

Vibração gerada na cravação de estacas: Comparação de métodos de previsão através da metodologia PRISMA

Ramon Duque Ferraz Burgos
Mestrando, POLI-UPE, Recife, Brasil, rdfb@poli.br

Alexandre Duarte Gusmão
Professor, POLI-UPE, Recife, Brasil, gusmao.alex@ig.com.br

Raíza Silva Bezerra
Mestranda, UFPE, Recife, Brasil, rbraizabezerra@gmail.com

Danilo Silva dos Santos
Mestrando, UFPE, Recife, Brasil, gusmao.alex@ig.com.br

Eduardo José Melo Lins
Mestrando, POLI-UPE, Recife, Brasil, eduardojmlins@hotmail.com

RESUMO: Durante a cravação de estacas para fundações, são geradas vibrações pelo equipamento que crava as estacas. Esse equipamento precisa aplicar uma energia na peça a ser cravada, e no processo, a energia gerada pelo equipamento de cravação é transferida do elemento de fundação para o solo, que se propaga através dele como ondas de vibrações. Essas ondas causam tensões internas no solo, e quando atingem estruturas, podem desenvolver danos prejudiciais a edificação. Sabendo do risco da vibração para estruturas, trabalhos científicos apresentam medições das vibrações geradas na cravação de estacas. Cada medição tem valores diferentes, porém apresentam padrões de comportamentos similares. Dessa forma, este trabalho vem com o objetivo de realizar uma revisão sistemática utilizando a metodologia PRISMA para obter dados das vibrações medidas por trabalhos científicos nacionais e internacionais e aplicar os dados em 3 formulas de previsão da vibração gerada, comparando os valores reais obtidos na medição com os valores previstos nas fórmulas. Os resultados mostraram que a fórmula de Attewell et al. foi a mais adequada para previsão da vibração gerada na cravação por impacto e a apresentada por P.J. More a mais adequada para previsão na cravação por vibração.

PALAVRAS-CHAVE: Fundações, estacas, cravação, vibração, PPV e PRISMA.

ABSTRACT: During the driving of piles, vibrations are generated by the equipment that drives the piles. This equipment needs to apply energy to the part to be crimped, and in the process, the energy generated by the crimping equipment is transferred from the foundation element to the ground, which propagates through it as vibration waves. These waves cause internal stresses on the ground, and when they hit structures, they can develop damage to the building. Knowing the risk of vibration for structures, scientific work presents measurements of the vibrations generated during the process of pile driving. Each measurement has different values, but presents patterns of similar behavior. Thus, this work aims to perform a systematic review using the PRISMA methodology to obtain data of the vibrations measured by national and international scientific works and to apply the data in 3 formulas of prediction of the generated vibration, comparing the real values obtained in the measurement with the values provided in the formulas. The results showed that the formula of Attewell et al. was the most suitable for prediction of the vibration generated in the impact pile driving and the one presented by P.J. More, the most suitable for prediction in the vibration driving.

KEYWORDS: Foundations, piles, Pile driving, vibration, PPV and PRISMA.

1 Introdução

Quando se utilizam estacas profundas do tipo metálicas ou pré-moldadas em concreto, as mesmas devem ser cravadas no solo. Uma das formas de cravação, é através de martelo de impacto, onde Gonçalves (2007), considera um martelo para cravação de estacas como uma fonte de energia utilizada para gerar um pulso de força na estaca, capaz de vencer a resistência imposta pelo solo e, por consequência, provocar o deslocamento da estaca no material. Os martelos são de dois tipos principais: de queda livre e automático. O martelo de queda livre é levantado pelo guincho e deixado cair quando o tambor do guincho é desacoplado do motor por um sistema de embreagem. No martelo automático, o peso é levantado pela explosão de óleo diesel ou pela ação de um fluido, que pode ser vapor, ar comprimido ou óleo (Velloso e Lopes, 2016).

O outro processo de cravação de estacas, é a cravação por vibração. Ele surgiu nos anos 30, tendo desde então sofrido um grande desenvolvimento tanto a nível dos equipamentos, como da técnica. Inicialmente, esta era apenas usada na cravação e extração de estacas prancha. No entanto a sua utilização generalizou-se, já que se revelou uma técnica eficaz e econômica devido à facilidade de cravação, baixas perturbações na área circundante e aos baixos danos provocados nas estacas. Ao contrário dos equipamentos tradicionais de cravação de estacas que usam um peso ou um pilão para atingir o topo da estaca, os martelos vibratórios usam contrapesos giratórios para criar vibração na estaca, o que permite "cortar" o material do solo. A vibração de alta velocidade faz com que o solo realmente "liquefaça" e a estaca deslize no solo quase sem esforço. Usando equipamentos de cravação tradicionais, um perfil de 30m de comprimento pode levar até uma hora para percorrer todo o caminho até a camada resistente, usando um martelo vibratório, o mesmo perfil pode ser cravado em 10 minutos ou menos, dependendo das condições do solo (Massarsch; Fellenius; Bodare, 2017).

