

# DETERMINAÇÃO DO QUAKE DO FUSTE DE ESTACAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO ATRAVÉS DE PROVAS DE CARGA ESTÁTICA E ENSAIOS DE CARREGAMENTO DINÂMICO

Determining shaft quake values of concrete precast piles by static and dynamic load tests

Daniel Kina Murakami\*

Faiçal Massad\*\*

**RESUMO** – Este trabalho tem como objetivo apresentar um caso de obra onde se utilizou o procedimento proposto por Murakami (2015) para a realização de análises com o CAPWAP (*Case Pile Wave Analysis Program*). O procedimento permite determinar o valor do *quake* do fuste da estaca de forma que o formato da curva simulada do CAPWAP fique mais próximo da curva real da prova de carga estática, melhorando não apenas o seu significado físico mas também o *match quality* da curva *wave up*. Uma forma de avaliar o formato da curva da simulação de prova de carga estática do CAPWAP em relação à curva real é através do conceito de “*match quality* de recalques”, que é uma das propostas deste trabalho.

**SYNOPSIS** – This paper aims to present a case study in which it is used the procedure proposed by Murakami (2015) to perform CAPWAP (*Case Pile Wave Analysis Program*) analyses. The procedure allows determining the shaft quake value of the pile, adjusting the CAPWAP’s load-settlement curve to be closer to the real curve of the static load test, improving not only the physical meaning of the simulation but also the CAPWAP match quality of the wave up curve. One way to evaluate the shape of the CAPWAP’s load-settlement curve regarding the static load test curve is through the concept of “settlement match quality”, proposed in this paper.

**PALAVRAS CHAVE** – Ensaio de carregamento dinâmico, CAPWAP, prova de carga estática, “*match quality* de recalques”.

## 1 – INTRODUÇÃO

Segundo Rausche *et al.* (1994), após a coleta de dados pelos sensores de um ensaio de carregamento dinâmico (ECD), podem ser feitas análises através do Método CAPWAP (*Case Pile Wave Analysis Program*), que avalia a distribuição do atrito lateral em profundidade, a carga transferida para a ponta, parâmetros do solo como *quake* (deslocamento necessário para ocorrer o esgotamento do atrito lateral ou mobilização plena da resistência de ponta da estaca) e *damping* (amortecimento do solo), além de estimar a relação carga-recalque da estaca sob carregamento estático. O método visa buscar o *best match quality* (melhor fator de qualidade), que resulta da comparação entre o sinal de força medido pelos sensores e o sinal calculado; quanto mais próximas forem as duas curvas, melhor deverá ser o resultado obtido (*signal matching*). Trata-se portanto de um cálculo realizado por diversas tentativas, não é uma solução fechada.

---

\* Engenheiro Civil, Benaton Fundações, Mestre pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.  
E-mail: daniel.murakami@gmail.com

\*\* Professor Titular Sênior, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. E-mail: faissal@usp.br

Há casos específicos onde é inevitável que a solução obtida pela análise CAPWAP apresente valores elevados de *quake* da ponta da estaca, conforme apresentado por Authier e Fellenius (1980), Likins (1983), Murakami e Cabette (2014). Nesses casos a não utilização de *quakes* elevados para a ponta da estaca faz com que o *match quality* piore consideravelmente.

Entretanto, segundo Fellenius (1988), os resultados do CAPWAP podem variar em função do operador que executa a análise, dependendo do tipo de subsolo. De forma geral, Fellenius (1988) concluiu que a carga total mobilizada varia pouco quando analisada por diferentes operadores, podendo apresentar maior variação em solos mais peculiares. Qualitativamente, houve uma concordância na distribuição do atrito lateral quando analisada por diferentes operadores, entretanto os valores de *quake* e *damping* podem variar. Os resultados do Método CAPWAP podem variar quando analisados por diferentes operadores porque o método é realizado por tentativas, não se trata de uma solução fechada, conforme já comentado anteriormente.

Segundo Murakami (2015) a distribuição do atrito lateral pode ser diferente da esperada em função do tipo de subsolo dependendo do valor do *quake* do fuste da estaca (*shaft quake*,  $q_s$ ) utilizado na análise CAPWAP. Quanto maior for o valor do  $q_s$  utilizado na análise, maior será o tempo necessário para mobilizar o atrito lateral do último elemento de solo próximo à ponta, de forma que na curva da força *wave up* (força ascendente) em função do tempo, cada elemento de solo fica mais desfasado em relação à análise com menor valor de  $q_s$ . De forma prática a curva *wave up* calculada fica deslocada para a direita com o aumento de  $q_s$ . Para que estas análises com valores de  $q_s$  maiores obtenham *match quality* satisfatórios pode ser necessário alterar a distribuição do atrito lateral, aumentar ou diminuir os valores de *damping*, assim como das demais variáveis envolvidas na análise. Dessa forma a distribuição do atrito lateral pode ser diferente dependendo do valor do  $q_s$  utilizado.

Com o objetivo de tentar resolver o problema da variabilidade dos resultados do CAPWAP em função do operador e apresentar uma solução mais próxima da realidade no sentido físico, e não apenas no sentido matemático, medido pelo *match quality*, este trabalho propõe um novo procedimento para a realização de análises CAPWAP (Murakami, 2015), incluindo uma nova forma de quantificar a solução obtida através do conceito de “*match quality* de recalques” (fator de qualidade de recalques). O trabalho mostra como isso pode ser feito, através de resultado de prova de carga estática (PCE), feita de forma convencional, ou realizando um carregamento estático com o peso próprio do martelo do bate-estaca, antes da realização do ensaio de carregamento dinâmico (ECD).

## 2 – MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente o CAPWAP é aplicado através do procedimento tradicional, isto é, buscando o *best match quality*, determinando a carga total mobilizada. Concluída a análise, o valor do *quake* do fuste da estaca é ajustado de forma que o trecho inicial da curva da simulação de prova de carga estática do CAPWAP se aproxime do trecho inicial da curva de uma prova de carga estática convencional ou, preferencialmente, através do CEPM (Carregamento Estático com o Peso do Martelo). As demais variáveis são ajustadas de forma a obter um novo *best match quality* da curva *wave up*. O procedimento para a realização do CEPM está indicado nas Figuras 1 e 2.

A nova solução obtida corrigindo o valor do *quake* do fuste da estaca deve apresentar capacidade de carga próxima da primeira solução obtida, além de proporcionar praticamente o mesmo trecho inicial de uma prova de carga estática. O *match quality* da curva *wave up* ( $MQ_{WU}$ ) também deverá melhorar, assim como o “*match quality* de recalques” ( $MQ_R$ ).



**Fig. 1** – Realização do CEPM.



**Fig. 2** – Leitura de recalques com relógio comparador (ampliação da Figura 1, em destaque).

O “*match quality* de recalques” pode ser definido através da equação 1 (Murakami, 2015):

$$MQ_R = \sum_0^n (|Y_{ci} - Y_{cwi}| + |Y_{ci+1} - Y_{cwi+1}|) \times (P_{i+1} - P_i) / (2 \times Y_{cmax}) \quad (1)$$

$Y_{ci}$  – recalque da prova de carga estática (PCE);

$Y_{cwi}$  – recalque do CAPWAP;

$P_i$  – carga associada ao recalque  $Y_i$ ;

$n$  – número de pontos da prova de carga;

$Y_{cmax}$  – recalque máximo da prova de carga estática;

$MQ_R$  – “*match quality* de recalques”.

A norma brasileira ABNT NBR 6122:2010 até permite a substituição de provas de carga estática por ensaios dinâmicos em alguns casos. Mas, dependendo da obra, torna-se inviável a realização de provas de carga estática (exemplo: obras de pequeno porte com recursos limitados e/ou cronograma “apertado”).

