

DIMENSIONAMENTO DE MARTELOS VIBRATÓRIOS PARA INSTALAÇÃO DE ESTACAS METÁLICAS

Jan Selders

Hammertec Tecnologia de Vibração e Martelos Ltda.

Frederico Falconi

ZF Engenheiros Associados SS Ltda.

RESUMO

A crescente necessidade de maior produtividade, menor ruído, menor vibração e maior limpeza nas obras urbanas proporcionou a introdução da tecnologia do martelo vibratório no Brasil. Inicialmente utilizados como auxiliares na introdução de tubos metálicos na fundação de pontes e na instalação de estaca-prancha em obras portuárias, sua utilização em obras urbanas prediais vem crescendo. Este trabalho faz um resumo do uso da tecnologia do martelo vibratório, parâmetros para a escolha de martelo vibratório adequado, e sugere uma metodologia para a escolha adequada de martelos vibratórios. A metodologia sugerida é validada para 5 obras executadas com êxito em Santos, SP e no Rio de Janeiro, RJ.

ABSTRACT

The need for higher productivity, less noise and vibration, and cleaner worksites in urban construction led to the introduction of vibration technology in Brazil. Firstly used to drive tubular piles for bridge foundations and sheet-pile installation for harbor construction, its uses in urban applications is rising. This article gives an overview of the vibration technology, the parameters for the selection of the appropriate vibratory hammer, and suggests a calculation method for the selection of vibratory hammers. The suggested method is calculated and validated for 5 jobs successfully executed with vibratory hammers in Santos, SP, and in Rio de Janeiro, RJ.

1. Introdução

O objetivo deste artigo é explicar sucintamente as características principais dos martelos vibratórios e os critérios de sua escolha para determinada situação de obra. Os critérios serão aplicadas em 5 obras executadas com martelo vibratório em Santos, SP e no Rio de Janeiro, RJ.

2. Tecnologia de martelos vibratórios

2.1. Parâmetros técnicos de martelos vibratórios

O **momento excêntrico M** é definido pelas massas excêntricas que giram em eixos dentro do vibrador, fazendo com que o martelo emita vibrações. O momento excêntrico é a "medida do desequilíbrio" e define outros parâmetros. É um parâmetro chave e constante, independente do solo, da estaca e da aplicação,

$$M = m \cdot r \quad [kgm].$$

Os eixos do vibrador são locomovidos por motores hidráulicos, determinando outro parâmetro: as **revoluções máximas por minuto n** [rpm]. Observa-se que acoplada uma estaca e havendo resistência de solo, o martelo vibratório não conseguirá manter n e trabalhará com n_{nom} , **revoluções nominais por minuto**, $n_{nom} < n$.

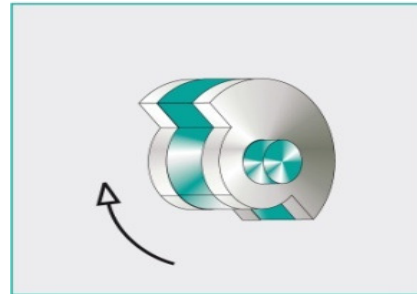


Figura 1: Ilustração de massa excêntrica.

Durante uma revolução completa da massa excêntrica o vibrador percorre um curso vertical S . O curso consiste de duas amplitudes x , sendo que há um deslocamento para cima e um para baixo. Por razões de simplificação, *erroneamente*, o curso completo S , é chamado de **amplitude, o que será mantido**

$$S = 2 \cdot x = \frac{2 \cdot M}{m_{Mart,dyn}} \quad [m],$$

onde $m_{Mart,dyn}$ denomina a **massa dinâmica** do martelo vibratório - a parte do martelo vibratório que emite vibração, acoplada à parte estática do vibrador por coxins (elastômeros) do martelo vibratório. A amplitude, portanto é diretamente influenciada pelo momento excêntrico e é uma medida de desempenho do vibrador, sendo que ela determina a capacidade de romper e superar o atrito entre estaca e solo.