Ferreira (2015) afirma que a cravação de estacas é um intensivo processo de produção de vibrações que, ao se propagarem no solo, inevitavelmente acabarão por interagir com estruturas próximas. Esta interação induz vibrações na estrutura, podendo causar incômodos às pessoas que a ocupam e possíveis danos à própria estrutura. Na Região Metropolitana do Recife, a cravação de estacas tem gerado conflitos entre construtoras e moradores vizinhos a empreendimentos em desenvolvimento. Sena (2016), cita um caso onde uma construtora modificou seu projeto de fundações, tendo que optar pelo estaqueamento com martelo vibratório contra solução em martelo de impacto, devido à proximidade de residências e construções antigas. Com o agravante de um desses prédios próximos a obra ter sido condenado pouco antes do início da construção, pela Defesa Civil do município de Jaboatão do Guararapes, com risco de desabamento.

Para evitar problemas relacionados a vibração gerada na cravação das estacas, a previsão das vibrações inerentes a este processo, a sua monitorização e controle tornaram-se passos importantes na prevenção de danos nas estruturas existentes e dos incômodos causados às pessoas. A monitorização das vibrações geradas pode ser feita utilizando um Geofone triaxial ou acelerômetros capazes de medir a velocidade nos eixos X, Y e Z. Uma forma mais simples é prever às vibrações é utilizando fórmulas matemática, onde as mesmas utilizam variáveis como a distância da fonte de vibração, energia liberada pelo equipamento de cravação e parâmetros geotécnicos do solo. Dessa forma, os próximos tópicos deste trabalho irão abordar a aplicação dessas metodologias desenvolvidas para previsão de vibração no solo e fazer uma comparação delas através da metodologia PRISMA.

2 Vibração gerada na cravação de estacas

Deckner (2013) define a vibração sendo um movimento oscilatório em torno de um estado de equilíbrio e pode ser descrito sob a forma de deslocamento, velocidade ou aceleração. Moutinho (2007), afirma que os problemas de vibrações em estruturas podem ser agrupados em dois domínios distintos, nomeadamente, os problemas de vibrações que podem afetar a integridade estrutural e os problemas relacionados com o nível de conforto proporcionado aos seus utilizadores. No primeiro caso, o que está em

causa é o Estado Limite Último de resistência das estruturas, inserindo-se nele a generalidade dos problemas da Engenharia Sísmica. De fato, ações exteriores adversas como esta podem induzir danos estruturais significativos ou, em última análise, levar as estruturas ao colapso. A segunda classe de problemas está relacionada com o cumprimento do Estado Limite de Serviço das estruturas no que diz respeito à satisfação de limites impostos para vibrações excessivas.

A propagação das vibrações ocorre sob a forma de ondas e depende essencialmente do nível de carregamento do solo e das suas propriedades, pois, estes irão determinar a forma como o solo se comporta ao carregamento e a forma como este irá transmitir as vibrações. Nordal (2009) classifica dois tipos de ondas, sendo elas as ondas volumétricas (Ondas de corpo) e as Ondas de Superfície (Ondas Rayleigh). Dentre as ondas volumétricas, existem as ondas primárias (Ondas P) e as ondas secundárias (Ondas S), ambas se caracterizam por viajar dentro de um corpo ou em um meio. Ferreira (2015) afirma que nas Ondas P, o movimento das partículas se dá em sentido longitudinal e paralelo à direção de propagação da onda através de uma compressão e expansão do material, à custa de uma deformação volumétrica das partículas, não ocorrendo, por isso, rotação ou corte das mesmas. Por sua vez, as Ondas S são transversais e provocam deformações por corte, mantendo-se o volume do material inalterado, não podendo viajar através dos fluidos já que estes não possuem rigidez ao corte. A Figura 1 exibe como as Ondas S e as Ondas P se propagam no solo.