Uma forma de contornar a questão de custo e prazo é a realização de um carregamento estático utilizando o peso próprio do martelo do bate-estaca (CEPM) antes da execução do ensaio dinâmico, medindo o recalque com relógio comparador segundo a norma ABNT NBR 12131:2006.

Este procedimento apresenta a vantagem de não necessitar de instalação de um sistema de reação, reduzindo custo e prazo, além de representar o comportamento da estaca no exato momento da realização do ensaio dinâmico (despreza-se a influência do efeito *set up*).

A realização do CEPM após o ensaio dinâmico costuma apresentar um recalque “ligeiramente” maior do que se o mesmo fosse realizado antes do ensaio dinâmico em função de uma provável influência de tensões residuais. Murakami (2015) verificou essa influência em dois casos de obra em que o CEPM foi realizado após o ECD: os recalques eram maiores que o esperado e aparentemente se estabilizaram antes dos 15 minutos; após 30 minutos a estaca começava a se deslocar para cima; após 60 minutos uma das estacas analisadas apresentou recalques “negativos”, indicando claramente que deveria haver uma carga aprisionada na ponta da estaca forçando-a para cima.

### 3 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A metodologia apresentada acima foi utilizada em uma obra na região de Osasco, São Paulo/SP. Foram executadas estacas pré-moldadas de concreto de seção  $\phi 38\text{cm}$ , utilizando martelo a queda livre de 4000 kg.

Foram executadas uma prova de carga estática (estaca E01) e 3 ensaios de carregamento dinâmico com energia crescente. Os ensaios dinâmicos foram feitos em estacas próximas à E01 (cerca de 10m de distância). Em uma das estacas onde foi realizado o ensaio dinâmico (estaca E02), foi executado, previamente, o carregamento estático com o peso próprio do martelo do bate-estaca (CEPM). Não foi realizado ensaio dinâmico na mesma estaca onde se realizou a prova de carga estática.

A estaca da prova de carga estática (E01) apresentou comprimento cravado de 13,80m e o ensaio foi realizado após 47 dias do final da cravação. A estaca E02, onde foi realizado o ensaio dinâmico em conjunto com o CEPM, possuía comprimento cravado de 14,10m e os ensaios foram feitos 6 dias após a sua cravação. Os dados referentes às estacas E01 e E02 estão indicados no Quadro 1.

**Quadro 1** – Dados das estacas E01 e E02.

Estaca	Ensaio	D (cm)	Área Cheia (cm <sup>2</sup> )	Área de Concreto (cm <sup>2</sup> )	Perímetro (cm)	Furo Central (cm)	Comprimento Cravado (m)	Set Up (dias)
E01	PCE	38	1134	810	119	20,3	13,80	47
E02	PDA-CEPM	38	1134	810	119	20,3	14,10	6

Nota – PDA – Pile driving analyser

O subsolo apresentava basicamente uma camada de aterro, de cerca de 3,5m de espessura, com  $N_{SPT}$  entre 2 e 7 golpes, sobrejacente a uma camada de argila siltosa, pouco arenosa, muito mole, marrom, amarela e cinza escura. Subjacente a esta camada as sondagens detectaram a presença de solo de alteração de rocha, constituído de areia siltosa, marrom, amarela e cinza, variegada, fofa a medianamente compacta, com  $N_{SPT}$  médio de 7 golpes até 14m de profundidade. A partir de 14m de profundidade, a camada de solo de alteração de rocha apresentou valores de  $N_{SPT}$  entre 25 e 55 golpes. O nível d'água foi detectado a 2,9m de profundidade.

### 3.1 – Resultados obtidos

O ensaio de carregamento dinâmico na Estaca E02 foi executado com as seguintes alturas de queda, H: 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm, 60cm, 70cm e 80cm. Ele foi precedido por um carregamento estático com o peso próprio do martelo (CEPM), obtendo um recalque de 0,08mm para uma carga de 40kN.

Segundo o Método Case (*Case Western Reserve University*) a partir da altura de queda H de 60cm praticamente não houve acréscimos significativos de capacidade de carga, conforme indicado na Figura 3, que também mostra a curva da prova de carga estática na Estaca E01, extrapolada segundo o Método de Chin (1970).

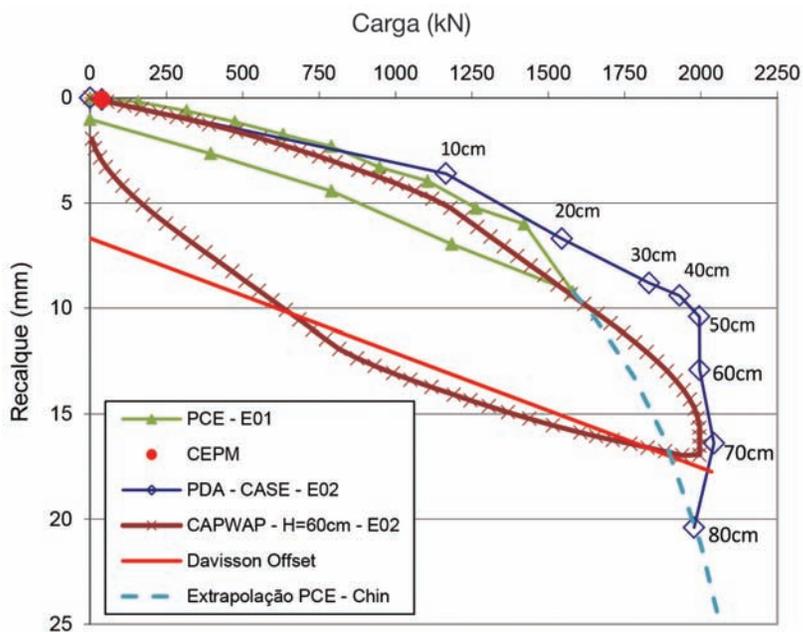


Fig. 3 – Correlação entre PCE × CAPWAP × Case (Estaca E02 - Osasco).

### 3.2 – Análise para altura de queda H de 60cm

A análise CAPWAP que apresentou melhor *match quality* da curva *wave up* ( $MQ_{WU}$ ), assim como melhor “*match quality* de recalques” ( $MQ_R$ ), foi realizada utilizando o *quake* do fuste de 0,868mm. Observa-se que este valor é menor que os valores sugeridos no manual do CAPWAP (Pile Dynamics, 2006) que variam entre 1,0mm e 7,5mm. As Figuras 4 e 5 ilustram a influência do

*quake* do fuste nos recalques simulados pelo CAPWAP. A Figura 4 é uma ampliação do trecho inicial da curva da Figura 5. Nota-se que o recalque no trecho inicial da curva é diretamente proporcional ao *quake* do fuste da estaca, conforme previsto pelo modelo de Smith (1960), que, como se sabe, adota funções de transferência de carga do tipo elasto-plástico (relações de Cambefort, 1964). É possível também verificar a proporcionalidade entre recalque e *quake* do fuste através do modelo matemático que utiliza o modelo de Cambefort (Massad, 1995). A solução usando *quake* do fuste de 0,868mm foi a que mais se aproximou do recalque do peso próprio do martelo, assim como da curva da prova de carga estática. Este valor de  $q_s$  é obtido por tentativas de forma a obter o melhor  $MQ_R$  em conjunto com o melhor  $MQ_{WU}$ . A Figura 6 ilustra a comparação dos resultados obtidos com melhor “*match quality* de recalques” ( $MQ_R$ ) ( $q_s=0,868\text{mm}$ ) e pior “*match quality* de recalques” ( $q_s=6,5\text{mm}$ ).