A **força centrífuga F** , outro parâmetro importante dos martelos vibratórios, é muitas vezes utilizada para escolher um martelo vibratório:

$$F = M \cdot 10^{-3} \cdot \omega^2 \quad [kN] \quad \text{onde} \quad \omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{max}}{60} \quad [s^{-1}]$$

Observa-se que a força centrífuga é diretamente influenciada pelo momento excêntrico e pelas rotações do martelo vibratório.

Resta mencionar os demais parâmetros de martelos vibratórios:

- Saída do drive, **Power P** [kW], mostrando a força real do martelo vibratório. É desejável ter no mínimo 2kw para cada 10kN de força centrífuga.
- **Vazão hidráulica v** [l/min], medida do consumo importante para a escolha do equipamento base (bate-estaca hidráulico ou *power-pack*).
- **Pressão hidráulica p** [bar, MPa]. Enquanto que nos catálogos o martelo vibratório é apresentado com pressão de 350bar, deve se considerar que o sistema não permite essa pressão e eles trabalham com 300 a 320bar, ou seja, desempenho real 10 a 20 % menor.

2.2. Alta Frequência ou *High-Frequency*, (HF)

Alta frequência, medida em Hertz [Hz], é consequência direta das rotações por minuto do martelo vibratório, e definida como superior a $f > 35$.¹ Martelos vibratórios com frequências entre 30 e 35 Hertz podem causar vibrações maiores, especialmente quando o solo é resistente e diminua a rotação, reduzindo as frequências nominais (reais) para $f < 30$ Hz, definida como baixa frequência. É preferível trabalhar com $f > 35$ para evitar frequências de ressonância de lajes em prédios.

A revolução n é a frequência multiplicado por 60s, portanto

$$f > 35Hz \Rightarrow n \geq 2100rpm, \quad f < 30Hz \Rightarrow n \leq 1800rpm.$$

Sabendo que as rotações nominais (reais) serão menores que as rotações máximas do vibrador, deve-se levar em conta se outros parâmetros do martelo vibratório estão adequados à situação da estaca e do solo, principalmente o momento excêntrico M e a força P do martelo vibratório, para evitar que existindo resistência, o martelo perca revoluções desproporcionalmente, reduzindo elas para $n < 1800rpm$. Para ilustrar o conceito de alta frequência, a figura 2 mostra a conexão entre rotações do martelo vibratório e a frequência emitida. Quando se liga e desliga o martelo vibratório ele passa por rotações baixas e existe o risco de ressonâncias do solo.

¹ DIN 4150-1, páginas 10-11.

