

Monitoramento De Vibrações Causadas Por Cravação De Estacas Pré Moldadas De Concreto

Daniel Kina Murakami

Benaton Specialist, São Paulo, Brazil, daniel.murakami@benaton.com.br

Jean Felix Cabette

Benaton Specialist, São Paulo, Brazil, jeancabette@benaton.com.br

RESUMO: Este artigo tem como objetivo apresentar dois casos de obra onde se fez o monitoramento das vibrações causadas pela cravação das estacas através de um sismógrafo. No Caso de Obra 1, localizado no centro de São Paulo, SP (Murakami e Cabette, 2022), serão apresentadas comparações de vibrações causadas por cravação de estacas de duas seções diferentes (23x23 cm e 30x30 cm), medidas à uma distância de 15m. O sismógrafo indicou para a seção 23x23 cm os seguintes valores de PPV (L, T, V) em mm/s: (2,41; 2,41; 2,67). Já para a seção transversal de 30x30 cm, foram verificadas os seguintes valores de PPV: (1,78; 2,67; 3,11). Notam-se que apenas na componente L ocorreu uma redução de 26,1%, enquanto que nas componentes T e V se observou um aumento de 10,8% e 16,5%. No Caso de Obra 2, localizado em São Bernardo do Campo, SP, serão apresentadas comparações de vibrações causadas por cravação de estacas de mesma seção (17x17cm), porém instrumentadas em distâncias diferentes (7 m, 11 m e 18 m). A estaca PC42 (7 m de distância) apresentou os valores de PPV: (3,24; 1,14; 3,37). Já a estaca PC50 (11 m de distância) apresentou os valores de PPV: (5,40; 2,54; 2,67). Por último, a estaca PC34 (18 m de distância) indicou PPV de: (7,56; ; 4,51; 2,73). Notam-se que a componente L apresentaram valores próximos. Já as componentes T e V aumentaram em função da distância de instrumentação, o que poderia ser explicado pelo aumento da resistência do solo.

Palavras-chave: monitoramento de vibrações, sismógrafo, cravação de estacas, estacas pré-moldadas de concreto

ABSTRACT: This paper aims to present two cases studies where vibrations caused by pile driving were monitored using a seismograph. In Case Study 1, located in São Paulo, downtown, SP (Murakami and Cabette, 2022), comparisons of vibrations caused by driving piles of two different sections (23x23 cm and 30x30 cm) will be presented, measured at a distance of 15m. The seismograph indicated the following PPV values (L, T, V) in mm/s for the 23x23 cm section: (2.41; 2.41; 2.67). For the 30x30 cm cross section, the following PPV values were verified: (1.78; 2.67; 3.11). It is noted that only in the L component there was a reduction of 26.1%, while in the T and V components an increase of 10.8% and 16.5% was observed. In Case Study 2, located in São Bernardo do Campo, SP, comparisons of vibrations caused by driving piles of the same section (17x17cm), but instrumented at different distances (7 m, 11 m and 18 m) will be presented. Pile PC42 (7 m away) presented PPV values: (3.34; 1.33; 2.35). The PC50 pile (11 m away) presented PPV values: (3.75; 1.65; 2.91). Finally, pile PC34 (18 m away) indicated a PPV of: (3.30; 3.56; 3.49). It is noted that the L component presented similar values. The T and V components increased as a function of the instrumentation distance, which could be explained by the increase in soil resistance.

KEYWORDS: monitoring of ground vibrations, seismograph, driven piles, precast concrete piles

1 INTRODUÇÃO

As estacas pré-moldadas de concreto são cravadas no solo pelo martelo do bate-estaca. Desta forma, vibrações são geradas ao longo do fuste da estaca e na ponta da estaca e a intensidade de seus valores podem

mudar durante a instalação da estaca. Essas vibrações se propagam em três direções na forma de ondas para as camadas circundantes do solo: Longitudinal (L), Transversal (T) e Vertical (V). Eles são proporcionais ao pico de velocidade das partículas (PPV) e frequência (f) (Massarsch e Fellenius, 2015). Além disso, estes valores podem ser medidos por um sismógrafo e não podem ultrapassar os valores permitidos para não causar danos aos edifícios. Em geral, a intensidade da vibração diminui em função da distância da fonte e diminui em função da seção transversal da estaca. Os valores de PPV podem aumentar ao transpor camadas de solo com valores mais elevados de N_{spt} e quando o número de golpes no diagrama de cravação são maiores. Além disso, a redução do VPP foi observada quando a seção transversal da estaca foi reduzida.