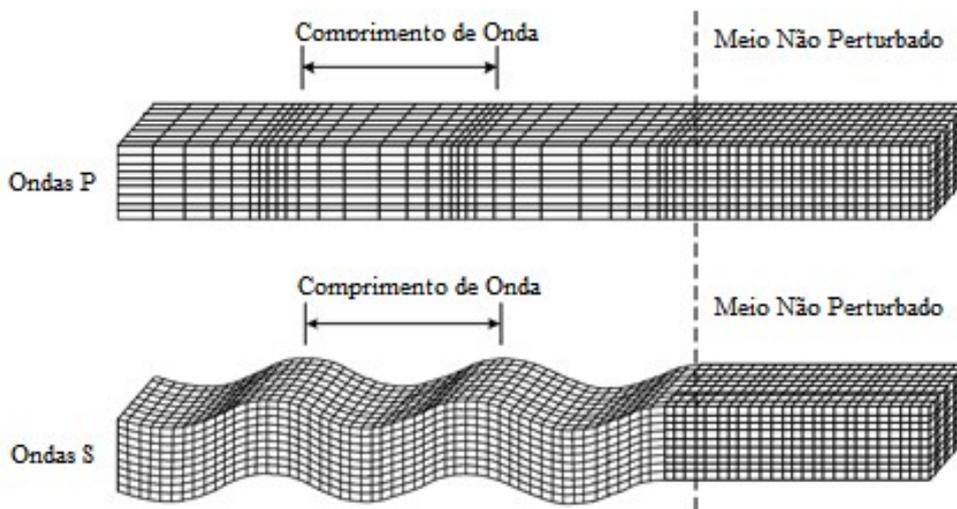


Figura 1. Propagação das ondas P e S no solo (Fonte: Deckner, 2013).

Lopes (2003) afirma que as ondas superficiais são ondas sísmicas que se propagam paralelamente à superfície do terreno, sem transmitir energia para o seu interior e a sua amplitude decresce exponencialmente com a profundidade, limitando-se a propagação energética a uma camada superficial equivalente a cerca de um comprimento de onda. Há dois tipos de ondas superficiais, as ondas Rayleigh e as ondas Love. As ondas superficiais são o resultado da interação das ondas volumétricas com a superfície livre e das suas sucessivas reflexões e refrações. As ondas Rayleigh são as mais utilizadas nos métodos que têm como base a propagação das ondas superficiais. Com base em deduções matemáticas realizadas por alguns autores, pode afirmar-se que as ondas Rayleigh resultam de uma combinação de ondas P e Sv, sendo Sv a componente vertical do movimento associado às ondas S. Quando comparadas com as ondas volumétricas, este tipo de ondas apresenta menor atenuação geométrica, maior amplitude e maior energia (Peniche, 2015).

Devido a essa natureza de propagação das ondas Rayleigh, a componente vertical do seu movimento sensibiliza facilmente os geofones verticais usualmente empregados na sísmica exploratória, cujo valor de mercado é bem inferior ao dos sensores horizontais que se exigem para o registro das ondas Love. Lopes (2003) ainda afirma que as ondas de Rayleigh geradas por uma fonte pontual transportam 2/3 do total da

energia transmitida, onde o restante da energia transmitida se propaga com ondas P e ondas S.

Para quantificar e poder estabelecer valores limites para as vibrações no solo, as normas que abordam tal tema, utilizam como parâmetros para avaliação das vibrações: O pico de deslocamento de partículas (PPD), a velocidade de pico de partícula (PPV) e a aceleração de pico de partículas (PPA). Elas representam o máximo deslocamento, velocidade e aceleração que uma partícula de solo experimenta durante um evento de vibração. Svinkin (2015) afirma que o PPV é o que mais tem potencial para desenvolver problemas em uma construção, dessa forma, a verificação do PPV em mm/s é a mais importante para a avaliação das vibrações geradas na cravação de estacas.

2.1 Métodos de previsão de vibração

O primeiro método de previsão de vibração foi desenvolvido por Attewell e Farmer em 1973. O estudo foi desenvolvido de forma empírica, após os autores analisarem diversos resultados de vibração medidos na cravação de estacas por vibração e impacto, e realizarem uma regressão linear. Eles chegaram ao resultado em que os dados necessários para obter o PPV depende da distância da fonte de vibração, da energia utilizada pelo equipamento de cravação durante a cravação da estaca e de uma constante k , que varia de acordo com o tipo da cravação (Vibração – 0,7; Impacto – entre 1,0 e 0,5) A Equação 1 representa a fórmula desenvolvida pelos autores:

$$PPV = k*(W^{0,5}/D) \quad (1)$$

Onde:

PPV = Velocidade de pico de partícula em mm/s;

k = Constante de acordo com o tipo de cravação;

W = Energia de cravação do equipamento em J (Para martelo de impacto, é o peso do pilão multiplicado pela altura de queda, e para vibração é a frequência multiplicada pela pressão hidráulica máxima);

D = Distância (m).

