

ANÁLISE COMPARATIVA DE ENSAIO DE CARREGAMENTO DINÂMICO EM ESTACA METÁLICA IMEDIATAMENTE CRAVADA E COM 21 DIAS DE REPOUSO

Glauco Guidi de Souza- Engenheiro Geotécnico da Moretti Engenharia Consultiva Ltda,
glauco@morettiengenharia.com.br

Fabian Corgnier- Engenheiro Geotécnico e Diretor Técnico da Moretti Engenharia Consultiva Ltda,
fabian@morettiengenharia.com.br

Geraldo Vanzolini Moretti- Engenheiro Geotécnico e Diretor Técnico da Moretti Engenharia Consultiva Ltda, Mestrando em Geotecnia pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp),
geraldo@morettiengenharia.com.br

Atilio Oliveira Moretti- Engenheiro Geotécnico e Diretor da Moretti Engenharia Consultiva Ltda,
atilio@morettiengenharia.com.br

RESUMO

O presente trabalho apresenta a comparação dos resultados de dois ensaios de carregamento dinâmico, executados em estacas metálicas perfil “I” pertencentes à fundação de um edifício residencial da grande São Paulo, um realizado imediatamente após a cravação e o outro com vinte e um dias de repouso, em solo com predominância de material silte arenoso. A análise comparativa dos resultados aborda os fatores que podem influenciar o comportamento do conjunto estaca-solo ao longo do tempo. Expõem-se fatores que podem explicar o aumento da resistência de estacas, fundamentalmente da resistência por atrito lateral em função do tempo.

Palavras chave: Estaca metálica, ensaio de carregamento dinâmico, fator de set up.

ABSTRACT

This paper presents the results between two dynamic loading tests, executed on “I” shaped steel piles belonging to the foundation of a residential building in Sao Paulo, one was performed immediately after driving and the other one was performed twenty one days after driving, on soil with predominance of sandy silt material. The comparative analysis focuses on the factors that can influence the behavior of the whole pile-soil over the time. Presents the factors which can explain the increase of resistance on piles, essentially due the lateral frictional resistance as a function of time.

Keywords: Steel pile, dynamic load test, set up factor.

1. OBJETIVO

Este trabalho consiste em apresentar os resultados obtidos nas análises CAPWAP em ensaios de carregamento dinâmico, realizados em duas estacas metálicas perfil “I”, de mesma área transversal e mesmo comprimento (24m), cravadas em solo de predominância siltosa, pertencentes à fundação de um edifício residencial situado na região metropolitana de São Paulo. É apresentada uma discussão sobre os fatores de ganho de carga observados nas estacas em questão.

2. INTRODUÇÃO

Em muitos solos, a capacidade de carga de uma estaca muda continuamente em relação ao tempo devido a efeitos diversos, mas principalmente aos conhecidos como set up (cicatrização) ou relaxação. O set up é caracterizado pelo efeito de ganho de capacidade de carga de uma estaca em relação ao tempo, e a relaxação é o efeito contrário, a perda desta capacidade de carga. É um fenômeno de grande importância apresentado por diferentes tipos de solos, que pode influenciar significativamente a capacidade de carga de uma estaca, principalmente se cravada. Segundo Niyama (1996), o “fator de setup” geralmente é aplicado apenas à parcela de atrito lateral, pois a parcela da resistência da ponta não é afetada significativamente por este fenômeno. Assim, pode-se considerar essencial se estabelecer um período de repouso após a cravação ou

execução da estaca, antes de um ensaio comprobatório de sua capacidade de carga.

Esse aspecto, dentre outros que serão abordados por este trabalho, pode ser analisado a partir dos resultados de capacidade de carga de 2 estacas cravadas em condições semelhantes, submetidas a ensaios de carregamento dinâmico (ECD) com tempos distintos.

O controle de qualidade de fundações profundas no Brasil é padronizado pela NBR 6122/2010. Esta norma preconiza a execução de provas de carga estática para obtenção da capacidade de carga e a possibilidade da realização de ECD para a comprovação de desempenho de uma estaca. O ensaio deve ser conduzido a partir das recomendações da NBR 13208/2007, podendo ser realizado com um equipamento específico para este fim, o analisador de cravação de estacas (Pile Driving Analyser – PDA).