2 OBJETIVOS

Este artigo tem como objetivo mostrar uma comparação de vibrações causadas pela cravação de estacas pré-moldadas de concreto em duas obras diferentes. O primeiro caso de obra é localizado no centro de São Paulo, SP e o segundo caso é localizado em São Bernardo do Campo, SP.

3 METODOLOGIA

A medição das vibrações causadas pela cravação das estacas foi realizada através de um sismógrafo da Geosonics (2001) que permitiu verificar a variação do PPV em três direções (longitudinal, transversal e vertical) e frequência ao longo da cravação das estacas. Durante a cravação das estacas utilizou-se o modo histograma que registra o valor máximo a cada minuto e no final da cravação, durante a cravação, utilizou-se o modo trigger que registram os gráficos de PPV em função do tempo. O modo histograma permitiu verificar como evoluiu o PPV ao longo do comprimento cravado, conforme será mostrado adiante.

Na ausência de normas brasileiras, foi adotada a norma alemã DIN 4150-3 como referência e através desta, foram verificados os níveis de vibração medidos com os valores recomendados pela norma alemã para verificação de possíveis indícios causadores de danos nas estruturas vizinhas.

4 CASOS DE OBRA

Serão apresentados dois casos de obra onde foi realizado o monitoramento de vibrações causadas pela cravação de estacas pré-moldadas de concreto através de um sismógrafo.

4.1 CASO DE OBRA 1: SÃO PAULO, SP

Trata-se de um caso de obra localizado no centro de São Paulo, SP (Murakami e Cabette, 2022). Serão apresentadas comparações de vibrações causadas por cravação de estacas de duas seções diferentes (23x23 cm e 30x30 cm), medidas à uma distância de 15m. As estacas foram cravadas por um martelo de queda livre de massa 4tf. O sismógrafo indicou para a seção 23x23 cm os seguintes valores de PPV (L, T, V) em mm/s: (2,41; 2,41; 2,67). Já para a seção transversal de 30x30 cm, foram verificadas os seguintes valores de PPV: (1,78; 2,67; 3,11). Notam-se que apenas na componente L ocorreu uma redução de 26,1%, enquanto que nas componentes T e V se observou um aumento de 10,8% e 16,5%.

A figura 1 mostra os valores de PPV em função da frequência para as duas seções diferentes. Para facilitar a visualização e verificar a influência da seção transversal na intensidade de PPV, as três direções de PPV foram inseridas na mesma figura 1. Nota-se nesta figura que a partir de 25 Hz os valores de PPV para a seção 30x30cm estão um pouco acima dos valores observados da seção 23x23cm, indicando um aumento de PPV em função do aumento da seção transversal da estaca. Os valores observados na figura 1 estão abaixo dos valores recomendados pela norma alemã, o que indicaria que tais magnitudes de vibração não deveriam causar danos às estruturas vizinhas, conforme já observado por Murakami e Cabette (2022).