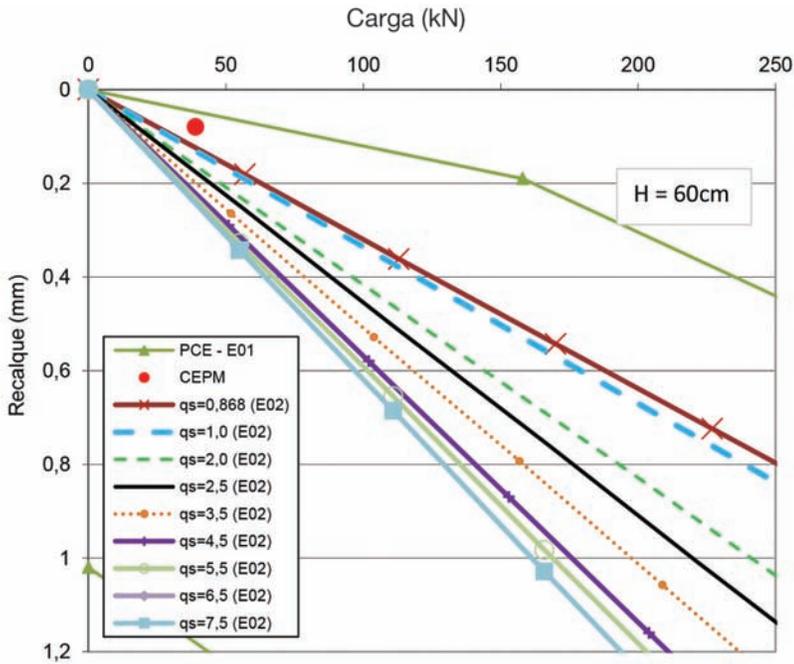


Fig. 4 – Influência do quake do fuste na curva carga-recalque (Estaca E02 - Osasco).

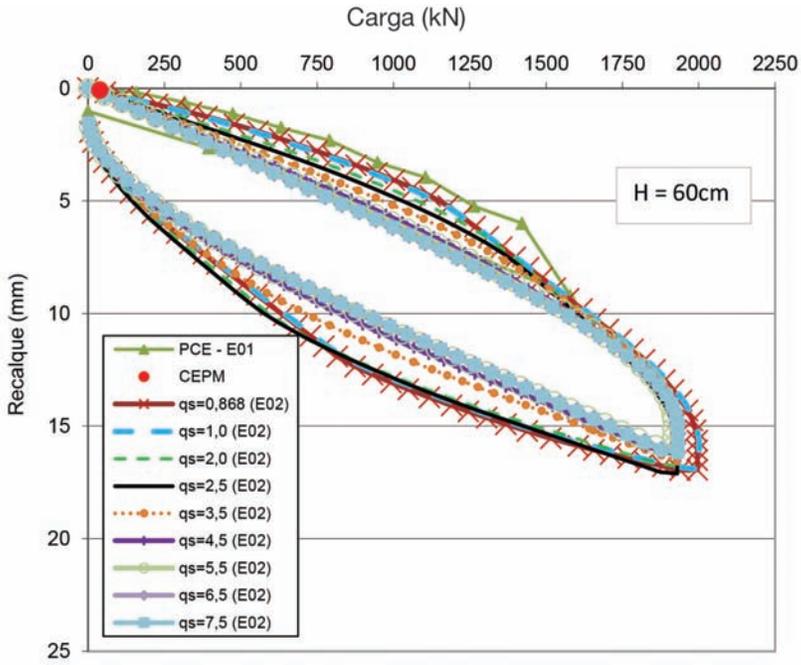


Fig. 5 – Influência do quake do fuste na curva carga-recalque (Estaca E02 - Osasco).

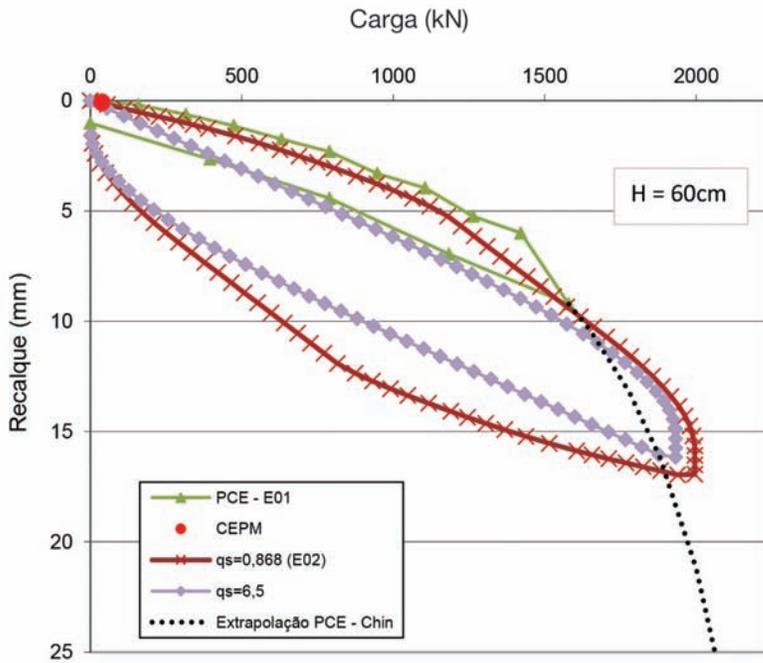


Fig. 6 – Influência do quake do fuste da curva carga-recalque considerando o melhor  $MQ_R$  ( $qs=0,868\text{mm}$ ) e o pior  $MQ_R$  ( $qs=6,5\text{mm}$ ) (Estaca E02 - Osasco).

O Quadro 2 permite comparar os resultados obtidos para diferentes valores de *quake* do fuste.

**Quadro 2** – Comparação dos resultados com diferentes valores de  $q_s$  (Estaca E02 – Osasco).

Análise	$MQ_R$	$MQ_{WAVEUP}$	Jc	RMX (kN)	Atrito (kN)	Ponta (kN)	SS (s/m)	ST (s/m)	qt (mm)
$q_s=0,868$	107	1,34	0,63	1996	1001	995	0,547	0,55	6,349
$q_s=1,0$	115	1,50	0,63	1996	1001	995	0,522	0,573	6,326
$q_s=2,0$	158	1,64	0,69	1930	1000	930	0,428	0,738	6,527
$q_s=2,5$	183	1,83	0,69	1930	1000	930	0,467	0,789	6,796
$q_s=3,5$	231	1,87	0,69	1930	920	1010	0,541	0,921	6,379
$q_s=4,5$	300	1,89	0,69	1930	710	1220	0,76	0,907	6,162
$q_s=5,5$	319	1,93	0,70	1913	663	1250	0,69	0,918	6,066
$q_s=6,5$	347	2,05	0,68	1933	613	1320	0,764	0,927	6,172
$q_s=7,5$	386	2,01	0,88	1842	493	1348	1,149	0,963	5,932

Nota - Jc- *Case damping factor*; RMX- Máxima resistência estática (Método Case); SS- *Smith shaft damping*; ST- *Smith toe damping*; qt- *Quake* da ponta da estaca (toe quake)

Observa-se que a solução utilizando *quake* do fuste de 0,868mm foi a que apresentou menor *match quality* ( $MQ_{wu}$ ) assim como menor “*match quality* de recalques” ( $MQ_R$ ). As análises realizadas utilizando valores de  $q_s$  maiores (a partir de  $q_s=5,5$ mm) revelaram que o atrito lateral não se esgotou totalmente. De fato, a partir de uma certa profundidade até à ponta da estaca, os valores de  $q_s$  têm que ser diminuídos proporcionalmente com a redução do atrito lateral de cada elemento de solo, conforme previsto pelo modelo de Smith (1960). A extrapolação do atrito lateral através do modelo elasto-plástico ideal levaria a um valor de capacidade de carga superior ao da prova de carga estática, indicando que valores de  $q_s$  superiores a 5,5mm não apresentam significado físico (relação carga-recalque), apesar de matematicamente resolverem a equação da onda. A utilização de *quakes* do fuste menores que o valor utilizado (0,868mm) aproximaria mais a curva do CAPWAP do ponto medido com o peso do martelo, porém o *match quality* da curva *wave up* ( $MQ_{wu}$ ) pioraria, indicando que valores de  $q_s$  abaixo deste apresentam pior solução matemática da equação da onda. Isso significa que este valor de  $q_s$  utilizado representa o ponto, dentro da faixa de valores de  $q_s$  possíveis matematicamente, onde se obtém o melhor  $MQ_R$  e o melhor  $MQ_{wu}$ . Portanto, o valor de *quake* do fuste mais provável é de 0,868mm.