Tradicionalmente a capacidade de carga das estacas é verificada através de prova de carga estática, mas devido a questões econômicas e aos prazos de execução das obras, em muitos países, o ECD tem substituído e complementado esta atividade (Gouveia, 2009).

No Brasil, o ensaio de carregamento dinâmico foi introduzido inicialmente para o controle da cravação das estacas das plataformas marítimas da Petrobrás, no início da década de 1980. Posteriormente, a partir de 1983, passou a ser utilizado em obras de fundação em terra (Niyama *et al*, 1996).

2.1. PDA

A realização do ECD consiste na instalação de, no mínimo, quatro sensores, sendo dois transdutores de força e dois transdutores de aceleração, diametralmente opostos em relação à estaca e, no caso de estacas metálicas, instalados como recomenda a NBR13208/2007.

O PDA surgiu a partir do resultado de pesquisas iniciadas em 1964 na Case Western Reserve University, em Cleveland, Ohio, sob a direção do Dr. G. G. Goble (Likins, 2000). É um hardware capaz de receber e amplificar sinais de força e aceleração de sensores especialmente desenvolvidos para sua utilização, que inicialmente enviam um sinal de calibração (garantindo a qualidade dos dados enviados), para posteriormente enviar os sinais obtidos nos golpes. Através da aplicação da teoria da equação da onda, o PDA fornece, a cada golpe, carga mobilizada, máxima tensão de tração e compressão, deslocamento máximo da estaca, energia máxima transferida pelo golpe, ocorrência de dano em uma região da estaca (indicando sua gravidade e profundidade), entre outras informações.

Após a conexão do PDA aos sensores, neste caso via radio (transmissão *wireless*), são desferidos golpes de um martelo (bate-estacas) à estaca, controlando-se a energia do impacto, através de diferentes alturas de queda do martelo.

Para que seja mobilizada toda a resistência disponível no sistema interativo solo-estaca, é necessário que seja transferida determinada energia pelo martelo à estaca. Quando se aplica uma energia baixa, não ocorre uma penetração suficiente da estaca no solo, não havendo mobilização total do “quake” (máximo deslocamento elástico do solo) na ponta da estaca, subestimando-se a resistência mobilizada.

2.2. CAPWAP

Os dados dos golpes armazenados no PDA são posteriormente enviados a outro computador e então é realizada uma análise numérica através de um software específico, CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program). O CAPWAP é uma rigorosa análise computacional que utiliza os sinais obtidos em campo e, interativamente, seu operador determina fatores desconhecidos do solo por um sinal correspondente (Likins, 1996).

O software CAPWAP é responsável pelo cálculo da máxima carga mobilizada por golpe analisado, parcelas de atrito lateral ao longo do fuste em profundidades que podem ser modificadas, parcela de resistência de ponta, cálculo de nega, fatores de amortecimento do solo, modelagem de mudanças de seção transversal (modelando também trincas e emendas) em toda extensão da estaca, além da possibilidade de elaboração da curva carga x recalque.

2.3. Dados da obra

Trata-se de duas estacas metálicas cravadas para a fundação de um edifício residencial a ser construído na área metropolitana de São Paulo.

Através das sondagens a percussão realizadas no local, pode-se verificar que o subsolo é constituído de uma camada superficial de aterro de silte arenoso, argiloso, fofo, de 1,7m de profundidade. Abaixo, observa-se uma camada de silte arenoso, pouco argiloso, fofo a medianamente compacto, de 19,3m de

profundidade. Subjacente a esta, encontra-se uma camada de solo residual, constituída por silte muito arenoso, pouco argiloso, medianamente compacto, de 1,7m de profundidade. Abaixo uma camada de solo residual com fragmentos de rocha composta de silte muito arenoso, pouco argiloso, compacto, de profundidade não determinada. O nível da água foi observado a 19,7m de profundidade.

Não foram realizadas sondagens individuais para cada estaca. Na figura abaixo consta a sondagem mais próxima das duas estacas em estudo (sondagem de referência).

