

## Análise de resultados através de duas provas de carga estática cíclicas e treze ensaios dinâmicos em estaca tubada metálica de 1,0 m de diâmetro

Daniel Kina Murakami

Teknier Engenharia e Tecnologia, São Paulo, Brasil, [daniel@tekniere.com.br](mailto:daniel@tekniere.com.br)

Dirney Cury Filho

Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, [dirney.cury@gmail.com](mailto:dirney.cury@gmail.com)

Fabian Corgnier

Teknier Engenharia e Tecnologia, São Paulo, Brasil, [fabian@tekniere.com.br](mailto:fabian@tekniere.com.br)

André Filipe Pereira da Silva

Teknier Engenharia e Tecnologia, São Paulo, Brasil, [andre@tekniere.com.br](mailto:andre@tekniere.com.br)

David de Carvalho

Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, [d33c@uol.com.br](mailto:d33c@uol.com.br)

**RESUMO:** Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise dos resultados obtidos através de duas provas de carga estáticas (PCE) cíclicas do tipo lento em estaca tubada de ponta aberta, com diâmetro de 1,0m e dimensionada para carga de trabalho de 370 tf. Também foram analisados treze ensaios dinâmicos (ECD) em estaca tubada de ponta aberta, com diâmetro de 0,81m e 1,0m, dimensionada para cargas de trabalho de 300 tf e 370tf respectivamente. As estacas possuem em torno de 40m de profundidade, sendo 30m cravados com martelo vibratório e 10 m com a utilização de martelo hidráulico com peso nominal de 14 tf até que se atingisse nega prevista em projeto. Trata-se de uma obra portuária "offshore" localizada na cidade de Itapoá, SC.

**ABSTRACT:** This paper aims to present an analysis of the results of two cyclic static load tests (SLT) in open-end steel pipe piles. The pile diameter was 1.0m and the design load was 370 tons. The SLT was performed according to the slow maintained load specifications. Also, thirteen high strain dynamic pile tests (HSDPT) were performed in open-end steel pipe piles. The pile diameters were 0.81m and 1.0m, designed for loads of 300 tons and 370 tons, respectively. The pile length was approximately 40m. In the first 30m the piles were driven by a vibratory hammer and the final 10m the piles were driven by a 14 tons hydraulic hammer until the predicted blow count was observed. The project site is an expansion work of a seaport located in Itapoá city, SC, Brazil.

**PALAVRAS-CHAVE:** Prova de Carga Estática Cíclica, Ensaio de Carregamento Dinâmico, Estaca Tubada Metálica, Cravação de Estacas "Offshore", efeito "set up", atrito lateral.

## 1 Introdução

As fundações fazem parte da ampliação de uma obra portuária localizada em Itapoá, SC. Trata-se de uma obra “offshore” onde as estacas tubadas metálicas de ponta aberta foram cravadas com martelo vibratório até aproximadamente 30 m de profundidade, posteriormente as estacas foram cravadas com martelo hidráulico de 14 tf até que obtivesse a nega estipulada em projeto. O comprimento total das estacas foi da ordem 40m.

O projeto previa a execução de estacas de 1,0 m e 0,81 m de diâmetro, ambas com espessura de parede de 9,5 mm.

Na região da cravação das estacas as sondagens apresentaram espessura de lamina d’água de aproximadamente 18 m, seguida de intercalações entre camadas de argila siltosa muito mole à média e areia argilosa fofa à compacta até aproximadamente 30 m de profundidade. Subjacente a estas camadas as sondagens detectaram a presença de uma camada de argila arenosa dura até aproximadamente 39 m de profundidade, seguida de uma camada de areia siltosa compacta à muito compacta até o limite do ensaio de 56 m de profundidade. A figura 1 ilustra o perfil geotécnico da região onde as estacas foram cravadas.