Em 1992, Attewell et al. utilizou os mesmos dados de 1973, adicionados de dados obtidos pela Universidade de Durham (UK), para realizar uma regressão quadrática, onde obteve duas equações, cada uma com aproximação melhor para a cravação de estacas através de impacto e de vibração. A Equação 2, representa a mais adequada para impacto, e a equação 3 para vibração.

$$\log PPV = -0,296 + 1,38 \log(W^{0,5}/D) - 0,234 \log^2(W^{0,5}/D) \quad (2)$$

$$\log PPV = -0,213 + 1,64 \log(W^{0,5}/D) - 0,334 \log^2(W^{0,5}/D) \quad (3)$$

P.J. More (1995) afirmou que as expressões desenvolvidas por Attewell e Farmer (1973) e Attewell et al. (1992) possuíam alguns erros, pois, baseavam-se na suposição de que toda a energia estava concentrada no primeiro comprimento de onda da vibração. Se os erros forem corrigidos, a Equação 4 demonstra o cálculo do PPV através de uma fórmula similar às apresentadas, porém com um K_s que representa o coeficiente para ondas de superfície (Ondas R e Ondas Love), calculado de acordo com a Equação 5.

$$PPV = k_s(W^{0,5}/D) \quad (4)$$

$$K_s = (f/V_r) * (0,8 * 3,14 * p)^{0,5} \quad (5)$$

Onde:

f = Frequência (Hz);
p = Densidade de Massa do Solo (Kg/cm³);
Vr = Velocidade de propagação (m/s).

A Velocidade de propagação é calculada com base nos parâmetros geotécnicos dos solos, aplicados na Equação 6.

$$PPV = ((0,862 + 1,14v) / (1 + v)) * (E/(2p(1 + v)))^{0,5} \quad (6)$$

Onde:

v = Coeficiente de Poisson;
E = Módulo de Young (Kpa);

3 Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é comparar os métodos empíricos de previsão de vibração gerados na cravação de estacas, aplicando tais métodos em parâmetros expostos em trabalhos científicos e comparando os resultados previstos com a vibração (PPV) medida *in loco*. Para análise dos trabalhos científicos, foi utilizada uma revisão sistemática que segue a metodologia de revisão sistemática PRISMA.

4 Metodologia

Para cumprimento dos sucessivos passos metodológicos, e elaboração desta revisão sistemática, foram consideradas as indicações do modelo PRISMA (Moher, 2015), que significa: Principais itens para relatar revisões sistemáticas e meta-análises. A metodologia PRISMA tem como objetivo ajudar autores a melhorarem a qualidade do relato dos dados da revisão sistemática e metanálise. Dessa forma, a metodologia define que deve ser desenvolvido um *check list* dos pontos mais importantes dos trabalhos científicos analisados na revisão sistemática. Esse *check list* vem na forma de uma tabela, que facilita a transparência dos dados da revisão e facilita a leitura e comparação dos dados.

A busca dos trabalhos científicos tratando de medições de vibrações na cravação de estacas ocorreu até 18 de dezembro de 2018. Para a procurar os textos, acessaram-se as bases de dados eletrônicas do Periódicos da CAPES, *Google Scholar*, SCOPUS, *Cambridge Core*, *Canadian Science Publishing* e *Research Gate*, sendo realizadas buscas por “Assunto”. Nas buscas, foram utilizadas as palavras-chaves especificadas, juntamente com os Operadores Boleanos em língua inglesa “AND” e “OR”. Foram utilizadas como palavras-chaves: *Pile Driving*, *Sheet Pile Driving*, *Vibrations*, *Foundations*, *Ground Vibration*, *Structures*, *Prediction*, *Vibration Prediction*, *Pilling*, *Monitoring*, *Peak Particle Velocity (PPV)*, Cravação de Estacas, Medição, Velocidade de Pico de Partícula e Vibração.

Foram adotados como critérios de seleção a avaliação dos títulos e resumos dos artigos que apresentam dados sobre a medição de vibração, e artigos que tragam dados suficientes para preencherem as formulas de previsão de vibração. Os critérios analisados nos artigos selecionados foram os seguintes: País, o tipo da estaca, o método de cravação da estaca, o equipamento de cravação, a profundidade da estaca, o tipo do solo, o peso do pilão e altura de queda (para martelos de impacto) ou a frequência e pressão hidráulica máxima do martelo vibratório (Cravação por vibração), equipamento usado na medição da vibração, a distância do equipamento de medição para a fonte de vibração e o resultado do PPV em mm/s.