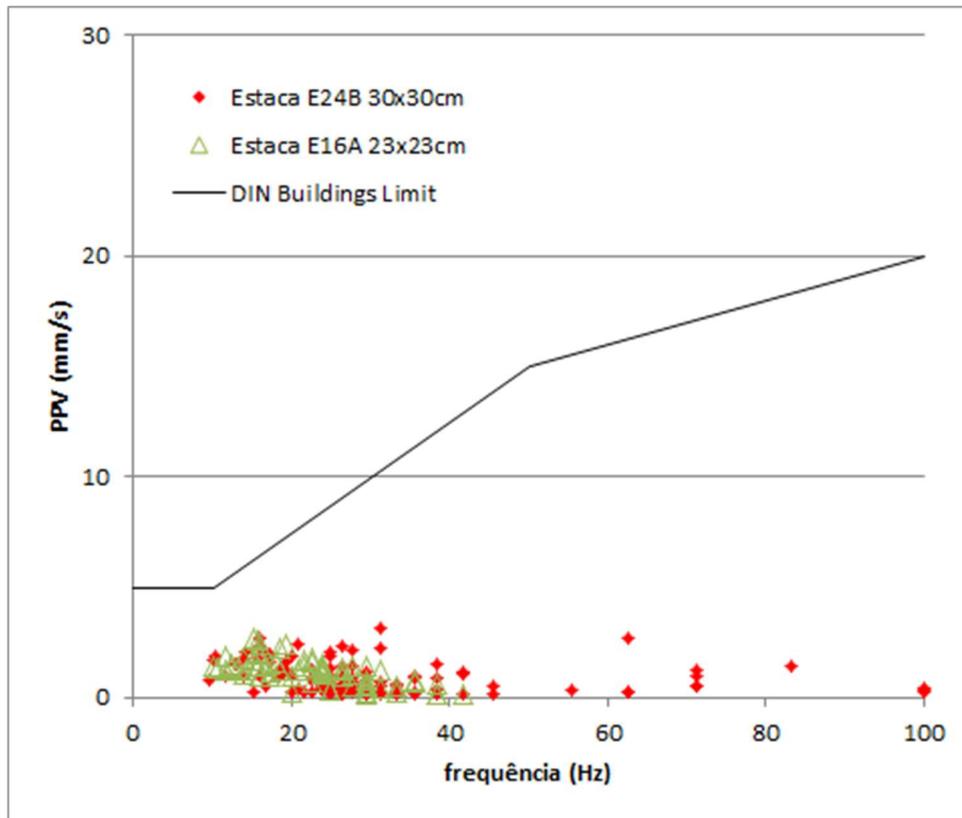


Figura 1. PPV vs. frequência – estacas E24B 30x30cm e E16A 23x23cm

As figura 2 e 3 mostram a variação de PPV em função do comprimento cravado das estacas. Para a estaca E24B de seção 30x30cm (figura 2), se observou uma tendência de aumento dos valores de PPV em função do comprimento cravado, sendo que as componentes longitudinal e transversal atingiram valores próximos de 1 mm/s no final da cravação, enquanto que a componente vertical atingiu valores próximos de 2 mm/s no final da cravação. Aos 4 m de profundidade as três componentes indicaram um aumento localizado nos valores de PPV, atingindo valores entre 0,25 mm/s e 3,15 mm/s. Uma explicação para esse pico localizado nas medições de PPV seria o transpasse de uma camada de solo de maior resistência.