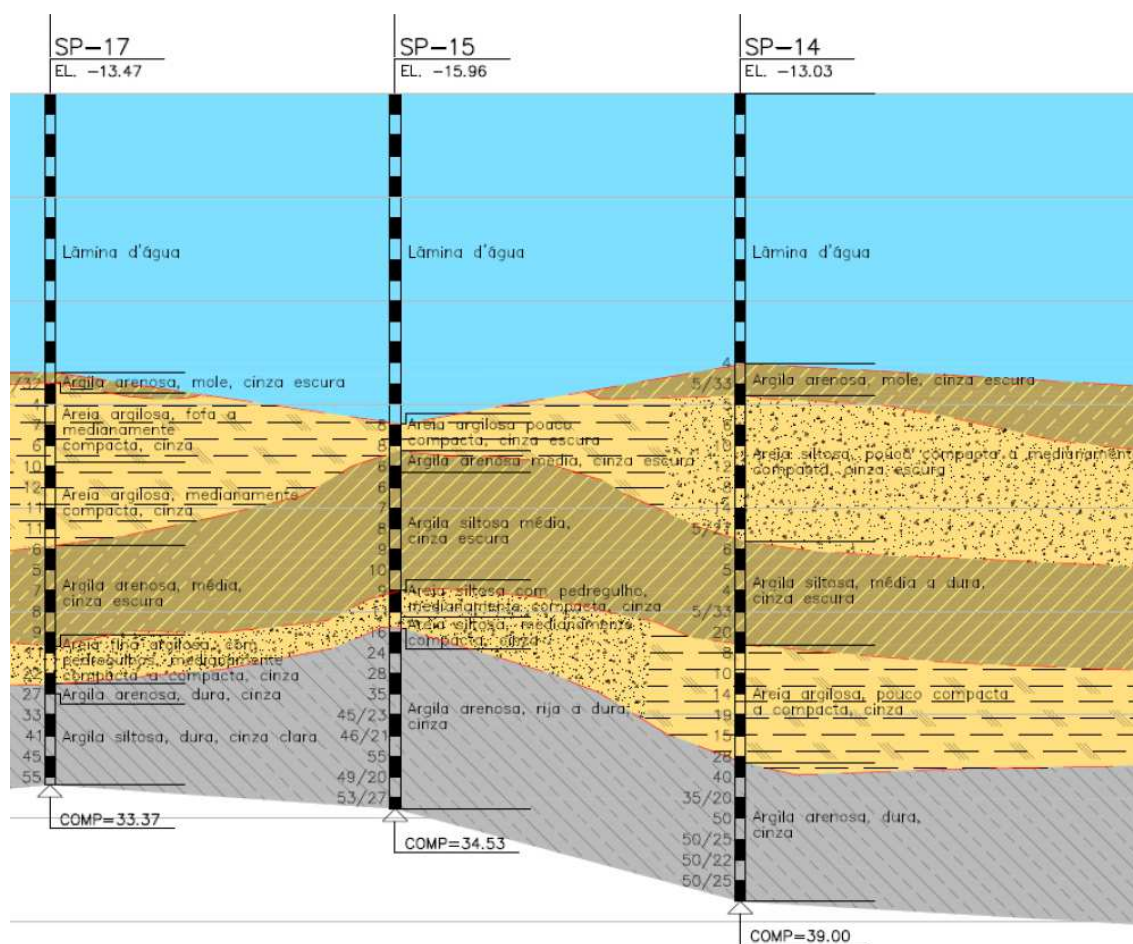


Figura 1. Perfil geotécnico da região onde as estacas foram cravadas.

Os ensaios realizados nas estacas foram:

1 - Treze ensaios de carregamento dinâmico com energia crescente, realizados no final da cravação e recravação.

2 - Duas provas de carga estática tipo lenta feitas em dois ciclos. Sendo que em uma dessas estacas também foi realizado ECD. O primeiro ciclo das provas foram realizados em cinco estágios de carregamento até 370 tf e o segundo ciclo foram feitos oito estágios de carregamento até 592tf. Murakami et al (2018) apresentaram em seu artigo a comparação entre ensaio dinâmico e prova de carga estática nesta estaca.

## 2 Revisão Bibliográfica

Diversos autores já apresentaram correlações entre prova de carga estática e ensaio de carregamento dinâmico, podendo ser citados Rausche et al (1972), Likins e Makredes (1982), Fellenius et al (1989), Niyama e Aoki (1991), Likins et al (1996), Likins et al (2004), Murakami (2015), Murakami et al (2016), entre outros.

