

Correlação entre Prova de Carga Estática e Ensaio de Carregamento Dinâmico em Estaca Pré-Moldada de Diâmetro 50cm

Murakami, D. K.

Fountest Engenharia, Engº Civil M. Sc., São Paulo, Brasil, daniel.murakami@gmail.com

Cabette, J. F.

Benaton Fundações, Engº Civil M. Sc., São Paulo, Brasil, cabettejean@gmail.com

Rodriguez, T. G.

Geoprova, Engº Civil, M. Sc., Campinas, Brasil, tiago@geoprova.com.br

Miranda Junior, G.

Gebase, Engº Civil, D. Sc., Campinas, Brasil, gentil@gebase.com.br

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo apresentar uma comparação entre prova de carga estática e ensaio de carregamento dinâmico em estacas pré-moldadas de concreto de diâmetro 50cm. As análises CAPWAP foram realizadas segundo o procedimento proposto por Murakami (2015), que inclui uma nova forma de avaliar a análise CAPWAP: conceito de “Match Quality de Recalques” (MQ_R). Mostra-se neste caso de obra que o procedimento proposto permitiu determinar o valor do quake do fuste da estaca (qs), melhorando a relação carga-recalque simulada pelo CAPWAP, obtendo melhor “Match Quality” da curva “Wave Up” (MQ_{WU}), assim como melhor MQ_R . A obra em questão apresentou condições geotécnicas peculiares, resultando em algumas quebras de estacas de difícil previsão na fase de projeto em função da presença de concreções de limonita, não previstas nas sondagens de simples reconhecimento (SPT) executadas na fase de projeto.

PALAVRAS-CHAVE: ensaio de carregamento dinâmico, prova de carga estática, estaca pré-moldada, “match quality de recalques”, concreções de limonita.

1 INTRODUÇÃO

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 subsolos 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.

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 utilizada na análise CAPWAP.

Durante a execução da cravação das estacas pré-moldadas de uma obra, composta por 3 torres residenciais de 17 pavimentos, com periferia / subsolo em lajes, na cidade de Rio Claro, interior do estado de São Paulo, ocorreram problemas de difícil previsão na fase de projeto: quebras e/ou danos nas estacas durante a execução, em alguns casos de forma quase “imperceptível”.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma comparação entre os resultados de prova de carga estática e ensaio de carregamento dinâmico em subsolo com a presença de concreções de limonita.

As análises CAPWAP foram realizadas utilizando o procedimento proposto por Murakami (2015) que tem como objetivo tentar resolver a variabilidade dos resultados do CAPWAP citada por Fellenius (1988), além de corrigir o formato da curva simulada carga-recalque.

2 METODOLOGIA

Para a comparação dos resultados da curva carga-recalque serão utilizados os métodos: prova de carga estática do tipo lenta, segundo a NBR 12131 (2006); Método CAPWAP, realizado segundo o procedimento proposto por Murakami (2015); Curva RMX-DMX do Método CASE, segundo Aoki (1989);

O procedimento proposto por Murakami (2015) é feito da seguinte forma: inicialmente o CAPWAP é aplicado normalmente 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 com o peso próprio do martelo do bate-estaca). As demais variáveis são ajustadas de forma a obter um novo “best match quality” da curva “wave up”.

Nota-se que a nova solução obtida corrigindo o valor do quake do fuste (qs) da estaca deve apresentar capacidade de carga próxima da primeira solução obtida, além de apresentar praticamente o mesmo trecho inicial de uma prova de carga estática. O “match quality” também deverá melhorar, assim como o “match quality de recalques”.