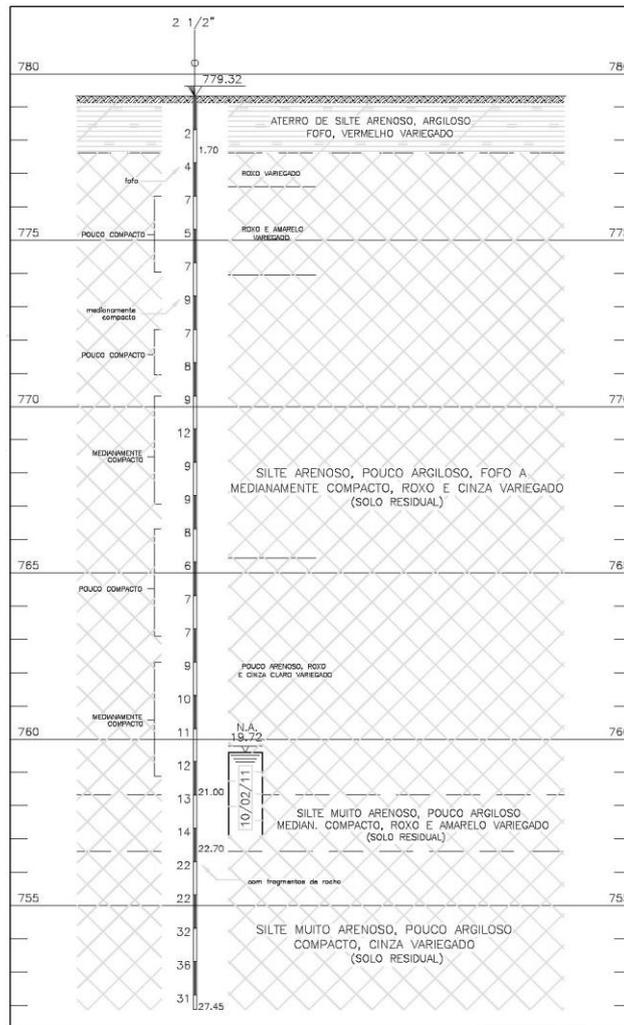


Figura 1. Sondagem de referência

2.4. Dados das estacas

As duas estacas de aço, perfil HP 310x79 (“I”), foram cravadas com aproximadamente 15m de distância. As tabelas abaixo apresentam as principais características das mesmas, que foram utilizadas nas análises CAPWAP.

Tabela 1. Dados das estacas

Estaca	Altura (mm)	Largura (mm)	E (tons/cm ²)	ρ (tons/m ³)	Perímetro (mm)	A (cm ²)	L (m)
E75	299	306	2109,22	7,8811	1780	100	24
E97	299	306	2109,22	7,8811	1780	100	24

Tabela 2. Dados da cravação das estacas

Estaca	Dias entre cravação e ensaio	Comprimento cravado (m)	Distancia abaixo dos sensores (m)
E75	0	22,5	23,35
E97	21	22,5	23,35

A estaca E75 foi submetida ao ensaio de carregamento dinâmico imediatamente após o final da cravação e a estaca E97 foi submetida 21 dias após ter sido cravada. Foi considerado o efeito de embuchamento na ponta da estaca, sendo considerada a área da ponta na análise CAPWAP igual a 914,94cm².

2.5. Sistema de cravação

Tanto para cravação como para realização dos ensaios foi utilizado o mesmo martelo, acoplado externamente à torre (balancim ou mochila). No primeiro ensaio o cepo era constituído de chapas de madeira compensada, no segundo apenas uma chapa de compensado e dimensões similares a do capacete. O capacete, de aço, se encaixava na extremidade do perfil com pouca folga (feito especificamente para este tipo de perfil). As figuras abaixo ilustram o sistema de percussão utilizado.

Tabela 3. Dados do sistema de cravação

Tipo de martelo	Massa do martelo (kg)	Dimensões do capacete (mm)	Massa do capacete (kg)	Espessura do cepo (mm)	Coxim
Queda livre	2540	460x480x460	≈ 100	50 e 20	não



Figura 2. Martelo utilizado



Figura 3. Capacete e estaca

2.6. Previsão de capacidade de carga em estacas

Uma formulação geralmente aceita por diferentes pesquisadores, desenvolvida por Skov e Denver (1988) *apud* Rausche (2009) cita que o aumento de capacidade de carga em uma estaca devido ao efeito set up pode ser obtido em função do tempo, através da seguinte equação:

$$Q(t_w) = Q_0 \left[1 + A \cdot \log_{10} \left(\frac{t_w}{t_0} \right) \right] \quad (1)$$

Onde A é um coeficiente adimensional empírico, função do tipo de solo, denominado fator de Denver e Skov (Paraíso *et al*, 2010), t_w mede um tempo de referência escolhido adequadamente e t_0 é o tempo em que se atinge a capacidade de carga Q_0 (capacidade de referência). De acordo com Skov *et al* (1988) *apud* Augustesen (2006), convém utilizar Q_0 para o período em que $t_0 = 1$ dia.

