

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

ANÁLISE DE CRAVABILIDADE DE ESTACAS-PRANCHA METÁLICAS: ESTUDO DE CASO EM SOLO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA

Alexandre Samuel Ramalho

Engenheiro Civil, Mestrando, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, alekostkoski@gmail.com

Jordana Furman

Engenheira Civil, Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura, Curitiba, Brasil, jorfurman@gmail.com

Kimberlym Tábata Pesch Vieira

Geóloga, Mestranda, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, kimberlymtabata@gmail.com

Cristhyano Cavali da Luz

Engenheiro Civil, Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura, Curitiba, Brasil, crisccluz@hotmail.com

Larissa de Brum Passini,

Professora, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, larissapassini@ufpr.br

RESUMO: A seleção de martelos vibratórios para cravação de estacas prancha é algo que envolve uma série de variáveis sendo buscadas soluções para esse problema desde a metade do século XX, com desenvolvimento de uma série de métodos e modelos, sendo os mais modernos baseados na equação de onda proposto por Smith (1960), tal solução é empregada pelo software GRLWEAP da PDI, bem como o ensaio de Prova de Carga Dinâmica (PDA), através do modelo CASE e CAPWAP. Essa pesquisa utilizou como estudo de caso a obra de contenção da trincheira da Av. Mário Tourinho sob a Av. Nsa. Aparecida em Curitiba-PR, utilizando ensaios de PDA realizados nas estacas modelo AZ19-700. Com base nos resultados obtidos de ensaio PDA que forneceu dados de damping, quake, resistência do conjunto solo/estaca e de sondagens à percussão (SPT) para reconhecimento do solo local, foi calibrado software de análise de cravabilidade de estacas (GRLWEAP da PDI) a fim de avaliar taxas de penetração e resistências máximas oferecidas por estacas-prancha metálica cravadas com martelo vibratório em solo da Formação Guabirrotuba.. Após os estudos e análises realizadas, é possível observar que a não convergência entre os resultados do software GRLWEAP e os encontrados no ensaio PDA pode estar associada a excentricidades e atritos desconsiderados pelo software, que geram perdas na eficiência e ganhos na resistência à cravação, superiores aos previstos na modelagem, bem como da dificuldade em estabelecer valores adequados de *quake* e *damping* ao solo do modelo.

PALAVRAS-CHAVE: Martelo vibratório, Prova de carga dinâmica, Cravabilidade.

ABSTRACT: The selection of vibro hammers for sheet pile driving is something that involves a series of variables, a problem for which solutions have been searched since the mid-twentieth century, with the development of a series of methods and models, being the most modern based on the wave equation proposed by Smith (1960), such solution is used by PDI's GRLWEAP software, as well as the Pile Dynamic Analysis (PDA), through the CASE and CAPWAP model. This research used as a case study the construction of a underpass containment structures for the Mário Tourinho Ave under Nsa. Aparecida Ave. in Curitiba-PR, using PDA tests performed on model AZ19-700 piles. Based on the results acquired from a PDA test that provided data on damping, quake, resistance of the soil/pile set and percussion sounding (SPT) for local soil recognition, the drivability analysis software (PDI's GRLWEAP) was calibrated in order to evaluate penetration rates and maximum strength offered by metallic sheet piles driven with vibro hammer in the soil of the Guabirrotuba Formation. After the studies and analyzes carried out, it is possible to observe that the non-convergence between the results of the GRLWEAP software and those found in the PDA test may be associated with eccentricities and frictions disregarded by the software, which generate greater losses in efficiency and



gains in resistance to crimping higher than the modeling results, as well as the difficulty in defining adequate earthquake and ground damping values for the model.

KEYWORDS: Vibro hammer, Pile Dynamic Analysis, Driveability.

1 Introdução

Com o crescente fluxo de veículos e expansão das cidades, é natural que obras de infraestrutura urbana sejam necessárias. No entanto, interromper o tráfego de veículos para execução dessas obras é sempre muito oneroso ao cidadão e aos entes públicos. Assim, métodos construtivos que otimizem tempo são de grande interesse e dentre estes podemos citar as obras de contenção com uso de estacas prancha para execução de trincheiras urbanas. Além dessas características o uso de estacas prancha de obras de arte especiais (OAE) proporcionam ao executor e ao projetista o uso de um material de características mecânicas bem definidas, além de proporcionar uma rápida execução com a vantagem da estrutura poder ser solicitada imediatamente após o fim da cravação. Além da vantagem desses perfis poderem ser cravados na maioria dos tipos de solos (Yandzio, 1998). Por se tratar de uma obra urbana, com diversas edificações próximas, optou-se pelo uso de martelo vibratório para cravação das estacas prancha, com o objetivo de reduzir o ruído, vibração e até mesmo o tempo da obra. Desta forma as estacas cumprem a função de conter o solo, conforme a trincheira é escavada, ficando assim permanentemente e no trecho de OAE, além de funcionar como contenção, assumem também a função de pilar e fundação da estrutura da OAE.

2 Localização da obra

A obra em questão está localizada na porção noroeste da cidade de Curitiba/PR, no cruzamento entre a rua Gen. Mário Tourinho e a Avenida Nossa Senhora Aparecida, no bairro Seminário (Figura 1). Em relação ao substrato, a região é caracterizada pela ocorrência dos sedimentos da Formação Guabirubá – Bacia de Curitiba, além dos depósitos recentes do rio Barigui e porções de exposição de rochas do embasamento da bacia nas proximidades.