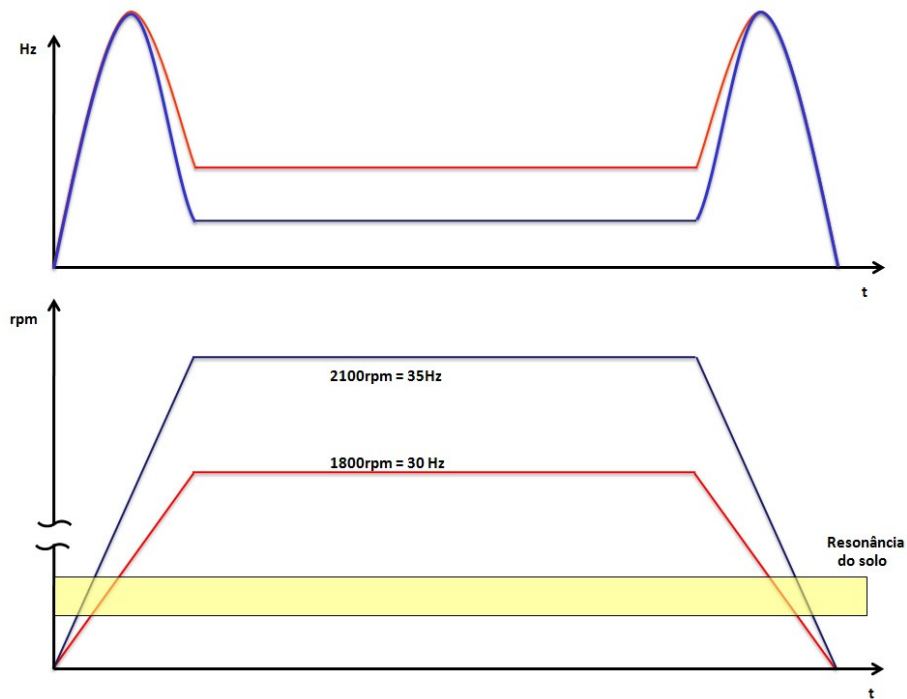


Figura 2: Ilustração de alta frequência e ressonância do solo.

2.3. Momento excêntrico variável ou *Resonance-Free, (RF)*

A figura 3, ilustra martelos vibratórios com momento excêntrico variável.

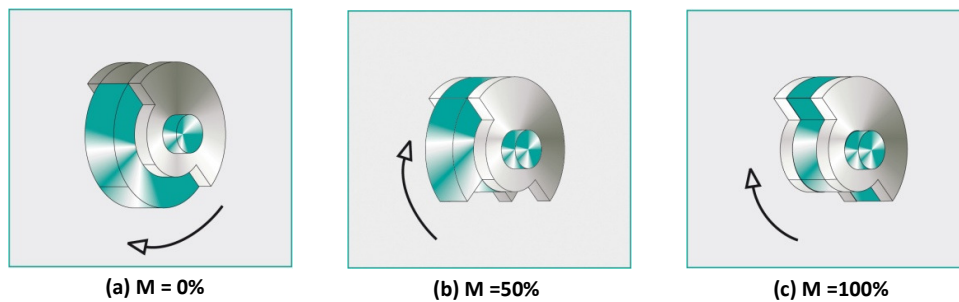


Figura 3: Mecanismo do momento excêntrico variável.

Neste tipo de martelo vibratório, existem duas massas excêntricas girando no mesmo eixo, em sentido contrário de mecanismo. Sendo a massa excêntrica uma meia lua, as duas massas excêntricas podem ser ajustadas de tal maneira que eles formem (a) uma lua cheia (b) três quartos de lua e (c) uma meia lua. No caso (a), as massas excêntricas se anulam e o momento excêntrico é zero. No caso (c), as duas massas excêntricas são sincronizadas para emitir a mesma vibração, e o momento excêntrico atinge 100%. Com este mecanismo pode-se gradualmente variar o momento excêntrico, como por exemplo, a 50% como no caso (b).

Pode-se ajustar o martelo vibratório no processo de cravação para diferentes camadas de solo, além de poder evitar ressonâncias quando se liga e desliga. Quando se liga o martelo

vibratório, ajusta-se as massas excêntricas na posição (a) e se mantém assim até atingir as rotações máximas. Só depois é que se começa a ajustar o momento excêntrico. No desligamento o processo é inverso: voltam-se as massas excêntricas para a posição (a), mantendo as rotações máximas, e depois se desliga o martelo vibratório. O resultado é ilustrado em verde na figura 4.