Para uma boa correlação é fundamental que os testes sejam bem executados e que atinjam a ruptura segundo algum critério, como o apresentado por Davisson (1972), por exemplo, além de levar em conta o intervalo de tempo entre a execução da PCE e do ECD, face ao efeito “set up” (Murakami, 2015).

O Método de Davisson (1972) estabelece um limite de capacidade de carga definido como a carga associada ao recalque correspondente à compressão elástica da estaca como se fosse um pilar, somado ao valor de 4 mm e o diâmetro da estaca (em mm) dividido por 120.

Nos casos onde a curva carga-recalque não atinge o Método de Davisson (1972) original, Murakami (2015) propõe o uso do Método de Davisson Modificado que consiste em traçar uma reta paralela à reta do Método original, passando pelo recalque máximo da curva carga-recalque. Quando se dispõe de curvas de diferentes tipos de ensaios, deve-se tomar o menor valor dos recalques máximos, conforme indicado na Figura 1:

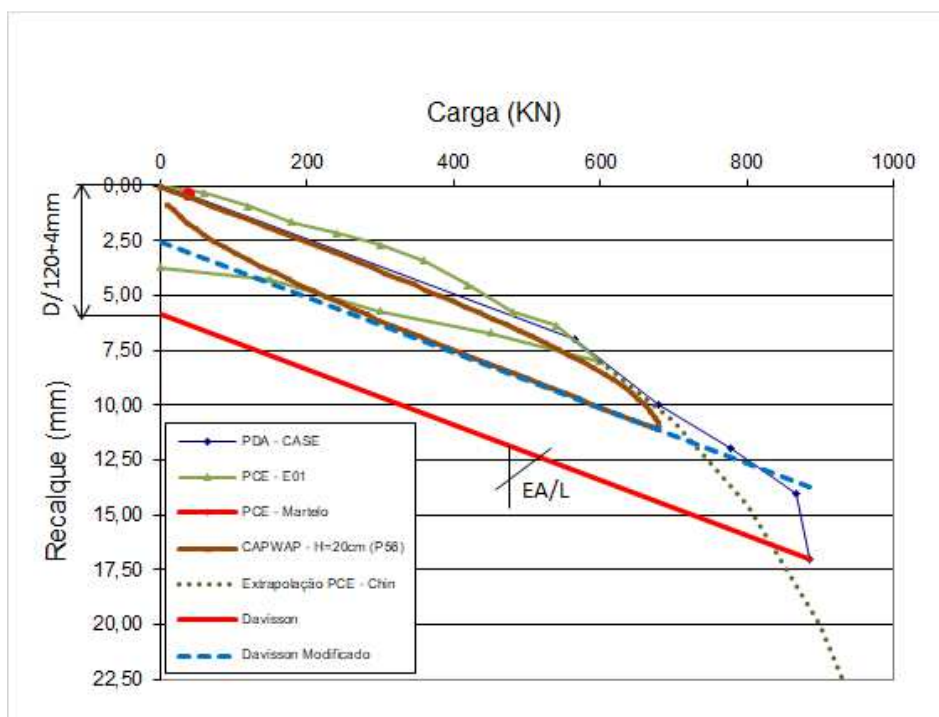


Figura 1. Aplicação do Método de Davisson Modificado (Murakami, 2015).

Murakami (2015) apresentou um novo procedimento para realização de análise CAPWAP que 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. As demais variáveis são ajustadas de forma a obter um novo “best match quality” da curva “wave up”. Neste contexto surge o “Match Quality de Recalques” ( $MQR$ ):

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

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 de prova de carga

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

$MQ_R$  = *match quality* de recalques

O procedimento proposto por Murakami (2015), quando o ECD é realizado com energia crescente, utiliza duas condições de contorno: 1) Proporcionalidade entre a resistência dinâmica total (atrito lateral 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).

O “*Match Quality*” de Recalques foi inicialmente concebido de forma a calcular o “erro” entre a curva carga-recalque da PCE e do CAPWAP através de uma expressão matemática (Murakami e Massad, 2014 e 2015; Murakami, 2015), visando a determinação do *quake* do fuste da estaca e consequentemente obtendo o melhor ajuste da curva-carga-recalque do CAPWAP.