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

$$MQ_R = \sum_{i=0}^n (|Y_{ci} - Y_{cwi}| + |Y_{ci+1} - Y_{cwi+1}|) \times (P_{i+1} - P_i) / (2 \times Y_{cmax}) \quad (1)$$

Onde:

Y_{ci} = recalque da prova de carga estática

Y_{cwi} = recalque do CAPWAP

P_i = carga associada ao recalque Y

n = número de pontos da prova de carga

Y_{cmax} = recalque máximo da prova de carga estática

MQ_R = “match quality de recalques”

Além do conceito de “match quality de recalques”, quando o ensaio dinâmico é feito com energia crescente o procedimento proposto por Murakami (2015) utiliza duas condições de contorno que são utilizadas para melhoria de “Match Quality” da curva “Wave Up”:

- 1) Proporcionalidade entre a resistência dinâmica total (atrito lateral médio e ponta) e a velocidade máxima do topo da estaca, para cada golpe aplicado com energia crescente;
- 2) Relação elasto-plástica aproximada entre a resistência e o quake da ponta da estaca, para cada golpe aplicado (manter o parâmetro R da Segunda Relação de Cambefort).

3 CARACTERÍSTICAS DO SUBSOLO E SUA INFLUÊNCIA NA CRAVAÇÃO DAS ESTACAS

Na obra em questão foram executadas duas campanhas de sondagem, a primeira pela Empresa A e a segunda pela Empresa B.

Com base nas sondagens executadas pela Empresa A, primeira campanha, percebe-se que, de um modo geral, as sondagens apresentam superficialmente uma camada de argila siltosa, muito mole, marrom avermelhado, até cerca de 6m de profundidade, seguida de uma camada de argila siltosa, mole a média, marrom alaranjado até cerca de 11m de profundidade. Subjacente a esta camada as sondagens detectaram a presença de argila siltosa, rija a dura, marrom. O nível d’água foi detectado aos 13m de profundidade.

A segunda campanha, executada pela Empresa B, as sondagens indicaram a presença de uma camada de argila silto arenosa, muito mole a média, marrom clara, até cerca de 6m de profundidade. Subjacente a esta camada as sondagens detectaram a presença de silte argiloso, rijo a duro, marrom claro, vermelho escuro/claro, amarelo escuro, com valores de N_{SPT} entre 18 e 39 golpes, entre 7 e 9m de profundidade, apresentando uma diminuição nos valores de N_{SPT} nos 3 m seguintes (N_{stp} médio de 17 golpes). A partir dos 13 m de profundidade os valores de N_{SPT} apresentaram entre 30 e 50 golpes.

Apesar de nenhuma sondagem executada na obra detectar a presença de limonita, Giacheti *et al* (1993) cita a possibilidade desta ocorrência. Durante a execução da obra foi verificada a ocorrência deste material em profundidades diversas, inclusive superficialmente na região onde houve corte no terreno.

Maiores informações sobre as características geotécnicas do local estão descritas por Murakami *et al* (2016).

4 CASO DE OBRA

A metodologia apresentada foi utilizada em uma obra localizada na cidade de Rio Claro, São Paulo/SP. Serão apresentados os resultados de uma prova de carga estática (PCE), na estaca ET01, e um ensaio de carregamento dinâmico com energia crescente (ECD), na estaca PC23B. As estacas testadas são pré-moldadas de concreto maciças de seção transversal de 50cm e possuem aproximadamente 5m de distância entre elas.

As estacas foram cravadas com martelo de queda livre de 6000kg com altura de queda de 80cm.

A estaca onde foi realizada a PCE (ET01) apresentou comprimento cravado de 16,15m e o teste foi realizado após 43 dias do final da cravação.

A estaca onde foi realizado o ECD (PC23B) apresentou comprimento cravado de 15,70m e o teste foi realizado após 8 dias do final da cravação.

5 RESULTADOS

A estaca PC23B foi ensaiada utilizando as seguintes alturas de queda (H): 40cm, 60cm, 80cm, 100cm. Durante a execução do ensaio os sensores não registraram os sinais do golpe de altura de queda de 40cm.

A prova de carga estática atingiu carga de ruptura de 3240 kN, obtendo deslocamento máximo do topo da estaca de 50,0mm e recalque residual de 40,68mm, conforme a figura 1.

A figura 2 mostra a comparação entre os diferentes métodos: PCE (estaca ET01); Método Case (Estaca PC23B); Método CAPWAP (Estaca PC23B com altura de queda de 100cm).