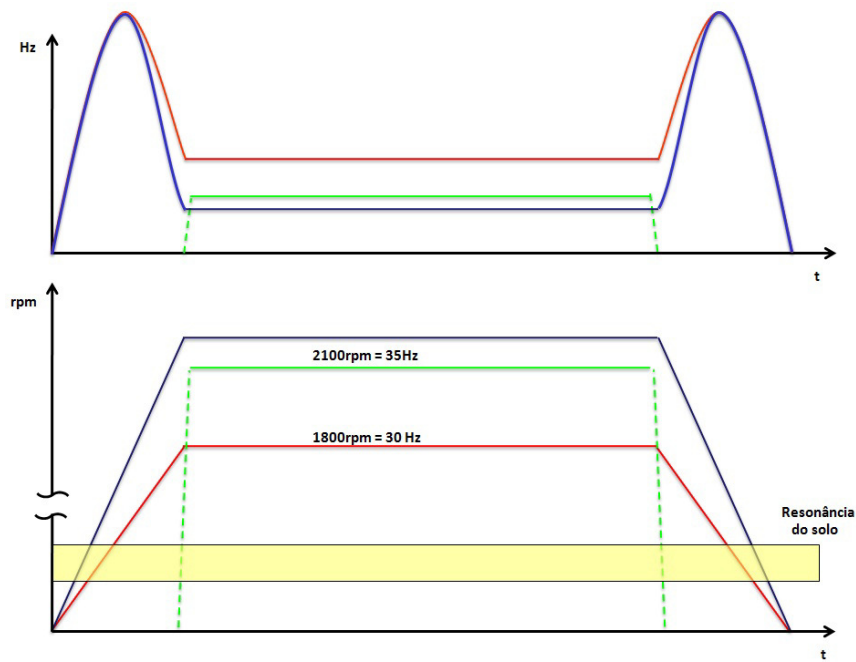


Figura 4: Ilustração de ressonância de martelo vibratório com momento excêntrico variável.

Um martelo vibratório ser "resonance-free" não significa que ele não emita vibração. Ele evita as vibrações problemáticas nas frequências de ressonâncias do solo quando é ligado/desligado, mas uma vez em operação emite a mesma vibração como um martelo vibratório qualquer. Em razão disso, vibradores "resonance-free" devem ser de alta-frequência.

A seguir lista-se fatores que amenizam o problema de vibração, sem entrar em detalhes, no espaço deste artigo:

- Mesmo se trabalhando com baixas frequências baixas, não necessariamente se causam vibrações. Quando a cravação tem progresso de, no mínimo, 1m por minuto ($\geq 1m/min$), danos são improváveis. Cautela deve ser aplicada quando o progresso é inferior a 50 cm por minuto ($\leq 0.5m/min$).²
- Depende do solo se uma rotação menor que 2100rpm pode causar frequências de ressonância. As "ondas" causadas pela vibração não se espalham da mesma maneira em todos os solos. Em solos moles quase não se sente a vibração enquanto que em solos rijos a propagação é maior. Por isso, às vezes não existe vibração ao redor da estaca quando se tem solo mole nos primeiros metros e a partir do solo resistente as ondas se espalham, e sente-se a vibração só a certa distância da estaca;

² EAU 2004, página 361.

- A vibração depende do tamanho do martelo vibratório e do perfil metálico. Martelos vibratórios de porte menor (momento excêntrico $\leq 10\text{kgm}$) geralmente não são equipados com momento excêntrico variável e uma estaca prancha vibra mais do que o perfil metálico;
- A norma alemã DIN 4150-3 indica que uma aceleração de estruturas (fundações, paredes, lajes etc.) somente pode causar danos quando é maior que 10mm/s para prédios ou 5mm/s para casas.³ Sempre se pode medir as vibrações na obra para aferir e demonstrar que em muitos casos somente sente-se a vibração, mas as estruturas não correm riscos.

Table 3: Guideline values for vibration velocity to be used when evaluating the effects of long-term vibration on structures

Line	Type of structure	Guideline values for velocity, v_v , in mm/s, of vibration in horizontal plane of highest floor, at all frequencies
1	Buildings used for commercial purposes, industrial buildings, and buildings of similar design	10
2	Dwellings and buildings of similar design and/or occupancy	5
3	Structures that, because of their particular sensitivity to vibration, cannot be classified under lines 1 and 2 and are of great intrinsic value (e.g. listed buildings under preservation order)	2,5

Figura 5: Aceleração máxima sugerida conforme DIN 4150-3, página 6.