Os resultados para as pesquisas nas bases de dados totalizaram 9.648 artigos. No processo de avaliação, os 9.648 artigos encontrados passaram por uma filtragem, onde critérios de exclusão foram aplicados. Os critérios de exclusão foram: Artigos repetidos, data de publicação, revisão por pares, idioma, tópicos, avaliação do título, avaliação do resumo. Após a aplicação dos critérios de exclusão, Fiegel (2008),

Silva (1996), Achuhan (2016), Yong Tan (2012), Deckner (2013), Deckner (2017), Athanaspoulos (2000) e Uromeihy (1990) foram submetidos a uma avaliação mais completa do texto e foram selecionados para aplicação na metodologia PRISMA.

As informações colhidas foram divididas em dois quadros. O primeiro quadro (Quadro 01) exibe os resultados para estacas cravadas por impacto. Já o Quadro 02, exibe às informações para as estacas cravadas por vibração. Para cada ponto, foram obtidas 2 medições em distâncias diferentes. Apenas os pontos YT1 de Yong Tan (2012) e De1 de Deckner (2017) que apresentam apenas 1 medição da vibração.

Quadro 1. Revisão sistemática dos trabalhos científicos para estacas cravadas por impacto.

Artigo	Ponto	País	Estaca	Tipo do Martelo	Comp. da estaca (m)	Solo	Peso do pilão (ton.)	H _{Queda} (m)	Equip. de Medição
Fiegel (2008)	F1	EUA	RAP	Rammed Aggregate Piers	4,6	Argila Dura	15,6		Geof.
Silva (1996)	S1	BRA	Fr	-	27,4	Argila Muito Mole	4	6	Acele.
Silva (1996)	S2	BRA	PCA	Martelo Diesel	12	Argila Muito Mole	8	1,25	Acele.
Silva (1996)	S3	BRA	PCA	Martelo Diesel	12	Argila Muito Mole	8	1,25	Acele.
Silva (1996)	S4	BRA	PCA	Martelo Diesel	12	Argila Muito Mole	8	1,25	Acele.
Silva (1996)	S5	BRA	PCA	Martelo Diesel	12	Argila Muito Mole	8	1,25	Acele.
Silva (1996)	S6	BRA	PCA	Martelo Diesel	12	Argila Muito Mole	8	1,25	Acele.
Silva (1996)	S7	BRA	PCA	Martelo Diesel	12	Argila Muito Mole	8	1,25	Acele.
Achuhan (2016)	AC1	SRI	PMC	-	-	Argila Média	5	3	Geof.
Yong Tan (2012)	YT1	CHN	PMC	Martelo Diesel	35	Areia Siltosa	4,6	-	-
Uromeihy (1990)	U1	UK	PM	Hydraulic-hammer (BSP 357)	9	Argila Dura	5	0,8	Geof.
Uromeihy (1990)	U5	UK	EMH	Diesel (BSP50c)	32	Argila Arenosa	4	0,8	Geof.

RAP – Estaca de Compactação, Fr=Franki, PCA=Prancha de Concreto Armado, PMC=Pré-moldada em Concreto, PM=Prancha Metálica, TM=Tubos Metálicos, EMH=Estaca Metálica “H”, Geof = Geofone Triaxial e Acel. = Acelerômetro Triaxial.

Quadro 2. Revisão sistemática dos trabalhos científicos para estacas cravadas por vibração.

Artigo	N	País	Estaca	Tipo do Martelo	Comp. da estaca (m)	Solo	Freq. De cravação (hz)	PHM (Kw)	Energia de cravação (J)	Equip. de Medição
Deckner (2013)	D1	SWE	PM	Dieseko 2316VM	11	Areia Fofa	30	250	8333,3	Geof.
Deckner (2013)	D2	SWE	PM	Dieseko 2316VM	11,01	Areia Fofa	30	250	8333,3	Geof.
Deckner (2017)	De1	SWE	PM	Liebherr 1100H	8,7	Argila Média	35	250	7142,9	Acele.
Deckner (2017)	De2	SWE	PM	ABI TM 14/17V	10	Areia Compacta	36	250	6944,4	Acele.
Athanas. (2000)	A1	GRE	PM	MGF RBH 60 M	7	Areia Siltosa	13	130	10000	Geof.
Athanas. (2000)	A2	GRE	PM	MS-5H4	10	Argila Arenosa	23	95	4130	Geof.
Athanas. (2000)	A3	GRE	PM	MGF RBH 60 M	8	Argila Média	20	130	6500	Geof.
Athanas. (2000)	A5	GRE	PM	MGF RBH 60 M	8	Areia Siltosa	25	130	5200	Geof.
Athanas. (2000)	A6	GRE	PM	ICE 416	7	Areia Siltosa	17	157	9200	Geof.
Athanas. (2000)	A7	GRE	PM	MGF RBH 60 M	8	Argila Dura	21	130	6200	Geof.
Athanas. (2000)	A8	GRE	PM	ICE 416	8	Areia Siltosa	16	157	9800	Geof.
Uromeihy (1990)	U2	UK	PM	MS 25H	16	Argila Arenosa	28	299,6	10700	Geof.
Uromeihy (1990)	U3	UK	TM	PTC RH23HFI	21	Areia Fofa	40	224	5600	Geof.
Uromeihy (1990)	U4	UK	EMH	Muller MS25H	16	Argila Arenosa	28	299,6	10700	Geof.