A Figura 7 ilustra a variação da força axial em profundidade para os diversos valores de *quake* do fuste. Nota-se que há uma divergência na distribuição das cargas, indicando valores maiores de atrito lateral unitário abaixo de cerca de 10m de profundidade para  $q_s$  até 3,5mm, compensados por uma redução na carga transferida à ponta. Tal constatação é condizente com o perfil de sondagem, descrito acima. As soluções obtidas utilizando  $q_s$  entre 5,5mm e 7,5mm se distanciaram no formato da curva de força axial em profundidade, indicando solo homogêneo em toda a altura da estaca, o que é inconsistente com o perfil de sondagem, sem sentido físico. Confirma-se também a variabilidade dos resultados do CAPWAP, conforme apresentado por Fellenius (1988) e Edde (1991).

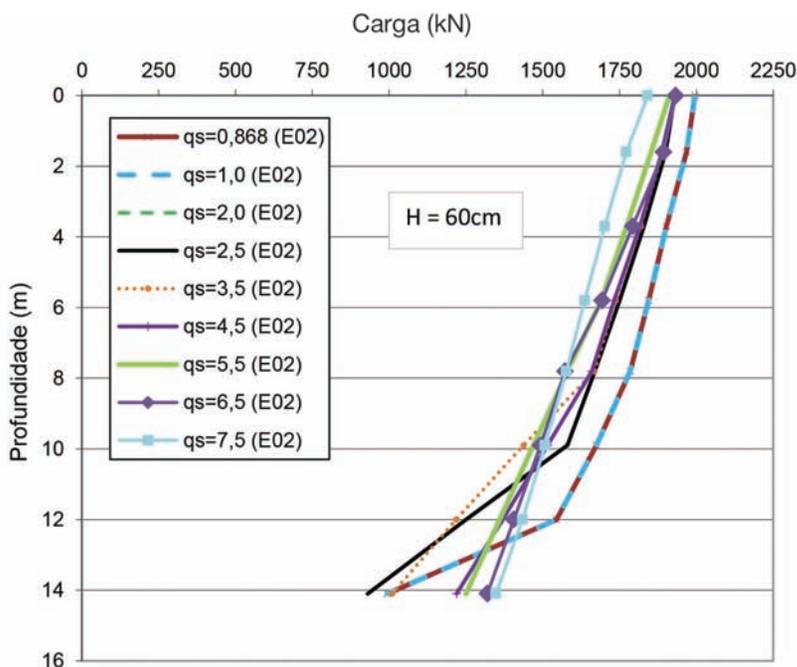


Fig. 7 – Força axial em profundidade para diversos valores de quake do fuste (Estaca E02 – Osasco).

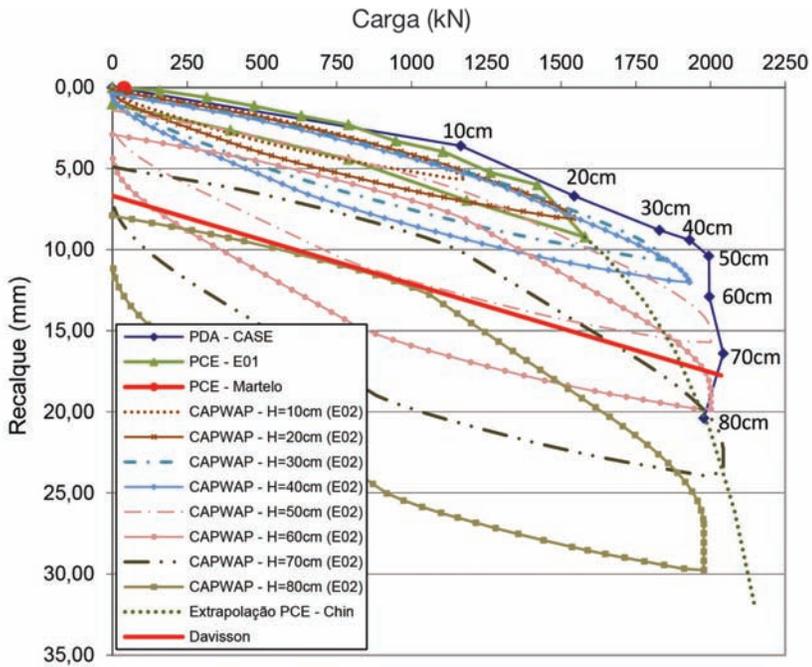
Reportando-se novamente à Figura 5 e ao Quadro 2, conclui-se que as diferentes análises CAPWAP apresentaram capacidades de carga (RMX) e valores de Jc (fator de amortecimento do Case) muito próximas. Isso significa que a curva RMX-DMX (máxima resistência estática-máximo deslocamento dinâmico) do Método Case deve ser parecida para essas diferentes análises CAPWAP, independentemente do operador.

### 3.3 – Análise para altura de queda H crescente

Todos os golpes aplicados no ensaio dinâmico foram submetidos à análise CAPWAP, utilizando como referência os parâmetros obtidos pela análise do golpe com altura de queda H de 60cm, ponto onde se verificou a ruptura do sistema solo-estaca. Foram adotadas as seguintes hipóteses para a realização da análise dos demais golpes:

- o *quake* do fuste foi o mesmo para todas as análises, exceto nos golpes de menor energia, onde não se mobilizou todo o atrito lateral nos últimos elementos de solo. Neste caso o *quake* diminuiu proporcionalmente com a carga;
- a resistência dinâmica é proporcional à velocidade do topo da estaca (primeira condição de contorno), que por sua vez é proporcional à energia aplicada, assim como os valores de Jc (fator de amortecimento do Método Case).
- a partir do golpe onde houve esgotamento do atrito lateral total (30cm), todo acréscimo de carga é exclusivamente devido à carga da ponta, que aumenta conforme o modelo elasto-plástico ideal de Cambefort, até se esgotar (segunda condição de contorno).

A Figura 8 ilustra a evolução das curvas carga-recalque com o golpe aplicado. O limite de Davisson foi atingido para a carga de 1990kN, referente ao golpe com altura de queda de 60cm, analisado pelo CAPWAP, enquanto que na curva RMX-DMX o valor obtido foi de 2035kN. A curva da prova de carga estática foi extrapolada através do Método de Chin (método que melhor se ajustou à curva), tendo-se obtido o valor de 1905kN através do limite de Davisson (1972). A variação da capacidade de carga obtida em relação à prova de carga estática foi de +4,5% para o CAPWAP, enquanto que pela curva RMX-DMX foi de +6,8%. Segundo Rausche *et al.* (1994), os ensaios dinâmicos devem ser sempre comparados com provas de carga estáticas através do limite de Davisson.



**Fig. 8** – Evolução da capacidade de carga como golpe aplicado na estaca E02, comparando com a curva da PCE na estaca E01 – Osasco.

A Figura 9 mostra a variação da força axial em profundidade para cada um dos golpes analisados. Nota-se que a partir do golpe de altura 30cm as curvas são paralelas indicando que houve esgotamento do atrito lateral. A partir deste ponto todo acréscimo de carga é exclusivamente devido ao acréscimo de carga de ponta. No último golpe aplicado (80cm) houve perda do atrito lateral em função da aplicação dos golpes anteriores, indicando menor capacidade de carga em relação ao golpe anterior, mantendo a mesma carga de ponta. A perda do atrito lateral em função da aplicação de sucessivos golpes já foi observado por outros autores como, por exemplo, Edde (1991), Murakami e Cabette (2015).