Paraíso (2010) propõe a seguinte tabela para a classificação de um solo a partir do coeficiente A:

Tabela 4. Tipo de solo – Fator A (médio).

Tipo de solo	Fator A (médio)
Argila siltosa média a rija	0,512
Silte arenoso	0,224
Silte argiloso	0,221
Areia siltosa	0,154
Argila siltosa muito mole	0,139

Segundo Lowery (1993), um “fator de set up” pode ser relacionado a um solo qualquer. Este valor consiste na divisão do valor de capacidade de carga correspondente ao ensaio de uma recravação pelo de uma cravação, podendo ser expresso em %. Niyama (1996) menciona que em muitos casos de solos coesivos observa-se a recuperação da resistência, com “fatores de set up” da ordem de 2,2 a pouco mais de 3 (observados na região de Santos).

2.7. Fatores de influência

Alguns fatores podem influenciar a interpretação dos resultados aqui apresentados, principalmente em relação ao ganho de resistência verificado e suas possíveis justificativas.

A aplicação de uma energia do martelo suficiente para mobilizar toda a resistência disponível no sistema solo-estaca é o fator mais importante na avaliação da capacidade de carga de uma estaca através do ECD. Esta energia está relacionada com a nega, que se for muito aberta ocasiona a perda do fator *setup* e se for muito fechada não mobiliza parcelas de atrito lateral mais profundas (Rausche, 1996). Há ainda que se separar convenientemente as parcelas correspondentes ao atrito lateral e à resistência de ponta.

O “efeito de embuchamento” (solo que adere a uma superfície na ponta da estaca) é uma ocorrência típica em estacas cravadas de concreto e seção vazada. Uma estaca metálica, mesmo não apresentando seção vazada, pode proporcionar a ocorrência de uma bucha de solo circunvizinha a sua geometria. Ao serem cravadas mais profundas no solo, e em camadas mais resistentes, acabam por arrastar, por aderência, uma parcela de solo junto ao seu fuste. Se tratando da comparação de resultados entre duas estacas distintas, apesar de similares, devem ser levadas em consideração eventuais diferenças no “embuchamento”.

Pequenas variações na seção transversal das estacas, assim como a rugosidade de sua superfície, desvios de cravação, drapejamento e consequências associadas, variações locais na constituição do subsolo, mesmo que com efeitos menos significativos, podem influenciar a interpretação das causas de alterações de resistência ao longo do tempo.

3. Resultados dos ensaios

Os resultados obtidos nos dois ensaios encontram-se na tabela a seguir. O ensaio da estaca E75 ocorreu imediatamente após sua cravação.

Tabela 5. Resistências obtidas nos golpes

	E75	E97
Resistência máxima mobilizada	195,3 tf	264.4 tf
Resistência de atrito lateral	116,0 tf	234.4 tf
Resistência de ponta	79,3 tf	30,0 tf

Tabela 6. Porcentagens das resistências de ponta e atrito lateral

Estaca	% de atrito lateral	% de resistência de ponta
E75 (2,5m)	59,39 %	40,61 %
E97 (2,5m)	88,65 %	11,35 %

Tabela 7. Dados obtidos nas análises CAPWAP

	E75	E97
Nega obtida em campo	3,0 mm	1,00 mm
Nega aferida pelo CAPWAP	2,58 mm	0,73 mm
Energia transferida calculada	3,31 tf.m	4,16 tf.m
Rendimento do martelo	52,28 %	65,51 %
Tensão de compressão máxima	224,2 MPa	241,2 MPa
Tensão de tração máxima	27,1 MPa	44,3 MPa

O ensaio fornece em campo uma capacidade de carga, que posteriormente é confirmada pela análise CAPWAP.

3.1. Comparação do atrito lateral com valores Nspt

As seguintes figuras apresentam a distribuição do atrito lateral. Uma comparação com os valores Nspt é apresentada para cada caso.