RAP – Estaca de Compactação, Fr=Franki, PCA=Prancha de Concreto Armado, PMC=Pré-moldada em Concreto, PM=Prancha Metálica, TM=Tubos Metálicos, EMH=Estaca Metálica “H”, Geof = Geofone Triaxial, Acel. = Acelerômetro Triaxial e PMH = Pressão Hidráulica Máxima.

5 Resultados

Para calcular o valor do PPV previsto através das metodologias em estudo, as amostras foram divididas em 2 grupos: Cravação por vibração e cravação por impacto. Essa divisão foi feita devido aos diferentes valores de coeficientes k e a composição da fórmula disposta por Attewell (1992), que podem ocasionar divergência dos valores reais pela falha no cálculo.

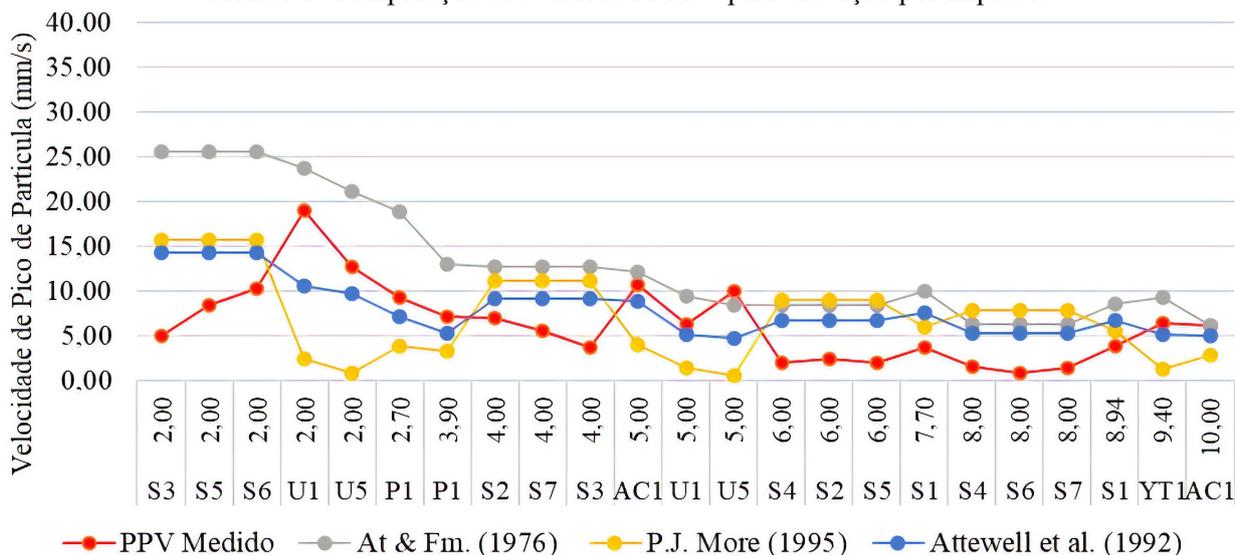
De acordo com o tipo de solo apresentado nos trabalhos científicos, foram estimados os valores dos parâmetros geotécnicos através de tabelas e gráficos. Dados como a pressão hidráulica máxima de cravação e frequência do martelo, quando não apresentado no trabalho, foi adquirido através dos manuais técnicos da empresa fabricante do equipamento.

Para cada cravação de estacas obtidas nos trabalhos científicos, foram retirados dois pontos de medição de vibração, medidos em D1 e D2 nas mesmas condições. Dessa forma, foram utilizadas 23 amostras de cravações por impacto para calcular a previsão de vibração em condições similares às exibidas nos trabalhos científicos em estudo, e nas mesmas condições, 27 amostras de cravação por vibração foram utilizadas. Os resultados foram compilados em dois gráficos com a mesma configuração. O eixo Y dos gráficos apresenta o PPV, e o eixo X ordena os pontos medidos de acordo com a distância da fonte de vibração, além de apresentar o código do trabalho científico em que esse ponto foi obtido.