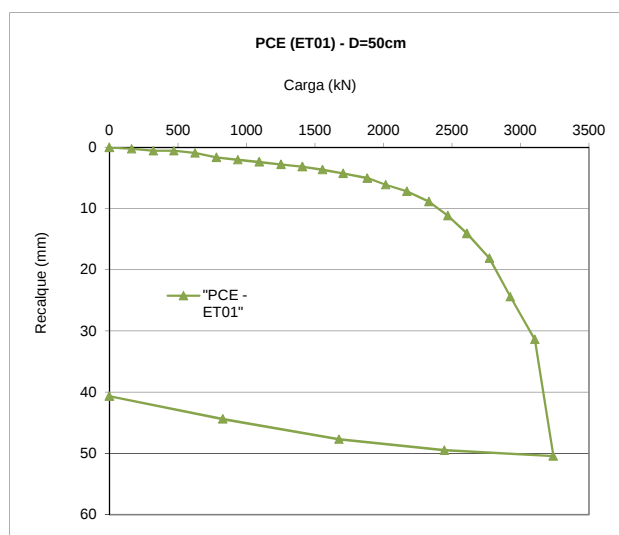


Figura 1. Curva carga-recalque da PCE (ET01)

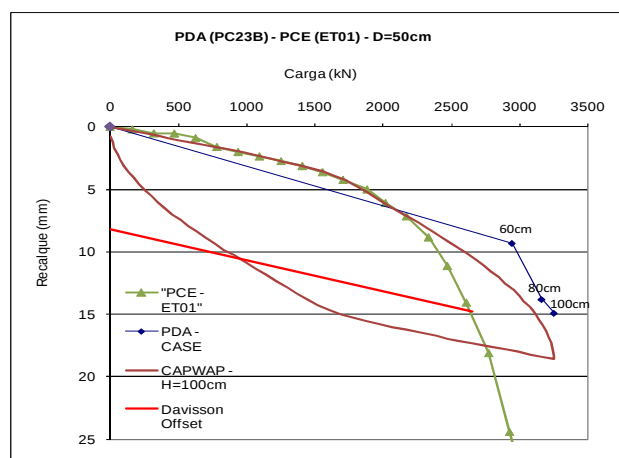


Figura 2. Comparação entre os diferentes métodos

A análise CAPWAP para o golpe de H=100cm que apresentou melhor MQ_{WU} foi

realizada utilizando o quake do fuste de 1,138mm. As figuras 3 e 4 ilustram a influência do quake do fuste (qs) nos recalques calculados pelo CAPWAP. A figura 3 é uma ampliação da figura 4. Nota-se que o recalque no trecho inicial da curva é diretamente proporcional ao valor de qs. A solução usando o valor de qs de 1,138mm levou a recalques mais próximos ao recalque da PCE.

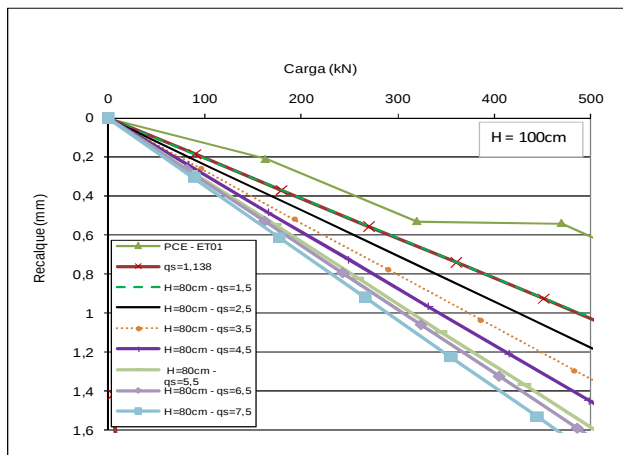


Figura 3. Influência do quake do fuste da estaca nos recalques (PC23B), em comparação com a PCE (ET01).

