, estende-se camisa de aço guia que permite a queda livre do martelo com modulação de peso de até 200 kN, modulações estas que permitem observar os critérios de pesos para capacidade resistente máxima mobilizada conforme recomendações de Hussein et al. (1996), ou seja, 1,5% a 2,0% da capacidade resistente a ser mobilizada no ECD de energia crescente. O sistema de elevação do martelo possui controle de altura de queda de precisão centimétrica. Este sistema de elevação funciona com gatilho e pistões hidráulicos automáticos garantindo a queda livre sem interferências das perdas por atritos mecânicos.

Rausche et al. (2008) estabelecem que, no caso das estacas escavadas, ensaios de carga estática e dinâmica podem ser realizados a partir dos 5 dias após a concretagem das estacas. Consideram ainda que para ativar resistências elevadas o peso do sistema de impacto deve ser de no mínimo 1 a 2% da capacidade resistente esperada de ensaio.

Os ensaios podem ser realizados em obras com lâmina de água (*nearshore* ou *offshore*) e em terra (*onshore*) com as mesmas facilidades operacionais de instalação e operação. A máxima altura de queda disponível é de 3,00m o que corresponde a uma energia potencial bruta de 600 kNm.

No caso das estacas escavadas de grande diâmetro é necessária a construção de um bloco de concreto (maciço de encabeçamento) sobre o topo das estacas, nas mesmas características geométricas das estacas a ensaiar dimensionado estruturalmente a absorver elevadas tensões dinâmicas de compressão evitando uma ruptura volumétrica lateral. As armaduras do bloco de ensaio são constituídas por barras verticais e cintamento periférico (estribos) de espaçamento não superior a 10 cm.

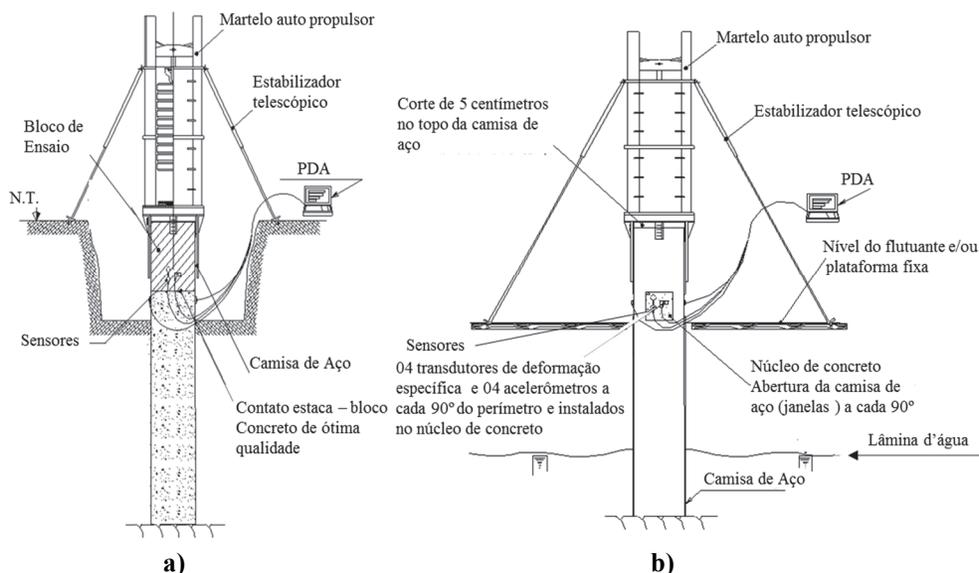
Alternativamente poder-se-á prolongar o fuste da estaca a ensaiar nas características de armadura do bloco de ensaio e/ou revestir o trecho correspondente ao bloco de ensaio com camisa de aço. A resistência característica do bloco no momento do ensaio deverá ser de pelo menos 40 MPa.

Adicionalmente, cepos e coxins devem ser utilizados no topo da estaca e na placa de aço de impacto do martelo e constituídos preferencialmente de chapas de borracha com malhas de aço e/ou neoprene.

## 2.2 – Metodologia executiva

As Figuras 3 (a) e (b), caracterizam as condições básicas de ensaio ECD em obras realizadas em terra e na presença de lâmina de água, respectivamente.

Os procedimentos técnicos de ensaio consideram, fundamentalmente, os casos de ensaios dinâmicos em estacas moldadas *in situ* de baixa (capacidade resistente mobilizável  $R \leq 5$  MN) e alta capacidade resistente (capacidade resistente mobilizável  $R > 5$  MN), observando rigorosamente a norma NBR 13208 (ABNT, 2007), em vigência, norma brasileira que regulamenta a execução de ensaio de carregamento dinâmico.



**Fig. 3** – Montagem do martelo e esquema de ensaio: a) obras em terra; b) obras com lâmina d'água

No caso de camisas de aço preenchidas com núcleo de concreto, sendo a responsabilidade de comportamento estrutural e geotécnico do núcleo de concreto, na maioria dos casos embutidos em rocha e ou em saprolitos de elevada resistência geomecânica, deve-se promover o corte no topo da camisa de aço de pelo menos 50mm, objetivando o impacto dinâmico sobre o núcleo de concreto.

A instrumentação deve ser materializada na metodologia apresentada a seguir.

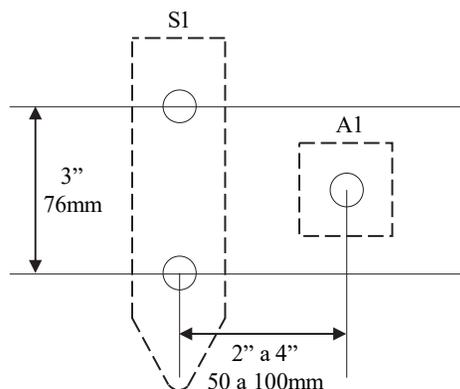
- Preferencialmente, os sensores deverão ser instalados no bloco de ensaio nas mesmas características geométricas da estaca a ensaiar com diâmetro ou largura maior ou igual a 80cm, e com resistência de, pelo menos, 40MPa em quatro posições diametralmente opostas.
- No caso de estacas de alta capacidade resistente, obrigatoriamente deverão ser instalados 8 (oito) sensores, especificamente 4 (quatro) transdutores de deformação específica e 4 (quatro) acelerômetros. As camisas de aço deverão ser preparadas com aberturas de janelas para instalação dos sensores no núcleo de concreto.
- Os sensores são conectados ao equipamento PDA que imediatamente a cada golpe aplicado ao topo da estaca / bloco de ensaio, obtêm-se registros relativos ao comportamento estrutural e de interação solo-estaca.
- As penetrações permanentes (S) devem ser medidas após cada golpe de energia crescente através de controle topográfico com nivelamento de precisão e garantia de precisão milimétrica.