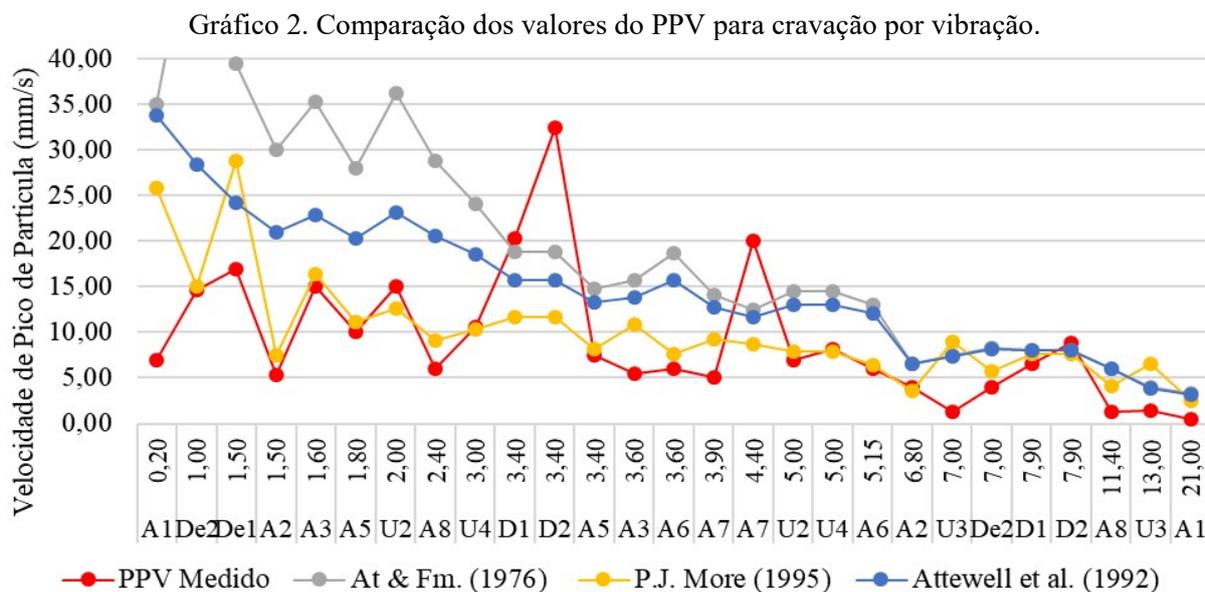
Os resultados dos PPV's obtidos pelo cálculo através da fórmula de Attewell e Farmer (1976), Attewell et al. (1992) e P.J. More (1995) estão apresentadas nos Gráficos 1 e 2, de acordo com as cores especificadas na legenda.

No Gráfico 1, o PPV medido está representado em vermelho, e analisando a linha que possui uma tendência mais similar a ela, fica claro que a linha dos resultados obtidos através da fórmula estabelecida por Attewell et al. é a que mais se adequa. Também é notável que para distâncias mais próximas da fonte de vibração, há uma variação maior dos resultados obtidos em relação ao PPV medido, onde ao avançar da distância, a linha do PPV medido não segue um padrão e tende a variar para valores maiores e menores do que os resultados estimados pelas fórmulas de P.J. More e Attewell et al., porém, a linha que representa Attewell e Farmer permanece predominantemente em valores superiores aos medidos. Outro ponto a se observar, é que as linhas de P.J. More e Attewell et al. sempre cruzam a linha do PPV medido no mesmo momento.

Gráfico 1. Comparação dos valores do PPV para cravação por impacto.



Para as estacas cravadas através da vibração (Gráfico 2), fica visível que a linha da fórmula de P.J. More é a que acompanha de forma mais próxima a linha do PPV medido. Também é notável que em quase todos os pontos, o PPV medido ficou abaixo dos valores previstos pelas fórmulas. Para uma análise numérica dos resultados, foi calculado o módulo da diferença entre o PPV medido e os resultados estimados. Foi usado a diferença dos resultados porque, quanto ao valor obtido, características de cada cravação como a distância e a energia podem influenciar na análise estatística. Com esses dados, foram definidas as médias e desvio padrão.



De acordo com a Tabela 1, para as estacas cravadas por impacto, a que teve a menor média e desvio padrão foi a previsão por Attewell et al. (1992), confirmando a análise visual do Gráfico 1. Para estacas cravadas por vibração, os resultados mostram que o método apresentado por P.J. More (1995) é o que tem menor média e desvio padrão, também ficando em acordo ao analisado no Gráfico 2.

