



**UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**

**RAMON DUQUE FERRAZ BURGOS**

**ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES GERADAS NA EXECUÇÃO DE ESTACAS  
MOLDADAS IN LOCO E CRAVADAS**

Recife, PE

2020



**UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**

**RAMON DUQUE FERRAZ BURGOS**

**ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES GERADAS NA EXECUÇÃO DE ESTACAS  
MOLDADAS IN LOCO E CRAVADAS**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão

Co-orientador: Prof. Dr. Marcílio André Felix  
Feitosa

Recife, PE

2020

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Universidade de Pernambuco – Recife

Burgos, Ramon Duque Ferraz

B957a      Análise das vibrações geradas na execução de estacas moldadas in loco e cravadas. / Ramon Duque Ferraz Burgos. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2020.

157 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão

Co-orientador: Prof. Dr. Marcílio André Félix Feitosa

Dissertação (Mestrado - Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.

**RAMON DUQUE FERRAZ BURGOS**

**ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES GERADAS NA EXECUÇÃO DE  
ESTACAS MOLDADAS EM LOCO E CRAVADAS**

BANCA EXAMINADORA:

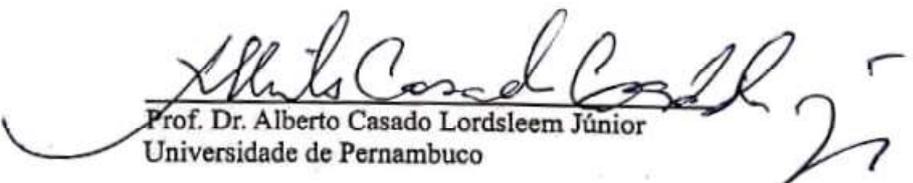
**Orientador(a)**

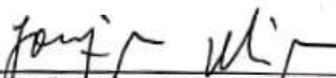
  
Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão  
Universidade de Pernambuco

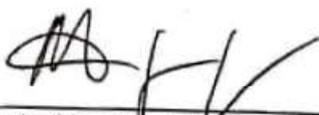
**Co-orientador(a)**

  
Prof. Dr. Marcílio André Félix Feitosa  
Universidade de Pernambuco

**Examinadores**

  
Prof. Dr. Alberto Casado Lordsleem Júnior  
Universidade de Pernambuco

  
Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira  
Universidade Católica de Pernambuco

  
Prof. Dr. Paulo José Rocha de Albuquerque  
Universidade Estadual de Campinas

Recife-PE  
2020

*“Se persistirmos na busca, mantivermos  
nossa curiosidade viva, temos chance de  
eventualmente vislumbrar algo que vibra, que  
pula, que surpreende, revelando a simples beleza  
do inesperado”*

Marcelo Gleiser

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Marcelo e Dalka, por todo incentivo ao longo da minha jornada e por terem acreditado quando eu era criança e disse que queria ser cientista.

À minha irmã, Manuela, por andar sempre ao meu lado nos bons e maus momentos.

Às minhas avós, Noêmia, Zélia e Hermínia, por sempre mostrarem a importância da família e por todas as histórias contadas no café das 15h. Aos meus avôs, Dário e José, que mesmo não os tendo conhecido, influenciaram meus passos com exemplos de humildade e sabedoria.

À toda minha família e amigos, que celebraram cada conquista alcançada e escutaram com atento aos momentos mais incertos desta etapa. Especialmente à Andrezza pelo companheirismo e momentos de felicidade, à minha madrinha Sydia pelo cuidado, à Maria Angelita pelas histórias e carinho, e aos meus primos Thiago e Gabriel pelas longas caminhadas na praia e desabafos.

Ao Professor Alexandre Gusmão, por todo conhecimento ensinado dentro e fora da sala de aula, assim como me ter aberto às portas da geotecnia da maneira magistral. Sempre será um exemplo de engenheiro, professor e ser humano que levarei para a vida.

Ao Professor Marcílio Feitosa, por todos os ensinamentos e ter dado suporte ao pensar fora da caixa para me aventurar na eletrônica e linguagens de programação.

A todos os amigos e amigas do mestrado, o qual foram compartilhados bons momentos dentro e fora da sala de aula, e que sempre incentivaram o desenvolvimento de uma pesquisa de qualidade. Assim como o aluno de IC, Almir, que desenvolveu a parte robusta do aplicativo apresentado nesse trabalho e não hesitava para responder as mensagens no domingo às 22h.

À toda equipe do PEC que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho, representados por Dona Lúcia, e aos professores que ao longo do programa trouxeram conhecimentos fundamentais para minha pesquisa. Assim como um agradecimento especial a Professora Andréa Batista, que incentivou minha pesquisa e auxiliou essa jornada com sua amizade.

Aos engenheiros e funcionários da Gusmão Engenheiros Associados, que auxiliaram da obtenção de dados e mostraram sempre muito entusiasmo em cada conquista, em especial aos amigos Rodrigo e Alan.

Às construtoras Moura Dubeux, Rio Ave e Fama por terem acolhido essa pesquisa e sem receio permitiram a coleta de dados. Que sejam exemplos para que a pesquisa científica seja ampliada na construção civil. Assim como as empresas que executaram às fundações, SEFE, Rossi e COPEF. Agradecimentos especiais aos engenheiros Felipe e Natália (MD), Lucas (Fama), Wendell (Rio Ave) e André Campêlo (SEFE).

Aos amigos da UFBA, Luis e Lui, por terem cedido o geofone que permitiu a realização desta pesquisa. Assim como, aos engenheiros da Ávila engenharia por terem compartilhados os dados dos serviços realizados.

À Deus em sua representação na natureza, por todos os sóis poentes, ventos que acalmam e ondas do mar que lavam a alma e trazem paz.

## RESUMO

Durante a implantação de um empreendimento imobiliário, os processos construtivos adotados podem dar reflexo nas edificações vizinhas e gerar incômodos aos seus residentes, é o caso do processo de execução de estacas. As cravações de estacas têm gerado diversos conflitos entre construtoras e moradores vizinhos, pois, durante o processo de cravação, as vibrações geradas podem ser sentidas pelas edificações próximas e preocupam seus residentes. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar as vibrações geradas na cravação e execução de estacas em obras na cidade do Recife, utilizando geofones triaxiais para medir a vibração em forma frequência e de velocidade, representada pela velocidade de pico de partícula (PPV). Também foi utilizado um acelerômetro presente em um celular para verificar as vibrações em formato de PPV, onde os resultados obtidos foram comparados com os do geofone. Foram selecionadas 5 obras com distintas soluções de fundação, onde a medição foi feita em distâncias que variaram entre 2 m da cravação de estaca até 23 m de distância. A medição com o celular foi feita colocando o mesmo ao lado do geofone, e os resultados colhidos em aceleração convertidos em velocidade através de uma integração numérica pelo método dos trapézios. Como resultado, as estacas metálicas cravadas por vibração e as estacas hélice contínua apresentaram os menores níveis de vibração, as estacas metálicas e as estacas pré-moldadas de concreto cravadas por impacto apresentaram PPV's altos para distâncias inferiores a 5 m, principalmente os primeiros elementos das estacas. As estacas de compactação apresentaram níveis de vibração elevados, onde até os 10 m de distância a vibração caracteriza risco para estruturas próximas. Na comparação dos resultados do geofone com o celular, a tendência do PPV seguiu o mesmo padrão, com os PPV's máximos variando num percentual de 8% a 34,79%, dessa forma, foi criado um aplicativo para celular com o intuito de medir vibração gerada na cravação de estacas. Os resultados apresentados representam uma grande contribuição para construtores e projetistas que executam fundações profundas, visto que o conhecimento acerca das vibrações geradas na cravação de estacas irá levar os mesmos a tomarem medidas de mitigar as perturbações na vizinhança e preservar o patrimônio público e privado.