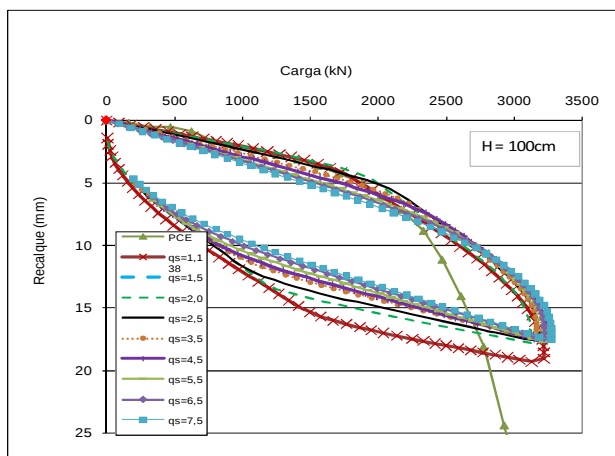


Figura 4. Influência do quake do fuste da estaca nos recalques (PC23B), em comparação com a PCE (ET01).

A figura 5 ilustra a comparação dos resultados obtidos com melhor “Match Quality de Recalques” (MQ_R) ($qs=1,138mm$) e pior “Match Quality de Recalques” ($qs=7,5mm$).

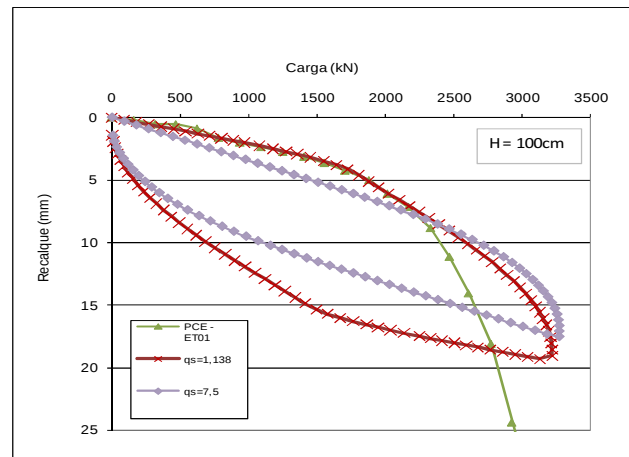


Figura 5. Influência do quake do fuste da estaca nos recalques (PC23B) considerando o melhor MQ_R ($qs=1,138mm$) e pior MQ_R ($qs=7,5mm$).

A tabela 1 permite comparar os resultados obtidos para diferentes valores de qs. Foi possível obter análises CAPWAP com valores de MQ_{WU} satisfatórios para praticamente toda a faixa de valores de qs sugeridos pelo manual do CAPWAP (2006), que variam entre 1,0mm e 7,5mm. Observa-se que a solução obtida utilizando o valor de quake do fuste de 1,138mm foi a que apresentou menor “Match Quality” da curva “Wave Up” (MQ_{WU}), assim como menor “Match Quality de Recalques” (MQ_R). Nota-se também que a solução obtida com melhor MQ_R ($qs=1,138mm$), além de obter melhor MQ_{WU} , apresentou melhor relação carga-recalque quando comparada com a curva da PCE (figuras 3 a 5).

As análises realizadas utilizando valores de qs maiores (a partir de $qs=6,5mm$) revelaram que o atrito lateral não se esgotou, apresentando valores de qs decrescentes a partir de uma certa profundidade. 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 qs superiores à 6,5mm 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 (1,138mm) aproximaria mais a curva do CAPWAP da curva da PCE, porém o “Match Quality” da curva “Wave Up” (MQ_{WU}) pioraria. Isso significa que o valor mais provável do quake do fuste é 1,138mm.

As diferentes análises CAPWAP revelaram capacidades de carga muito próximas, apresentando também valores de J_c próximos. Isso significa que a curva RMX vs DMX do Método Case deve ser parecida para essas diferentes análises CAPWAP. Tal constatação conduz à conclusão de que a curva RMX vs DMX do Método Case é independente do operador que executa a análise CAPWAP.

Tabela 1. Comparação dos resultados para o golpe de $H=100\text{cm}$ (estaca PC23B).