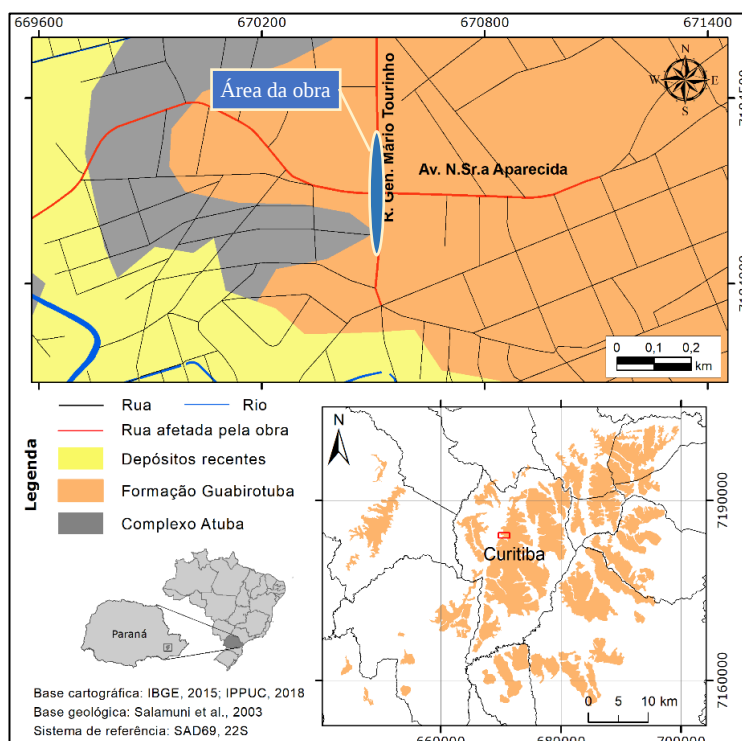


Figura 1 - Localização geográfica e contexto geológico do local da obra



3 Características geológicas e geotecnicas

A Bacia de Curitiba é uma pequena bacia do tipo rifte, depressão formada por esforços distensivos e controlada por falhas normais, e compõe junto com outras bacias semelhantes o Rift Continental do Sudeste do Brasil. Esses conjuntos de bacias teve sua origem no Cenozoico associada à abertura do Atlântico Sul, devido a reativações de estruturas do embasamento, formando assim pequenas depressões alongadas em direção NE-SW que, na região de Curitiba, condicionou a formação de espaço de acomodação para a deposição da Formação Guabirotuba (Ricomini et al., 2004). A Formação Guabirotuba é descrita como constituída por espessas camadas de lamias com intercalações de camadas lenticulares de areias arcossianas e, em menor proporção, depósitos de cascalhos e ‘margas’ (cimentação carbonática - calcretes). Sua sedimentação é atribuída predominante a depósitos de leques aluviais que ao centro da bacia alimentariam porções lacustres (Bigarella e Salamuni, 1962). A idade da sedimentação era controversa até a descoberta da fauna Guabirotuba em afloramento na Cidade Industrial de Curitiba que possibilitou estimar a deposição da unidade no período Eoceno (Sedor et al., 2017). Lima et al. (2013) que caracterizaram o ambiente deposicional da formação como um sistema fluvial distributário, atribuíram a deposição dos sedimentos na região da obra em questão à rios rasos dominados por inundação laminar arenosa, caracterizados por sucessões de lamias maciças intercalados com estratos de areia fina/média.

Em relação as lamias esverdeadas características da Formação Guabirotuba, Bigarella e Salamuni (1962) atribuíram ao intemperismo sua mudança gradual para tons avermelhados nas porções superiores de afloramentos. Tais argilas foram caracterizadas por Kormann (2002) como compostas predominantemente por esmectitas nos perfis esverdeados, passando a caulinitas nas porções avermelhadas devido a ação do intemperismo. Também conhecido popularmente por “sabão de caboclo”, devido a sua dureza em seu estado natural, é uma material bastante plástico que quando umidecido torna-se bastante liso e escorregadio. Frequentemente ocasiona atraso em obras por conta de desmoronamentos durante escavações ou estrangulamento do fuste de estacas (Massad et al, 1981). A Figura 3 demonstra o corte realizado durante a escavação da trincheira, onde é possível observar os horizontes do solo, superficialmente uma argila marrom mais intemperizada e logo em seguida uma argila arenosa cinza, compacta e menos intemperizada.



Figura 2 – Nspt antes e durante as obras

3.1 Sondagens SPT

Ao todo foram realizadas 13 sondagens SPT (*Standard Penetration Test*), 7 antes do início da obra, as quais foram identificadas através de numeração, para subsidiar a elaboração do projeto geotécnico e outras 6, identificadas por letras, já durante a execução da obra para confirmação das primeiras sondagens, em virtude de dificuldades executivas durante a cravação das estacas prancha (Figura 3).