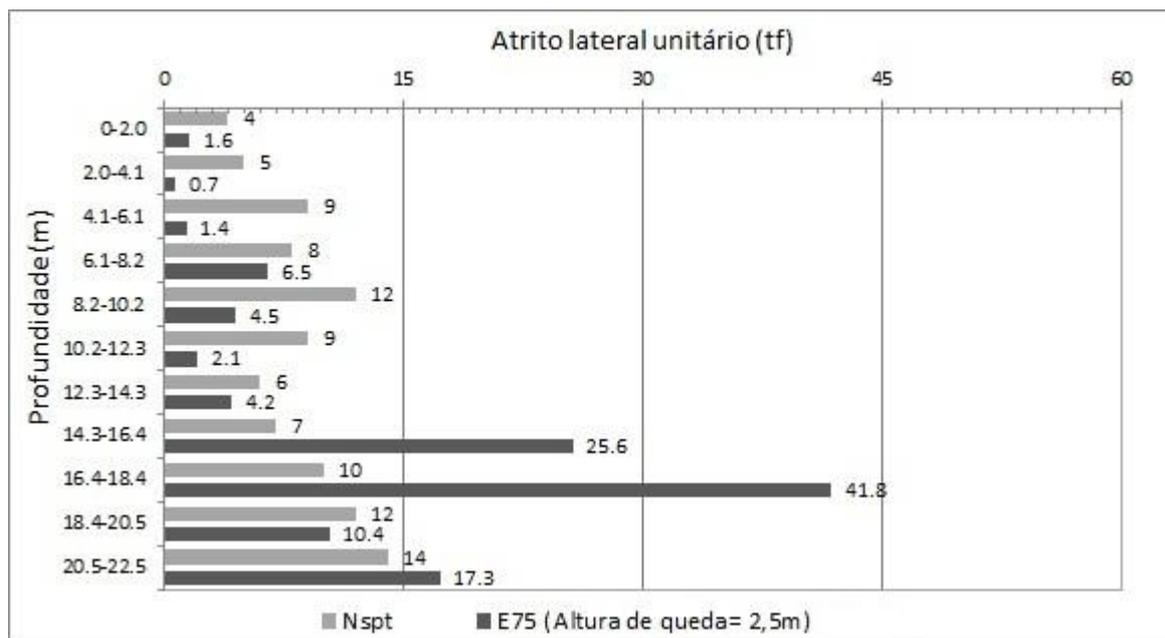


Figura 4. Nspt x Atrito da camada – E75 (E= 3,31 tf.m)