3. Escolha de martelos vibratórios

3.1. Condicionantes técnicas do solo

Geralmente, saibro e areia com grãos arredondados e solos moles com baixa plasticidade são ideais para o método. Saibro ou areia de grãos com arestas e angulosos, solos argilosos duros, areias finas e argilas rijas não saturadas são bem menos adequados, pois absorvem a energia da vibração. De maneira geral, a água presente no subsolo ajuda a instalação, "lubrificando" a estaca durante o processo.

A posição de uma camada resistente também é importante. Quando ela se encontra na superfície é mais fácil de ultrapassar do que quando encontrada em profundidade, pois há perdas de energia de vibração no processo. Às vezes, estacas instaladas muito próximas podem causar a compactação do solo, em areia fina, por exemplo.

Utilizando-se martelos vibratórios de porte médio para instalação de perfis metálicos em obras residenciais e industriais, houve boas experiências em argilas siltosas (São Paulo e Campinas) e experiências muito boas em argilas orgânicas (Rio de Janeiro e Santos).

³ Veja em detalhe DIN 4150-3

3.2. Amplitude

A equação que determina a amplitude \bar{S} do martelo vibratório, indicada em 2. é ampliada para incluir o peso da estaca e o solo, chamada amplitude real utilizando o momento excêntrico M do martelo vibratório, o peso dinâmico $m_{Mart,dyn}$ do martelo, além do peso da estaca e o peso do solo (entendido aqui com a resistência imputada pelo solo)

$$\bar{S} = 2 \cdot \bar{x} = \frac{2 \cdot M}{m_{Mart,dyn} + m_{Estaca} + m_{Solo}} \quad [m],$$

Na Europa, por experiência, o m_{Solo} é adotado como $m_{Solo} \geq 0.7 \times (m_{Mart,dyn} + m_{Estaca})$, sendo recomendado amplitude mínima de 3mm.⁴ Como ainda não se tem esta experiência no Brasil – ponto a ser investigado futuramente -, sugere-se adotar o seguinte critério já praticado com sucesso por um dos autores:

$$\bar{S} = 2 \cdot \bar{x} = \frac{2 \cdot M}{m_{Mart,dyn} + m_{Estaca}} \geq 5mm,$$

Facilmente pode-se escolher o martelo pelo momento excêntrico transformando a equação para

$$M \geq 2.5 \cdot \frac{m_{Mart,dyn} + m_{Estaca}}{1000} \quad [kgm].$$

Todos os parâmetros são conhecidos e fixos e se tem boa previsão sobre o desempenho do processo de instalação das estacas. A experiência do projetista e executor deve levar em conta os demais fatores do projeto (tipo do solo, de estaca, a profundidade) que influenciam na escolha do martelo vibratório, utilizando a equação como um bom indicador, mas não a certeza da escolha da ferramenta certa.

3.3. Força centrífuga

Para solos ideais (uniformes, bem estruturados e saturados) a força centrífuga para a seleção de um martelo vibratório para um determinado projeto é dada pela equação abaixo,⁵ considerando que deva existir 15 kN de força centrífuga para cada metro de profundidade e 30 kN de força centrífuga para cada 100 kg de peso de estaca.

$$F = 15 \cdot \left(t + \frac{2 \cdot m_{Estaca}}{100} \right) \quad [kN]$$

onde t é a profundidade prevista em metros e m_{Estaca} é o peso total da estaca.

Novamente, tal qual a amplitude, reitera-se que tal fórmula é apenas um indicador.

⁴ EUA 2004, página 359

⁵ EAU 2004, página 360.

Deve ser observado que, enquanto o momento excêntrico e a amplitude são parâmetros constantes, a força centrífuga depende da frequência. A frequência - para efeitos relativos a martelos vibratórios - sempre é medida sem a estaca acoplada. A frequência máxima, portanto é valor teórico que raramente é alcançado em situações reais, pois quando a estaca está em processo de instalação resulta frequência nominal inferior à máxima. Isto implica que a força centrífuga, por ser variável, não deve ser o único critério de escolha. Apesar da força centrífuga ser significativa, na opinião dos autores, a análise do momento excêntrico e da amplitude são parâmetros mais importantes na escolha do martelo vibratório.