As Figuras 4 e 5 detalham o gabarito para instalação e fixação dos transdutores de deformação específica (S1) e acelerômetros (A1). A Figura 6 apresenta um exemplo do preparo para ensaio em estaca com camisa metálica e núcleo de concreto.

O sistema de impacto a ser utilizado deverá ser constituído de peso suficiente para mobilizar a capacidade resistente prevista de ensaio, calculada a partir da carga de trabalho aplicando-se, em geral, um fator de segurança satisfatório, preferencialmente igual ou superior a 2,0.

O ensaio de carregamento dinâmico deverá ser realizado através de golpes aplicados ao topo da estaca a ensaiar e/ou bloco de ensaio com energia crescente, ou seja, alturas variáveis em queda livre, nas condições de paralisação descritas a seguir.

- Ruptura do sistema na interface estaca-solo/rocha.
- Obtenção de níveis de tensões dinâmicas compressivas e trativas incompatíveis às características do material que constitui as estacas.
- Obtenção de fator de segurança satisfatório em relação à carga de trabalho especificada em projeto.
- Iminência da possibilidade de dano estrutural e/ou constatação do mesmo.
- Condições de segurança insatisfatórias que não permitam a continuidade dos ensaios.



**Fig. 4** – Gabarito para instalação e fixação dos sensores.



**Fig. 5** – Sensores instalados aos pares em 4 posições diametralmente opostas.



**Fig. 6** – Abertura de janelas para estaca com camisa metálica e núcleo de concreto.

Todos os detalhes descritos relativamente aos procedimentos de ensaio são extremamente importantes e devem ser seguidos escrupulosamente para garantirem sinais de boa qualidade e nas condições ideais de interpretação através da teoria da equação da onda.

### 2.3 – Critérios técnicos pertinentes sobre o sistema de impacto

Hussein et al. (1996) apresentaram trabalho constituído de estudos paramétricos utilizando o programa WEAP (*Wave Equation Analysis of Pile*) considerando estacas de grande diâmetro na gama de 750 mm a 1500 mm, respectivas cargas estruturais admissíveis, profundidades entre 10 e 30 diâmetros com a finalidade da determinação do peso de martelo, altura de queda, adequação do sistema de amortecimento, necessários à mobilização da capacidade resistente no ensaio de carregamento dinâmico. Nas análises realizadas considerou-se profundidades na relação de 10D, 15D, 20D, 25D e 30D, sendo D, o diâmetro da estaca. As resistências estáticas consideradas e analisadas situam-se no intervalo de 5 MN a 30 MN. Em todos os casos analisados, a resistência lateral considerada foi de 85% da resistência total com distribuição uniforme em 80% do comprimento das estacas.

Para os estudos realizados, foram considerados pesos de martelo de 80 kN a 480 kN.

As análises paramétricas realizadas conduziram ao seguinte:

- a) Peso do martelo  $\geq 1,4\%$  a  $1,6\%$  da capacidade resistente esperada no ECD.
- b) Altura de queda  $H \geq 2,00$  metros;  $H \geq 8,5\%$  L, sendo L o comprimento da estaca.
- c) Espessura do sistema de amortecimento do martelo (t)

$$\text{Caso de } L \leq 30,0 \text{ m } t = \frac{L^2}{2D}$$

$$t \text{ (mm) } t \geq 100\text{mm,}$$

$$\text{Caso de } L \geq 30,0 \text{ m } t = \left( \frac{L^2}{2D} + 150 \right)$$

Para os casos analisados, as considerações de negas (S) e tensões dinâmicas de compressão ( $\sigma_c$ ) e tração ( $\sigma_t$ ), foram observadas nos seguintes limites:

- $1,2 \text{ mm/golpe} \leq S \leq 5,6 \text{ mm/golpe}$
- $13,4 \text{ MPa} \leq \sigma_c \leq 28,1 \text{ MPa}$

$$\blacksquare \quad 0,70 \text{ MPa} \leq \sigma_t \leq 3,80 \text{ MPa}$$

Paikowsky (2004) analisou estatisticamente uma base de dados de 167 ensaios de carregamento dinâmico. Foram estabelecidas várias correlações entre a energia líquida transferida (EMX) e a capacidade resistente mobilizada (R). Apesar da elevada dispersão dos resultados, traduzida por um coeficiente de determinação de cerca de 0,4, foi proposta a equação seguinte:

$$R \text{ (kN)} = 100 \text{ EMX (kJ ou kNm)} \quad (1)$$

Por outro lado, aquele autor analisou o rendimento dos sistemas de impacto tendo-se concluído que o valor médio era de cerca de 40% o que levou à relação entre a capacidade resistente esperada de ensaio, peso do martelo (P) e altura de queda (H), conforme a equação seguinte:

$$E_p \text{ (kNm)} = H \times P = \frac{EMX}{0,4} = 0,025 R \quad (2)$$

Paraíso et al. (2004) e Paraíso e Costa (2006) estabeleceram critério para determinação da energia potencial bruta em função da capacidade resistente a ser mobilizada com base em resultados de ensaios de carregamento dinâmico para  $H \leq 3,0\text{m}$ :

$$E_p \text{ (kNm)} \geq \eta R \text{ (kN)} \quad (3)$$

em que  $\eta$  é um coeficiente em (m).

Coxim do martelo = 300mm; Coxim da estaca = 30mm

Material = chapas de borracha constituídas de malhas de aço

As estacas ensaiadas apresentam-se nas seguintes características:

800 mm  $\leq D \leq$  1600 mm                      sendo D o diâmetro da estaca

2500 kN  $\leq Q_t \leq$  10000 kN                      sendo  $Q_t$  a carga de trabalho

7,0m  $\leq L \leq$  48m                                      sendo L o comprimento da estaca

Fatores de segurança obtidos FS  $\geq$  2,0

15,0 MPa  $\leq \sigma_c \leq$  28,0 MPa (tensão de compressão) e 1,0 MPa  $\leq \sigma_t \leq$  2,5 MPa (tensão de tração)

Os valores de  $\eta$  indicados na Tabela 2 foram obtidos a partir das correlações de energia potencial bruta e capacidade resistente mobilizada em 48 estacas. Estudou-se, através de histogramas de distribuição de frequência, os valores de  $\eta$  para todo o universo de estacas ensaiadas (amostragem global) e paralelamente determinação dos valores de  $\eta$  para as estacas compreendidas no universo de maior frequência de eficiência do martelo. A eficiência do martelo é a relação da energia líquida transferida para a estaca e a energia potencial correspondente ao golpe de energia crescente específico. Os grupos definidos na Tabela 2 caracterizam os tipos de elementos estruturais de fundações profundas analisados:

- Grupo I – Estacas escavadas com lama bentonítica, tubulões a ar comprimido e hélice contínua.
- Grupo II – Estacas camisa de aço perdida e núcleo de concreto.
- Grupo III – Estacas Pré-moldadas de concreto protendidas.