**Palavras-Chave:** Fundações profundas; PPV; Frequência; Aplicativo; Geotecnia

## ABSTRACT

During the implementation of a real estate project, the construction processes adopted can reflect on the neighboring buildings and cause inconvenience to the residents, as is the case with the process of pile driving. Pile driving has generated several conflicts between construction companies and neighboring, because, during the driving process, the vibrations generated can be felt by nearby buildings and concern their residents. Thus, this work aims to evaluate the vibrations generated in the driving and driving of piles in works in the city of Recife, using triaxial geophones to measure vibration in frequency and velocity, represented by the peak particle speed (PPV). An accelerometer present in a cell phone was also used to check the vibrations in PPV format, where the results obtained were compared with those of the geophone. 5 buildings were selected with different foundation solutions and the measurement was made at distances that varied between 2 m from the pile driving up to 23 m in distance and the results were evaluated in relation to Standards that address vibration limits and use the particle peak speed (PPV) as the unit of measurement. The measurement with the cell phone was made by placing it next to the geophone, and the results collected in acceleration converted into speed through a numerical integration using the trapezoids method. As a result, the metallic piles driven by vibration and the continuous flight auger piles showed the lowest levels of vibration, the metal piles and precast concrete piles driven by impact showed high PPV's for distances less than 5 m, mainly the first elements of the piles. The compaction piles showed high levels of vibration, where up to 10 m away, vibration is a risk for nearby structures. When comparing the results of the geophone with the cell phone, the PPV trend followed the same pattern, with the maximum PPVs varying from 8% to 34,79%, thus, a mobile application was created in order to measure vibration generated by pile driving. The results presented represent a great contribution for builders and designers who execute deep foundations, since the knowledge about the vibrations generated in the pile driving will take them to take measures to mitigate the disturbances in the neighborhood and preserve the public and private patrimony.

***Key-words:*** Deep foundations; PPV; Frequency; App; Geotechnics

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação de vibrações geradas pela cravação de estacas por impacto e vibração .....	25
Figura 2 - Propagação das ondas P e S no solo .....	26
Figura 3 - Propagação das vibrações geradas na cravação de estacas para fundações de edificações .....	28
Figura 4 - Representação de um equipamento de cravação de estacas por impacto. ....	29
Figura 5 - Crescimento da vibração e RPM em martelos vibratórios ao longo do tempo .....	32
Figura 6 – Cravação de estacas prancha por prensagem .....	33
Figura 7 – Processo de cravação de estacas por prensagem com equipamento japonês .....	33
Figura 8 - Etapas da execução de estacas de compactação .....	35
Figura 9 - Etapas de execução da estaca hélice contínua .....	37
Figura 10 – Sondagem do edifício acidentado e gráfico de cravação das estacas do edifício vizinho .....	43
Figura 11 – Fissura causada pela cravação de estacas pré-fabricadas de concreto próximas a uma edificação vizinha .....	45
Figura 12 – Desenho esquemático de um geofone .....	46
Figura 13 - Geofone posicionado sobre o solo para realizar medição.....	47
Figura 14 – Geofone perto medindo vibração gerada na cravação de estacas prancha por vibração .....	48
Figura 15 – Composição de um acelerômetro piezoelétrico.....	49
Figura 16 – Composição e funcionamento de um Acelerômetro MEMS .....	50
Figura 17 – Direção dos eixos X, Y e Z no smartphone .....	51
Figura 18 – Critérios de exclusão dos trabalhos científicos .....	57
Figura 19 - Geofone da GeoSonics Inc., modelo SSU3000EZ pertencente a Ávila Engenharia .....	59
Figura 20 - GEOsig Inc., modelo GSR-12PC pertencente a UFBA.....	60
Figura 21 – Eixos ortogonais de medição da vibração.....	61
Figura 22 – Locação do equipamento de cravação e dos pontos de medição com os geofones .....	62
Figura 23 – Sensor fixado na parede .....	63
Figura 24 - Celular no solo ao lado do sensor .....	64

Figura 25 - Celular em contato direto com o solo .....	65
Figura 26 – Interface do Android Studio 3.....	65
Figura 27 – Código do aplicativo para medir vibrações.....	66
Figura 28 – Integração pela regra dos trapézios .....	67
Figura 29 – Mapa geológico da cidade do Recife .....	68
Figura 30 – Localização das obras em estudo na cidade do Recife .....	69
Figura 31 - Situação do terreno que receberá o do estudo de caso 01.....	71
Figura 32 – Divisa norte da obra com edificações de baixa qualidade coladas ao muro .....	72
Figura 33 – Edificação muito precária na divisa norte da obra .....	72
Figura 34 – Locação das 03 estruturas previstas no terreno do estudo de caso 01 .....	73
Figura 35 - Planta de Locação das sondagens do estudo de caso 01 .....	75
Figura 36 - Perfil geotécnico do estudo de caso 01 .....	76
Figura 37 - Situação do terreno que receberá o do estudo de caso 02.....	78
Figura 38 – Locação da estrutura prevista no terreno do estudo de caso 02 .....	79
Figura 39 - Planta de Locação das sondagens do estudo de caso 02.....	81
Figura 40 - Perfil geotécnico do estudo de caso 02 .....	82
Figura 41 - Situação do terreno que receberá o do estudo de caso 03.....	83
Figura 42 - Perfil geotécnico do estudo de caso 03 .....	85
Figura 43 - Situação do terreno que receberá o do estudo de caso 04.....	86
Figura 44 - Planta de Locação das sondagens do estudo de caso 04.....	87
Figura 45 - Perfil geotécnico do estudo de caso 04.....	88
Figura 46 - Situação do terreno que receberá o do estudo de caso 05.....	89
Figura 47 – Locação da estrutura prevista no terreno do estudo de caso 05 .....	90
Figura 48 - Planta de Locação das sondagens do estudo de caso 05.....	91
Figura 49 - Perfil geotécnico do estudo de caso 04.....	92
Figura 50 - Comparação dos valores do PPV para cravação por impacto .....	96
Figura 51 - Comparação dos valores do PPV para cravação por vibração.....	97
Figura 52 - Cravação do primeiro elemento metálico da estaca piloto .....	99
Figura 53 - Cravação do segundo elemento metálico da estaca piloto.....	100
Figura 54 - Cravação do terceiro elemento metálico da estaca piloto.....	101
Figura 55 - Cravação do quarto elemento metálico da estaca piloto.....	102
Figura 56 – Locação das estacas que foram medidas no estudo de caso 02.....	106
Figura 57 –Disposição do sensores na estaca P6E1 .....	106
Figura 58 – Parte do muro antes da queda .....	107

Figura 59 – Trecho do muro após a ruína parcial.....	108
Figura 60 – Pilar do muro em péssima qualidade .....	108
Figura 61 – Locação das estacas que foram medidas no estudo de caso 02.....	114
Figura 62 – Posicionamento do equipamento para medição do PA2E2.....	115
Figura 63 - Trado helicoidal utilizado na execução das estacas.....	123
Figura 64 – Locação das estacas que foram medidas no estudo de caso 04.....	124
Figura 65 – Posicionamento do equipamento para medição do PA2E2.....	125
Figura 66 - Disposição dos sensores para medição de estacas de 600mm .....	125
Figura 67 - Disposição dos sensores para medição de estacas de 400mm .....	126
Figura 68 – Braço vibratório e o tubo vazado com tampa durante cravação de estaca.....	131
Figura 69 – Locação das estacas que foram medidas no estudo de caso 05.....	132
Figura 70 - Disposição dos sensores para medição de estacas de compactação .....	133
Figura 71 - Disposição dos sensores .....	133
Figura 72 – QR Code para download do app Analisador de Vibrações.....	141
Figura 73 – Como Realizar a permissão para o Google Drive instalar Apps.....	142
Figura 74 – Instalação do aplicativo.....	142
Figura 75 – Conclusão da instalação e app no menu do celular.....	143
Figura 76 – Tela inicial e opções do tipo de solo .....	144
Figura 77 – Opções de distância e Norma.....	145
Figura 78 – Tipos de estruturas para a Norma da AASHTO e do Eurocode .....	146
Figura 79 – Atraso de 3 segundos com mensagem e gráfico gerado durante a medição da vibração .....	147
Figura 80 – Mensagem exibida ao fim da medição.....	148
Figura 81 – Arquivo de texto gerado com os registros da medição .....	149