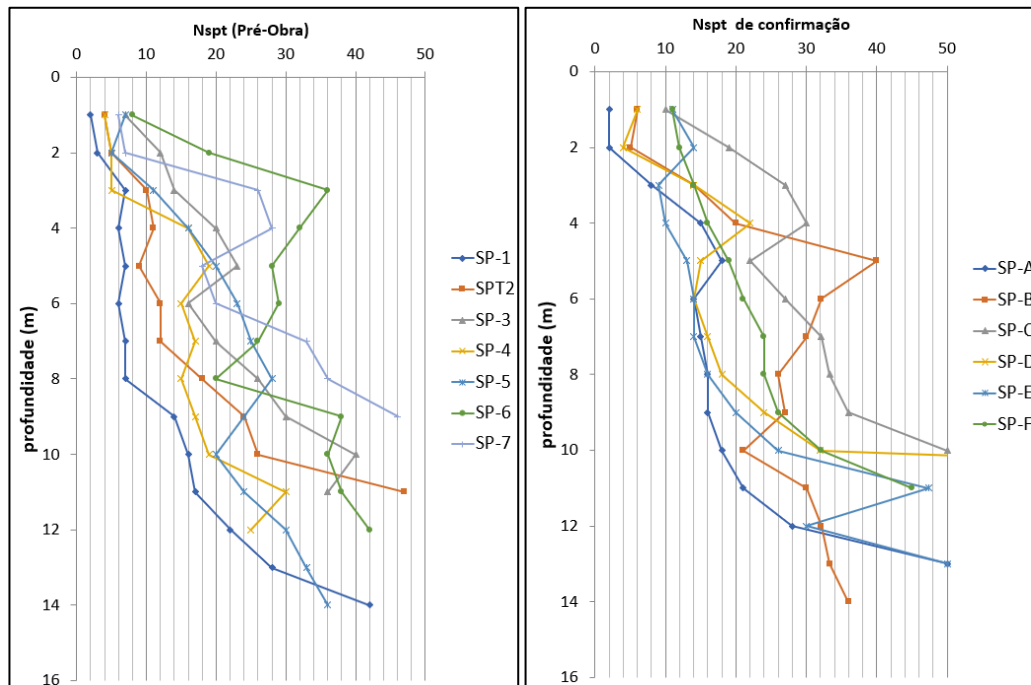


Figura 3 – Nspt antes e durante as obras

As sondagens pré-obra indicaram um nível d'água, a cerca de 7 m, e as sondagens de confirmação não identificaram nível d'água, tal variação deve-se a influência da sazonalidade nos regimes de chuva. Com base nas informações contidas nos relatórios de sondagem SPT foi feito o perfil estratigráfico das camadas de solo presente na área da obra, o qual está demonstrado na Figura 4. Percebe-se que o solo é majoritariamente composto de argila siltosa e arenosa, com consistências que vão de média a compacta/rija, de forma que o impenetrável a sondagem a percussão encontra-se, em média, a 14 m de profundidade. Os valores de Nspt mínimo e máximo são 2 e 50, respectivamente, com Nspt médio da ordem de 21 golpes.

O Trecho de cravação de estacas que apresentou maior dificuldade foi o compreendido entre as sondagens de nº 4 e letra "B", tanto pela resistência do solo quanto por ser o trecho com estacas mais longas (12 e 13 m) de cravação, motivo pelo qual este artigo se restringiu a apresentar os estudos de cravabilidade para este trecho.

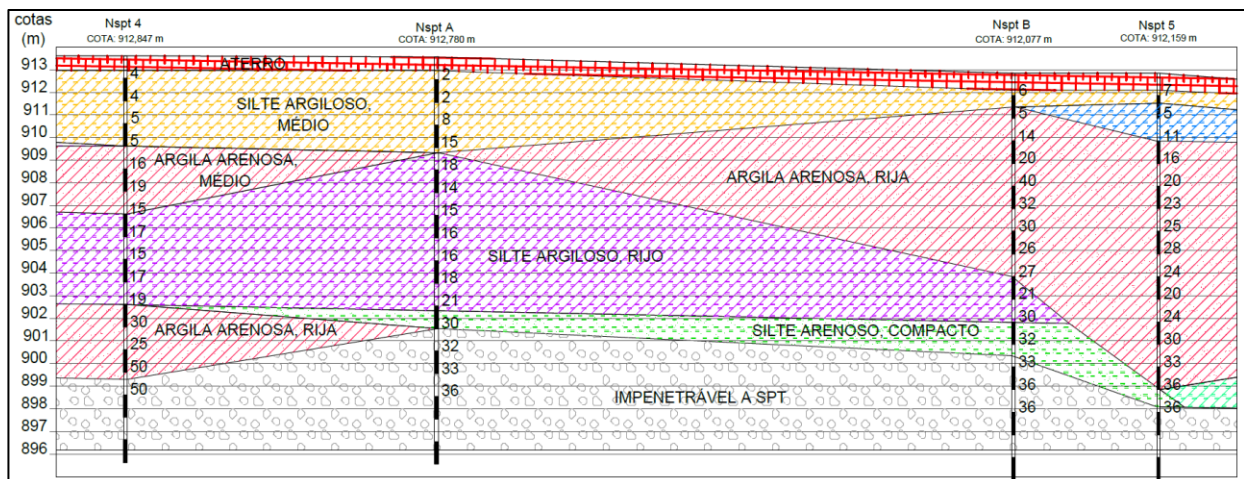


Figura 4 - Perfil estratigráfico do solo (Local de cravação das estacas AZ-19 com 13 m)



4 Cravação por martelo vibratório

Os martelos vibratórios foram inicialmente desenvolvidos na Alemanha e na antiga União Soviética entre os anos de 1930 e 1931. O seu funcionamento consiste em girar massas iguais e excêntricas (Figura), porém em sentido contrário (Alonso, 2019).