A amostragem de maior frequência compreende o maior número de estacas de cada grupo cujas energias transferidas se mantiveram dentro de um limite de valores, tais como:

- Grupo I – total 24 estacas, sendo 15 estacas (62,5% do total de estacas) com eficiência entre 31% e 40%;
- Grupo II – total 16 estacas, 9 estacas (56,3% do total de estacas) com eficiência entre 26% e 38%;

- Grupo III – Estacas Pré-moldadas de concreto protendidas. Total 8 estacas, todas as 8 estacas (100% do total) com eficiência entre 66% e 80%.

Justifica-se a convergência dos valores médios de  $\eta$  em razão da pequena dispersão de valores não considerados na amostragem de maior frequência de eficiência do martelo.

**Tabela 2 – Valores de  $\eta$  (m)**

Grupo	Amostragem Global			Amostragem Maior Frequência		
	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
I	0,013	0,035	0,083	0,013	0,028	0,052
II	0,015	0,024	0,034	0,015	0,024	0,034
III	0,035	0,045	0,053	0,035	0,045	0,053
I+II	0,013	0,030	0,083	0,013	0,026	0,052
I+II+III	0,013	0,033	0,083	0,013	0,032	0,053

Verifica-se da Tabela 2 que o valor médio de  $\eta$  para amostragem global e amostragem de maior frequência, são, respectivamente,  $\eta = 0,033$  e  $\eta = 0,032$ . Adotou-se o valor de  $\eta = 0,033$ . Em resumo:

$\eta = 0,033 \rightarrow$  Paraíso et al. (2004) e Paraíso e Costa (2006), Tabela 2

$\eta = 0,025 \rightarrow$  Paikowsky (2004), equação 2

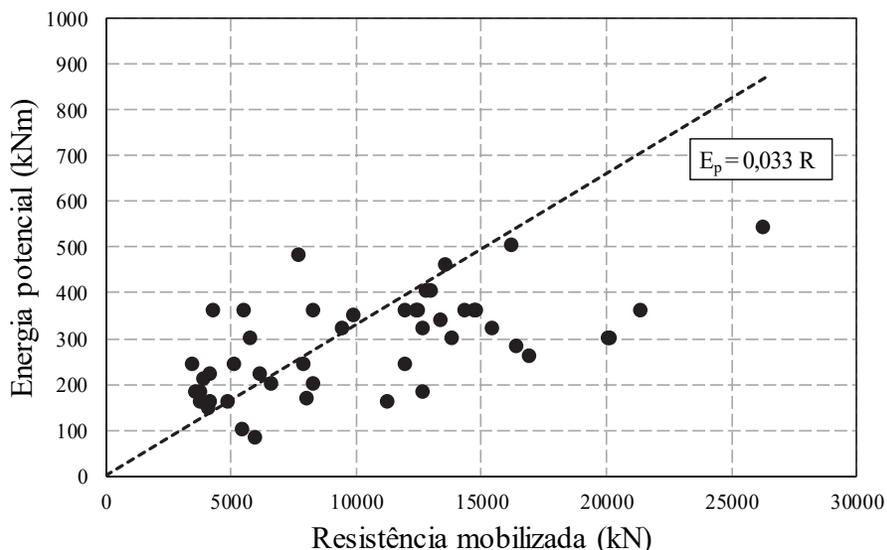
Acrescenta-se, ainda, que uma vez determinando a energia potencial necessária em função da capacidade resistente de ensaio esperada calibrando com o valor de  $\eta$ , obtém-se a altura de queda provável máxima e, em consequência, determina-se o padrão de altura de queda para o ensaio de carregamento dinâmico de energia crescente.

#### **2.4 – Nova proposta para a estimativa da energia potencial necessária em função da capacidade resistente a ser mobilizada**

Para clarificar melhor esta importante relação entre a energia potencial bruta e a capacidade resistente faz-se notar que o coeficiente  $\eta$  não é adimensional apresentando-se em unidade de comprimento. Com efeito, num sistema ideal em que toda a energia potencial é transferida para o sistema solo-estaca e em que toda essa energia é convertida em trabalho das tensões internas do solo, o coeficiente  $\eta$  representaria o deslocamento associado às deformações plásticas que ocorrem ao longo da interface lateral solo-estaca e na ponta da estaca. Com efeito, os valores indicados entre 0,025 e 0,033m parecem estar de acordo com a natureza física dos mecanismos de transferência de carga na estaca. Para a mobilização da resistência lateral na interface solo-estaca basta a ocorrência de pequenos deslocamentos da ordem de grandeza milimétrica, enquanto que para a mobilização da resistência de ponta é necessária a ocorrência de deslocamentos de maior magnitude da ordem de grandeza centimétrica e fortemente dependente do processo construtivo e do diâmetro da estaca.

Reanalisa-se novamente os resultados de Paraíso e Costa (2006) que são apresentados na Figura 7 e por questões de simplicidade na escrita, utiliza-se sem qualquer distinção os termos capacidade resistente ou resistência.

É notória a dispersão de resultados que pode dever-se a vários fatores, nomeadamente o método construtivo, as características geométricas das estacas, as condições geológicas e geotécnicas e o nível de mobilização da resistência em relação à ruptura. Para ajudar a compreender melhor esta relação, analisam-se seguidamente os resultados de ensaios de carregamento dinâmico em 7 estacas experimentais de 800mm e 2 estacas de 1500mm de diâmetro, executadas no âmbito da construção da ponte da Lezíria no Carregado, Portugal (Santos e Gouveia Pereira, 2005). A tecnologia de



**Fig. 7** – Resistência mobilizada vs Energia potencial (Paraíso e Costa, 2006).

execução das estacas consistiu na cravação de camisa metálica por meio de bate-estaca hidráulico tipo *vibrofonceur*, sendo efetuada no seu interior a furação através de vara telescópica *Kelly*. Para a realização dos ensaios de carregamento dinâmico foi utilizado um sistema de impacto de queda livre de 200kN com altura de queda até 3,0m.

A Figura 8 mostra a relação entre a energia potencial bruta e a resistência mobilizada para todos os ensaios realizados nas estacas de 800mm e 1500mm de diâmetro. Faz-se notar que as estacas foram executadas utilizando a mesma técnica construtiva, em condições geológicas e geotécnicas semelhantes e ensaiadas recorrendo ao mesmo sistema de impacto. Por conseguinte, a dispersão de resultados é atribuída fundamentalmente às características geométricas, ou seja, ao efeito do diâmetro da estaca e constata-se que quanto maior for o diâmetro menor será a energia necessária para mobilizar uma determinada resistência.