Murakami (2018) introduziu uma nova solução gráfica do “*Match Quality*” de Recalques, onde se correlaciona o recalque da PCE com o recalque do CAPWAP para cada incremento de carga da PCE. O gráfico resultante é uma curva do tipo:

$$Y = \alpha \times X \quad (2)$$

Quanto mais próximos da unidade (1) forem os valores de  $\alpha$  e do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) melhor será o “*Match Quality*” de Recalques.

Massad (2002) propôs um novo método para interpretação de provas de carga cíclicas, estáticas ou dinâmicas, em estacas verticais. O método admite que o solo entra num processo de resiliência, isto é responde elasticamente às solicitações impostas pela repetição dos ciclos de carga-descarga. Correlações empíricas entre as máximas cargas aplicadas no topo das estacas e os repiques elásticos do topo, a elas associados, são estabelecidas e interpretadas, sendo então possível separar as parcelas de atrito lateral e de ponta das cargas máximas ou de ruptura.

Leonards e Lovell (1979) propuseram uma equação para a estimativa do encurtamento de estacas verticais, sob a ação de uma carga axial no topo ( $P_o$ ), não necessariamente de ruptura, que pode ser escrita da seguinte forma:

$$\Delta e = \frac{Q_p}{K_r} + c \times \frac{Al}{K_r} \quad (3)$$

Onde  $Q_p$  e  $Al$  são as parcelas de ponta e atrito lateral e  $P_o$  é a soma das duas parcelas.

$K_r$  é a rigidez da estaca, de comprimento  $h$ , área de seção transversal  $S$  e módulo de Young  $E$ , tomada como peça estrutural, isto é:

$$K_r = \frac{E \times S}{h} \quad (4)$$

Na equação 3, o valor de  $c$  é a relação entre o valor médio da carga transferida por atrito  $Al - \bar{Al}$  e o atrito lateral total ( $Al$ ), segundo a equação 5:

$$c = \frac{Al - \bar{Al}}{Al} \quad (5)$$

O termo  $d_{2r}$  é definido como:

$$\frac{1}{d_{2r}} = \frac{1}{Kr} + \frac{1}{K_{reb} \times Sp} \quad (6)$$

Onde  $Sp$  é a área da ponta da estaca e  $K_{reb}$  é um dos parâmetros básicos da Segunda Relação de Cambofort, para o descarregamento. No final do descarregamento, na situação onde  $Po = 0$ , o parâmetro  $c$  torna-se constante e a expressão de  $Po$  em função de  $Al$  é a seguinte:

$$Po^{max} = Al \times \left(1 - c \times \frac{d_{2r}}{Kr}\right) + \rho \times d_{2r} \quad (7)$$

Onde  $\rho$  é o repique elástico.

### 3 Metodologia

A seguir é apresentada a listagem dos ensaios realizados:

- O resultado de uma da estaca já estudada por Murakami et al (2018);
- Em uma das estacas foi realizado ECD em duas profundidades diferentes, com o intuito de se verificar a possibilidade de redução nos comprimentos cravados. Próximo a esta estaca foi realizado outro ECD em uma estaca de maior comprimento e maior tempo (*set up*);
- Em quatro estacas vizinhas de comprimentos próximos, foi realizado ECD com intervalos de tempo diferentes (*set up*);
- PCE em uma outra estaca e quatro ECD em estacas vizinhas.

Os resultados obtidos através dos de PCE e ECD serão analisados da seguinte forma:

- nas duas estacas onde foram executadas PCE serão avaliadas a possibilidade de separação da parcela de atrito lateral através do repique elástico (Massad, 2002).
- Os resultados da interpretação da curva carga-recalque das PCE (método de separação do atrito lateral) serão comparados com os resultados dos ECD.

Salienta-se que os ECD e PCE foram realizados de acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2010), NBR 13208 (ABNT, 2007), CAPWAP Manual (Pile Dynamics, 2006) e PDA Manual (Pile Dynamics, 2009).

### 4 Resultados

A Tabela 1, a seguir, indica o resumo dos resultados onde foram realizados ECD.