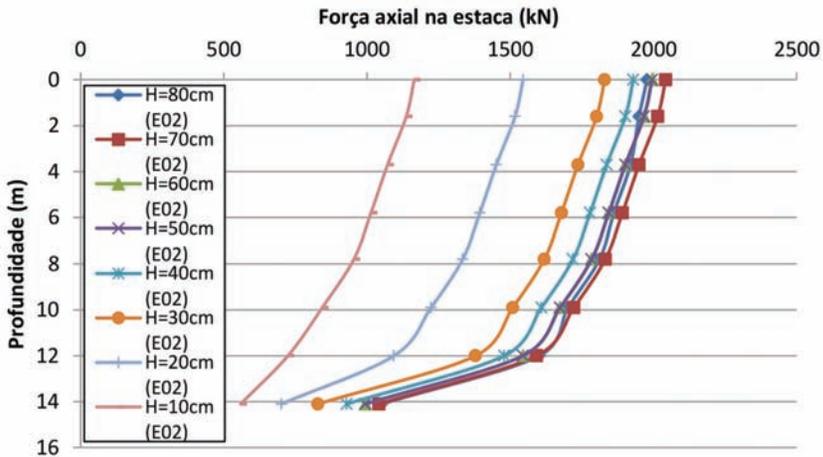


Fig. 9 – Força axial em profundidade (Estaca E02 – Osasco).

A Figura 10 ilustra a evolução do  $J_c$  (*Case Damping Factor*) em função da energia aplicada. Nota-se valores menores de  $J_c$  para os golpes de menor energia em função de menores resistências dinâmicas mobilizadas. A curva RMX-DMX do Método Case, indicada nas figuras anteriores, foi obtida utilizando os valores de  $J_c$  indicados na Figura 10.

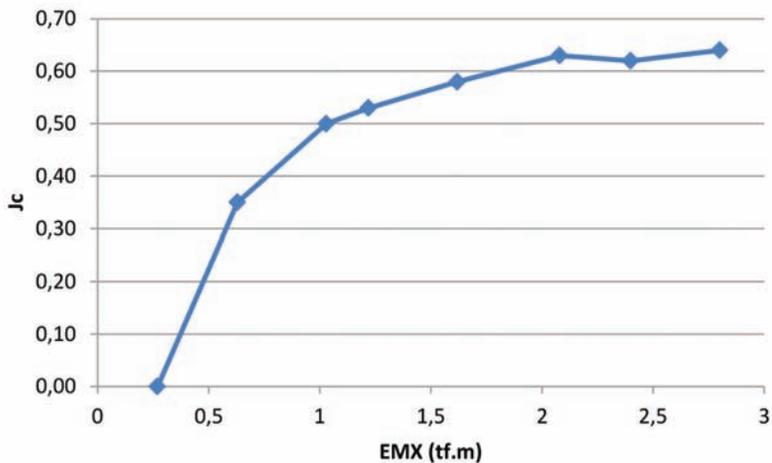


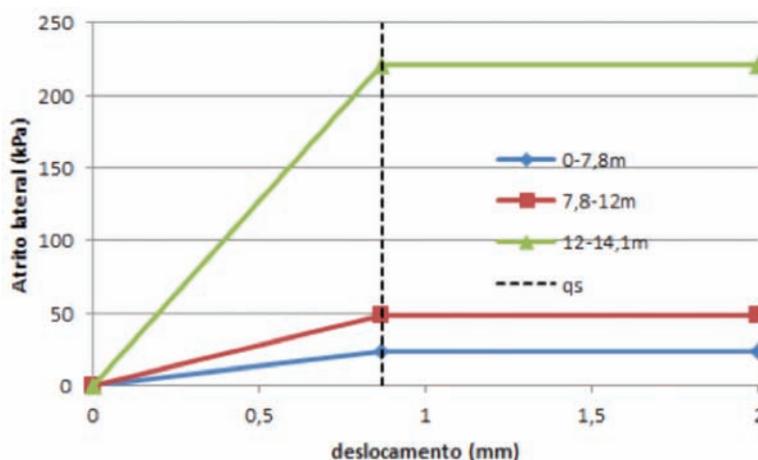
Fig. 10 – Evolução do  $J_c$  com o golpe aplicado (Estaca E02 – Osasco).

O Quadro 3 indica os resultados obtidos para os golpes analisados com energia crescente. Nota-se que o valor do atrito lateral permaneceu constante a partir do golpe de altura de queda de 30cm, indicando o esgotamento do atrito lateral. No golpe de altura de queda de 80cm ocorreu a redução do valor do atrito lateral, como foi mencionado anteriormente.

**Quadro 3** – Resultados obtidos no ECD com energia crescente (Estaca E02 – Osasco).

H (cm)	RMX (kN)	MQ <sub>wu</sub>	MQ <sub>R</sub>	Jc	Atrito (kN)	Ponta (kN)	SS (s/m)	ST (s/m)	qs (mm)	qt (mm)
10	1131	1,91	1,91	0,03	602	578	1,237	1,147	0,868	1,112
20	1510	2,04	2,04	0,45	807	735	1,136	1,313	0,868	1,773
30	1804	2,48	2,48	0,54	1001	845	1,212	0,621	0,868	2,700
40	1914	2,37	2,37	0,56	1001	929	0,720	0,579	0,868	3,432
50	1971	1,82	1,82	0,61	1001	1000	0,710	0,499	0,868	4,693
60	1996	1,34	1,34	0,76	1001	1000	0,560	0,555	0,868	6,283
70	2065	1,89	1,89	0,60	1001	1042	0,555	0,462	0,868	7,427
80	1983	1,64	1,64	0,64	926	1052	0,640	0,559	0,868	8,872

Enquanto a Figura 11 mostra a variação do atrito lateral para cada camada de solo (Primeira Relação de Cambefort), a Figura 12 ilustra o comportamento da ponta da estaca (Segunda Relação de Cambefort). Percebe-se que os resultados obtidos nas análises CAPWAP para cada golpe são idênticos ao modelo elasto-plástico ideal para o atrito lateral e, para a ponta, são próximos, apresentando boa definição do parâmetro “R” da Segunda Relação de Cambefort.



**Fig. 11** – Variação do atrito lateral – Primeira Relação de Cambefort – Procedimento Proposto (Estaca E02 – Osasco).

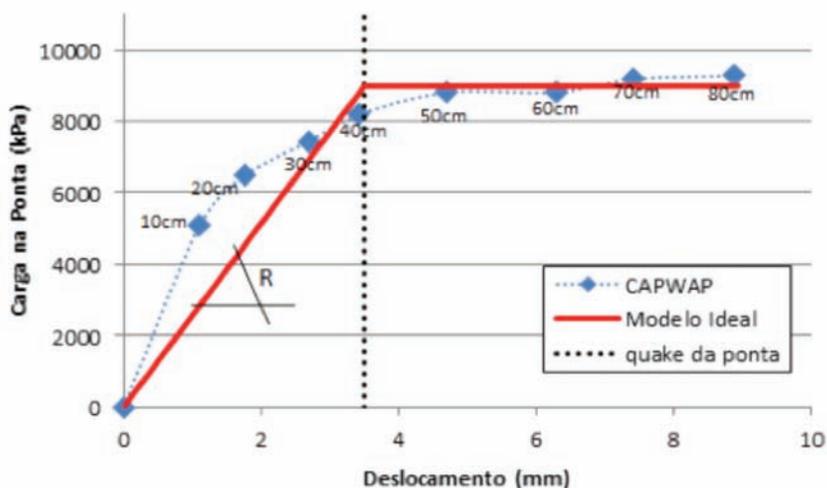


Fig. 12 – Comportamento da ponta da estaca – Segunda Relação de Cambefort – Procedimento Proposto (Estaca E02 – Osasco).