Para a racionalização dos dados introduz-se neste trabalho o conceito inovador de energia potencial normalizada para uma estaca de diâmetro  $D_1=1000\text{mm}$ . A energia potencial normalizada é assim definida pela equação seguinte:

$$E_{p1} \times D_1 = E_p \times D \quad (4)$$

Ao normalizar a energia potencial bruta em relação ao diâmetro a dispersão dos resultados reduz consideravelmente. A Figura 9 representa a tentativa de conjugar todos os resultados obtidos por Paraíso e Costa (2006) e Santos e Gouveia Pereira (2005). O ajuste do modelo linear é bastante razoável com um coeficiente de determinação de 0,652. A reta de ajuste apresenta uma ordenada na origem praticamente nula:

$$E_{p1} = 0,0264 R \quad (5)$$

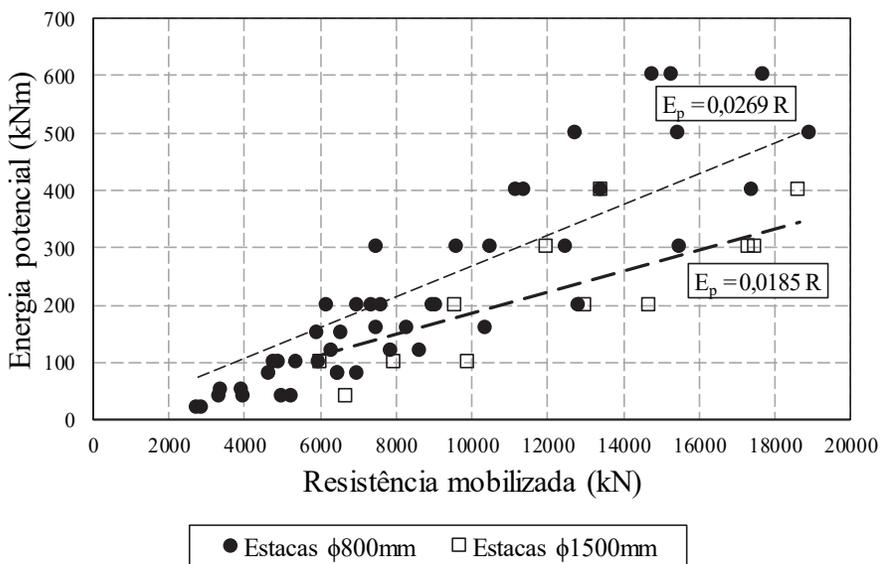


Fig. 8 – Resistência mobilizada versus Energia potencial (Santos e Gouveia Pereira, 2005).

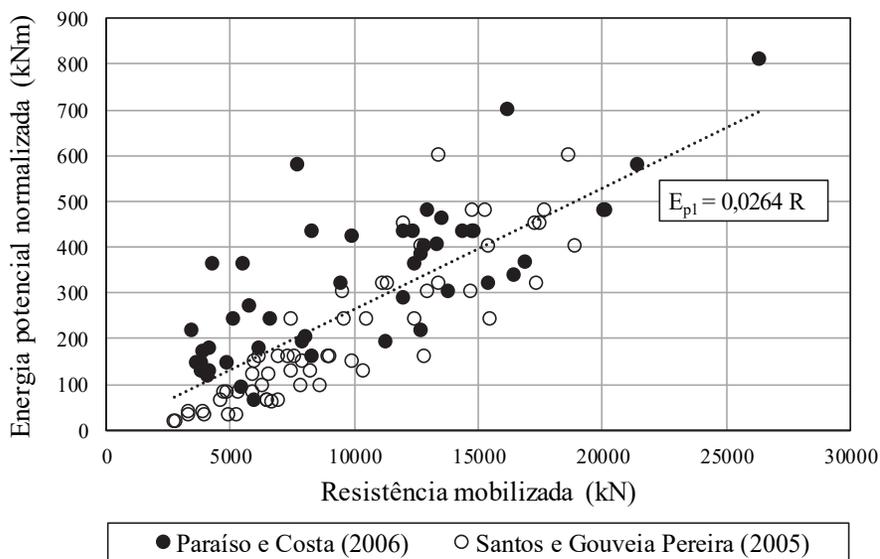
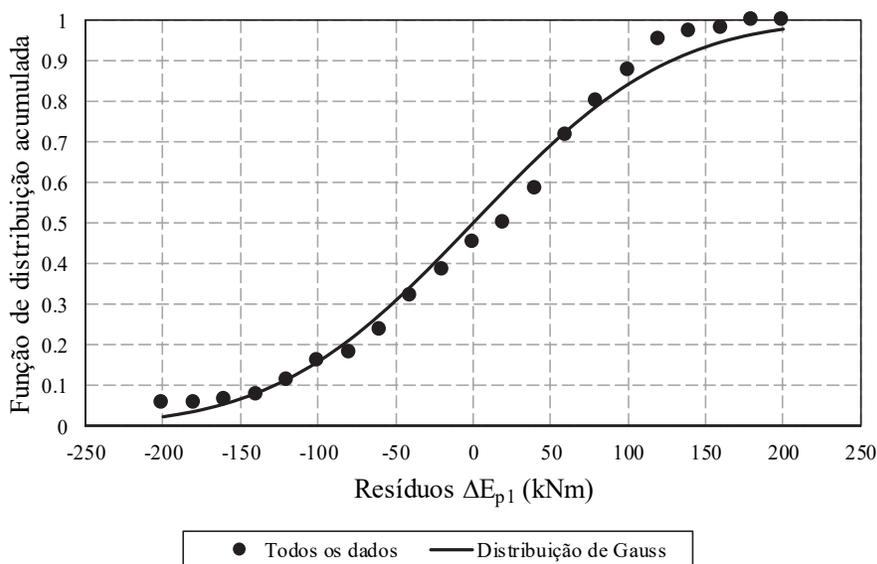


Fig. 9 – Resistência mobilizada versus Energia potencial normalizada.

Para analisar a dispersão dos valores foram calculados os desvios ou resíduos em relação à reta de regressão linear, os quais conduziram à função de distribuição acumulada representada na Figura 10. Como se pode observar, os resíduos ajustam-se muito bem a uma distribuição de Gauss centrada e com desvio padrão aproximadamente igual a 100kNm. Como consequência, 68% dos valores estarão compreendidos no intervalo entre o valor médio e o desvio padrão, ou seja, em 84% dos casos  $(68+32/2)$  a energia potencial conseguirá mobilizar a resistência pretendida.



**Fig. 10** – Função de distribuição acumulada dos resíduos considerando todos os dados de Paraíso e Costa (2006) e Santos e Gouveia Pereira (2005).