É destacado que na estaca 22aE (item a da metodologia) foi realizado primeiramente um ECD no final da cravação, o primeiro ciclo da PCE 13 dias após o final da cravação, o segundo ciclo aos 14 dias após o final da cravação e outro ensaio ECD 15 dias após o final da cravação. Maiores detalhes sobre esta estaca podem ser encontrados em Murakami et al (2018).

A estaca 21BN e 21CN correspondem ao segundo caso listado na metodologia (item b).

Na estaca 21BN, o primeiro ensaio foi realizado aos 37,5 m de profundidade no final da cravação com martelo vibratório, com 43,4 horas de *set up*. A mesma (21BN) apresentou carga mobilizada de 343 tf, não atendendo à carga de projeto. Esta estaca foi recravada com martelo hidráulico atingindo 40,6m de profundidade e reensaiada nesta profundidade com 3,2 horas de *set up*, resultando em 582 tf. Neste caso um acréscimo de cerca de 3 m de profundidade e com *set up* de apenas 3,2 horas resultou num acréscimo de carga mobilizada de cerca de 68%.

A estaca 21CN apresentou comprimento cravado cerca de 3,5 m superior em relação à estaca 21BN e com *set up* de 27 horas, resultando em carga mobilizada 9,5% superior.

As estacas 21E, 21A, 21aE, 21aA correspondem ao terceiro caso (item c) listado na metodologia onde as mesmas foram cravadas próximas uma das outras. Nota-se que as estacas 21E e 21aE apresentam mesmo comprimento cravado e na estaca 21E foi a que apresentou maior valor de atrito lateral (cerca de 31%) em função de maior tempo de *set up* (cerca de 15 horas de diferença).

A Figura 2, ilustrada a seguir, mostra o resultado da segunda PCE cíclica realizada na obra. A Figura 3, a seguir, apresenta o gráfico da carga máxima no topo da estaca em função do repique elástico da mesma para aplicação do método de Massad (2002), visando à separação da parcela de atrito lateral.

Tabela 1. Resumo dos resultados obtidos.

Estaca	D (cm)	Carga Proj (tf)	Comp. Cravado (m)	Horas entre final da cravação e ensaio	Atrito (tf)	Ponta (tf)	Carga Mob. (tf)	Match Quality
22aE	101,6	370	42,150	0,0	442,0	203,0	645,0	1,44
22aE	101,6	370	42,150	360,0	576,0	206,0	782,0	2,67
21E	101,6	370	40,700	20,4	522,0	105,0	627,0	1,43
21A	101,6	370	40,700	5,5	398,5	238,0	636,5	2,37
21aE	101,6	370	40,900	23,5	498,0	166,0	664,0	2,00
21aA	101,6	370	42,500	0,6	423,0	101,0	524,0	1,74
21CN	81,28	300	44,030	27,0	572,0	65,0	637,0	3,36
21BN	81,28	300	37,500	43,4	295,0	51,0	346,0	3,36
21BN	81,28	300	40,600	3,2	496,0	86,0	582,0	2,37
11B	101,6	370	39,410	75,4	511,0	172,0	683,0	2,88
11D	101,6	370	36,110	94,7	535,0	190,0	725,0	2,72
6F	101,6	370	36,800	19,4	512,0	214,0	726,0	2,38
6CN	81,28	300	36,600	2,1	279,0	200,0	479,0	2,92