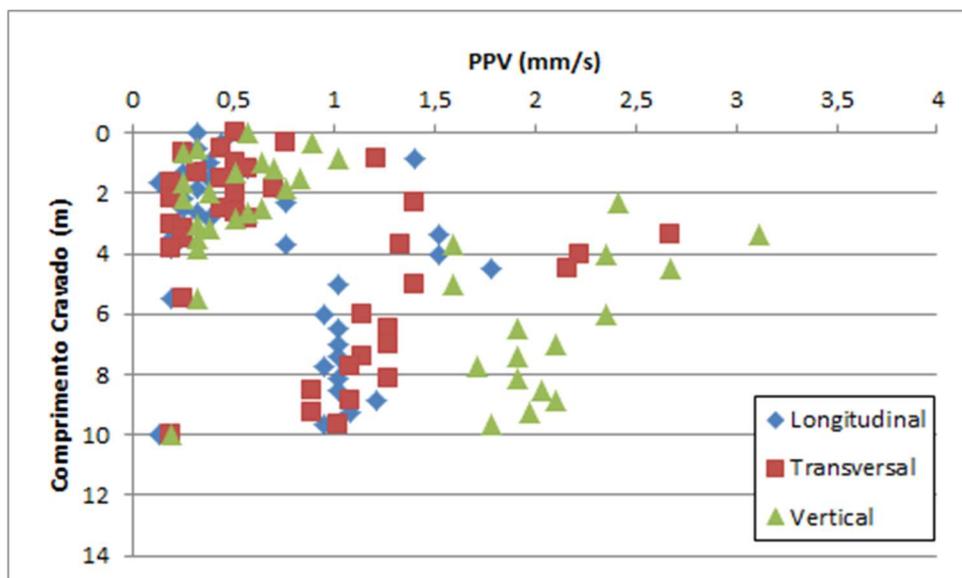


Figura 2. PPV vs. profundidade – estaca E24B 30x30cm

Para a estaca E16A de seção 23x23cm (figura 3), se observou uma tendência de aumento dos valores de PPV em função do comprimento cravado, sendo que as três componentes atingiram valores próximos de 1,25 mm/s no final da cravação. Aos 2 m de profundidade as três componentes indicaram um aumento localizado nos valores de PPV, atingindo valores próximos de 2,5 mm/s. Uma explicação para esse pico localizado nas medições de PPV seria o transpasse de uma camada de solo de maior resistência. Maiores informações sobre este caso de obra podem ser encontrados em Murakami e Cabette (2022).

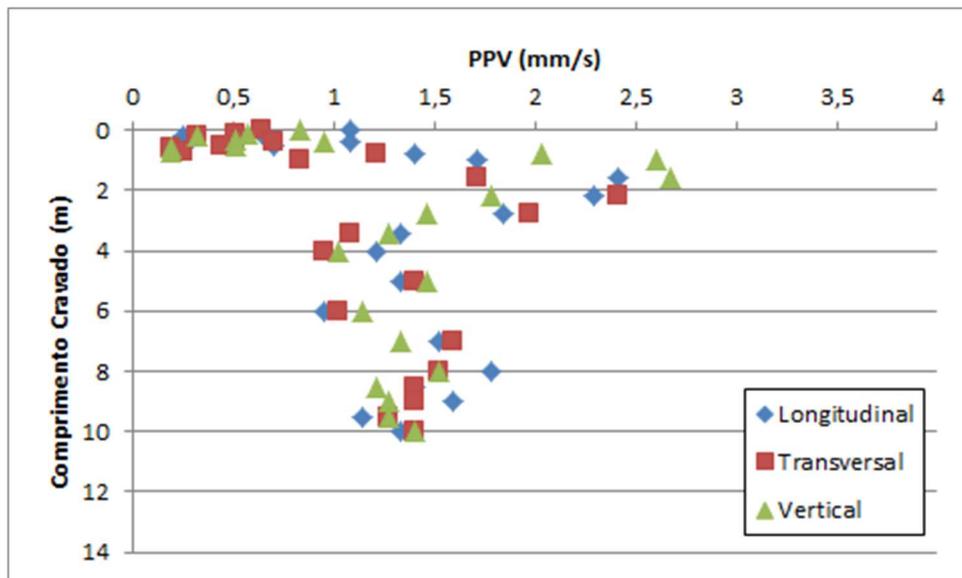


Figura 3. PPV vs. profundidade – estaca E16A 23x23cm

4.2 CASO DE OBRA 2: SÃO BERNARDO, SP

Neste local do projeto, localizado em São Bernardo do Campo, SP, Brasil, estacas pré-moldadas de concreto de 17 cm quadrados foram cravadas por um martelo de queda livre de 2,8 toneladas com altura de queda de 30 cm para uma carga de trabalho de 25 toneladas. Além disso, os ensaios SPT mostraram solo argiloso com baixos valores de N_{spt} de 1 golpe/30 cm nos primeiros 3m de profundidade, seguido por uma camada do mesmo material com valores de N_{spt} entre 4 golpes/30 cm e 14 golpes/30 cm até 5m profundidade. Então, os testes SPT indicaram valores superiores a 50 golpes/30cm entre 6m e 7m de profundidade para o solo argiloso.

A análise GRLWEAP indicou que estacas pré-moldadas de concreto de 17 cm quadrados seriam cravadas entre 5 m e 5,5 m de profundidade com diagrama de cravação superior a 860 golpes/m para uma altura de queda de 30 cm.