Deste modo e, para efeitos práticos, os autores recomendam uma nova proposta para determinação da energia potencial em função da capacidade resistente a ser mobilizada, conforme representada na Figura 11 e traduzida pelas equações seguintes:

$$E_{p1} \geq 0,0264 R + 100 \quad (6)$$

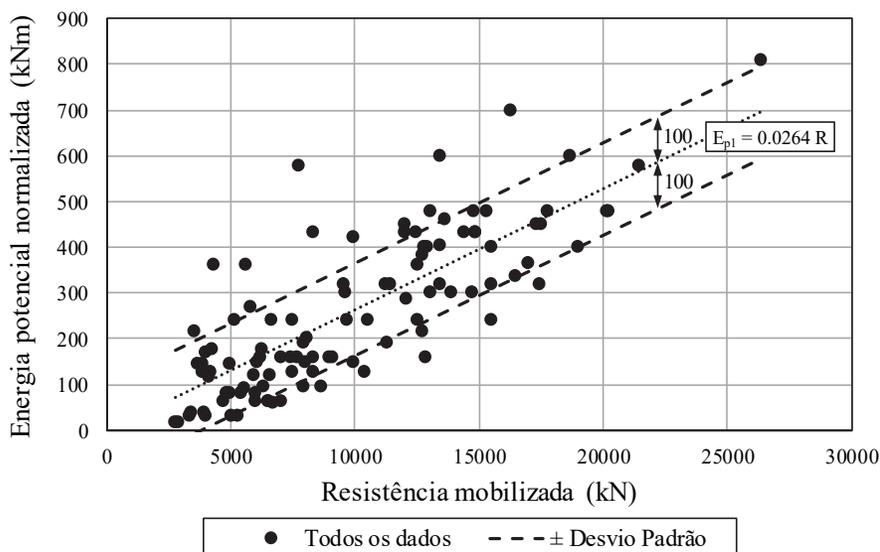
ou seja,

$$E_p \geq (0,0264 R + 100) \times D_1/D \quad (7)$$

Os casos que conduziram a maiores desvios em relação à média, ou seja, fora do intervalo de confiança representado na Figura 11, estão relacionados com o nível de resistência mobilizada em relação à ruptura. Com efeito, os casos que se situam fora e acima do intervalo referido, correspondem aos ensaios próximos da ruptura do sistema solo-estaca com deslocamentos elevados, havendo, portanto, uma maior dissipação de energia sem a contrapartida do aumento da resistência mobilizada. Excluindo estes casos pontuais todos os valores se situam dentro do intervalo de confiança subjacente às equações (6) e (7).

No que respeita aos valores que se situam abaixo do intervalo de confiança, estes ocorreram apenas em 16% dos casos (100-84) e correspondem a ensaios em que a excentricidade ou as condições do sistema de amortecimento possam ter afetado a mobilização da resistência. Normalmente, as condições de ensaio são corrigidas e melhoradas nos golpes seguintes.

É de mencionar que a mais recente norma europeia ISO 22477-4:2018 especifica que o peso do martelo deverá ser superior a 2% do valor de cálculo da capacidade resistente da estaca. Se se admitir que a maioria dos martelos hidráulicos correntes apresentam uma altura de queda inferior a 1,5m, é fácil de compreender esta recomendação à luz da equação (7), fisicamente e matematicamente mais correta.



**Fig. 11** – Relação  $R-E_{p1}$  proposta considerando todos os dados de Paraíso e Costa (2006) e Santos e Gouveia Pereira (2005).

### 3 – NOVA METODOLOGIA DE ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO

A nova metodologia de análise tem por objetivo principal contribuir para o avanço no conhecimento no que respeita à avaliação do comportamento de estacas sob ações verticais submetidas ao ensaio de carregamento dinâmico de energia crescente. Sabe-se que o dimensionamento de estacas é condicionado, fundamentalmente, pela verificação da capacidade resistente, mas em algumas situações o aspecto mais crítico pode estar associado à magnitude dos deslocamentos para as condições de serviço.

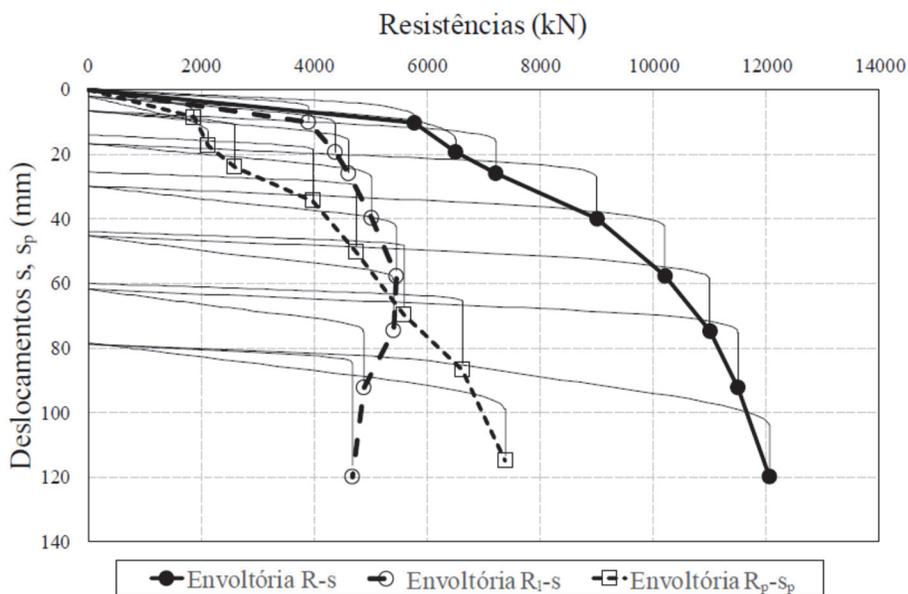
A partir de análises e interpretações de resultados obtidos em ensaios de carregamento dinâmico de energia crescente, em estacas de alta capacidade resistente, propõe-se nova metodologia de análise e interpretação de resultados com base na análise numérica CAPWAP processada para todos os golpes aplicados na estaca durante o ensaio.

Rausche et al. (1996), Aoki (2000) e Kormann et al. (2000) sugeriram critérios interpretativos semelhantes, sendo que estes autores consideraram análises de múltiplos golpes de energia constante (Rausche et al., 1996) e de energia crescente (Aoki, 2000 e Kormann et al., 2000), entretanto considerando-se apenas as cargas totais mobilizadas.