Tabela 1. Média e desvio padrão da diferença dos resultados medidos e previstos

Cravação	Média At & Fm (1976)	Média PJ More (1995)	Média Attewell (1992)	Desv. Pad. At & Fm (1976)	Desv. Pad. PJ More (1995)	Desv. Pad. Attew. (1992)
Impacto	6,87	6,60	3,84	4,92	3,23	2,10
Vibração	11,35	4,37	7,98	9,90	5,49	5,61

6 Conclusões

Os métodos de previsão de vibração se mostraram eficientes. Porém, é preciso atenção quanto aos dados obtidos e quanto mais precisos os dados, melhor será a previsão. O tipo de cravação também influenciou quanto ao método mais adequado, sendo o método de Attewell et al. (1992) o que ficou mais próximo dos resultados para cravação através de impacto, e o método apresentado por P.J. More (1995) o melhor para previsão por vibração. Ambos os métodos podem servir para se estimar a vibração gerada, mas por critérios de segurança, o único meio de definir a vibração é através da medição durante a cravação.

É preciso salientar que todos os métodos usados neste trabalho são de base empírica, e métodos numéricos mais elaborados, utilizando elementos finitos já existem para previsão de vibração gerada na cravação de estacas. Tais métodos trazem mais confiança nas suas previsões, devido ao maior número de informações que são aplicados em seu desenvolvimento e o presente trabalho pode servir de base para pesquisadores que desejem aplicar métodos numéricos para previsão de vibração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Attewell P. B. and Farmer I. W. (1973) Attenuation of ground vibrations from pile driving. *Ground Engineering* 3(7): 26-29.

- Attewell PB, Selby A. R. and O'Donnell L. (1992) Estimation of ground vibration from driven piling based on statistical analyses of recorded data. *Geotechnical*.
- Achuhan R., Subashi De Silva G.H.M.J. and Sudhira. (2016) Comparison between ground vibrations induced by impact piling and bored piling. *International Conference on Sustainable Built*, Kandy, Sri Lanka.
- Athanasopoulos, G.A.; Pelekis, P.C. (2000) Ground vibrations from sheetpile driving in urban environment. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19(5), 371–387.
- Deckner, F. (2013) *Ground vibrations due to pile and sheet pile driving: influencing factors, predictions and measurements*. KTH, Royal Institute of Technology: Stockholm. p. 126.
- Deckner, F., Viking, K., Hintze, S. (2017) Wave Patterns in the Ground: Case Studies Related to Vibratory Sheet Pile Driving. *Geotechnical and Geological Engineering*. December, Volume 35, Issue 6.
- Ferreira, J. (2015) *Vibrações induzidas pela cravação de estacas. Análise e modelação numérica*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Fiegel, G. L.; Farrell, T. M. (2008) Measurement of Vibration and Noise During the Installation of Rammed Aggregate Piers. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 9.
- Gonçalves, C.; Bernardes, G. P.; Neves, F. S. (2007) *Estacas Pré-Fabricadas de Concreto*. São Paulo.
- Lopes, I. I. (2003) O estudo das ondas sísmicas superficiais como método de caracterização dinâmica de solos, *VI Congresso Nacional de Geologia, Ciências da Terra*, Lisboa, pp G38-G41.
- Massarsch, K. R.; Fellenius, B. H.; Bodare, A. (2017) Fundamentals of the vibratory driving of piles and sheet piles. *Geotechnik*, v. 40, n. 2, p. 126-141.
- Moutinho, C. M. R. (2007) *Controle de vibrações em estruturas de engenharia civil*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade do Porto, Porto.
- Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG, Altman D, Antes G. (2015) PRISMA Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *Intern Med*.
- Nordal, S. (2009) *Course of Geodynamics*. Norwegian University of Science, Trondheim, Norway.
- Peniche, B. S. V. (2015) *Utilização de ensaios sísmicos para a caracterização dinâmica local 2D*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa.
- Moore P. J., Styles J. R., Ho W-H. (1995) Vibrations caused by pile driving. In: Prakash S, editor. *Proceedings of the Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, vol. III. St. Louis, MO.
- Sena, R. D.; Oliveira, J. T. R.; Gusmão, A. D. (2016) O uso do martelo vibratório em obras no Grande Recife. *XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Geotecnia - COBRAMSEG*.
- Silva, C. B. L. (1996) *Estudo do efeito vibratório Causado por Cravação de estacas*. Dissertação de Mestrado. Coppe/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Svinkin, M. (2015) Tolerable limits of construction vibrations. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 17 May Vol. 20, Issue 2.
- Uromeihy, Ali. (1990) *Ground vibration measurements with special reference to pile driving*. Tese de Doutorado. Durham University.
- Lopes, F. R.; Velloso, D.A. (2016) *Fundações-Volume completo*. Oficina de Textos.
- Yong Tan; Lan, Hongliang. (2011) Vibration effects attributable to driving of PHC pipe piles. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 26, n. 5, p. 679-690.