Durante a cravação das estacas, o solo apresentou baixa resistência a 5 m de profundidade para a maioria das estacas, sendo que as estacas foram cravadas entre 5,9 m e 12,1 m de profundidade, e a penetração média das estacas foi de 9,3 m. Como a penetração média das estacas foi 3 m maior (cerca de 70% maior) que os comprimentos previstos pelo GRLWEAP, foi solicitado novo ensaio SPT para confirmação do perfil do solo. No entanto, não foi possível devido às restrições de prazo. Em seguida, foram realizados sete Ensaios de Carregamento Dinâmico (NBR 13208) nas estacas com comprimentos entre 8,4m e 12,1m, e os resultados confirmaram baixa resistência do solo a 6m de profundidade. As cargas mobilizadas ficaram entre 51,6 e 87,0 toneladas. Além disso, o PDA indicou bons resultados para as estacas que atingiram profundidades maiores que as previstas pelo GRLWEAP, embora o SPT tenha sugerido um comprimento de estaca menor.

A estaca PC46 (7 m de distância) apresentou os valores de PPV: (3,34; 1,14; 3,37). Já a estaca PC50 (11 m de distância) apresentou os valores de PPV: (5,40; 2,54; 2,67). Por último, a estaca PC34 (18 m de distância) indicou PPV de: (7,56; 4,51; 2,73). Neste caso de obra não foi observada uma tendência de redução dos valores de PPV em função da distância, uma vez que, conforme observado por Murakami e Cabette (2024), as sondagens do local não estavam condizentes com o diagrama de cravação das estacas e simulações através do GRLWEAP. Sendo assim, a cota de ponta das estacas era imprevisível, assim como identificação de possíveis

camadas de maior resistência eram difíceis de se prever em função das divergências observadas entre a sondagem SPT, diagrama de cravação real das estacas e aplicação da teoria da equação da onda através do software GRLWEAP. Os valores observados na figura 4 estão abaixo dos valores recomendados pela norma alemã, o que indicaria que tais magnitudes de vibração não deveriam causar danos às estruturas vizinhas.

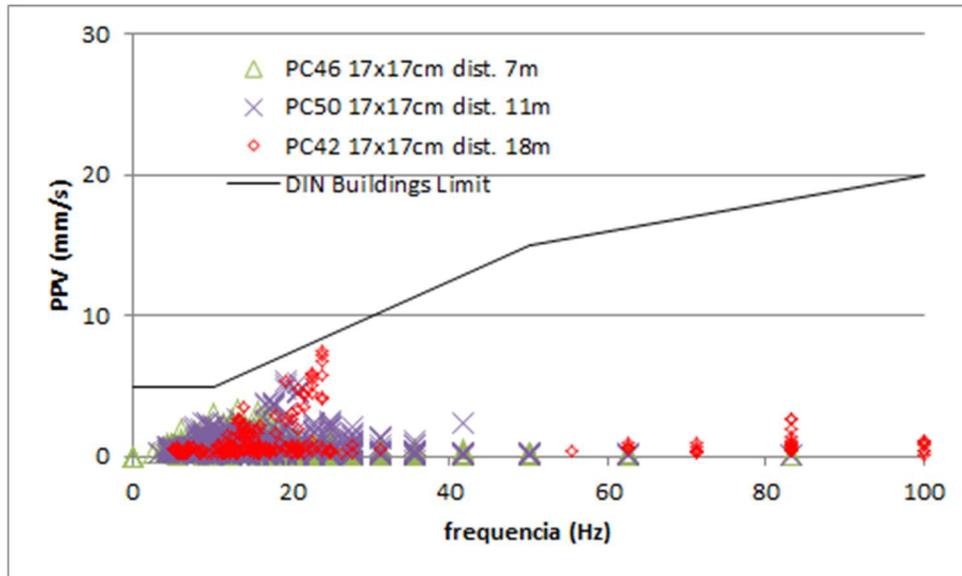


Figura 4. PPV vs. frequência – estacas de 17x17cm

A figura 5 e tabela 1 mostram os resultados do sismógrafo da estaca PC46 medido a 7 m de distância. Este monitoramento foi realizado através do modo trigger no final da cravação (nega da estaca).