Os resultados do CAPWAP apresentados somente foram possíveis graças a uma boa qualidade dos sinais de força e velocidade coletados. A aplicação de golpes excêntricos faz com que o sinal de força  $\times$  tempo coletado apresente diferenças entre os dois transdutores de deformação. Consequentemente podem ocorrer diferenças no formato da curva *wave up* em golpes consecutivos, apresentando uma “falsa” aparência de que a distribuição do atrito lateral mudou nos diferentes golpes aplicados.

Nos primeiros golpes de menor energia a curva *wave up* apresenta uma “falsa” aparência de que há um aumento do atrito lateral nos primeiros metros. Analisando de forma isolada cada um desses golpes de menor energia chega-se a esse equívoco, uma vez que tradicionalmente as análises CAPWAP são feitas da “esquerda para a direita” na curva *wave up* para definição da distribuição do atrito lateral, ou seja, é feito o aumento ou redução do atrito lateral de cada elemento de solo comparando a curva *wave up* medida da curva calculada. Se há aumento na curva *wave up* nos golpes de menor energia, o procedimento tradicional induziria a aumentar a curva *wave up* com aumento de atrito lateral. Entretanto ao analisar todos os golpes de forma global, adotando as hipóteses listadas anteriormente (item 3.3), conclui-se que o aumento da força na curva *wave up* nos primeiros instantes é devido ao efeito de *damping*, ou seja, trata-se do aumento de SS (*damping do fuste de Smith*) e ST (*damping da ponta de Smith*), não se trata de um efeito exclusivo de RS (*shaft resistance*, atrito lateral). Outro argumento de que esse efeito é devido ao aumento de SS e ST é que se supusesse um aumento de RS desses golpes de menor energia e fosse feita a soma dos máximos valores de atrito lateral para cada golpe e da carga máxima de ponta, o resultado obtido excederia o valor dado pela prova de carga estática, piorando a correlação. Além disso a proporcionalidade entre resistência dinâmica e velocidade do topo da estaca se manteve em todos os golpes, garantindo a hipótese de Smith (1960). As Figuras 13 e 14 comprovam o aumento de SS e ST nos golpes de menor energia.

Outra explicação para comprovação do aumento de SS e ST nos golpes de menor energia é através do modelo de Cambefort (1964). Segundo este modelo, para uma menor carga estática aplicada no topo da estaca espera-se que o atrito lateral não se esgote. De forma análoga, no ECD quando aplicamos menor energia no topo da estaca espera-se que o atrito lateral não se esgote, entretanto ao fazermos isso na análise CAPWAP a curva *wave up* diminui, piorando o  $MQ_{WU}$ . Para obter o *best match* mantendo a hipótese de Cambefort é necessário aumentar os valores de SS e ST.

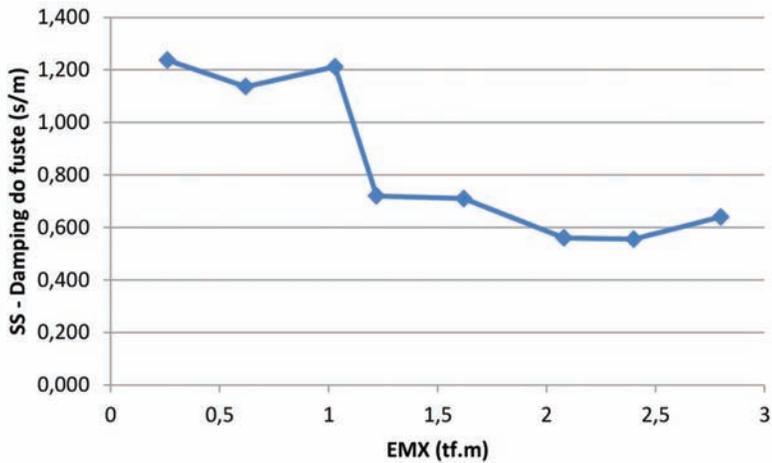


Fig. 13 – Efeito de SS (damping do fuste) com a energia aplicada (Estaca E02 – Osasco).

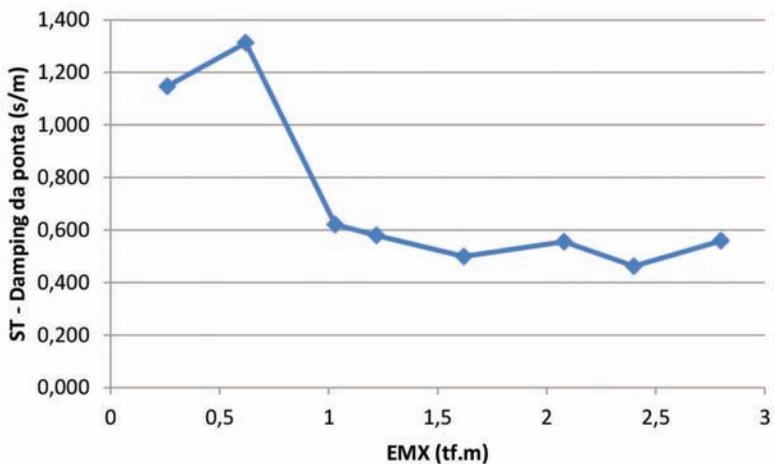


Fig. 14 – Efeito de ST (damping da ponta) com a energia aplicada (Estaca E02 – Osasco).

Nota-se nas Figuras 13 e 14 que os valores de SS e ST são maiores nos primeiros golpes aplicados de menor energia justamente para atender o modelo de Cambefort em relação à mobilização do atrito lateral (não se mobiliza plenamente o atrito lateral nos golpes de menor energia aplicada) e para atender a proporcionalidade entre a resistência dinâmica e velocidade máxima do topo em todos os golpes (hipótese de Smith), conforme comentado anteriormente.

As figuras seguintes permitem comparar o procedimento proposto (referido como DK) com o procedimento tradicional baseado exclusivamente na redução do valor de *match quality* da curva *wave up* ( $MQ_{WU}$ ). Nota-se na Figura 15 que o procedimento proposto (DK) apresentou redução dos valores de  $MQ_{WU}$ . A notação (DK) para o procedimento proposto é a mesma do trabalho original de Murakami (2015).

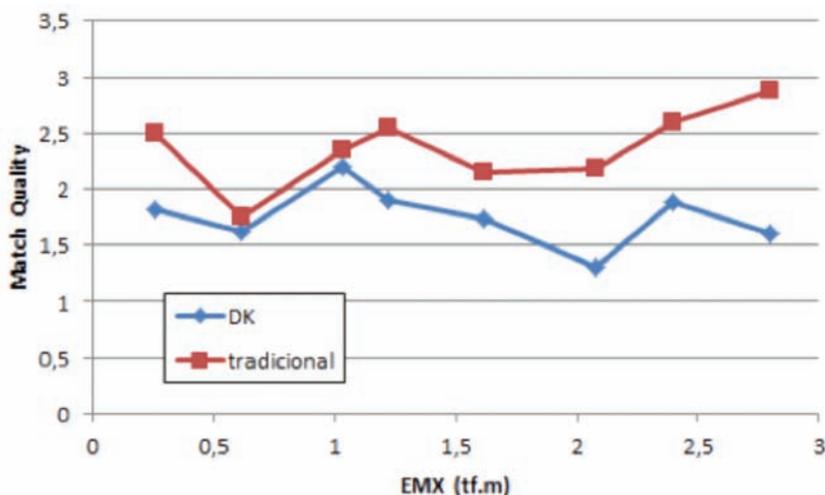


Fig. 15 – Redução dos valores de *Match Quality* (Estaca E02 – Osasco).