Análise	MQ_R	MQ_{WAVE}	J_c	RMX (kN)
		UP		
qs=1,138	179	1,74	0,56	3250
qs=1,5	184	3,46	0,59	3119
qs=2,5	202	2,94	0,57	3174
qs=3,5	207	2,95	0,57	3165
qs=4,5	223	2,86	0,54	3230
qs=5,5	228	2,97	0,55	3215
qs=6,5	232	2,98	0,55	3220
qs=7,5	240	3,05	0,52	3270

A figura 6 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 9m de profundidade para qs até 3,5mm. Tal constatação é condizente com o perfil de sondagem, descrito acima. As soluções obtidas utilizando qs entre 4,5mm e 7,5mm se distanciaram no formato da curva de força axial em profundidade, indicando maior atrito lateral unitário entre 3m e 9m de profundidade, o que é inconsistente com o perfil de sondagem, sem sentido físico.

A divergência da curva de força axial em profundidade em função do valor de qs utilizado na análise apresentou maior divergência neste caso de obra quando comparado com os casos de obra apresentados por Murakami e Massad (2014) e Murakami (2015). A explicação desta maior divergência seriam as condições geotécnicas peculiares do local da obra (Murakami *et al*, 2016) que influenciaram para uma maior variabilidade dos resultados do CAPWAP, conforme apresentado por Fellenius (1988).

A redução significativa de MQ_{WU} na análise com qs=1,138mm, conforme indicada na tabela

1, foi possível graças à aplicação do procedimento proposto por Murakami (2015) que permitiu a determinação deste valor de qs, além da correção dos valores de damping (primeira condição de contorno) e da relação carga-deslocamento da ponta (segunda condição de contorno).

Além disso, o conhecimento geotécnico da região (Murakami *et al*, 2016) permitiu reduzir o valor de MQ_{WU} na análise CAPWAP através da utilização de ‘Plug on Shaft’ (massa de solo no fuste). Este artifício não é utilizado em estacas pré-moldadas, porém as condições geotécnicas possibilitaram sua utilização, uma vez que se verificou durante a execução da obra camadas de concreção limonita em profundidades diversas ao redor do fuste das estacas cravadas.

Estas camadas de concreções aderidas ao fuste da estaca influenciaram o formato da curva ‘Wave Up’, indicando um aumento localizado da força na curva. O aumento da curva ‘Wave up’ com a utilização de ‘Plug on Shaft’ na análise com qs=1,138mm melhorou o MQ_{WU} , enquanto que nas demais análises com diferentes valores de qs o aumento da curva ‘Wave Up’ foi através de aumento de atrito lateral unitário localizado. Esta seria outra explicação para maior divergência entre as diferentes curvas indicadas na figura 6.

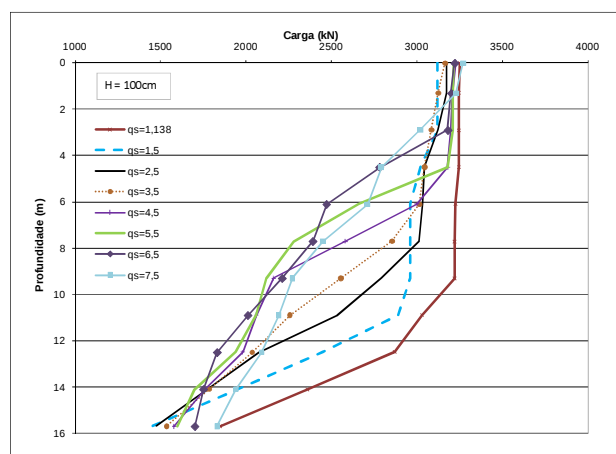


Figura 6. Variação da força axial em profundidade para análises com diferentes valores de qs (estaca PC23B).

Através das figuras 3 a 5, assim como a tabela 1, é possível verificar a variabilidade dos resultados do CAPWAP, conforme apresentado por Fellenius (1988). Nota-se que as

capacidades de carga são muito próximas, apresentando em todos os casos valores de “Match Quality” da curva “Wave Up” aceitáveis; entretanto o “Match Quality de Recalques” (MQ_R) aumenta à medida que os valores do quake do fuste vão ficando mais distantes do real.