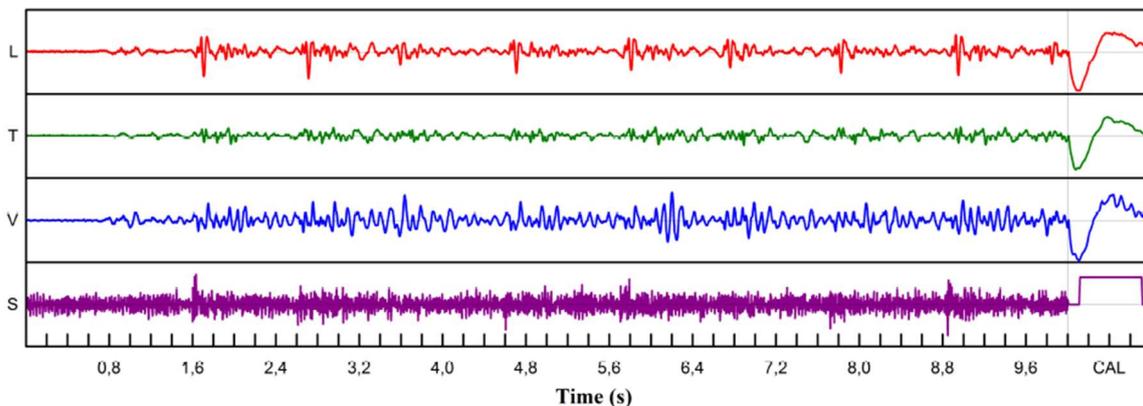


Figura 5. PC46 – 17x17m – distância 7m

Tabela 1. PC46 – 17x17m – distância 7m

	Summary Data		
	L	T	V
PPV (mm/s)	3,24	1,14	3,37
FREQ (Hz)	15,6	25,0	13,2
PD (.01mm)	3,49	2,71	4,49
PPA (g)	0,039	0,020	0,033
Peak Vector Sum:		3,43 mm/s	
Peak Air Pressure:		103 db	
		3,31776 PSI @ 83,3 Hz	

A figura 6 e tabela 2 mostram os resultados do sismógrafo da estaca PC50 medido a 11 m de distância. Este monitoramento foi realizado através do modo trigger no final da cravação (nega da estaca).

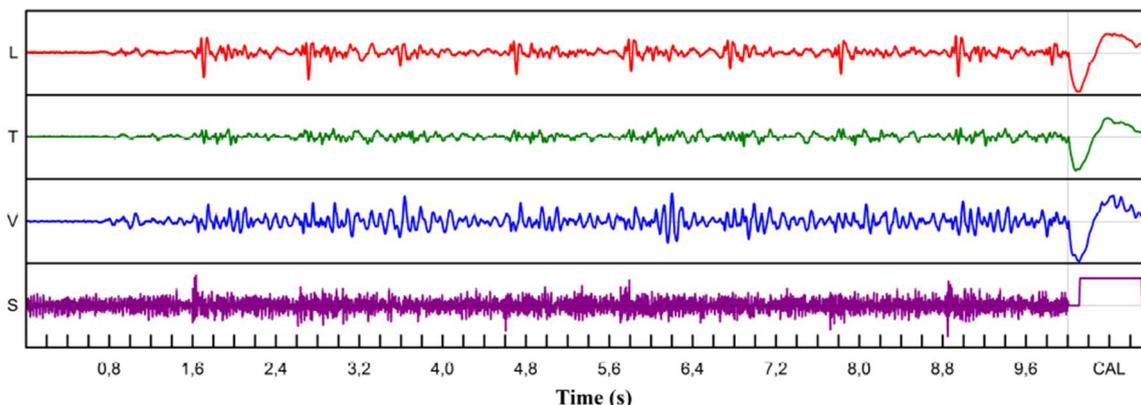


Figura 6. PC50 – 17x17m – distância 11m

Tabela 2. PC50 – 17x17m – distância 11m

	Summary Data		
	L	T	V
PPV (mm/s)	5,40	2,54	2,67
FREQ (Hz)	19,2	25,0	13,2
PD (.01mm)	5,05	2,17	4,11
PPA (g)	0,065	0,039	0,026
Peak Vector Sum:	5,46 mm/s		
Peak Air Pressure:	100 db		
	2,08896 PSI @ 50,0 Hz		