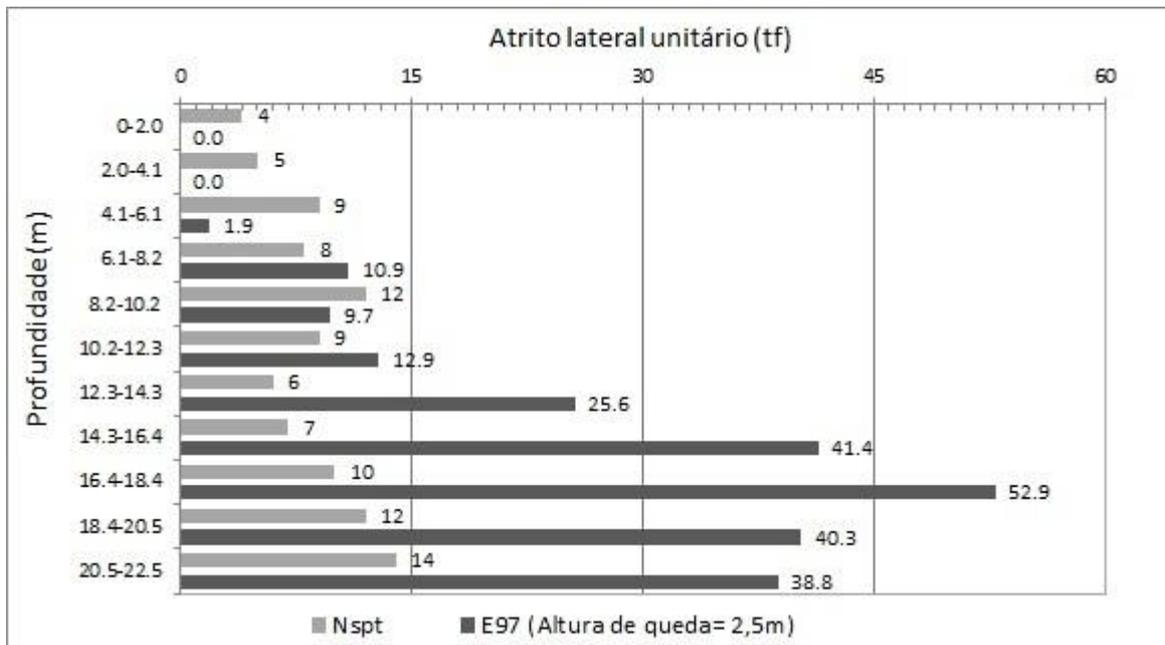


Figura 5. Nspt x Atrito da camada – E97 (E= 4,16 tf.m)

3.2. Capacidade de carga ao longo do fuste e curva carga x recalque obtida pelo PDA

A seguinte figura apresenta os valores de adesão para cada parcela do fuste da estaca, obtidos dos golpes com altura de queda igual a 2,5m.

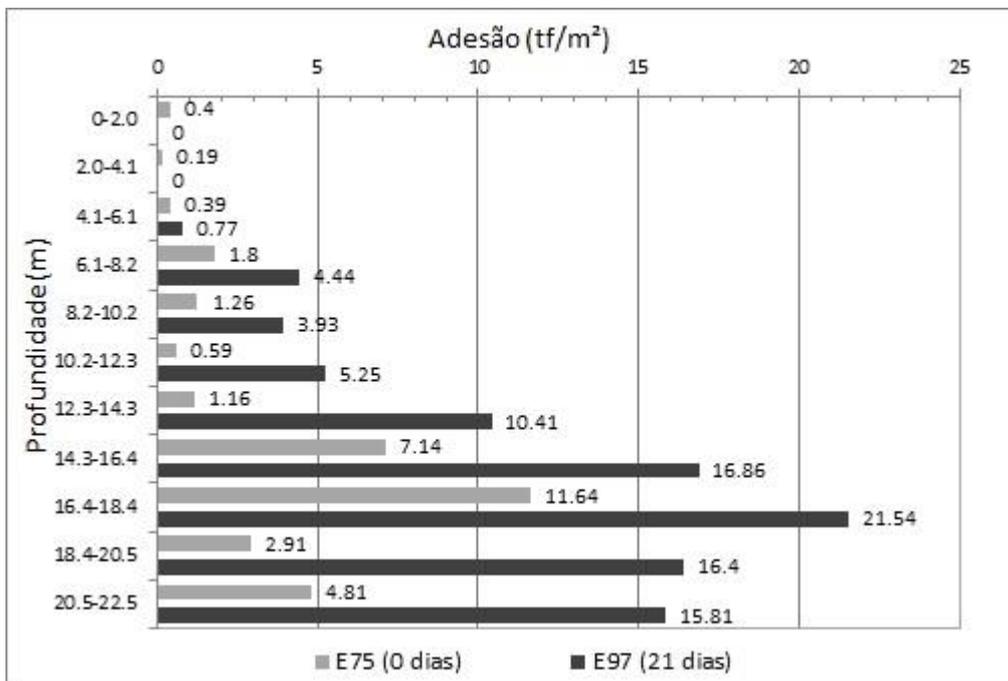


Figura 6. Adesão ao longo do fuste

As figuras abaixo representam a simulação de prova de carga estática que o PDA realiza, para cada golpe ensaiado. A linha pontilhada representa a ponta da estaca e a linha contínua o topo. R_u é a máxima carga mobilizada no golpe, R_s é a carga mobilizada pelo fuste, R_b pela ponta.