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Diagrama proposto pela AFTES das vibrações admitidas para as três classes de estrutura .....	41
Gráfico 2 – Vibração gerada na cravação de estacas metálicas por vibração do Caso 01 .....	103
Gráfico 3 – Verificação do PPV e Frequência na Obra 1 em relação aos limites da recomendação AFTES (1974) .....	105
Gráfico 4 – Vibração gerada na cravação por impacto de estacas pré-moldadas de concreto no Caso 02 .....	110
Gráfico 5 - Verificação do PPV e Frequência na Obra 2 em relação aos limites da recomendação AFTES (1974) .....	111
Gráfico 6 - Medição do PPV com o celular na estaca P7E1 do Estudo de caso 02 .....	112
Gráfico 7 - Medição do PPV com Geofone na estaca P7E1 do Estudo de caso 02 .....	112
Gráfico 8 - Vibração gerada na cravação por impacto de estacas metálicas no Caso 03 .....	119
Gráfico 9 - Verificação do PPV e Frequência na Obra 3 em relação aos limites da recomendação AFTES (1974) .....	120
Gráfico 10 - Medição do PPV com celular na estaca PA16E21 do Estudo de caso 03 .....	121
Gráfico 11 - Medição do PPV com Geofone na estaca PA16E21 do Estudo de caso 03 .....	122
Gráfico 12 - Comparação dos resultados obtidos no estudo de caso 04 com os limites de vibração impostos para residências em 4 normas internacionais .....	128
Gráfico 13 -Verificação do PPV e Frequência na Obra 4 em relação aos limites da recomendação AFTES (1974) .....	129
Gráfico 14 - Medição do PPV com o celular na estaca P12E3 do Estudo de caso 04 .....	130
Gráfico 15 - Medição do PPV com celular o celular na estaca P12E3 do Estudo de caso 04	130
Gráfico 16 - Comparação dos resultados obtidos no estudo de caso 05 com os limites de vibração impostos para residências em 4 normas internacionais .....	136
Gráfico 17 - Verificação do PPV e Frequência na Obra 5 em relação aos limites da recomendação AFTES (1974) .....	137
Gráfico 18 – Resultados do PPV dos 5 estudos de caso comparados com limites para construções de baixa qualidade da AASHTO, BS7345-2, Eurocode e SN640312 .....	138
Gráfico 19 - Resultados do PPV dos 5 estudos de caso comparados com limites para construções de média qualidade da AASHTO, BS7345-2, Eurocode e SN640312 .....	139
Gráfico 20 - Resultados do PPV dos 5 estudos de caso comparados com limites para construções de qualidade muito boa da AASHTO, BS7345-2, Eurocode e SN640312 .....	140

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Resumo dos limites de PPV's abordados por normas estrangeiras .....	40
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Importância dos diferentes parâmetros utilizados para estimar os danos das vibrações por explosão .....	38
Tabela 2 - Revisão sistemática dos trabalhos científicos para estacas cravadas por impacto. .	94
Tabela 3 - Revisão sistemática dos trabalhos científicos para estacas cravadas por vibração.	95
Tabela 4 - Média e desvio padrão da diferença dos resultados medidos e previstos .....	98
Tabela 5 - Resultado dos PPV's medidos com o geofone no estudo de caso 01.....	102
Tabela 6 - Resultado da frequência medidos com o geofone no estudo de caso 01.....	104
Tabela 7 – Resultado dos PPV's medidos com o geofone no estudo de caso 02.....	109
Tabela 8 – Resultado dos PPV's medidos com o geofone no estudo de caso 03.....	118
Tabela 9 – Resultado dos PPV's medidos com o geofone no estudo de caso 04.....	127
Tabela 10 – Resultado dos PPV's medidos com o geofone no estudo de caso 05.....	134

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	18
<b>1.1. Considerações Iniciais</b> .....	18
<b>1.2. Justificativa</b> .....	20
<b>1.3. Objetivos</b> .....	22
<b>1.3.1. Geral</b> .....	22
<b>1.3.2. Específicos</b> .....	22
<b>2. VIBRAÇÃO GERADA NA CRAVAÇÃO E EXECUÇÃO DE ESTACAS</b> .....	23
<b>2.1. Vibrações</b> .....	23
<b>2.1.1. Tipos de ondas</b> .....	25
<b>2.1.2. Amortecimento das vibrações nos solos</b> .....	27
<b>2.2. Cravação e execução de estacas</b> .....	28
<b>2.2.1. Cravação por impacto</b> .....	29
<b>2.2.2. Cravação por vibração</b> .....	30
<b>2.2.3. Cravação por prensagem</b> .....	32
<b>2.2.4. Estacas de compactação</b> .....	34
<b>2.2.5. Estacas hélice contínua</b> .....	36
<b>2.3. Avaliação da vibração</b> .....	38
<b>2.4. Normas e recomendações acerca de limites de vibrações</b> .....	39
<b>2.5. Casos de danos por vibrações excessivas</b> .....	41
<b>2.6. Equipamentos para medição da vibração</b> .....	45
<b>2.6.1. Geofone</b> .....	46
<b>2.6.2. Acelerômetro</b> .....	48
<b>2.7. Métodos de previsão da vibração</b> .....	52
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	55
<b>3.1. Revisão sistemática</b> .....	55

<b>3.2. Medição da vibração</b> .....	58
<b>3.2.1. Medição com geofone</b> .....	58
<b>3.2.2. Medição com acelerômetro do Celular</b> .....	64
<b>3.3. Desenvolvimento do aplicativo para celular</b> .....	65
<b>3.4. Estudo de casos</b> .....	68
<b>3.4.1. OBRA 01 – Estaca metálica cravada por vibração</b> .....	69
3.4.1.1. Localização .....	70
3.4.1.2. Caracterização do empreendimento .....	73
3.4.1.3. Caracterização do solo .....	73
3.4.1.4. Tipo de fundação e execução .....	77
<b>3.4.2. OBRA 02 – Estaca pré-moldada cravada por impacto</b> .....	77
3.4.2.1. Localização .....	77
3.4.2.2. Caracterização do empreendimento .....	78
3.4.2.3. Caracterização do solo .....	80
3.4.2.4. Tipo de fundação e execução .....	82
<b>3.4.3. Obra 03 – Estaca metálica cravada por impacto</b> .....	83
3.4.3.1. Localização .....	83
3.4.3.2. Caracterização do empreendimento .....	84
3.4.3.3. Caracterização do solo .....	84
3.4.3.4. Tipo de fundação e execução .....	86
<b>3.4.4. Obra 04 – Estaca do tipo hélice contínua</b> .....	86
3.4.4.1. Localização .....	86
3.4.4.2. Caracterização do empreendimento .....	87
3.4.4.3. Caracterização do solo .....	87
3.4.4.4. Tipo de fundação e execução .....	89
<b>3.4.5. OBRA 05 – Estaca de compactação</b> .....	89
3.4.5.1. Localização .....	89

3.4.5.2. <i>Caracterização do empreendimento</i> .....	89
3.4.5.3. <i>Caracterização do solo</i> .....	90
3.4.5.4. <i>Tipo de fundação e execução</i> .....	92
<b>4. RESULTADOS</b> .....	94
<b>4.1. Banco de dados com resultados de medições apresentadas na literatura</b> .....	94
<b>4.2. Estudo de caso 01</b> .....	98
<b>4.3. Estudo de caso 02</b> .....	105
<b>4.4. Estudo de caso 03</b> .....	113
<b>4.5. Estudo de caso 04</b> .....	122
<b>4.6. Estudo de caso 05</b> .....	131
<b>5. APLICATIVO PARA VERIFICAÇÃO DAS VIBRAÇÕES GERADAS NA CRAVAÇÃO DE ESTACAS – “Analisador de Vibrações”</b> .....	141
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	150
<b>7. REFERÊNCIAS</b> .....	153

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Considerações Iniciais

O crescimento urbano tende a estar associado às obras de construção civil, assim como, também está associado ao crescimento econômico da região. No Brasil, o crescimento populacional junto ao déficit habitacional alerta para a necessidade de moradia e infraestrutura para a população. A cidade do Recife segue o mesmo padrão de crescimento, agravado pela falta de terrenos livres nas áreas onde o setor imobiliário tem maior pujança. Wanderley (2016) expõe que a cidade do Recife possui 1,5 mil prédios com mais de 35 m ou 12 andares, ficando atrás apenas do Rio e de São Paulo. No entanto, com pouca dimensão geográfica, a concentração no Recife é de sete edifícios por km<sup>2</sup>, quase o dobro da capital paulista, que possui 6,1 mil prédios, porém apenas quatro edifícios por km<sup>2</sup>.