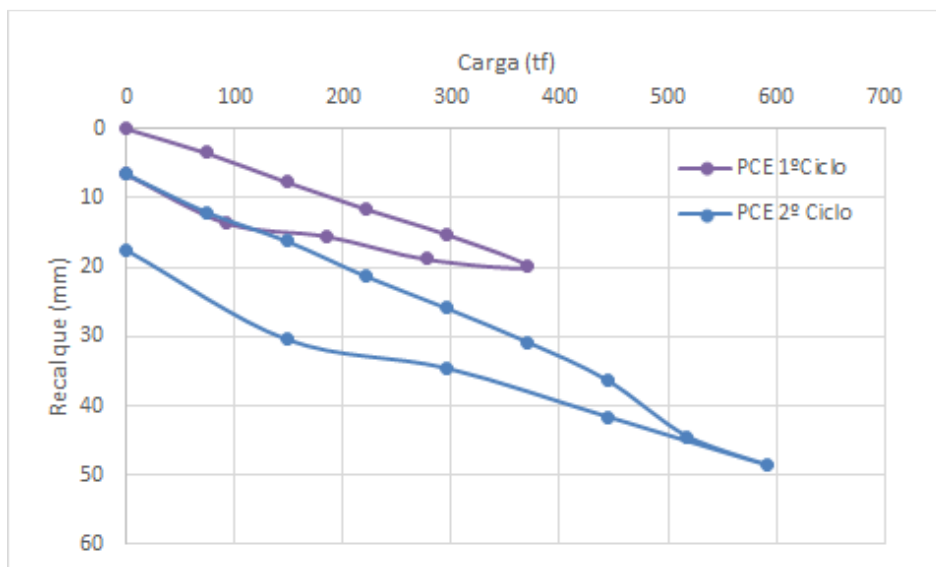


Figura 2. Segunda PCE realizada na obra

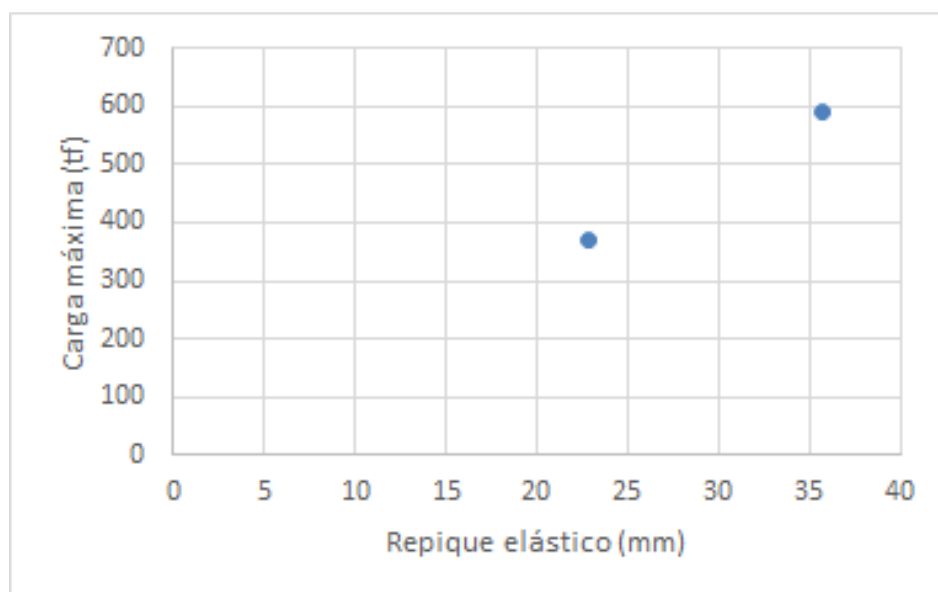


Figura 3. Gráfico de Po em função do repique elástico

O valor da constante  $c$  foi obtida com base nos dados obtidos do CAPWAP da estaca 21aE através dos ábacos de Leonards e Lovell, obtendo o valor de 0,767.

Através da equação 4 chega-se ao valor de  $K_r = 14,9$  tf/mm. Foi encontrado o seguinte valor  $K_{reb} \times S_p = 16,58$  tf/mm. Através da equação 6 foi obtido o seguinte valor  $d_{2r} = 7,84$  tf/mm.

Reescrevendo a equação 7, foi obtido o valor de atrito lateral igual a:

$$A_l = \frac{(592 - 35,6 \times 7,84)}{(1 - \frac{0,767 \times 7,84}{14,9})} = 523,3tf$$

Na estaca 21aE o atrito lateral obtido na análise CAPWAP foi de 576tf, cerca de 9,1% superior.

## 5 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).

Verificou-se que o comprimento cravado foi fundamental para o acréscimo de carga mobilizada de cerca de 68% em relação ao comprimento cravado apenas com martelo vibratório (estaca 21BN). A estaca 21CN, próxima à estaca 21BN, apresentou comprimento cravado cerca de 3,5 m superior e com *set up* de 27 horas, resultando em carga mobilizada 9,5% superior.