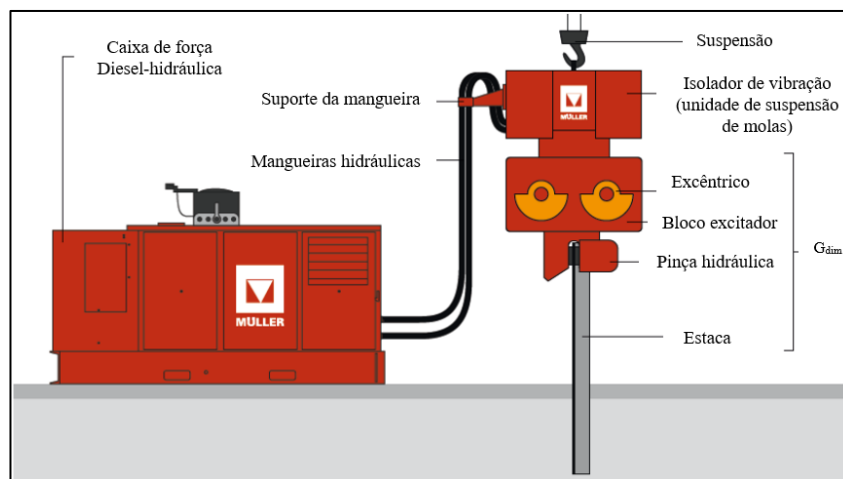
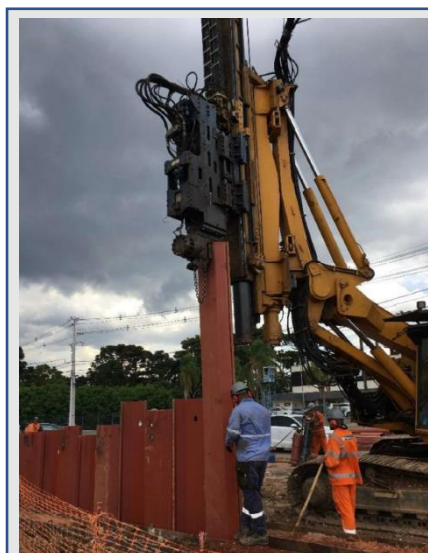


Figura 5 - Esquema de um martelo vibratório (Muller, 2013).

Segundo Alonso (2019), os martelos vibratórios são geralmente classificados de acordo com a frequência imposta pelo excêntricos, podendo ser assim classificados em: (i) Baixa frequência: que operam em frequência inferior a 20 Hz (1.200 rpm); (ii) Média frequência: que operam em frequência entre 20 Hz (1.200 rpm) e 35 Hz (2.100 rpm); (iii) Alta frequência: que operam em frequência superior a 35 Hz (2.100 rpm). Inicialmente a obra utilizou um martelo vibratório modelo ABI MRZV 18V, conforme Figura , que apesar de ter tido êxito para cravação das estacas GU-8N para profundidades de até 8 m, teve dificuldade para profundidades maiores e também na cravação das estacas AZ-19 700d, mesmo para profundidades de até 3 m, motivo pelo qual o passou-se a utilizar o medolo MS-50 H3 da Muller, que segundo as especificações do fabricante, possui as características conforme apresentado na Figura . Portanto, tem-se um martelo vibratório que opera em média frequência (entre 20 Hz e 35 Hz), com carga total de 8,05 toneladas.



Modelo	ABI - MRZV 18V
Força Centrífuga	925 kN
Momento Excêntrico	18 kg.m
Velocidade	2.160 rpm
Frequência	36 Hz
Peso dinâmico (sem pinça)	2.730 kg
Peso total (sem pinça)	4120 kg
Amplitude	2*13 26 mm

Figura 6 - Imagem do MS-50 H3 operando no canteiro de obras e especificações do fabricante



Modelo	MS-50 H3
Força Centrífuga	1.430 kN
Momento Excentrico	50 kg.m
Velocidade	1615 rpm
Frequência	26,9 Hz
Força de cravação	500 kN
Peso dinâmico (sem pinça)	3.820 kg
Peso total (sem pinça)	8.050 kg
Amplitude	26,2 mm

Figura 7 - Imagem do MS-50 H3 operando no canteiro de obras e especificações do fabricante

Segundo Holeyman (2002), em solos não coesivos essas tensões efetivas podem ser reduzidas de 50 a 95% com martelos vibratórios. Contudo, em solos coesivos esta resistência pode não ser reduzida, não havendo o efeito de liquefação. Segundo Guillemet (2013), argilas necessitam de alta amplitude para romper a adesão da estaca com o solo ao longo do fuste, em martelos vibratórios, essa amplitude é diretamente relacionado ao momento excentrico. A vibração em altas frequências, superiores a 30 Hz, apresentam bons resultados quando aplicado em areias, reduzindo a resistência lateral, devido à rápida aceleração que induzem a fluidização do solo. O trabalho em altas frequências evita o efeito de ressonância no solo, sendo indicado em regiões urbanas ou próximas a construções (Guillemet, 2013). A seleção de martelos vibratórios para cravação de estacas é realizada de forma empírica, com base na experiência dos executores.