Apesar do grande número de edifício altos, existe uma característica intrínseca ao Recife que está associada ao tipo de formação geológica presente na cidade. Gusmão (2005) classifica o relevo do Recife em duas paisagens, os morros e a planície. Os morros circundam a cidade e apresentam solos de boa resistência, geralmente pertencentes à formação barreiras. Apesar de um solo com boas características para a construção, nos morros, a maior parcela da ocupação se dá de maneira irregular e por uma população de baixa renda. Já a planície ocupa o espaço entre o colar dos morros e a orla marítima, e nela onde se concentram as obras de grande porte urbano. Exemplos de bairros localizados na planície são Boa Viagem, Espinheiro, Casa Forte, Madalena, Pina, Ilha do leite, entre outros.

Alheiros et al. (1990) e Gusmão (2005) descrevem a planície do Recife como de origem flúvio-marinha com dois níveis de terraços marinhos arenosos, nesse contexto geológico, o subsolo típico é muito variado. Encontra-se camadas de areia fina e média, intercaladas ou seguidas por outras, seja de argila orgânica mole. Os depósitos de argila orgânica mole e média são encontrados em cerca de 50% da área da planície, muitas vezes em subsuperfície e com espessuras superiores a 15 metros. Tais características geológicas na planície são consideradas desfavoráveis para a construção de edifícios, e essa condição por vezes limita a execução de fundações diretas, levando aos construtores a utilizar fundações profundas para viabilizar a obra. A NBR 6.122 (ABNT, 2019) define uma fundação profunda como sendo um elemento de

fundação que transmite a carga ao terreno pela ponta, pela sua superfície lateral ou por uma combinação das duas.

No contexto da prática de fundações na cidade do Recife, Santos (2011) avaliou os tipos de fundações mais usuais entre os anos de 2000 a 2010, com a predominância das estacas profundas, onde os tipos mais recorrentes foram as estacas metálicas, estacas tipo Franki, estaca raiz, estacas pré-moldadas de concreto e estacas hélice contínua. Oliveira (2018) fez uma avaliação dos tipos de fundações de 161 obras no bairro de Boa Viagem e chegou a números similares aos de Santos, encontrando predominância (77%) das fundações profundas, com o as estacas metálicas (23,6%), hélice contínua (22,4%) e estaca pré-moldada de concreto (21,7%) sendo as mais recorrentes.

Dentre as fundações profundas mais utilizadas na cidade do Recife, as estacas metálicas e pré-moldadas de concreto precisam ser cravadas no solo por vibração ou percussão. Dutra (2012) comenta que o sistema de cravação à percussão promove a penetração da estaca no solo através das sucessivas aplicações de golpes no seu topo. Estes golpes são gerados pela queda de uma massa “M” solta de uma altura “H”, previamente definidas para um projeto específico, onde o corpo de massa “M” é conhecido como martelo ou pilão. Já o processo de cravação de estacas por vibração é uma técnica eficaz e econômica pela facilidade de cravação, às baixas perturbações na área circundante e aos baixos danos que provoca nas estacas prancha. O tempo de cravação de estacas por vibração é cerca de 10% do necessário na cravação de estacas por percussão. Este tipo de cravação é usado em solos granulares e em solos coesivos (Ferreira, 2015).

Durante o processo da cravação, parte da energia gerada para deslocar a estaca através do solo acaba se dissipando como vibrações no terreno e se propagam por distâncias consideráveis. Deckner (2013) afirma que o valor da energia de impacto para a maioria dos martelos varia entre 5 até 300 kJ por impacto, no entanto apenas 30 a 50% desta energia é que é transferida à estaca e o restante é dissipada no solo. 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 induzidas pelo mesmo.

Ferreira (2015) ainda adiciona que a cravação de estacas é um intensivo processo de produção de vibrações que, ao propagarem-se no solo, inevitavelmente acabarão por interagir com estruturas existentes. Esta interação induz vibrações na estrutura, podendo causar incômodos às pessoas que a ocupam e possíveis danos à própria estrutura. Assim, a previsão das vibrações inerentes a este processo, a sua monitorização e controle tornaram-se passos importantes na prevenção de danos das estruturas e dos incômodos causados às pessoas.

Sena, Oliveira e Gusmão (2016), apresentam uma obra onde a construtora optou pelo estaqueamento com martelo vibratório, contra solução em martelo de impacto, devido à proximidade de residências e construções antigas, tendo um desses prédios sido desapropriado pouco antes do início do empreendimento, pela Defesa Civil da Prefeitura de Jaboatão, com risco de desabamento.

Tendo conhecimento que a planície da cidade do Recife apresenta poucos terrenos livres para se construir, e por vezes tais terrenos ficam próximos a outros edifícios já ocupados, problemas relacionados à cravação de estacas preocupam projetistas e construtores.

## **1.2. Justificativa**

O impacto de uma obra de construção civil dentro de uma área urbana influencia diretamente a qualidade de vida da vizinhança, pois, a geração de ruídos e vibrações tendem a incomodar os residentes. Tais perturbações são normalmente causados pela movimentação de máquinas, demolições e cravação de estacas. À primeira vista, a emissão exagerada de ruídos e vibrações não se relacionaria com o aspecto segurança das situações de vizinhança. Mas, pelo contrário, acarreta riscos pessoais e patrimoniais. Wagner (2014) afirma que as vibrações intensas podem afetar a estabilidade de uma edificação vizinha, e mesmo a movimentação de terra de um terreno contíguo, muitas vezes, carece de atenção especial.

Brito (2014) avaliou impacto gerado pelas principais fontes de vibração no meio urbano, sendo as fontes: o tráfego rodoviário, o ferroviário, o processo de cravação de estacas de concreto e metálica e a o processo de demolição. O limite de incomodidade foi superado em todas as análises com exceção da estaca metálica, e o limite de danos estruturais foi ultrapassado pelo tráfego ferroviário e pela cravação de estacas pré-moldadas de concreto.

A conclusão obtida por Brito (2014) mostrou que mesmo o impacto do tráfego ferroviário pode ser mais degradador que a cravação de estacas, porém, sempre que obras são realizadas, reclamações da comunidade são constantes, mesmo que as obras sejam feitas em conformidade com a legislação e normas e os níveis de vibração e ruído estejam abaixo dos limites permitidos pela legislação vigente.

Natanson (2015) afirma que as reclamações são geradas devido ao desconhecimento da vizinhança, ou seja, a surpresa ou incômodo causados por uma obra. A ansiedade gerada estimula os proprietários a procurar danos estruturais em suas casas, pois se creem aparentemente lesados, tanto fisicamente quanto no que concerne a danos nas suas propriedades.

Dessa forma, a medição da vibração gerada na execução e cravação de estacas é fundamental para garantir a construtora resguardo quanto aos impactos nos arredores da obra, onde associado ao estudo de impacto de vizinhança, irá permitir conhecer as patologias realmente desenvolvidas no processo executivo das fundações profundas de uma edificação. A medição das vibrações geradas também apresenta importância devido à falta de uma legislação brasileira específica para vibrações advindas do processo construtivo, onde um maior número de estudos irá fornecer dados necessários para que se possa tomar um primeiro passo na direção da normatização.

Outro impasse para a realização das medições de vibrações na execução e cravação de estacas está relacionado ao equipamento utilizado, o qual é denominado Geofone. O mesmo é um conjunto de 3 acelerômetros de precisão que são capazes de medir a aceleração da partícula em um meio nas direções longitudinal, sagital e transversal. O geofone tem um custo de aquisição elevado e sua aplicação não é recorrente na construção civil, sendo amplamente utilizado no desmonte de rochas e detonações.

Dentro desse contexto, o presente trabalho apresenta a medição da vibração durante o processo executivo de fundações profundas e avalia a viabilidade do desenvolvimento de um equipamento capaz de medir a aceleração gerada no processo, porém com custos mais acessíveis e que permita a ampla utilização por empresas da construção civil, auxiliando construtores e projetistas nas tomadas de decisão.

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. *Geral*

Analisar a vibração gerada durante o processo de execução de estacas *in loco* e cravação de diferentes tipos de estacas e comparar os resultados com limites estabelecidos em norma.