Nota-se, na Figura 16, que com o procedimento tradicional os golpes com alturas de queda de 70cm e 80cm indicaram menores resistências de ponta e maiores *quakes* de ponta quando comparados com o golpe de altura de queda de 60cm. A explicação destes resultados é a variabilidade dos resultados do CAPWAP, citada por Fellenius (1988). O autor demonstrou que para o mesmo golpe analisado é possível obter resultados próximos de capacidade de carga, porém com dados de entrada diferentes. A análise da Figura 3 indica claramente que houve ruptura do sistema solo-estaca a partir do golpe de altura de queda 60cm. A partir deste golpe não há acréscimo significativo de carga mobilizada. Na Figura 16, o procedimento tradicional possibilitou obter menor resistência de ponta nos golpes de alturas de 70cm e 80cm em relação ao golpe de altura de 60cm (inconsistente com o modelo de Cambefort), pois houve o aumento do atrito lateral nesses golpes, mantendo a carga total mobilizada (soma do atrito lateral e carga de ponta) e realizando o devido ajuste de *damping* e outras variáveis envolvidas.

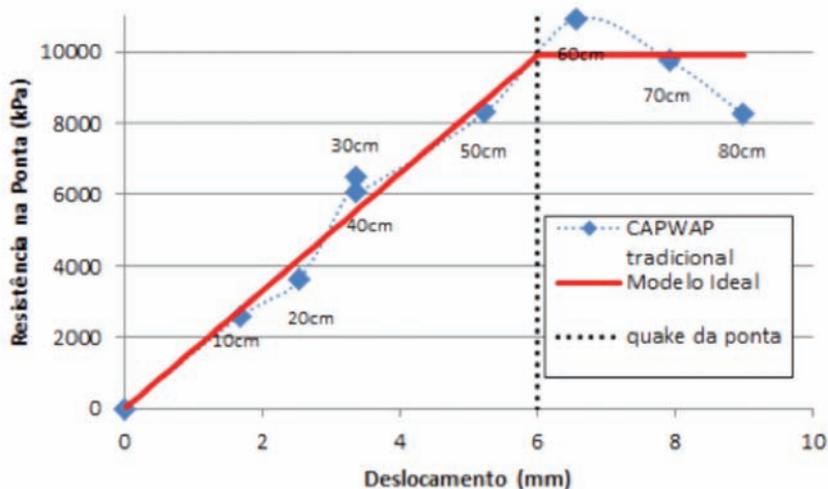


Fig. 16 – Comportamento da ponta da estaca - Segunda Relação de Cambefort - procedimento tradicional (Estaca E02 – Osasco).

Foi possível também obter uma análise com menor altura de queda ( $H=30\text{cm}$ ) e maior resistência de ponta em relação ao golpe com  $H=40\text{cm}$ , indicando que no procedimento tradicional não se manteve constante o parâmetro  $R$  da Segunda Relação de Cambefort. Isso demonstra que, apesar de resolver a teoria da equação da onda através da avaliação do *match quality* da curva *wave up*, o procedimento tradicional não apresentou “significado físico” por não apresentar consistência com o modelo de Cambefort. Além disso os valores de *quake* do fuste e a distribuição do atrito lateral foram diferentes para cada golpe analisado com altura de queda crescente.

O procedimento proposto (DK) também apresentou melhor coeficiente de determinação  $R^2$  (0,7984), conforme indicado na Figura 17, na relação entre resistência dinâmica total (atrito lateral médio e resistência de ponta) e velocidade máxima do topo em relação ao procedimento tradicional, em que se obteve coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,7528 (Figura 18).

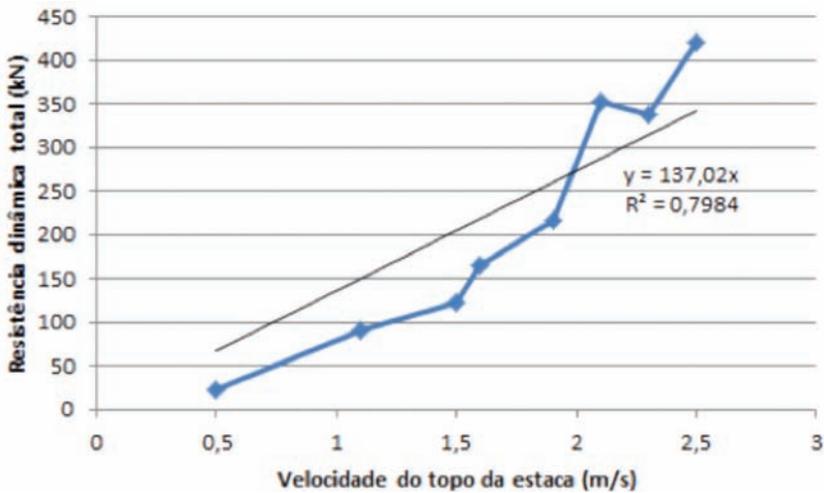


Fig. 17 – Relação entre resistência dinâmica e a velocidade do topo da estaca – procedimento proposto (Estaca E02 – Osasco).

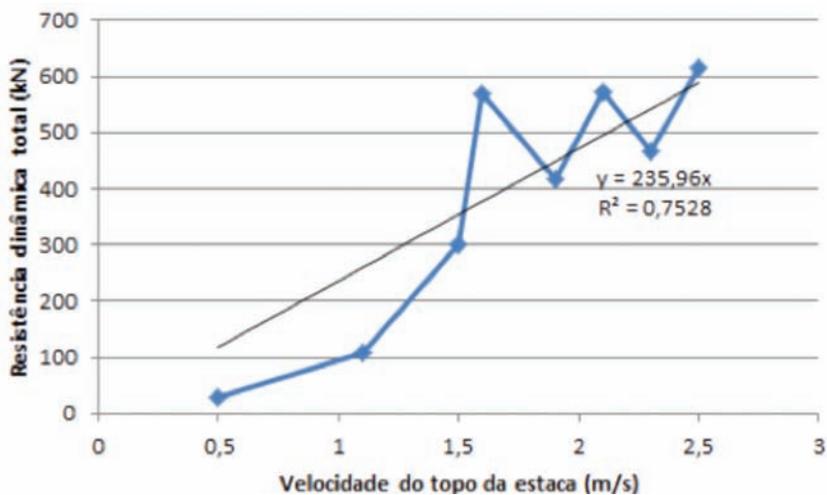


Fig. 18 – Proporcionalidade entre a resistência dinâmica total e a velocidade máxima do topo - procedimento tradicional (Estaca E02 – Osasco).

No ensaio de carregamento dinâmico tradicional o operador de CAPWAP pode direcionar a solução para os valores esperados, sendo fundamental nas primeiras 50 a 100 tentativas o ajuste manual dos parâmetros envolvidos na análise, ou até que se obtenha uma redução significativa de  $MQ_{WU}$ , com valores entre 3,5 e 7,0. Esta faixa de valores apresentados para o número de tentativas e de  $MQ_{WU}$  é orientativo, podendo ser maior ou menor dependendo da dificuldade de análise do sinal coletado. Pode ser feita a melhoria de *match quality* da curva *wave up* ( $MQ_{WU}$ ) através de procedimentos automáticos. Estes procedimentos são realizados através da variação dos dados de entrada (distribuição do atrito lateral, carga de ponta, *quakes*, *dampings*, entre outros).

No procedimento proposto (DK), a melhoria de  $MQ_{WU}$  através de procedimentos automáticos deve ser realizada com cautela. Não deve ser utilizada a opção automática “AC” do CAPWAP, onde todas as variáveis envolvidas na análise são ajustadas (inclusive a distribuição do atrito lateral). A opção automática “AQ” do CAPWAP, de ajuste dos parâmetros do solo selecionados, deve ser realizada com cautela, restringindo os limites de cada variável de forma manual (e não através da “larga faixa de valores sugeridos pelo *software*”), direcionando a solução de forma a obter o melhor *match quality* de recalques  $MQ_R$ , assim como atender às duas condições de contorno apresentadas anteriormente (item 3.3).