5 Procedimento de cravação

Além da escolha adequada do martelo vibratório, cuidados durante a execução da cravação das estacas devem ser adotados, a depender da dificuldade apresentada pelo solo, para garantir o alinhamento das estacas, existindo basicamente 3 formas executivas, bem como nos resultados obtidos: (i) Levantar e cravar, recomendado apenas quando as estacas forem curtas e solo não oferecer dificuldade à cravação; (ii) Uso de gabarito de cravação por peineis, para assegurar a verticalidade e alinhamento das estacas pranchas, recomenda-se o uso de gabaritos; (iii) Sequência de cravação por etapas, procedimento de cravação recomendado quando a instalação das estacas prancha deve atravessar solos muito resistentes (areias muito compactas, lentes de pedregulhos, etc.). As estacas são posicionadas dentro do gabarito e cravadas parcialmente e progressivamente, na sequência 1,3,5,4,2.

6 Dimensionamento do martelo

Na obra em questão, foram utilizadas seções de estacas prancha PU-8 (52,8 kg/m), GU-8N (48,5 kg/m) e AZ-19 (80 kg/m) de estacas metálicas. Conforme o projeto, as estacas devem ser cravadas a profundidades que variam entre 4 a 13 m, sendo que a estaca com maior profundidade de cravação e com maiores solicitações de carga é a AZ-19, devendo ser cravada até 13 m de profundidade. Com relação ao solo, essas estacas ficam entre o SPT 4 e SPT B. Segundo Alonso (2019), a seleção do martelo vibratório é empírica, contando apenas com o conhecimento e prática do executor, existindo alguns métodos que procuram estabelecer parâmetros para conduzir a uma escolha mais criteriosa, porém ainda dotados de empirismo. Conforme Ernst & Sohn (2004), a força centrífuga pode ser utilizada como critério de seleção de martelos vibratórios, de forma que a força centrífuga mínima deve ser a obtida através da seguinte equação:

$$F = 15. \left(t + \frac{2.m_{pile,mat}}{100} \right) \text{ [kN]} \quad (1)$$

Onde: F = Força centrífuga mínima (kN); t = Profundidade de cravação (m); $m_{pile,mat}$ = Peso da estaca (kg).



Ainda, segundo a recomendação, devem 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. Além da força centrífuga a amplitude também pode ser um parâmetro para seleção do martelo vibratório, obtida pela seguinte equação em função do peso dinâmico do sistema, incluso a pinça:

$$Amplitude = \left(\frac{2000 \cdot \text{Momento excentrico [kg.m]}}{\text{peso dinâmico [kg]}} \right) [m] \quad (2)$$

Amplitude inferior a 3 mm não são recomendadas, como forma orientativa, a amplitude deve ser da ordem de 4 mm, 6 mm e 8 mm, conforme a cravabilidade fácil, normal e difícil, respectivamente, referente a dificuldade de cravação (EAU, 2004). Contudo, essas equações são aplicáveis em solo uniforme, bem estruturado e saturado, diferentemente das condições da obra, portanto, não foram aplicadas neste estudo. Além dessas formulações empíricas, existem estudos sendo desenvolvidos com base em equação de onda, como o caso do GRLWEAP (*Wave Equation Analysis of Pile Driving*), e uma proposta de Alonso (2019). Segundo estudo desenvolvido por Alonso (2019), a carga de ruptura geotécnica (PR) em uma estaca é a soma da resistência de ponta e de resistência lateral. Porém, a resistência oferecida pelo solo durante a cravação de uma estaca por martelo vibratório é menor do que (PR). Com base nesse conceito e com estudo de cravação de estaca de seção transversal simples (H), com martelos de alta frequência, na costa brasileira, especificamente em Santos (SP), Barra da Tijuca (RJ), Jaboatão dos Guararapes (PE) e São Luis (MA). Os parâmetros para seleção de martelo vibratório pode ser obtido conforme as equações a seguir:

$$P_{\text{din}} \geq 0,6 \cdot P_{\text{est}} \quad \text{e} \quad F_c = 0,8 \cdot P_{\text{adm}} - (P_{\text{est}} + P_{\text{din}} + P_{\text{pd}}) \quad (3)$$

Onde: P_{din} = Peso dinâmico mínimo; P_{est} = Peso da estaca; F_c = Força centrífuga mínima; P_{adm} = Carga de trabalho da estaca; P_{pd} = *Pull-Down* (Quando o martelo dispõe desse elemento).

A aplicabilidade dessas equações não se enquadram nas condições da obra em estudo. Existe ainda, a possibilidade de utilização de ábacos fornecidos pelos fabricantes de martelos para escolha do modelo, como de Muller (2013) apresentado na Figura . Contudo, esses ábacos são limitados à amostragem utilizada para sua concepção, não havendo qualquer fundamentação teórica (Alonso, 2019).