#### 1.3.2. *Específicos*

- a) Elaborar um banco de dados com resultados e características de obras onde foram feitas medições de vibração e verificar sua adesão aos métodos de previsão do PPV;
- b) Definir obras para estudo e realizar medições de vibrações durante a execução das estacas na obra com um geofone e um aparelho celular;
- c) Analisar as medições e comparar os resultados com limites estabelecidos em norma;
- d) Comparar os resultados obtidos no geofone com os obtidos no aparelho celular;
- e) Desenvolver um aplicativo (app) para medir a vibração gerada na cravação de estacas.

## 2. VIBRAÇÃO GERADA NA CRAVAÇÃO E EXECUÇÃO DE ESTACAS

### 2.1. Vibrações

Deckner (2013) define a vibração como sendo um movimento oscilatório em torno de um estado de equilíbrio e pode ser descrito sob a forma de deslocamento, velocidade ou aceleração.

Resende (2011) observou que a influência da vibração no comprometimento da integridade física dos edifícios se dá pela desagregação de materiais por fricção, ou por fadiga, ou ainda pela instalação de recalques diferenciais nas fundações a partir do adensamento dos solos, onde não são apenas os edifícios que sofrem a ação das vibrações. O comprometimento pode ser observado em forma de pavimentações de ruas desarticuladas e com lacunas, de passeios e muros trincados, de tubulações rompidas; ou seja, uma série de lesões que têm uma causa comum.

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.

A respeito da integridade estrutural, o que está em pauta 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 a citada, podem induzir danos estruturais significativos ou, em última análise, levar as estruturas ao colapso. Naturalmente que esta é a área que mais preocupa a comunidade científica, devido ao impacto social e económico resultante dos efeitos catastróficos dos sismos.

Os problemas relacionados com o nível de conforto proporcionado aos seus utilizadores, está relacionada com o cumprimento do Estado Limite de Serviço das estruturas no que diz respeito à satisfação de limites impostos para vibrações excessivas. Ao contrário da situação anterior, o que está em causa não é a integridade estrutural, mas o bom funcionamento em serviço, incluindo-se nesta área a generalidade dos problemas da engenharia do vento, assim como os problemas relacionados com fenômenos de ressonância em estruturas sujeitas à ação de cargas móveis.

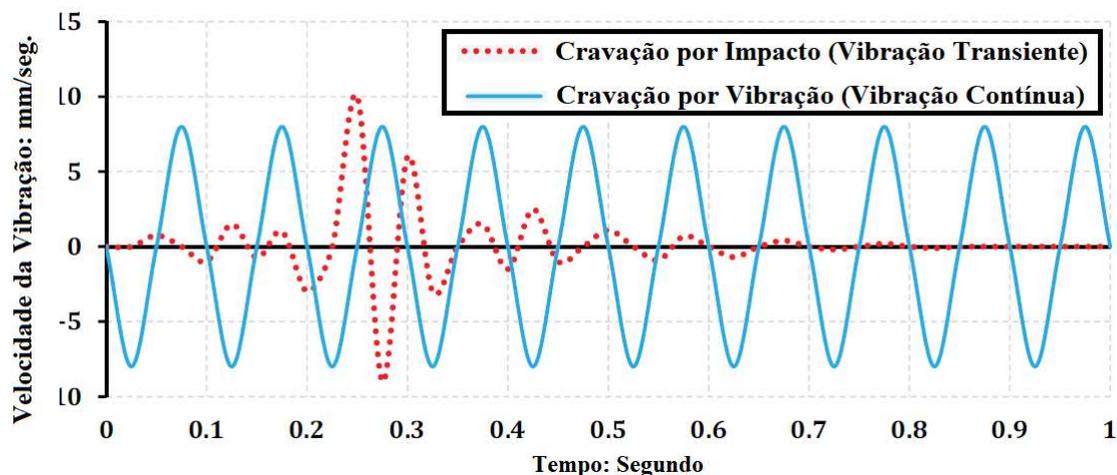
Ações exteriores de menor intensidade podem provocar danos estruturais, é o caso de explosões devidas a explorações mineiras, trabalhos de construção próximas de localidades ou o caso de tráfego intenso ou máquinas em funcionamento junto a edifícios existentes. Nestas situações, as vibrações induzidas por estas atividades, além de poderem originar trincas em elementos não estruturais como fachadas e paredes divisórias, podem conduzir à fissuração de elementos estruturais diversos. Além disso, podem originar estados de tensão elevados nos materiais e induzir fenômenos de fadiga motivados pelos sucessivos ciclos de solicitação causados pelas vibrações (Moutinho, 2007).

Um primeiro passo para mitigar a influência das vibrações, é descobrir o tipo de vibração do solo, pois elas podem se originar de duas fontes principais: fenômenos naturais e atividades artificiais. Onde as vibrações do solo geradas a partir de atividades de construção podem ser classificadas em vibrações transitórias e contínuas.

Hamidi, Rooz e Pourjenabi (2018) apresentam as vibrações transitórias como um evento único, que atingem rapidamente um valor de pico e são submetidas a um efeito de amortecimento até que desapareçam, podendo incluir apenas um único evento, como uma explosão, ou vários eventos únicos, como a cravação de estacas por impacto e compactação dinâmica. Os mesmos autores definem as vibrações contínuas, que apresentam um estado estacionário, gerando oscilação ininterrupta por um período definido com ciclos de distribuição. As fontes comuns de vibração contínua são a cravação de estacas por vibração, tráfego rodoviário e ferroviário, equipamentos de construção pesada, escavação, demolição e compactação.

As vibrações transitórias geralmente têm uma intensidade mais alta que as vibrações contínuas. No entanto, embora os padrões tenham determinado limites mais altos para vibrações transitórias do que para vibrações contínuas, as vibrações contínuas têm maior potencial de causar danos estruturais. Ambos os tipos de vibração, especialmente os induzidos pela cravação de estacas, têm grande potencial para causar danos estruturais e incomodar residentes em estruturas adjacentes. A Figura 1 exibe de forma mais clara a diferença entre os dois tipos de vibração.

Figura 1 – Comparação de vibrações geradas pela cravação de estacas por impacto e vibração



Fonte: Adaptado Hamidí, Rooz e Pourjenabi (2018)

No entanto, primeiramente é necessário entender de que forma é que o solo, enquanto material, se comporta mecanicamente quando carregado de forma estática ou dinâmica. A resposta física dos materiais é dada por leis constitutivas, que relacionam os estados de tensão e deformação. Os modelos de comportamento do solo mais usuais são o elástico linear, o elástico não linear, o elastoplástico, o elástico-perfeitamente plástico, o elástico não linear-perfeitamente plástico, o rígido-plástico e o viscoso (Ferreira, 2015).

### 2.1.1. Tipos de ondas

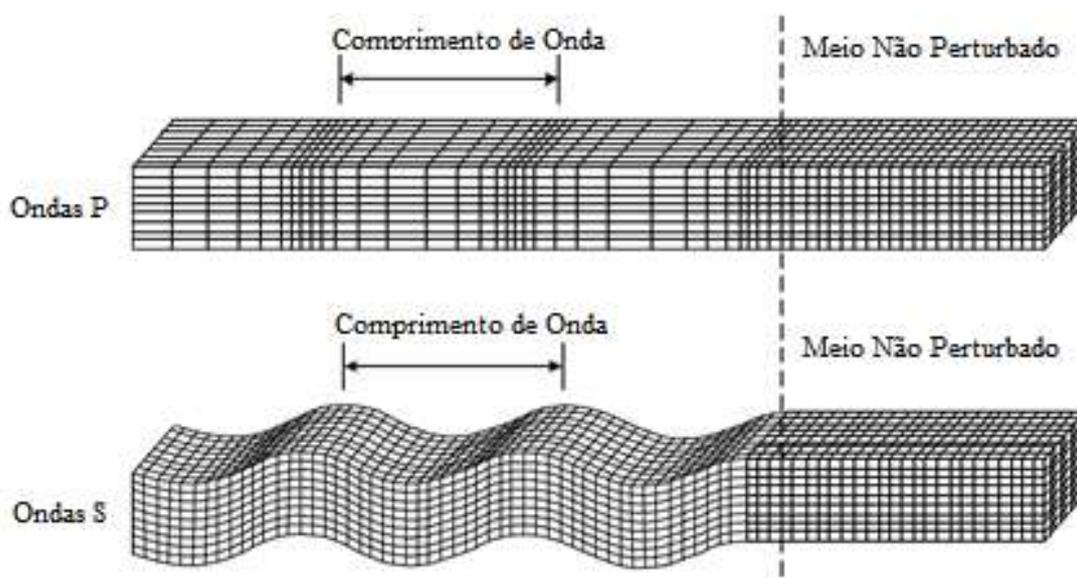
As vibrações formam ondas, em que as ondas são as responsáveis pelas perturbações no meio, e que no caso desse estudo, o meio considerado é o solo. A engenharia sísmica é dentro das engenharias as que mais estuda a formação e propagação de ondas no solos, Nordal (2009) classifica dois tipos de ondas como sendo *body wave* (ou ondas volumétricas), são elas 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 as ondas sísmicas são ondas tridimensionais, que se propagam radialmente a partir da fonte de perturbação em qualquer direção do meio.