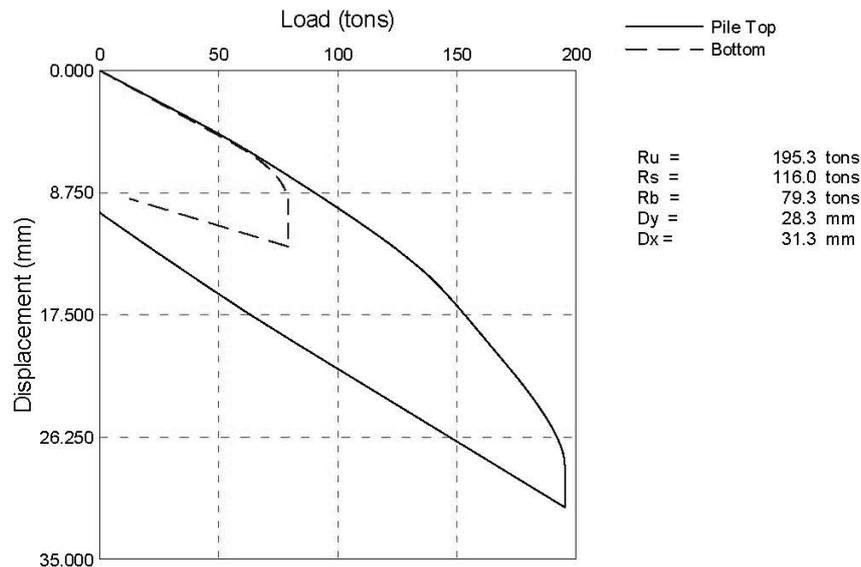


Figura 7. Curva carga x recalque realizada pelo CAPWAP – E75 (E= 3,31 tf.m)

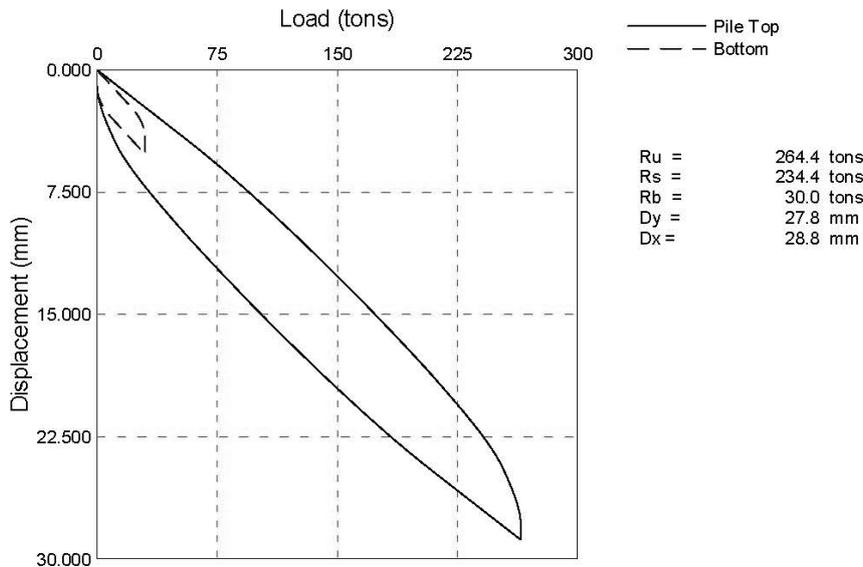


Figura 8. Curva carga x recalque realizada pelo CAPWAP – E97 (E= 4,16 tf.m)

3.3. “Fator de set up” e aumento da capacidade de carga devido ao “set up”

Para estimativa do “fator de set up” para o solo estudado, convém que o cálculo seja realizado em golpes de mesma energia transferida (ou muito próxima). Foram utilizados os golpes com energia transferida muito próxima (3,31tf.m e 4,16tf.m), o que permite minimizar a influência dessa variável. Dessa forma, o “fator de set up” obtido para este solo foi 1,354 ou 35,4%.

Através da equação proposta por Skov e Denver é possível obter o seguinte coeficiente A: $Q_t=264,4\text{tf}$; $Q_0= 195,3\text{tf}$; $t_w= 21$ dias e $t_0= 1$ dia, portanto $A= 0,268$. De acordo com a tabela 4, a classificação do solo mais próxima deste valor é silte arenoso.

4. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados sugerem a ocorrência de aumento da resistência da estaca ao longo do tempo, após a cravação, principalmente para a parcela da resistência associada ao atrito lateral. É de se supor que esse ganho seja todo ou parcialmente decorrente da cicatrização do solo em contato com as superfícies externas da estaca, efeito usualmente denominado de “efeito set up”.