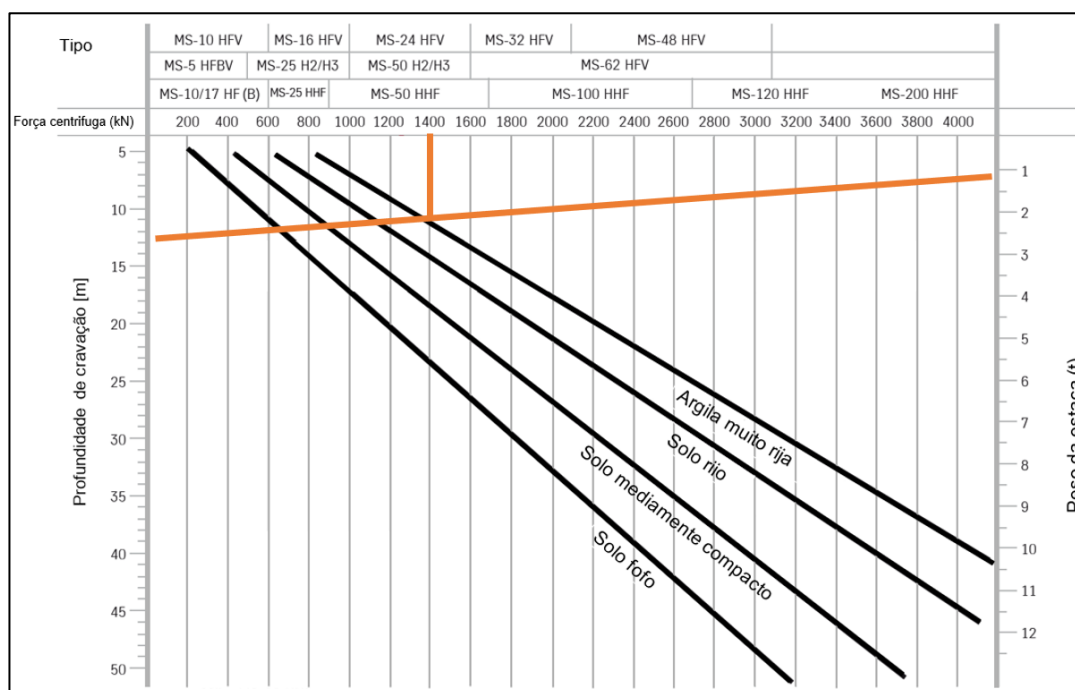


Figura 8- Ábaco para seleção de martelo vibratório. (Adaptado de Muller, 2013)



Aplicando-se este ábaco, chega-se à conclusão de que o martelo MS-50 H3 da Muller (2013) é adequado para a cravação de estacas com peso total de 1040 Kg a 13 m de profundidade em uma argila muito rija. Contudo, não foi o observado em campo o que gera questões a serem discutidas.

Na Tabela 1 os valores recomendados para quake e damping por Jiachen (2018), para análise no software GRLWEAP estão apresentados e condizem com os valores sugeridos pelo manual do software supramencionado.

Tabela 1 - Valores recomendados de quake e damping

Solo	quake de fuste (mm)	quake de ponta (mm)	damping de fuste (s/m)	damping de ponta (s/m)
Coesivo	2,0 – 3,5	Diâmetro da estaca/60	0,7 – 1,3	0,5 – 0,6
Não coesivos	1,5 – 3,0	Diâmetro da estaca/120	0,6 – 0,9	0,3 – 0,5
Base rochosa	1,0 – 2,0	2,5	0,5 – 0,8	0,1 – 0,3

Apesar de ser considerado um padrão de quake em torno de 2,5 mm, Aoki (1991 apud CINTRA, 2013) descreve que para solos resilientes (comportamento análogo ao de “borracha”) o valor de quake pode apresentar valores da ordem de até 30 mm.

7 Ensaio PDA realizado nas estacas

Entendendo que a obra estava sendo executada em local com particularidades geológico-geotécnicas e existindo dúvidas quanto ao desempenho das estacas quanto a sua capacidade portante da OAE (Obra de Arte Especial estrutura do tabuleiro da trincheira), foi realizado ensaio PDA em 6 estacas modelo AZ-19 700d.

O método de ensaio contou com um bate estaca com martelo de queda livre de 25 kN com altura de queda crescente, de 30cm, 60cm e 90cm. Na tabela 2 estão listadas as estacas ensaiadas e os resultados obtidos.

Tabela 2- Estacas ensaiadas com PDA e resumo de cargas mobilizadas

Local	Estaca	Seção	Comp. Total (m)	Comp. Cravado (m)	Carga de Trabalho (kN)	Carga ao longo do fuste (kN)	Carga de ponta (kN)	Resistência máxima mobilizada ⁽¹⁾ (kN)
Lado esquerdo	E1190	AZ19-700	6,62	5,42	220	381,5	798,3	1150
Lado esquerdo	E1212 ⁽²⁾	AZ19-700	10,94	9,74	220	2109,6	327,4	2437
Lado esquerdo	E1233	AZ19-700	12,71	11,51	220	1821,9	246,3	2068
Lado Direito	E2206	AZ19-700	5,73	4,53	220	385,2	756,1	1141
Lado Direito	E2211	AZ19-700	8,82	7,62	220	636,5	235,0	872
Lado Direito	E2215 ⁽²⁾	AZ19-700	11,26	10,06	220	664,8	159,8	825

Os valores obtidos na interpretação do ensaio PDA através do modelo CAPWAP São demonstrados na Tabela 3, para cada uma das estacas ensaiadas, sendo todos do modelo AZ 19 700d.