No caso das *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 2 exhibe como as *Ondas S* e as *Ondas P* se propagam no solo.

**Figura 2 - Propagação das ondas P e S no solo**



Fonte: Deckner (2013)

Lopes et al. (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-se afirmar que as ondas Rayleigh resultam de uma combinação de ondas P e SV, em que as últimas representam 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 (Ardito, 2013). Lopes et al. (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.

### **2.1.2. Amortecimento das vibrações nos solos**

À medida que uma onda se propaga num meio, as suas propriedades vão sendo alteradas devido a fenômenos de dispersão e de amortecimento. A dispersão provoca a alteração da configuração de onda com o aumento da distância entre o emissor e o receptor. Por sua vez, o amortecimento induz uma atenuação na amplitude da onda (Ferreira, 2015).

Azocar (2017) define a dispersão como sendo o efeito que reduz a intensidade da onda conforme ela se distancia da origem, sendo influenciado pelas propriedades elásticas do material. O amortecimento causa a redução da amplitude da onda conforme ela se distancia da origem devido a dissipação de energia pelas partículas do material.

Já Athanaspoulos (2000) define o amortecimento como uma atenuação da amplitude das vibrações no solo com a distância do ponto de observação relativamente à fonte de excitação. Este pode ser originado pela forma como a energia transportada pela onda se espalha à medida que o volume de solo envolvido entre a fonte e o ponto de observação aumenta (amortecimento geométrico) e pela perda de energia devido à sua dissipação interna no material à medida que as partículas do solo se movem com a propagação da onda (amortecimento material) (Ferreira, 2015).

Silva (2015) representa o amortecimento geométrico de duas formas: amortecimento viscoso, onde as forças dissipativas são proporcionais à velocidade da vibração, ou o amortecimento histerético, na qual a dissipação deve-se ao comportamento não-elástico dos solos, acontecendo a partir de certo nível de deformações.

O amortecimento do material depende da velocidade de propagação da onda. Como os solos moles têm velocidades de propagação mais baixas que os solos rígidos, os movimentos com a mesma frequência terão comprimentos de onda mais curtos em solos mais macios. Isto significa que, para uma certa distância, as ondas em solos moles experimentarão mais ciclos de movimento e experimentarão mais amortecimento material do que as ondas viajando através de solos mais rígidos com velocidades de propagação mais altas (Lidén, 2012).

## 2.2. Cravação e execução de estacas

A cravação de estacas é um complicado e intensivo processo de transferência de energia, que ocorre sob a forma de vibrações e que poderá causar danos às estruturas adjacentes à obra. A fim de prever e limitar estas vibrações e, conseqüentemente, os danos a si inerentes, é necessário perceber como, e de que forma, estas se transmitem pelo terreno. A Figura 3, representa o processo de transferência de energia da fonte de vibração, apresentada como o equipamento de cravação, através do solo até a edificação.

**Figura 3 - Propagação das vibrações geradas na cravação de estacas para fundações de edificações**



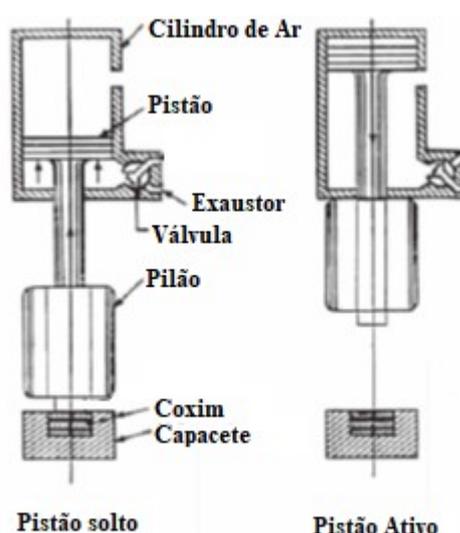
Fonte: Adaptado Hamidi, Rooz e Pourjenabi (2018)

### 2.2.1. Cravação por impacto

A cravação por impacto é o método de cravação mais utilizado no mercado e o maquinário pode ser de queda livre, hidráulico ou pneumático (diesel), sobre rolo ou sobre esteira, e é definido em função das cargas, dimensões das estacas, acessos, capacidade de suporte do solo na cota de cravação, dentre outros fatores.

O sistema de cravação por impacto promove a penetração da estaca no solo através das sucessivas aplicações de golpes no seu topo. Estes golpes são gerados pela queda de uma massa, previamente definida para um projeto específico, conhecida como martelo ou pilão (Dutra, 2012). Na Figura 4, estão ilustrados o corpo de massa içado e sua posterior queda em direção ao topo da estaca.

**Figura 4 - Representação de um equipamento de cravação de estacas por impacto.**



Fonte: Adaptado Da Silva (2015)

Conforme Gonçalves (2007), pode-se considerar 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 (penetração) da estaca no solo.

Para que ocorra a distribuição uniforme das tensões dinâmicas que surgem devido aos impactos do martelo sobre a cabeça das estacas, é instalado entre o martelo e o topo da estaca, um

capacete metálico. O capacete é composto na sua parte superior por um cepo de madeira dura, sobre o qual são desferidos os golpes do martelo e sua principal função é proteger o martelo de tensões elevadas. Na parte inferior do capacete encontra-se o amortecedor, chamado de almofada ou coxim, composto de madeira mole, cujo intuito é amortecer a estaca dos golpes e das altas tensões, e assim garantir que o risco de quebras de estacas seja reduzido (Klenk, 2017).

Em geral, equipamentos dotados de martelos do tipo queda- livre proporcionam eficiência (relação entre a energia disponível e aquela efetivamente transferida às estacas) situada entre 40% e 60% e eficácia (número de golpes por minuto desferido sobre as estacas) entre 30 e 40. Já os equipamentos dotados de martelos hidráulicos proporcionam eficiência de 75% a 90% e eficácia entre 60 e 100, além de possibilitarem maior velocidade de manobras e, por consequência, redução de tempo nas operações de cravação. Svinkin (2004) ainda acrescenta que a frequência dominante de ondas de propagação de fontes de impacto varia principalmente entre 3 e 60 Hz, mas em alguns casos os valores inferiores e superiores podem estar entre 1 e 100 Hz

### **2.2.2. Cravação por vibração**

A cravação de estacas por vibração foi desenvolvida na Rússia no início dos anos 1930 e desde então se tornou uma técnica cada vez mais utilizada em vários países (Viking, 2004). 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 perca resistência e a estaca deslize no solo quase sem esforço. Ao observar pela primeira vez um martelo vibrador, pode parecer estranho ver a estaca entrar no solo tão rapidamente. Usando equipamentos de cravação tradicionais, um perfil de 30 m 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)

Os equipamentos de cravação por vibração podem ser classificados em três categorias básicas (Warrington, 1992, apud Deckner 2013):

- Máquinas de baixa frequência - Frequência do vibrador entre 5 e 10 Hz. Usado principalmente para estacas com muita massa e alta resistência de ponta;
- Máquinas de frequência média - Frequência do vibrador entre 10 e 30 Hz. A maioria dos equipamentos usados hoje são desse tipo;
- Máquinas de alta frequência - Frequência do vibrador superior a 30 Hz. Esta categoria é geralmente dividida em dois grupos. Primeiro, máquinas na faixa de 30 a 40 Hz projetadas para minimizar a vibração de estruturas vizinhas. Em segundo lugar, os martelos vibratórios que operam a frequências de 90-120 Hz.