Todos os golpes aplicados no ensaio dinâmico com energia crescente foram submetidos à análise CAPWAP, utilizando como referência os parâmetros obtidos pela análise do golpe com altura de queda de 100cm. Foram mantidas as seguintes hipóteses para a realização da análise dos demais golpes:

- Os valores do quake do fuste foram iguais para todos os golpes;
- A resistência dinâmica (R_d) é proporcional à velocidade do topo da estaca (figura 7), que por sua vez é proporcional à energia aplicada (Primeira condição de contorno);
- A partir do golpe onde houve esgotamento do atrito lateral (H=60cm, como será mostrado adiante) todo acréscimo de carga é exclusivamente devido à reação de ponta; neste caso o acréscimo de carga de ponta é proporcional ao acréscimo do quake da ponta da estaca, segundo o modelo elasto-plástico ideal (Segunda condição de contorno);

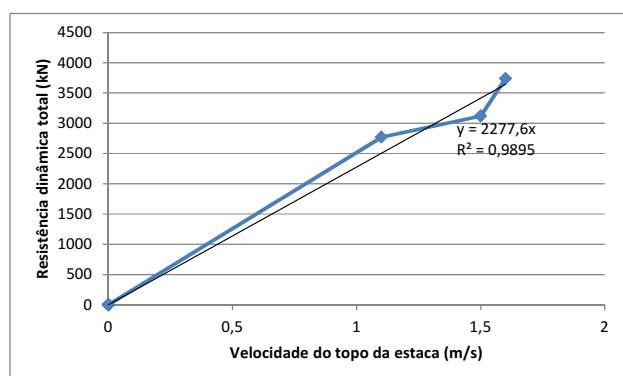


Figura 7. Proporcionalidade entre a resistência dinâmica e a velocidade máxima do topo da estaca (estaca PC23B).

A figura 8 ilustra a evolução da curva carga-recalque com o golpe aplicado. O limite de Davisson foi atingido para a carga de 3025 kN, referente à altura de queda de 100cm, segundo a curva do CAPWAP, enquanto que na curva

RMX vs DMX do Método Case não foi atingido o limite de Davisson, entretanto a extrapolação de sua curva levaria a um valor de 3350 kN. A curva da prova de carga estática obteve o valor de 2650 kN através do limite de Davisson.

A variação da capacidade de carga obtida em relação à prova de carga estática foi de +14,2% para o CAPWAP, enquanto que pela curva RMX-DMX foi de +26,4%. Segundo Rausche, (1994), os ensaios dinâmicos devem ser sempre comparados com provas de carga estática através do limite de Davisson.

Salienta-se que o limite de Davisson é dependente da relação carga-recalque. A estaca submetida à PCE sofreu grandes deslocamentos do topo da estaca (50,0mm), conseqüentemente a ponta da estaca sofreu maiores deslocamentos. No ensaio dinâmico o deslocamento do topo da estaca, simulada pelo CAPWAP, sofreu menores deslocamentos (18,6mm), em função do menor deslocamento da ponta da estaca. Essa seria uma explicação da diferença obtida entre o ECD e a PCE quando comparado através do limite de Davisson. A comparação direta entre a carga máxima obtida na PCE (3240 kN) e no CAPWAP (3250 kN) resultaria numa diferença de apenas +0,3%.

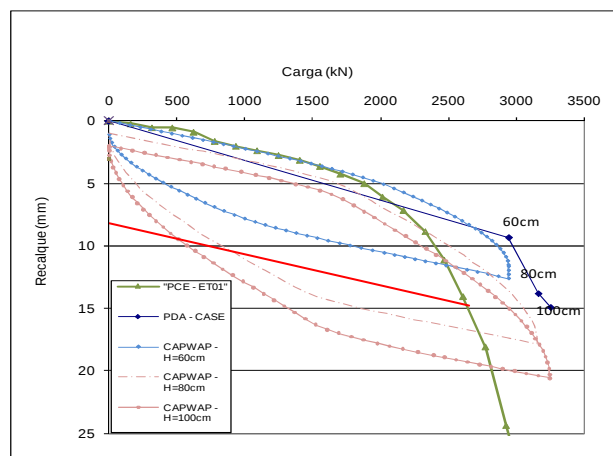


Figura 8. Evolução da curva carga-recalque com o golpe aplicado, comparando a estaca ET01 (PCE) e a estaca PC23B (ECD).