No caso das estacas 21E e 21aE de mesmo comprimento, uma diferença de cerca de 15 horas resultou em acréscimo de carga de cerca de 31%.

O Método de Massad possibilitou a separação do atrito lateral, verificando que o ensaio dinâmico obteve boa concordância com valor obtido pelo Método utilizado, cerca de 9,1% superior. Além disso, conforme observado por Murakami et al (2018), o ensaio dinâmico obteve excelente Match Quality de Recalque, com valores de  $\alpha$  e  $R^2$  próximos da unidade em todos os golpes analisados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 13208 (2007) *Estacas Ensaio de carregamento dinâmico*, Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 6122 (2010) *Projeto e execução de fundações*, Rio de Janeiro.
- Davisson, M.T. (1972) High capacity piles. Proc. of Lecture Series on Innovations in Foundation Construction, ASCE Illinois Section, Chicago, March 22, pp. 81 - 112.
- Fellenius, B. H., Riker, R. E., O'Brien, A. J., and Tracy, G. R., "Dynamic and Static Testing in Soil Exhibiting Set-Up," J. Geotech. Eng., Vol. 115. No. 7, 1989, pp. 984–1001.
- Leonards, G. A., Lovell, D. (1979), "Interpretation of Load Tests in High Capacity Driven Piles". Behavior of Deep Foundations, ASTM STP 670, Raymond Lungren, Ed. ASTM, pp. 388-415.
- Likins, G. E. and Makredes, H. S. "Bearing Capacity of Piles from Dynamic Measurements," presented at the Proceedings of the Seventh Southeast Asian Geotechnical Conference, Hong Kong, November 22–26, Southeast Asian Geotechnical Society and Hong Kong Institution of Engineers, Hong Kong, 1982, pp. 375-389.
- Likins, G. E., Rausche, F., Thendean, G., and Svinkin, M., "CAPWAP Correlation Studies," Proceedings of the Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Orlando, FL, 1996, pp. 447–464.
- Likins, G. E. and Rausche, F., "Correlation of CAPWAP with Static Load Tests," Proceedings of the Seventh International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Petaling Jaya, Selangor, Malaysia, 2004, pp 153–165.
- Massad, F. (2002) *Novo método para interpretação de provas de carga cíclicas, estáticas ou dinâmicas, em estacas verticais*, XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo
- 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*, XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Goiânia.
- Murakami, D. K., Massad, F. (2015) *Determinação do quake do fuste de estacas pré-moldadas através de provas de carga estática e ensaios de carregamento dinâmico*, Revista Geotecnia N°137, Lisboa.
- 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.
- Murakami, D. K., Cabette, J. F., Rodrigues, T. G., and Miranda Junior, G., "Correlação entre prova de carga estática e ensaio de carregamento dinâmico em estaca pré-moldada de concreto de 50cm de diâmetro" XVIII Cobramseg, Belo Horizonte, Minas Gerais, ABMS, Belo Horizonte, Minas Gerais, Novembro, 2016 pp. 1-8.
- Murakami, D. K. (2018) *A New Concept of Match Quality of Settlements for Signal Matching Analysis on the Dynamic Pile Testing*. 10th International Conference on Stress Wave Theory and Testing Methods for Deep Foundations, San Diego.
- Niyama, S. and Aoki, N., "Correlation between Static and Dynamic Load Test in the EPUSP Experimental Test Site," presented at Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, SEFE II, São Paulo, 1991, ABEF and ABMS, São Paulo, Vol. 1, pp. 285–293.
- Pile Dynamics, Inc. (2006) CAPWAP Manual, Cleaveland, OH, USA.
- Pile Dynamics, Inc. (2009) PDA-W Manual, Cleaveland, OH, USA.
- Rausche, F., Moses, F., and Goble, G. G. "Soil Resistance Predictions from Pile Dynamics," J. Soil Mech. Found. Div., Vol. 98, No. 9, 1972, pp. 917–937.
- Rausche, F.; Hussein, M.; Likins, G. (1994). Static Pile Load-Movement from Dynamic Measurements. Proceedings of Settlement '94; Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments: College Station, TX; 291-902.