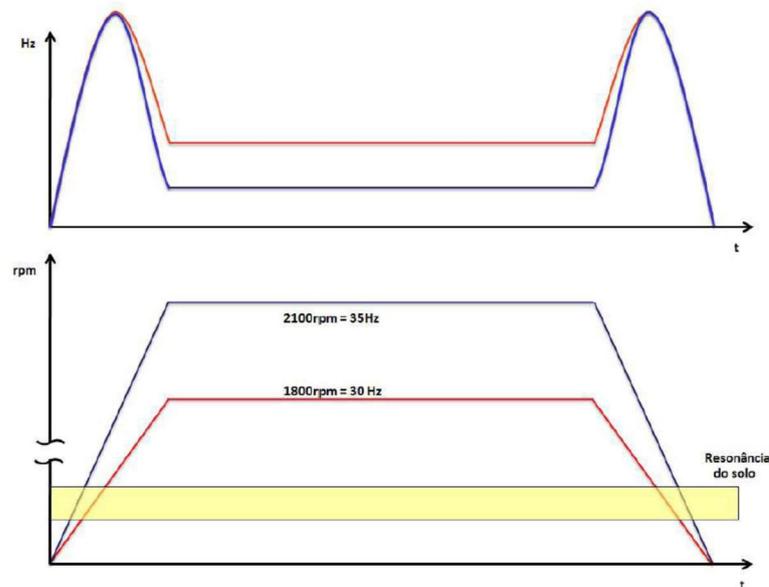
Falconi (2016), adiciona que a frequência é consequência direta das rotações por minuto (Rpm) do martelo vibratório, as rotações nominais (reais) serão menores que as rotações máximas do vibrador, que é preferível trabalhar com frequências acima de 35Hz para evitar frequências de ressonância em lajes em prédios e que quando se liga e desliga o martelo vibratório, ele passa por rotações baixas, e existe o risco de ressonância no solo.

Quando a frequência de cravação e a frequência característica do solo coincidem, ocorrem efeitos de ressonância que amplificam as vibrações do solo. Uma vez que as frequências características dos solos são frequentemente inferiores à frequência de cravação, isto normalmente ocorre durante o início da vibração na máquina, antes de atingir a frequência de cravação, e acontece o mesmo processo quando se desliga.

A situação otimizada seria passar pelas frequências de ressonância crítica do solo e estaca sem qualquer força aplicada, e em seguida, quando a frequência de cravação é atingida, se aumenta a pressão da estaca contra o solo. Os vibradores onde isso pode ser controlado são geralmente chamados de vibradores de “excentricidade variável”, “amplitude variável” ou “Sem ressonância” (Lidén, 2012).

A Figura 5, demonstra com a frequência (Gráfico superior) e as rotações por minuto (Gráfico inferior) se comportam ao longo de um determinado tempo de vibração.

**Figura 5 - Crescimento da vibração e RPM em martelos vibratórios ao longo do tempo**



Fonte: Falconi (2016)

Falconi (2016) explica que nos martelos livres de ressonância (*Resonance-free*) existem duas massas excêntricas girando no mesmo eixo, em sentido contrário de mecanismo, onde a frequência de uma massa anula a outra. É possível ajustar o martelo vibratório no processo de cravação para diferentes camadas de solo, além de poder evitar ressonâncias ao ligar e desligar. Uma vez em operação, emite a mesma vibração de um martelo vibratório qualquer – em razão disso, vibradores *resonance-free* devem ser de alta frequência.

### **2.2.3. Cravação por prensagem**

A cravação por prensagem é usualmente executada com recurso de macacos hidráulicos em que a reação pode ser a própria estrutura existente, estacas adjacentes ou plataformas com sobrecargas. Este processo tende a ser mais utilizado no caso de micro-estacas, onde as cargas de reação podem ser obtidas, como já referido, na própria estrutura (Silva, 2015).

Os métodos de cravação por prensagem operam empurrando as estacas para o solo, usando as estacas adjacentes para reação (Figura 6). Este é um método de baixo ruído e baixa vibração, o que o torna adequado para áreas sensíveis.

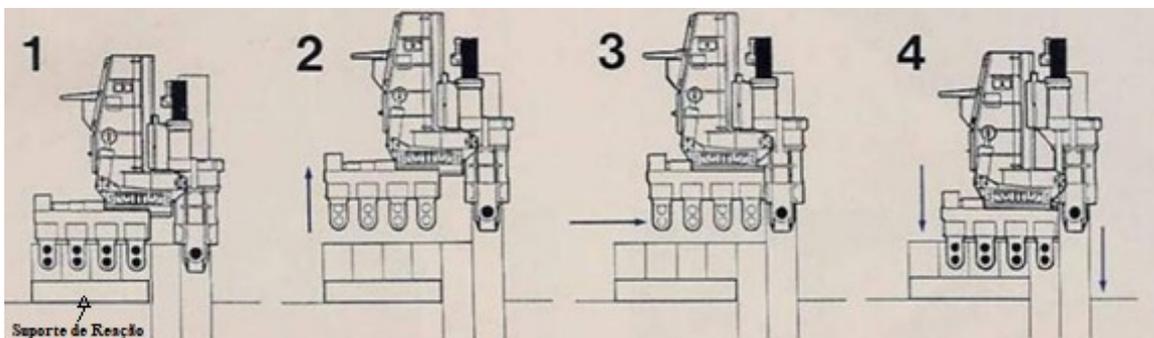
**Figura 6 – Cravação de estacas prancha por prensagem**



Fonte: Rockhill, Bolton e White (2003)

Existem dois tipos de equipamentos de prensagem, os equipamentos "japoneses" e os equipamentos de cravação de painéis. Unidades também foram desenvolvidas para adaptar outros equipamentos de cravação com métodos de prensagem. O método japonês usa um equipamento que avança ao longo da linha de estacas (Figura 7) sem precisar ser içado por um guindaste sobre cada estaca, o que significa que os requisitos de acesso são limitados. As máquinas são geralmente específicas para um tipo de perfil metálico.

**Figura 7 – Processo de cravação de estacas por prensagem com equipamento japonês**



Fonte: Deckner (2013)

Os equipamentos de cravação de painéis são adequados principalmente para instalação em argilas pesadas e requerem um guindaste para mover os equipamentos de estaca à estaca. Com

as prensas mais antigas, também era necessário parafusar as placas em cada estaca, no entanto, avanços recentes eliminaram essa exigência (Steel Piling Group, 2018).

#### **2.2.4. Estacas de compactação**

Moraes (2008) define as estacas de compactação como estacas executadas através de processos dinâmicos com o propósito de densificar o solo, aumentando sua resistência e reduzindo sua compressibilidade, onde essa densificação ocorre por dois efeitos: o deslocamento do material igual ao volume da estaca inserida no solo e os efeitos das vibrações geradas durante a cravação. A introdução de material adicional compactado também exerce grande influência no processo de densificação do solo.

Existem duas técnicas para a execução de estacas de compactação: a vibrosubstituição e o vibro-deslocamento.

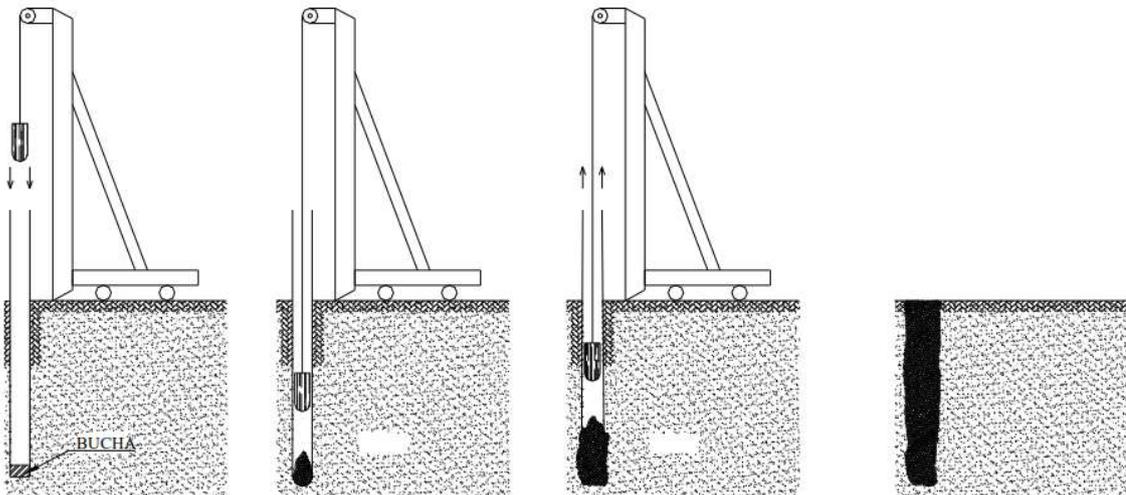
A vibrosubstituição também é conhecida como vibroflotação, e baseia-se na execução prévia de furos cilíndricos no interior do maciço de solo por meio da vibração de uma agulha, comumente denominada “torpedo”. Emprega-se água ou ar sob pressão como fluido de desagregação do solo, agindo na extremidade dessa agulha. O material granular, lançado dentro do furo, é vibrado durante os movimentos ascendentes e descendentes do torpedo, constituindo-se um elemento mais resistente que o solo natural.