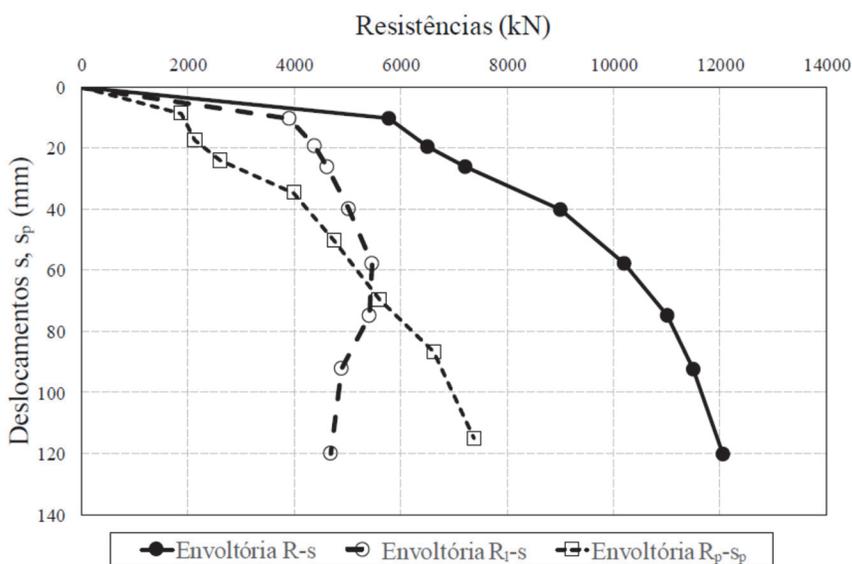
As análises e interpretações apresentadas neste trabalho são constituídas das seguintes propostas inovadoras com base no traçado das curvas envoltórias obtidas (para todos os golpes), conforme apresentado na Figura 12, das resistências total, lateral e de ponta ativadas, para um exemplo típico de uma estaca de diâmetro de 1400 mm, relação comprimento/diâmetro  $L/D < 15$ , carga de trabalho 7000kN, solo lateral ( $\bar{N}_{SPT}=25$ ) e de ponta ( $N_{SPT}=37$ ) na litologia de silte areno-argiloso (solo residual maduro de gnaíse).

A Figura 12 (a) mostra o traçado das curvas de carga - deslocamento de cada golpe, acumulando-se sempre o deslocamento ou recalque permanente do golpe anterior. A curva envoltória é constituída dos pontos de maior recalque de cada golpe de energia crescente. Tal procedimento assemelha-se a um carregamento cíclico de carga e descarga.

Na Figura 12 (b) estão discretizadas as envoltórias de resistência total  $R$ , lateral  $R_l$  e de ponta  $R_p$  em função do deslocamento do topo ( $s$ ) e do deslocamento da ponta ( $s_p$ ), respetivamente. Estas



(a)

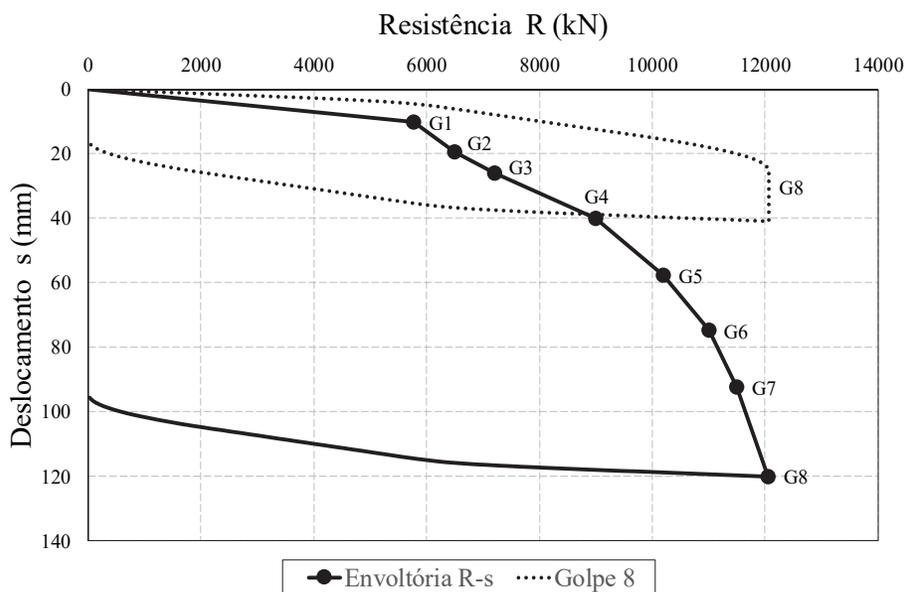


(b)

**Fig. 12** – Curvas envoltórias (a) e (b).

curvas envoltórias são de maior relevância evidenciando claramente os mecanismos de transferência de carga e permitindo conhecer o momento de saturação da resistência lateral e transferência de maior incremento de carga para a ponta.

Na Figura 13, compara-se o ensaio de energia crescente com avaliação das resistências ativas para cada golpe ao invés do convencional que considera somente o golpe de resistência máxima ativada.



**Fig. 13** – Curva envoltória de energia crescente vs Curva da resistência máxima ativada.

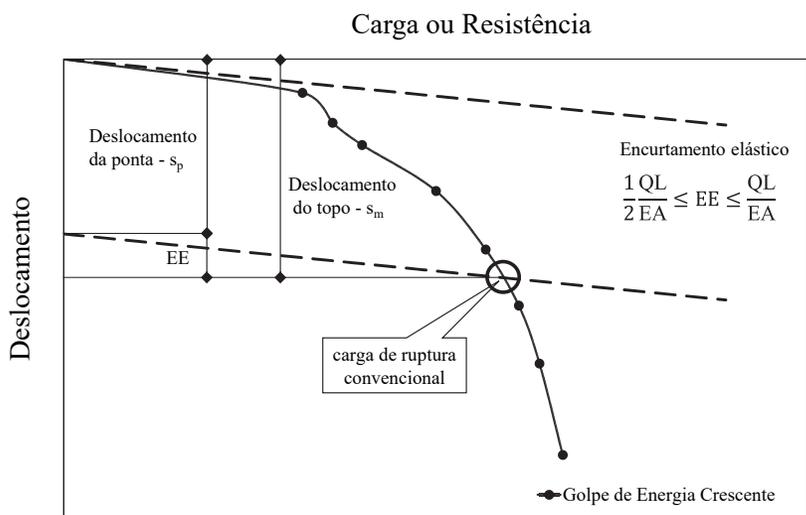
O critério convencional baseado em golpes de energia constante ou somente o golpe de resistência máxima ativada apresenta sérias limitações, uma vez que ignora a resposta da estaca em termos de deslocamentos. Se a energia aplicada for insuficiente e os deslocamentos forem muito reduzidos, o critério convencional será conservador e a resistência ativada estará muito aquém da resistência última. Pelo contrário, se os deslocamentos forem elevados e excessivos, o critério convencional poderá ser inadequado e contra a segurança.