3.4. Instalação das estacas

É imprescindível tanto do ponto de vista de eficiência quanto da segurança, que o equipamento disponha de *pull-down*. O *pull-down* fornece um peso adicional que acelera a instalação (importante manter velocidade maior de 0.5m/min) e permite alcançar maiores profundidades. Isso fica claro quando se sabe que a vibração não empurra a estaca. A vibração vence o atrito lateral, mas o que empurra a estaca para dentro do solo é o peso do martelo vibratório. Os martelos vibratórios de porte médio (10 kgm-30 kgm) pesam entre 2.000 kg e 5.000 kg. Apresenta grande vantagem a instalação de um *pull-down* da ordem de 10.000 kg na torre do equipamento.

Em solos densos, não coesivos pode ser aplicada uma lavagem com baixa pressão (de 1.5-2bar, vazão de 2-4l/s no máximo, e tubo de 25mm de diâmetro)⁶. Este procedimento é recomendável para vibradores de alta frequência e os tubos devem ser conectados na estaca. Em solos muito rijos, pode ser utilizada uma lavagem com alta pressão (de 250-500bar, vazão de 1-2l/s, tubo de 20 a 30 mm de diâmetro do, bico de 1.5 a 3.0mm).⁷ Recomenda-se conectar o tubo quase no pé da estaca. A alternativa para solos argilosos pode ser a execução de pré-furos.

Recomenda-se trabalhar com perfis metálicos a partir de 200 ou 250 mm que tem maior superfície, para melhor encaixe no grampo do vibrador. Em estacas-prancha recomenda-se a de menor perímetro, 60 cm de largura e simples, e por razões de estabilidade estacas laminadas a quente. Em estacas-prancha duplas (AZ, por exemplo), recomenda-se grampos especiais para pegar estas estacas. Estacas-pranchas com 20 ou mais m de comprimento devem ter uma espessura mínima de 12 mm.⁸ Além disso, deve-se considerar também o atrito entre as estacas-prancha e o conector. Para facilitar, recomenda-se engraxar o conector da estaca prancha que vai engatar no conector da estaca prancha já cravada e tampar o conector do lado oposto para evitar entrada de material que possa dificultar a instalação da próxima estaca. Espuma de poliuretano, por exemplo, é uma solução.

⁶ EN 12063, página 45.

⁷ EN 12063, página 45.

⁸ Grabe, Jürgen e Pichler, Torben, página 64.

4. Análise de 5 casos reais

As duas fórmulas sugeridas nos itens 3.2 e 3.3 podem ser aplicadas às situações apresentadas em dois artigos apresentados neste seminário:

- Critério de Paralisação de Estacas Metálicas com Utilização de Martelos Vibratórios – Controle de Campo
- Resultados de Provas de Carga Estáticas em Estacas Metálicas Cravadas com Martelo Diesel e Instaladas com Martelo Vibratório na Barra da Tijuca – RJ.

Nos artigos são examinados 4 casos de Santos, SP e um do Rio de Janeiro, RJ, no qual perfis metálicos instalados com martelos vibratórios e sem aferição por nega atingiram o a carga de projeto.

Com o peso real da estaca e os dados dos martelos vibratórios informados nos artigos, são obtidos os resultados mostrados na tabela abaixo.