Tabela 3 - Resumo dos valores calculados pelo CAPWAP

	E1190	E1212	E1233	E2206	E2211	E2215
Shaft quake (mm)	0,995	0,992	0,999		0,825	
Shaft damping (s/m)	1,492	0,257	0,134	0,522	0,154	0,96
Toe quake (mm)	2,115	0,628	1,004		0,288	
Toe damping (s/m)	1,704	0,804	0,358	0,079	0,080	0,3
Jc (damping case)					0,65	
RS (kN)	381,5	2109,6	1821,9	385,2	636,5	664,8
RT (kN)	768,3	327,4	246,3	756,1	235,0	159,8
RU (kN)	1149,8	2437,0	2068,2	1141,3	871,5	824,6

Sendo:

RS = Resistência lateral

RT= Resistência de ponta

RU = Resistência Total



Experimentalmente, como forma de avaliar a influência dos parâmetros de quake e damping sobre o modelo de equação de onda, com auxílio do GRLWEAP, foi selecionada a estaca E1233, por essa ter sido a que atingiu maior profundidade cravada para realizar simulações, variando os valores de quake desde 0 mm a 15 mm. Mantendo os valores de N_{spt} já utilizados e a profundidade sendo 13 m para estaca simples, os valores de damping como zero para fuste e ponta estando os resultados demonstrados na Tabela 4-3 e representados graficamente na Figura 4.

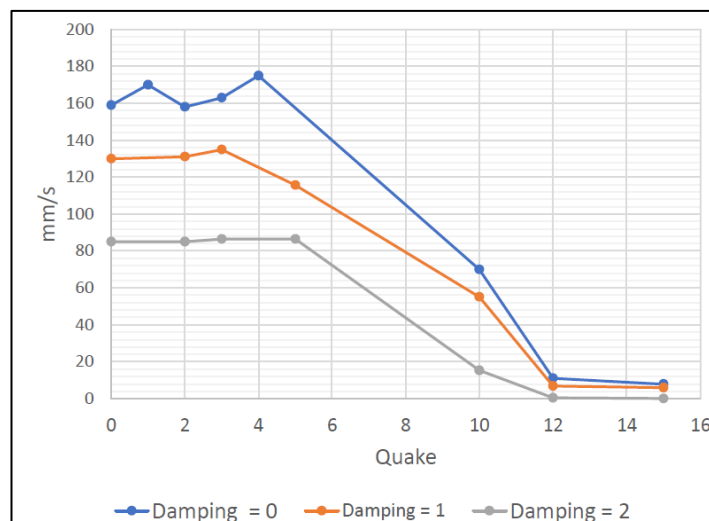


Figura 4. Influência do valor de quake e damping na taxa de penetração.

8 Resultados e análises

Houve dificuldade além da prevista para cravação das estacas, com deformação de algumas, quebra por cisalhamento na ponta de várias e sem sucesso na cravação. Contudo, algumas questões sobre a cravação das estacas devem ser apontadas.

Nas sondagens pré-obra, o nível de água apresentava-se em média a 7,5 m de profundidade, com água a 1,25 m sendo encontrado no SP-3. Entende-se que se tratava de água em suspensão. No decorrer das obras e nas sondagens de confirmação, não foi observado presença de nível água no solo, situação esta que implicou na cravação das estacas em solo argiloso em condição não saturada.

Durante a cravação, imprimia-se a força máxima do equipamento. Porém, segundo Kormann et al. (1999), o solo existente na região oferece menores resistência ao cisalhamento quando submetida a carregamentos mais lento, bem como o intercepto coesivo. Tal redução tem explicação na poropressão negativa gerada por carregamentos mais rápidos, que não permitem a drenagem.

Além dessas questões, a bibliografia existente orienta para o uso de gabaritos e cravação por sequência em solos resistentes, cuidado este não observado na execução das primeiras estacas.

Segundo Legrand et al. (1993) apud Viking (2002), o contato dos conectores também oferecem resistência a cravação, por conta de partículas de solo ou do próprio contato do aço. Para reduzir essa fricção nos conectores, pode-se utilizar espuma para impedir a entrada de solo e óleo como lubrificante.

Arcelor Mittal (2016), cita a possibilidade de utilização de jatos de água, de baixa ou alta pressão, acoplados a estaca prancha para auxiliar na cravação, cumprindo a dupla função, de desagregar o solo e tornar o solo “liso”, ou ainda a utilização de pré-furos. Na obra em questão foram realizados pré-furos para facilitar a cravação, contudo, não houve ganho na facilidade de cravação. Uma possível explicação é a já relatada característica do solo, que comumente fecha o fuste de estacas escavadas.