Deste modo, recomenda-se a avaliação do comportamento de estacas de elevada capacidade resistente à compressão através da metodologia do ensaio de carregamento dinâmico de energia crescente. As curvas envoltórias agregam a informação essencial para a correta interpretação dos mecanismos de transferência de carga. É possível mobilizar e caracterizar o comportamento da ponta da estaca, nomeadamente a evolução da resistência e da sua rigidez em função dos deslocamentos (Paraíso, 2017).

Em estacas escavadas é, por vezes, difícil de estabelecer um critério de ruptura a partir do diagrama carga-deslocamento. Nestes casos, o Eurocódigo 7 propõe um critério de “ruptura” baseado num deslocamento do topo da estaca igual a 10 % do diâmetro da base da estaca. Trata-se de um critério simplificado ignorando totalmente os mecanismos de transferência de carga.

Na Figura 14 caracteriza-se a proposta de determinação de uma carga de ruptura convencional em função da curva envoltória da resistência total R, considerando-se encurtamentos elásticos e deslocamentos da ponta da estaca.

O encurtamento elástico, EE, depende fundamentalmente da relação L/D (comprimento/diâmetro) e é pouco influenciado pelas características do terreno da ponta e solo lateral predominante, situando-se, em geral, no intervalo de valores entre  $\frac{1}{2} \frac{QL}{EA} \leq EE \leq \frac{QL}{EA}$ , sendo Q a carga/resistência ativada, E o módulo de elasticidade e A a área transversal da estaca. Nas estacas curtas existe uma maior transferência de carga para a ponta, ou seja, o esforço normal médio é superior em comparação com as estacas longas, pelo que a extensão axial é maior e o encurtamento elástico nas estacas curtas aproxima-se do limite superior (quando  $R \rightarrow R_p$ ). Para a situação oposta,



**Fig. 14** – Proposta de definição de um deslocamento que corresponda a uma carga de ruptura convencional.

em que grande parte da carga é absorvida pela resistência lateral, o esforço normal médio diminui, pelo que o encurtamento elástico nas estacas longas aproxima-se do limite inferior (quando  $R \rightarrow R_1$ ).

Relativamente ao deslocamento da ponta da estaca  $s_p$ , este pode ser definido observando o ponto de inflexão da fase elástica para fase plástica com base no estudo da rigidez da ponta. O ponto de inflexão depende da tecnologia e dos cuidados executivos bem como das características do terreno na ponta da estaca. Em solos, o seu valor varia, em geral, entre  $D/15$  e  $D/40$ , enquanto que em maciços rochosos toma aproximadamente o valor de  $D/45$  ou inferior, sendo que este valor sugerido está associado à possibilidade de resíduo no contato da rocha, tendo em vista que o maciço rochoso é indeslocável (Paraíso, 2017).

Sendo assim, a carga de ruptura convencional pode ser definida conforme a Figura 14 para um deslocamento máximo no topo definido por:

$$s_m = EE + s_p \quad (8)$$

Os valores de  $EE$  e  $s_p$ , serão definidos para cada situação de obra em função dos resultados a obter nos ensaios de carregamento dinâmico de energia crescente, podendo-se considerar a título indicativo, os valores atrás referidos.

#### 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ensaio de carregamento dinâmico de energia crescente apresenta a vantagem de ser mais versátil e económico em comparação com a prova de carga estática, sobretudo para as estacas escavadas de elevada capacidade resistente. A grande versatilidade do ensaio permite, na maioria dos casos, esgotar a resistência lateral e observar a resposta da ponta da estaca, algo que nem sempre é atingível nas provas de carga estática, por razões económicas.

A metodologia de execução apresentada consubstancia-se de critérios técnicos executivos pertinentes que devem ser seguidos escrupulosamente para proporcionar sinais de boa qualidade e nas condições ideais de interpretação através da teoria da equação da onda. Foi definido o conceito inovador de energia potencial normalizada, a partir do qual derivou uma nova proposta para determinação da energia potencial necessária em função da capacidade resistente a ser mobilizada.

A metodologia de interpretação apresentada com base em análises numéricas CAPWAP para cada golpe de energia crescente, permite o traçado das curvas envoltórias das resistências lateral, de ponta e total em função dos deslocamentos. Esta metodologia proporciona todo um conjunto de informações relevantes que possibilitam avaliar de uma forma clara os mecanismos de transferência de carga e a proposta de um deslocamento que corresponda a uma carga de ruptura convencional, definido a partir do encurtamento elástico e do deslocamento da ponta da estaca.

## 5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2007). NBR 13208 – *Estacas – Ensaio de Carregamento Dinâmico*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Aoki, N. (1989). *Prediction of the behavior of vertical driven pile and dynamic conditions*. Proceedings, 12<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering – Rio de Janeiro – Brasil, vol. 2, pp. 367-376.
- Aoki, N. (1997). *Determinação da capacidade de carga última de estaca cravada em ensaio de carregamento dinâmico de energia crescente*. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos – USP – São Paulo – Brasil.
- Aoki, N. (2000). *Keynote lecture: Improving the reliability of pile bearing capacity prediction by the dynamic increasing energy test (DIET)*. Proceedings, 6<sup>th</sup> International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, São Paulo, Brasil, pp. 635 – 650.
- Barends, F. B. J. (1992). *Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Proceedings, 4<sup>th</sup> International Conference, The Hague, The Netherlands, 21 a 24 de setembro de 1992, Ed.
- Bredenberg, H. (1980). *Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Proceedings, 1<sup>st</sup> International Conference, Stockholm, 4 a 5 de junho de 1980, Ed.
- Bullock, P.; Verbeek, G.; Paikowsky, S.; Tara, D. (2018). *Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Proceedings, 10<sup>th</sup> International Conference on Stress Wave Theory and Testing Methods for Deep Foundations, San Diego, Califórnia, USA, 27 a 29 de junho de 2018, Ed.
- CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program) User’s Manual (2014). GRL and Associates, Inc. Cleveland, Ohio.
- D’Aguiar, S. C.; Modaressi, A.; Santos, J. A.; Lopez-Caballero, F. (2011a). *Piles under cyclic axial loading: study of the friction fatigue and its importance in piles behavior*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 48, no. 10, pp. 1537-1550.
- D’Aguiar, S. C.; Modaressi, A.; Santos, J. A.; Lopez-Caballero, F. (2011b). *Elasto-plastic constitutive modelling of soil-structure interfaces under monotonic and cyclic loading*. Computers and Geotechnics, 38, pp. 430-447.
- D’Aguiar, S. C.; Santos, J. A.; Lopez-Caballero, F.; Modaressi, A. (2008). *Comparison of static and dynamic pile load tests using an elastoplastic soil model*. Proceedings, 8<sup>th</sup> International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, pp. 643-651, Lisboa, Portugal.
- De Mello, L. G.; Paraíso, S. C. (1998). *Variable Energy Dynamic Load Test on a 1.0m Diameter CFA Pile*. Proc. Belgium – BAP III, pp. 321-334.
- European Standard EN ISO 22477-4:2018. *Geotechnical investigation and testing - Testing of geotechnical structures - Part 4: Testing of piles: dynamic load testing*. Comité Européen de Normalização, Bruxelas.