#### 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante décadas o ensaio de carregamento dinâmico (ECD) tem sido utilizado para verificação de desempenho das fundações, apresentando inúmeras vantagens em relação à prova de carga estática (PCE), conforme relatado por Rausche *et al.* (1994).

Este trabalho apresentou uma aplicação do procedimento proposto por Murakami (2015) visando obter resultados de análises CAPWAP ainda melhores, tentando desta forma minimizar a sua variabilidade, conforme apresentado por Fellenius (1988) e Edde (1991).

O procedimento consiste na determinação do *quake* do fuste da estaca através da comparação com resultado de prova de carga estática. Como alternativa à prova de carga convencional pode ser realizado um carregamento estático utilizando o peso próprio do bate-estaca (CEPM), reduzindo tempo e custo de execução, apresentando a vantagem de não sofrer influência tanto da redução dos valores de *quake* em função do tempo (Likins *et al.*, 1996) quanto do fenômeno de *set up*. Apesar de ser um carregamento estático onde se obtém um único ponto, o procedimento mostrou ser suficiente para a definição do trecho inicial da curva carga-recalque do topo. Este trecho inicial da curva é fortemente influenciado pelo *quake* do fuste da estaca ( $q_s$ ), conforme previsto pelo modelo de Smith e pela Primeira Relação de Cambefort. Os valores de  $q_s$  sugeridos pelo manual do CAPWAP (2006) variam entre 1,0mm e 7,5mm.

Este trabalho utilizou a nova forma de medir a “qualidade” das análises CAPWAP através do conceito de “*match quality* de recalques” ( $MQ_R$ ), semelhante ao *match quality* do *wave up* do CAPWAP (Murakami, 2015). Este novo conceito permite medir o “erro” do recalque apresentado pela simulação de prova de carga estática do CAPWAP com o resultado da prova de carga estática. Quanto menor for o valor de  $MQ_R$  melhor é a solução do CAPWAP no sentido físico (relação carga-recalque).

Verificou-se num caso real de obra que a análise com menor  $MQ_R$  apresentou também menor *match quality* da curva *wave up* ( $MQ_{WU}$ ), indicando que a solução obtida é a melhor no sentido matemático ( $MQ_{WU}$ ) assim como no sentido físico ( $MQ_R$ ). O valor de  $q_s$  que conduziu aos menores valores de *match quality* foi 0,868mm. Foi utilizado este mesmo valor de  $q_s$  em todos os golpes aplicados com energia crescente. Usando o critério de Davisson, constatou-se que a variação da capacidade de carga obtida em relação à prova de carga estática foi de +4,5% para o CAPWAP, enquanto que pela curva RMX-DMX foi de +6,8%.

A realização de um carregamento estático com o peso próprio do martelo (CEPM) após a realização do ensaio dinâmico costuma apresentar um recalque “ligeiramente” maior do que se o mesmo fosse realizado antes do ensaio dinâmico, indicando uma possível influência de tensões residuais (Murakami, 2015). A utilização de *quake* do fuste menor que o valor utilizado (0,868mm) aproximaria a curva do CAPWAP do ponto medido do peso do martelo, porém o *match quality* da curva *wave up* pioraria. Isso significa que o provável valor do *quake* é o valor utilizado (0,868mm).

No presente estudo verificou-se que nos ensaios dinâmicos com energia crescente há um ponto da curva RMX-DMX onde ocorre o esgotamento do atrito lateral. A partir deste ponto o acréscimo de carga é devido ao acréscimo de resistência de ponta. Nesse contexto, constatou-se também que tanto o fuste quanto a ponta apresentaram comportamentos consistentes com a Primeira e a Segunda Relação de Cambefort, respectivamente.

Os valores de *match quality* da curva *wave up* foram satisfatórios para todos os golpes analisados, variando entre 1,34 e 2,48, indicando que as hipóteses adotadas e os dados de entrada, como distribuição do atrito lateral, resistência de ponta, valores de *quake* e *damping*, estão provavelmente próximos da realidade.

O operador de CAPWAP deve direcionar a solução para os valores esperados, sendo fundamental nas primeiras 50 a 100 tentativas o ajuste manual dos parâmetros envolvidos na análise, ou até que se obtenha uma redução significativa de  $MQ_{wu}$ , com valores entre 3,5 e 7,0. A melhoria de *match quality* através de procedimentos automáticos nos parâmetros do solo (opção “AQ”) deve ser realizada com cautela, restringindo os limites de cada variável de forma manual (e não através da “larga faixa de valores sugeridos pelo *software*”), direcionando a solução de forma a obter o melhor *match quality* de recalques, assim como atender às duas condições de contorno apresentadas, quais sejam: (1) resistência dinâmica proporcional à velocidade do topo da estaca e (2) a carga da ponta variando conforme o modelo elasto-plástico ideal da Segunda Relação de Cambefort.

## 5 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Benaton Fundações e à empresa responsável pela execução da obra por disponibilizar os ensaios de carregamento dinâmicos e prova de carga estática, assim como as informações necessárias para elaboração deste trabalho. Agradecem também à EPUSP, pelo apoio dado à presente pesquisa.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 6122 (2010). *Projeto e execução de fundações*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 12131 (2006). *Estacas Prova de carga estática – Método de ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Authier, J.; Fellenius, B.H. (1980). *Quake values determined from dynamic measurements*. Proceedings 1st International Conference on the Application of Stress-Wave Theory on Piles, Stockholm. A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 197-216.
- Cambefort, H. (1964). *Essai sur le comportement en terrain homogène des pieux isolés et des groupes de pieux*. Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, Paris, Annales. n. 204, pp. 1478-1517.

- Chin, F.K. (1970). *Estimation of the failure load of piles not carried to failure*. Proc. 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, pp. 81-90.
- Davisson, M.T. (1972) *High-Capacity Piles*. Proceedings of Lecture Series on Innovations in Foundation Construction, Chicago, IL, 81-112.
- Edde, R.D. (1991). *Case Pile Wave Equation Analysis – CAPWAPC. Evaluation of driven piles*. MSc thesis, University of Ottawa, Canada.
- Fellenius, B.H. (1988). *Variation of CAPWAP results as a function of the operator*. Proc. 3rd Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Ottawa, pp. 814-825.
- Likins, G.E. (1983). *Pile Installation Difficulties in Soils with Large Quakes*. Dynamic Measurement of Piles and Piers, ASCE Spring Convention. Philadelphia, PA.
- Likins, G.E.; Rausche, F.; Thendean, G.; Svinkin, M. (1996). *CAPWAP Correlation Studies*. Proceedings of the 5th International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles, Orlando, Florida, pp. 447-464.
- Massad, F. (1995). *The analysis of piles considering soil stiffness and residual stresses*. Proc. 10th Panamerican Conf. Soil Mech. and Foundation Eng., Guadalajara, México, v. II:1199-1210.
- Murakami, D.K.; Cabette, J.F. (2014). *Dificuldade de cravação em solos com quake elevados*. Seminário apresentado em “Workshop - Ensaio de Carregamento Dinâmico e Monitoração de Cravação de Estacas (Pile Driving Analyzer e CAPWAP)”, São Paulo.
- Murakami, D.K.; Cabette, J.F. (2015). *Perda do atrito lateral com a aplicação de sucessivos golpes no ensaio dinâmico*. VIII Seminário de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo.
- Murakami, D.K. (2015). *Novo procedimento para a realização de análise CAPWAP no ensaio de carregamento dinâmico em estacas pré-moldadas*. Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo.
- Pile Dynamics, Inc. (2006). *CAPWAP manual*. Cleveland, Ohio.
- Rausche, F.; Hussein, M.; Likins, G.; Thendean, G. (1994). *Static Pile Load-Movement from Dynamic Measurements*. Proceedings of Settlement '94 - Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments. College Station, TX, pp. 291-302.
- Smith, E.A.L. (1960). *Pile driving analysis by the wave equation*. J. Soil Mech. Found. Div., ASCE 86(SM4), pp. 35-61.