OBRA	Comprimento previsto (m)	Comprimento cravado (m)	Peso da estaca (kg)	Momento excêntrico (kgm)	Força centrífuga (kN)	Peso dinâmico (kg)	Amplitude (mm)	$M \geq 2,5 \cdot \frac{m_{Mart.dyn} + m_{Estaca}}{1000} \quad [kgm].$	
								$F = 15 \cdot \left(t + \frac{2 \cdot m_{Estaca}}{100} \right) \quad [kN]$	
1 - São Vicente (Obra Mal. Deodoro)	42 a 50	42	4098	17,4	1100	2690	5,13	17,0	1.859
		50	5034	17,4	1100	2690	4,51	19,3	2.260
2 – Santos (Presidente Wilson)	46	38,6	4734	17,4	1100	2690	4,69	18,6	1.999
3 - Praia Grande (Xixova)	48	48	4512	17,4	1100	2690	4,83	18,0	2.074
4 –Santos (WashLuiz)	48	49,5	4512	17,4	1100	2690	4,83	18,0	2.096
5 - Rio de Janeiro (Windsor Barra)	39	39	4875	24	1200	2840	6,22	19,3	2.048

Figura 6: Resultado das formulas para 5 casos reais

A análise dos dados sugere que:

1. A amplitude real varia de 4,69mm a 6,22mm que é muito próximo do valor mínimo teórico de 5mm (variação < 10%). Isso permite aceitar a formula da amplitude apresentada. .
2. O momento excêntrico M calculado é de 17 kgm a 19,3kgm para as quatro obras de Santos, onde foi utilizado martelo com M=17,4kgm, e de 19,3kgm para a obra do Rio de Janeiro, onde foi utilizado martelo com M=24kgm. Isso permite novamente aceitar a formula para o dimensionamento do martelo vibratório, pois todas as obras foram executadas com êxito.
3. A força centrífuga calculada oscila em torno de 2.000kN, sendo que nas obras foram utilizados martelos com F = 1.100kN e F = 1.200kN., sugerindo uma superestimação da necessidade real.

5. Conclusão

A utilização de martelos vibratórios parece cada vez mais importante e este artigo procura sintetizar as informações técnicas disponíveis na literatura e a experiência dos autores na execução de obras de fundações com estacas metálicas (inclusive de seção decrescente) com martelos vibratórios.

Pode ser constatado que a utilização da formula da amplitude e do momento excêntrico dos martelos vibratórios, com a sugerida adaptação para o Brasil, conduz a bons resultados do ponto de vista de dimensionamento do equipamento, enquanto que a força centrífuga não apresentou resultados satisfatórios. Como a tecnologia foi desenvolvida fora do Brasil deve ser adaptada às condições de nosso subsolo. Até que mais estudos sejam feitos ênfase deve ser dada aos parâmetros do momento excêntrico e da amplitude na escolha do martelo vibratório.

Referências

- EN 12699 (2000) Execution of special geotechnical work - Displacement Piles
- EN 1993-5 (2007) Eurocode 3: Design of steel structures - Part 5: Piling
- EN 10263 (1998) Execution of special geotechnical work - Sheet-pile walls
- EN 1997-1 (2007) Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules
- DIN 4150-1 (2001) Erschütterungen im Bauwesen - Teil 1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen (Structural vibration - Part 1: Prediction of vibration parameters)
- DIN 4150-2 (1999-02) Erschütterungen im Bauwesen - Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden (Structural vibration - Part 2: Human exposure to vibration in buildings)
- DIN 4150-3 (1999-02) Erschütterungen im Bauwesen - Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen (Structural vibration - Part 3: Effects of vibration on structures)
- Falconi, F.; Maset, V.; Silva, H. (2014) Cravação de estacas metálicas com martelo hidráulico e instalação com martelo vibratório - comparação de resultados de provas de carga estáticas – Cobramseg- Goiânia
- Selders, J.; Falconi, F. (2014) Resultados de Provas de Carga Estáticas em Estacas Metálicas Cravadas com Martelo Diesel e Instaladas com Martelo Vibratório na Barra da Tijuca – RJ.
- German Society for Soil Mechanics und Engineering, Foundation [EAU 2004]: *Recommendations of the Committee for Waterfront Structures, Harbours and Waterways*. Ernst & Sohn, 8. Edição, 2004
- Grabe, Jürgen e Pichler, Torben: *EAU 2012. Die 11. Auflage der Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen"*. EM: BAW-Kolloquium, S. 59–67, 2012