Como observado, não existem parâmetros empíricos ou teóricos que auxiliem na escolha de martelos vibratórios para cravação de estacas metálicas em solos como o encontrado na Bacia de Curitiba. A bibliografia existente apenas versa sobre a dificuldade de cravação por vibração em argilas, sem definir impossibilidade de uso desse método em tais solos, indicando para o emprego de martelos que possuam maiores amplitudes. Associado a dificuldade imposta pelo próprio solo, existem ainda questões executivas, de forma que não se



pode afirmar que toda a dificuldade encontrada para cravação das estacas nessa obra, são oriundas apenas das características do geotécnicas. Além de não terem sido esgotadas as possibilidades técnicas conhecidas, não sendo conclusiva a viabilidade ou não de martelo vibratório, necessitando de asculação.

Uma vez que o ensaio PDA depende de medições de velocidade e força e estando as estacas em contanto com outras estacas formando a cortina é razoável pensar que essas condições de contorno interferiram nas medições de campo e, logo, nas análises, prejudicando a adoção de valores precisos para quake e damping.

9 Conclusão

Com bases no que foi apresentado, entende-se que os métodos disponíveis para seleção de martelos vibratórios não são aplicáveis a região da Bacia de Curitiba, não havendo referencial teórico ou empírico que relate experiências prévias a respeito de execução desse tipo de obra na Formação Guabirotuba, sendo também escassos os estudos que conduzam ao consenso para dimensionamento de martelos vibratórios nas condições de contorno descritas. Apesar da concepção inicial da obra prever o uso de martelo vibratório visando à redução no tempo de execução, as dificuldades impostas tanto pelo solo quanto pela não adoção de boas práticas construtivas ainda é objeto de discussão com relação a suas respectivas influências nas constantes interrupções durante os serviços de cravação, devendo, portanto, serem conduzidos estudos que abordem a problemática apresentada.

Com base na pesquisa desenvolvida, apesar de ser considerado um padrão de quake em torno de 2,5 mm, modelos com a intenção de avaliar a penetração em solos mais resilientes como as argilas rígidas da Formação Guabirotuba são mais realistas adotando os valores propostos por Aoki (1991 apud CINTRA, 2013) para quake.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Instituto Tecnológico de Transportes e Infraestrutura da Universidade Federal do Paraná (ITTI-UFPR), pela oportunidade e apoio e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC/UFPR), em especial a prof. Larissa de Brum Passini.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arcelor Mittal (2016) *Piling Handbook, 9th edition*, 455p.
- Alonso, U. R. (2019) *Primeira tentativa para seleção de martelos vibratórios na cravação de estacas metálicas em solos da costa brasileira e critério de controle durante a cravação dessas estacas usando esse tipo de martelo*. Workshop, ABMS, Minas Gerais.
- Bigarella, J.J., Salamuni, R. (1962). Caracteres texturais dos sedimentos da Bacia de Curitiba. *Boletim da Universidade Federal do Paraná*, 7, p.1-164.
- Guillemet, C. (2013) *Pile – Soil Interaction during Vibratoy Sheet Pile Driving – a full scale field study*. Master of Science Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Department of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 136 p.
- Holeyman, A. (2002) *Vibratory driven piles, Vibratory pile Driving and Deep Soil Compaction*, Valkema Publishers, Lisse, p 3-30.
- Kormann, A.C.M.; Chamecki, P.R.; Boszczowski, P.B.; Nascimento, N.A.(1999) Ensaio de cisalhamento direto em argila rija da Formação Guabirotuba: Influência da velocidade de deslocamento, In: Mesa redonda características geotécnicas da Formação Guabirotuba, Curitiba, Anais. Curitiba ABMS/UFPR. p.29-36.
- Kormann, A.C.M. (2002) *Comportamento geomecânico da Formação Gauabirotuba: Estudos de campo e laboratório*. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo/USP, 429 p.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
 23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
 23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
 COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

- Lima, F.M., Fernandes, L.A., Melo, M.S., Góes, A.M., Machado, D.A.M. (2013). Faciologia e contexto deposicional da Formação Guabirotuba, Bacia de Curitiba (PR). *Brazilian Journal of Geology*, 43(1), p.168-184.
- Massad, F.; Rocha, J. L. R.; Yassuda, A. J. (1981) Algumas características geotécnicas de solos da Formação Guabirotuba, In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro, *Anais. S.L.:* s.n., 1981. P. 706-723.
- Muller (2013) *Parameters, equipment selection and operating principle*. 24p.
- Recommendations of the Committee for Waterfront Structures, Harbours and Waterways*. (2004) Ernst & Sohn, 8. Edição.
- Riccomini, C., Sant'anna, L.G., Ferrari, A.L. (2004). Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: Mantesso Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., Neves, B.B.B. (eds). *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, São Paulo, Beca Editora, p. 383–405. Sedor, F.A., Oliveira, E.V., Silva, D.D., Fernandes, L.A., Cunha, R.F., Ribeiro, A.M., Dias E.V. (2017). A new South American Paleogene Land Mammal Fauna, Guabirotuba Formation (northern Brazil). *Journal of Mammalian Evolution*, 24(1), p.39-55.
- Viking, K. (2002) *Vibro-driveability – A field study of vibratory driven sheet piles in non-cohesive soils*. Stockholm. Doctoral Thesis, Department of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), 286 p.
- Yandzio, E. (1998) *Design Guide for Steel Sheet Pile Bridge Abutments*. The Steel Construction Institute Ascot, 157p.