- Duarte, R. J. L. (2009). *Aplicação do ensaio de carga dinâmico para avaliação da capacidade resistente de estacas em solo residual do granito*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.
- Fellenius, B. H. (1988). *Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Proceedings, 3<sup>rd</sup> International Conference, Ottawa, Canadá, 25 a 27 de maio de 1988, Ed.
- Fellenius, B. H.; Santos, J. A.; Viana da Fonseca, A. (2007). *Analysis of piles in a residual soil - The ISC'2 prediction*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 44, pp. 201-220.
- Gouveia Pereira, J. J. (2003). *Avaliação da capacidade resistente de estacas através do ensaio de carga dinâmico*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Georrecursos – área de Geotecnia, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.
- Gouveia Pereira, J. J.; Santos, J. A.; Gomes Correia, A. (2004). *Interpretação do ensaio de carga dinâmico em estacas através de análises tipo CAPWAP*. 9<sup>o</sup> Congresso Nacional de Geotecnia, Universidade de Aveiro, vol. 1, pp. 239-248.
- Gouveia Pereira, J. J.; Santos, J. A.; Gomes Correia, A.; Simões, T. N. (2008). *Static and dynamic load tests comparison considering load-energy level and soil non-linearity*. Proceedings, 8<sup>th</sup> International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, pp. 585-589, Lisboa, Portugal.
- Gouveia Pereira, J. J.; Santos, J. A.; Gomes Correia, A.; Simões, T. N. (2009). *Ensaaios de carga dinâmico em estacas – um caso de estudo*. Revista Geotecnia, editada conjuntamente pela Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG), pela Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS) e pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 115, pp. 21-43.
- Holm, G.; Bredenberg, H.; Grävare, C.-J. (1984). *Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference, Stockholm, 27 a 30 de maio de 1984, Ed.
- Hussein, M.; Rauche, F.; Linkins, G. (1996). *Selection of a hammer for high strain dynamic testing of Cast in Place shafts*. Proceedings, 5<sup>th</sup> International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, pp. 759-772, Florida, USA.
- Kormann, A. C. M.; Russo Neto, L.; Antoniutti Neto, L.; Bernardes, G. P. (2000). *Behavior of short CFA piles in an overconsolidated clay based on static and dynamic load tests*. Proceedings, 6<sup>th</sup> International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, pp. 707-714, São Paulo, Brasil.
- Matsumoto, T. (2012). *Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Proceedings, 9<sup>th</sup> International Conference on Testing and Design Methods for Deep Foundations, Kanazawa, Japão, 18 a 20 de setembro de 2012, Ed.
- Mun, K. P. (2004). *Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Proceedings, 7<sup>th</sup> International Conference, Kuala Lumpur, Malasya, 9 a 11 de agosto de 2004, Ed.
- Niyama, S. (1983). *Medições dinâmicas na cravação de estacas - fundamentos, instrumentação e aplicações práticas*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP.
- Niyama, S. (1985). *Report on penetrability and drivability of piles in Brazil*. International Symposium on Penetrability and Drivability of Piles, San Francisco.
- Niyama, S.; Beim, J. (2000). *Application of Stress-Wave Theory to Piles, Proceedings*, 6<sup>th</sup> International Conference, São Paulo, Brasil, 11 a 13 de setembro de 2000, Ed.

- Niyama, S.; Martins, J. A. A.; Likins, G. Jr. (1984). *Dynamic pile instrumentation in a calcareous sand close to PCR-2 platform, Brazil*. Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, pp. 306 – 312, Stockholm.
- NP EN 1997-1 (2010). *Eurocódigo 7 – Projecto Geotécnico*. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.
- Paikowsky, S. G. (2004). *Drop weight dynamic testing of drilled deep foundations*. Special Lecture, Proceedings, 7<sup>th</sup> International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, pp. 13-81, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Paraíso, S. C. (2017). *Análise crítica de ensaios de carregamento dinâmico de energia crescente em estacas de elevada capacidade resistente*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Universidade de Lisboa – Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Paraíso, S. C.; Costa, C. M. C. (2006). *Análise do desempenho de martelo hidráulico autopropulsor testando estacas de alta capacidade de carga*. COBRAMSEG, Curitiba, Paraná, Brasil, pp. 1079-1084.
- Paraíso, S. C.; Costa, C.; Soares, E. P. (2004). *The performance of free fall auto propulsion hydraulic hammer testing high capacity piles*. Proceedings, 7<sup>th</sup> International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, pp. 467-474, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Rausche, F.; Richardson, B.; Likins G (1996). *Multiple blow Capwap analysis of pile dynamic records*. Proceedings, 5<sup>th</sup> International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, pp. 435 – 446, Florida, USA.
- Rausche, F.; Likins G.; Hussein M. H. (2008). *Analysis of post installation dynamic load test data for capacity evaluation of deep foundations*. ASCE – GSP 180, pp. 312-330.
- Santos, J. A. (2008). *Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Proceedings, 8<sup>th</sup> International Conference, Lisboa, Portugal, 8 a 10 de setembro de 2008, Ed.
- Santos, J. A.; Gouveia Pereira, J. (2005). *A10 Auto-Estrada Bucelas/Carregado/IC3, sublanço Carregado A1/Benavente, travessia do Tejo no Carregado. Ensaios de carga em estacas experimentais. Relatório de análise*. Relatório ICIST/IST, EP no. 40/05.
- Santos, J. A.; Leal Duarte, R. J.; Viana da Fonseca, A.; Costa Esteves, E. F. M. (2006). *Campo experimental do ISC'2 – previsão e desempenho de estacas instrumentadas solicitadas axialmente*. Revista Geotecnia da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 107, pp. 79-90.
- Townsend, F. C.; Hussein, M.; McVay, M. C. (1996). *Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Proceedings, 5<sup>th</sup> International Conference, Flórida, USA, 11 a 13 de setembro de 1996, Ed.
- Viana da Fonseca, A.; Santos, J. A. (2008). *International prediction event. Behaviour of CFA, driven and bored piles in residual soil. Experimental site - ISC'2*. Edição FEUP/IST. ISBN 978-9-72752-104-3 / ISBN 978-989-95625-1-6.
- Viana da Fonseca, A.; Santos, J. A.; Costa Esteves, E.; Massad, F. (2007). *Analysis of piles in residual soil from granite considering residual loads*. Soils and Rocks, vol. 30, no. 1, pp. 63-80.