As figuras 7 e 8 mostram os resultados obtidos pelo sismógrafo para a estaca PC42 a 18 m de distância. Este monitoramento foi realizado através do modo histograma, o que permitiu realizar o gráfico de PPV em função do comprimento cravado da estaca (figura 8). Observa-se na figura 8 que ocorreu um pico localizado de PPV aos entre 0,5m e 1,5m de profundidade. Posteriormente, até 6m de profundidade os valores de PPV ficaram próximos de 0,5 mm/s, aumentando sua magnitude para valores entre 1,5 mm/s e 7,5 mm/s.

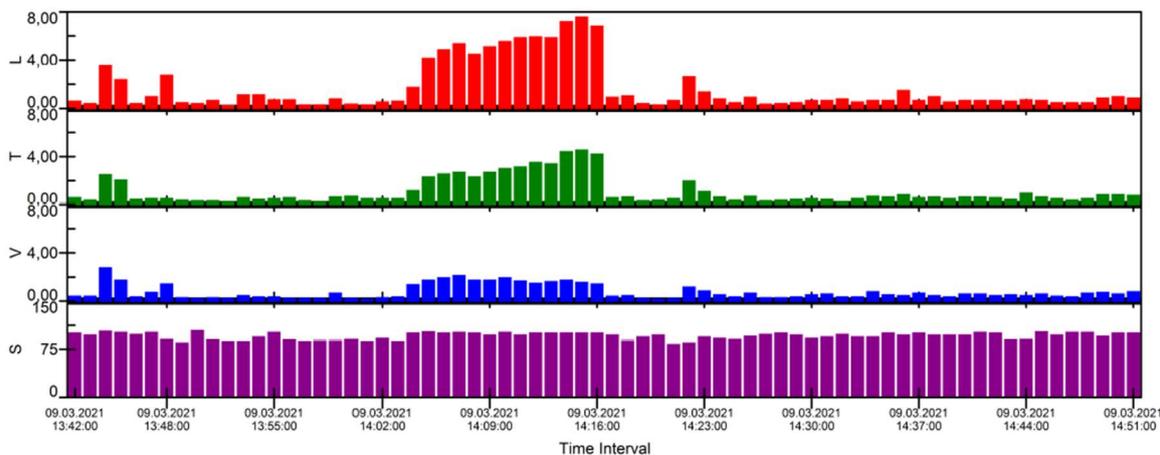


Figura 7. histograma estaca PC42 17x17cm – distância 18m

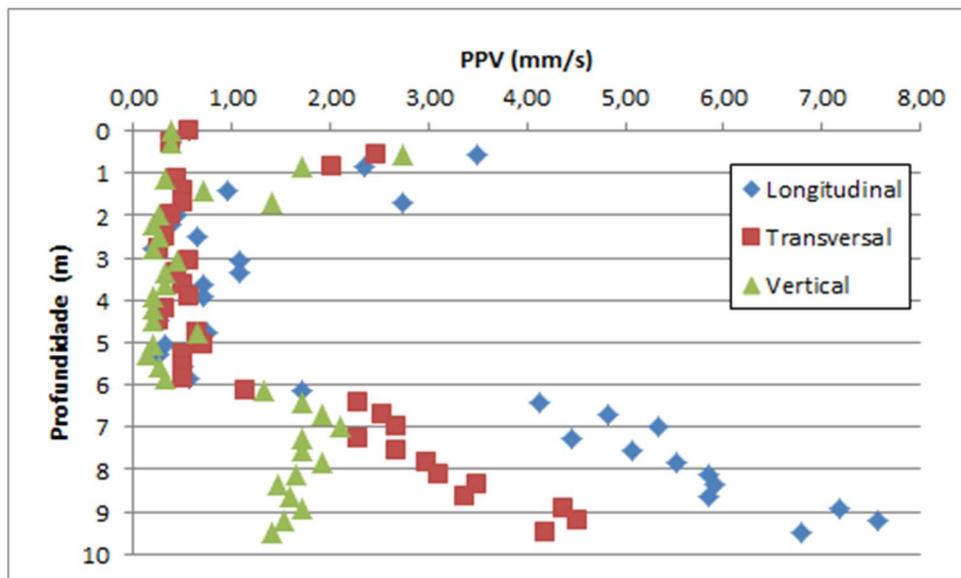


Figura 8. PPV vs. profundidade – estaca PC42 17x17cm – distância 18m

5 CONCLUSÕES

Este artigo mostrou o uso do sismógrafo para medição dos valores de PPV (velocidade de pico da partícula) durante a cravação das estacas. Utilizou-se o modo histograma que registra o valor máximo a cada minuto e no final da cravação, durante a nega, utilizou-se o modo trigger que registram os gráficos de PPV em função do tempo. O modo histograma permitiu verificar como evolui o PPV ao longo do comprimento cravado, conforme mostrado anteriormente.

Na ausência de normas brasileiras, foi adotada a norma alemã DIN 4150-3 como referência e através desta, foram verificados os níveis de vibração medidos com os valores recomendados pela norma alemã para verificação de possíveis indícios causadores de danos nas estruturas vizinhas.

No primeiro caso de obra localizado em São Paulo, SP, o monitoramento das vibrações verificou que a cravação da estaca de seção 30x30cm apresentou valores de PPV um pouco maiores do que os observados da estaca de seção menor (23x23cm).

No segundo caso de obra localizado em São Bernardo do Campo, SP, o monitoramento das vibrações verificou que não havia uma tendência de redução dos valores de PPV em função da distância. Uma explicação deste fato seria a ocorrência de camadas de solo de maior resistência nas medições com maior PPV, uma vez que era de se esperar que o PPV diminuísse com o