A figura 9 ilustra a variação da força axial em profundidade para cada um dos golpes analisados. Nota-se as curvas são paralelas indicando que houve esgotamento do atrito lateral desde o golpe de altura de queda de

60cm. A partir deste ponto todo acréscimo de carga é exclusivamente devido ao acréscimo de carga de ponta.

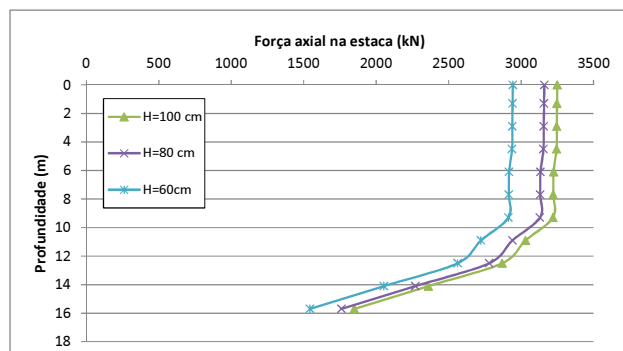


Figura 9. Variação da força axial em profundidade na estaca PC23B (ECD).

A tabela 2 indica os valores de MQ_{WU} e MQ_R obtidos nas análises.

Tabela 2. Valores de MQ_{WU} e MQ_R obtidos nas análises (estaca PC23B).

H (cm)	RMX (kN)	MQ_{WU}	MQ_R	Jc
60	2943	3,24	205	0,66
80	3160	1,71	143	0,59
100	3250	1,74	179	0,56

A figura 10 ilustra o comportamento do atrito lateral para cada profundidade. Percebe-se que para valores de deslocamentos maiores que o quake do fuste ocorre o esgotamento do atrito lateral.

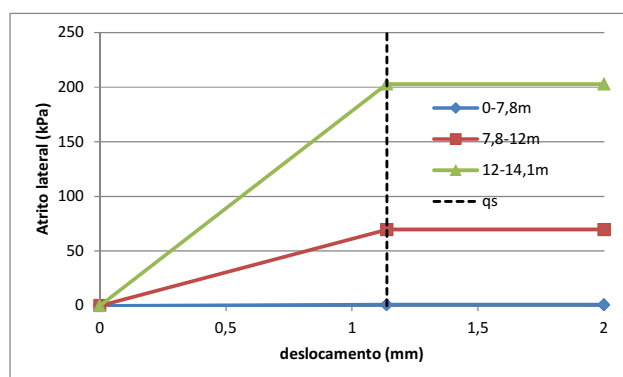


Figura 10. Comportamento do atrito lateral (estaca PC23B).

A figura 11 ilustra o comportamento da ponta da estaca. Percebe-se que os resultados obtidos nas análises CAPWAP para cada golpe estão próximos do modelo elasto-plástico ideal,

apresentando boa definição do parâmetro R da Relação de Cambeftort.

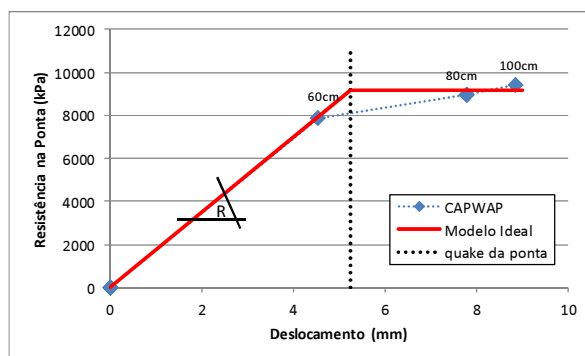


Figura 11. Comportamento do atrito lateral (estaca PC23B).