Como pode-se observar na figura 6, obtiveram-se valores de adesão na estaca E97 superiores aos da estaca E75, praticamente ao longo de toda a profundidade. Com os dados obtidos foi possível obter um fator

de Denver e Skov $A=0,268$, valor que caracteriza o solo como silte arenoso, mesmo material detectado através da sondagem SPT.

Ressalta-se, no entanto, que a interpretação desses resultados deve estar amparada numa criteriosa análise dos fatores que podem influenciar a determinação da capacidade de carga (fatores relacionados ao ensaio de carregamento dinâmico como, por exemplo, a energia aplicada) e a resistência em si (fatores como variações localizadas do subsolo).

Finalmente, vale comentar que não foi possível executar os ensaios em uma mesma estaca, em tempos diferentes, o que é condição ideal para realização de análises deste gênero. Entretanto, os resultados, considerando-se a proximidade e os demais aspectos em que as estacas são praticamente idênticas, possibilitam uma ilustração interessante do fenômeno de ganho de resistência com o tempo, especialmente se forem ponderadas as ressalvas aqui expostas.

5. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – NBR 6122/2010; **Projeto e Execução de Fundações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 91p
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – NBR 13208/2007; **Estacas – Ensaio de Carregamento Dinâmico**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 12p
- AUGUSTESEN, A. H.; ANDERSEN, L.; SORENSEN, C. S. **Assessment of Time Functions for Piles Driven in Clay**. DCE Technical Memorandum No. 1. Aalborg, 2006, Dinamarca.
- GOUVEIA, J. J. P.; SANTOS, J. A.; CORREIA, A. G.; NOGUEIRA, S. T. **Interpretação do Ensaio de Carga Dinâmico em Estacas Através de Análises Tipo CAPWAP**. Congresso Nacional de Geotecnia, Prospecção e Caracterização de Maciços e Materiais Geotécnicos. Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Aveiro, 2009, Portugal. vol.1. p.239-248.
- GONÇALVES, C.; BERNARDES, G. P.; NEVES, L. F. S. **Estacas Pré-Fabricadas de Concreto – Teoria e Prática**. Cap. 11: Embuchamento, Tamponamento e Inserção de Ponteiros Metálicos na Ponta de Estacas Vazadas. Ed. Copyright, 2007 by Gonçalves, C.; Bernardes, G. P.; Neves, L. F. S.
- LIKINS, G.; RAUSCHE, F.; GOBLE, G. G. **High Strain Dynamic Pile Testing, Equipment and Practice**. Proceedings, sixth international conference on the application of stress-wave theory to piles. São Paulo, 2000, Brasil.
- LIKINS, G.; RAUSCHE, F.; THENDEAN, G.; SVINKIN, M. **CAPWAP Correlation Studies**, Proceedings, Fifth International Conference On The Application Of Stress Wave Theory To Piles, 1996, Orlando, Florida, USA. p. 447 – 464.
- LOWERY, L. L. **Pile Driving Analysis By The Wave Equation**, 1993, Texas, USA.
- NIYAMA, S.; AOKI, N.; CHAMECKI, P. R. **Fundações, Teoria e Prática**. Cap. 20: Verificação de desempenho. Ed. Pini, 1ª Ed., 1996, São Paulo, São Paulo, Brasil. P. 723 – 751.
- PARAÍSO, S. C.; COSTA, M. C. C. **A Eficácia do Ensaio de Carregamento Dinâmico na Avaliação do Efeito “Setup” em Estacas Cravadas**. Cobramseg 2010: Engenharia Geotécnica Para o Desenvolvimento, Inovação e Sustentabilidade. 2010 ABMS, Brasil.
- RAUSCHE, F.; NAGY, M.; WEBSTER, S.; LIANSG, L. **CAPWAP And Refined Wave Equation Analyses For Driveability Predictions And Capacity Assessment Of Offshore Pile Installations**. Proceedings Of The ASME 28TH International Conference On Ocean, Offshore And Arctic Engineering: 31 de Maio de 2009, Honolulu, Hawaii, USA.
- RAUSCHE, F.; LIKINS, G.; HUSSEIN, M. H. **Analysis of Post-Installation Dynamic Load Test Data for Capacity Evaluation of Deep Foundations**. Proceedings of From Research to Practice in Geotechnical Engineering Congress, New Orleans, LA, USA, 2008. p.312-330.