aumento da distância. Conforme observado por Murakami e Cabette (2024), as sondagens SPT do local não estavam condizentes com o diagrama de cravação real das estacas e análises através do GRLWEAP. Além disso, os comprimentos cravados foram cerca de 60% superiores aos previstos pela sondagem e análise através do GRLWEAP. Salienta-se que a análise do GRLWEAP depende fortemente dos dados de entrada, ou seja, da resistência do solo em profundidade, o que explicaria as divergências entre o software e o diagrama de cravação real das estacas.

Para concluir, nos dois casos de obra não foram observados indícios de possíveis problemas nas estruturas vizinhas em decorrência da cravação das estacas pré-moldadas de concreto e os valores de PPV observados estavam abaixo dos valores especificados pela norma alemã.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007) NBR 13208. *Estacas Ensaio de carregamento dinâmico*. Rio de Janeiro.

- ASTM D4945 (2017) Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations, West Conshohocken, PA, USA.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. (2016) DIN 4150-3 – Vibrations in buildings – part 3: effects on structures.
- Geosonics, Inc. (2001). SSU 3000-EZ Plus. *Manual version 5.3.13*. Warrendale PA. p. 1-55.
- Massarch, K. R., Fellenius, B. H. (2015). Engineering assessment of ground vibrations caused by impact pile driving. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA* 46(2) 54-63.
- Murakami, D. K., Cabette, J. F. (2022) Monitoring of Ground Vibrations Caused by Pile Driving, Demolition, and Train, in São Paulo, Downtown. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Campinas, SP.
- Murakami, D. K., Cabette, J. F. (2024) The Importance Of A Reliable Spt Test On Costs Of Deep Foundations. XX ICongresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Balneário Camboriú, SC. (artigo submetido)
- Pile Dynamics, Inc. (2006) CAPWAP manual, Cleveland, Ohio.
- Pile Dynamics, Inc. (2009). PDA-W Manual. Cleveland, Ohio.
- Pile Dynamics, Inc. (2010). GRLWEAP Manual. Cleveland, Ohio.