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 x tempo registrado apresente diferenças entre os dois transdutores de deformação. Consequentemente pode haver diferenças no formato da curva “Wave Up” em golpes consecutivos, apresentando uma “falsa” aparência de mudança na distribuição do atrito lateral.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

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

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

O procedimento consiste na determinação do quake do fuste da estaca através da comparação com a curva carga-recalque da prova de carga estática. Este trecho inicial da curva é fortemente influenciado pelo quake do fuste da estaca. Os valores sugeridos pelo manual do CAPWAP (2006) variam entre 1,0mm e 7,5mm.

O conceito de “Match Quality de Recalques” (MQ_R) permitiu 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 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 (“Match Quality” da curva “Wave Up”) assim como no sentido físico (MQ_R).

A curva da simulação de prova de carga estática do CAPWAP obtida através do procedimento proposto por Murakami (2015) apresentou melhor aproximação com a curva carga-recalque da prova de carga estática. Apresentou também boa correlação com a carga de ruptura segundo o critério de Davisson (desvio de +14,1%), enquanto que a comparação direta da carga máxima obtida no CAPWAP o desvio foi de apenas +0,3%.

A utilização de quakes do fuste menores que o valor utilizado (1,138mm) aproximaria a curva do CAPWAP da curva da PCE, porém o MQ_{WU} pioraria. Isso significa que o provável valor do quake do fuste é o valor utilizado (1,138mm).

Verificou-se que, na obra em questão com condições geotécnicas peculiares, houve influência das concreções de limonita no formato da curva “Wave Up” que por sua vez influenciou a condução do operador do CAPWAP nos dados de entrada utilizados na análise. Foi utilizado “Plug on Shaft” (massa de solo ao redor do fuste) na análise em função da ocorrência de concreções de limonita em profundidades diversas. Este material, aderido ao fuste da estaca, causou aumento localizado na curva “Wave Up”, justificando o uso de “Plug on Shaft” em estacas pré-moldadas.

As demais análises no golpe de altura de queda de 100cm com diferentes valores de quake do fuste que não utilizaram “Plug on Shaft” apresentaram valor de “Match Quality” da curva “Wave Up” maior quando comparado com a solução obtida através do procedimento proposto por Murakami (2015), indicando que a solução obtida através deste procedimento

apresentou melhor solução matemática da equação da onda (MQ_{WU}), além de apresentar melhor solução física, medida através da relação carga-recalque (MQ_R).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à construtora responsável pela obra pelo fornecimento dos dados necessários para a elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Aoki, N. (1989). A new dynamic load test concept.; Drivability of piles (1): 1-4, Proc. Discussion Session 14, *Int. Conf. Soil Mech. And Found. Eng.* (12), Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2010) NBR 6122 Projeto e Execução de Fundações, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2006) NBR 12131; Estacas – Prova de carga estática – Método de ensaio, Rio de Janeiro.
- Fellenius, B. H. (1988). Variation of CAPWAP results as a function of the operator; *Proceedings of the Third international conference on the application of stress-Theory to Piles*, Otawwa, pp.814-825.
- Giacheti, H. L.; Rohm, S. A.; Nogueira, J. B.; Cintra, J. C. A. (1993). Propriedades Geotécnicas do Sedimento Cenozóico. *Solos do Interior de São Paulo, Mesa Redonda*, AMBS.
- Murakami, D. K.; Massad, F.. (2014). Determinação do quake do fuste de estacas pré-moldadas através de provas de carga estática e ensaios de carregamento dinâmico. *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Goiânia.
- Murakami, D. K. (2015). *Novo procedimento para realização de análise CAPWAP no ensaio de carregamento dinâmico em estacas pré-moldadas*. Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo.
- Murakami, D. K.; Cabette, J. F.; Rodriguez, T. G.; Miranda Junior, G. (2016). Cravação de Estacas em Solos com Concreções de Limonita. *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Belo Horizonte.
- Pile Dynamics, Inc. (2006). *CAPWAP Manual*. Cleveland, Ohio.
- Pile Dynamics, Inc. (2009). *PDA-W Manual*. Cleveland, Ohio.
- Rausche, F.; Likins, G. E.; Globe, G. G. (1994). A rational and usable wave equation soil model based on field test correlation. *International conference on design and construction on deep foundations*, Vol. 2, Orlando, Fl; pp.1118-1132, 1994..