O vibro-deslocamento é o processo de compactação do solo se dá por efeitos dinâmicos, tendo como principal objetivo a compactação de camadas de areias com baixa compacidade é a sua densificação, que é conseguida mediante a introdução no terreno das estacas de areia e brita. A melhoria permite elevar a tensão admissível do terreno (Soares, 2002). As etapas da execução do melhoramento de solo por vibro-deslocamento (Figura 8) podem ser vistas a seguir:

- Cravação dinâmica de um tubo metálico com uma bucha seca na ponta, até à profundidade especificada. O volume da bucha deve ser definido pelo executor, tomando-se por base uma altura de bucha seca equivalente a uma vez e meia o diâmetro do tubo.
- A bucha é então expulsa, e são introduzidas a areia e a brita no tubo. Este material é compactado devido à queda livre do pilão, até que seja atingida uma densificação limite.

- O tubo é levantado, e é feita a compactação de um novo trecho, até ser atingida a superfície do terreno.

**Figura 8 - Etapas da execução de estacas de compactação**



Fonte: Gusmão Filho (1998)

A implantação da solução de melhoramento da camada superficial através de estacas de compactação pode viabilizar o uso de fundações superficiais, e reduzir de forma significativa os custos da fundação. O melhoramento possibilita uma elevação da taxa de trabalho do terreno, permitindo uma substancial diminuição nos volumes de escavação e de concreto das fundações projetadas (Gusmão Filho, 1998).

Gusmão (2006) ainda adiciona a técnica de melhoramento do solo através de estacas de argamassa, que é uma variante do uso de estacas de areia e brita, e foi desenvolvida em virtude das difíceis condições do subsolo do Recife. O processo apresenta uma concepção inovadora para projetos de fundações, tendo conseguido pleno êxito de segurança e custo. O processo de melhoramento de solos, conhecido como “estacas de argamassa”, na verdade se trata de uma estaca constituída de concreto simples. O seu emprego é determinado em função da granulometria do terreno superficial e da presença de camadas argilosas moles superficiais, que devem ser ultrapassadas para redução de recalques. As etapas de execução estão apresentadas abaixo:

- Cravar o tubo pelo processo de bucha seca até a profundidade de abertura de base. O volume da bucha deve ser definido pelo executor, tomando-se por base uma altura de

bucha seca equivalente a uma vez e meia o diâmetro do tubo (cerca de 32 litros de brita 38 mm) para um tubo de 300 mm.

- Deve-se medir a nega ao final da cravação do tubo para 10 golpes do pilão, com altura de queda de 1 m.
- A base da estaca deve ser aberta com volume usual de 105 litros, e compactação da base tal que seja introduzida com uma energia mínima de 1.750 kN.m.
- O fuste da estaca deve ser concretado até o nível do terreno.

Atualmente são amplamente utilizados equipamentos que cravam as camisas metálicas através de vibração, onde o equipamento de vibração fica acoplado a uma escavadeira que aumenta consideravelmente a produção das estacas de compactação.

#### **2.2.5. Estacas hélice contínua**

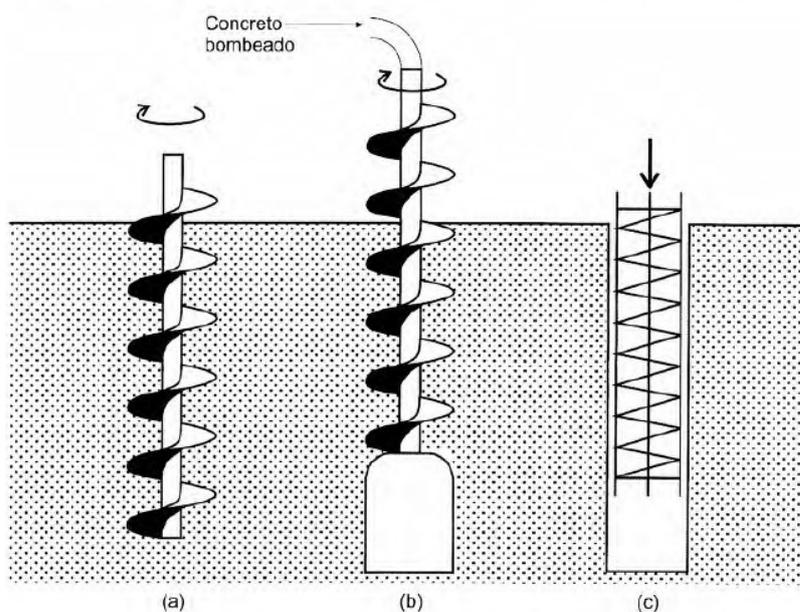
A NBR 6.122 (2019) define a fundação do tipo hélice contínua como uma estaca de concreto moldada *in loco*, executada mediante a introdução de um trado helicoidal contínuo no terreno, por rotação, e posterior injeção de concreto pela própria haste central do trado, simultaneamente a sua retirada.

Velloso e Lopes (2012) afirmam que há uma discussão técnica quanto a classificação das estacas tipo hélice contínua: se elas devem ser consideradas como estacas escavadas tradicionais (estacas de substituição), em cujo processo executivo há descompressão do solo, ou como estacas sem deslocamento. Segundo o processo executivo, se houver retirada de praticamente todo o solo no espaço onde será constituída a estaca, ela deve ser classificada como estaca de substituição. Se, no processo executivo, houver deslocamento lateral do solo para criar o espaço da estaca, ela pode ser considerada uma estaca sem deslocamento ou mesmo de pequeno deslocamento.

Durante a perfuração do terreno pelo trado contínuo, é aplicado um torque necessário capaz de superar a resistência do terreno, onde a haste de perfuração é constituída de uma hélice espiral desenvolvida em torno de um tubo central, sendo que em sua extremidade inferior existem dentes (garras) capazes de cortar o terreno. A profundidade de perfuração é definida de acordo com o projeto e em nenhum momento durante a perfuração o trado da hélice deverá ser retirado, garantindo assim que não ocorra alívio de tensões no solo. Tal característica torna possível a

execução da estaca hélice contínua tanto em solos coesivos como arenosos, na presença ou não do lençol freático. A Figura 9 apresenta as etapas de execução de uma estaca hélice contínua, sendo a escavação do trado (Figura 9.a), concretagem (Figura 9.b) e colocação da armadura (Figura 9.c)

**Figura 9 - Etapas de execução da estaca hélice contínua**



Fonte: Velloso & Lopes (2012)

Magalhães (2005) afirma que durante todo o processo de perfuração do terreno é feito o registro instantâneo, pelo sistema de monitoração, da profundidade de penetração, do torque aplicado pela mesa rotativa, da velocidade de avanço e da rotação do trado. À medida que a resistência do solo aumenta, a relação entre a velocidade de avanço e a rotação do trado diminui.

No intuito de minimizar o efeito do desconfinamento provocado pela remoção excessiva do solo durante a penetração, a velocidade de penetração do trado deverá ser igual ou bem próxima ao produto da velocidade de rotação do trado pelo seu passo. Quando a velocidade de penetração do trado é muito maior, a probabilidade de prendê-lo é grande. Em contrapartida, quando essa velocidade é muito menor o trado funciona como um transportador provocando, assim o desconfinamento do solo circundante com a consequente perda de capacidade de carga.

As vantagens da utilização das estacas hélice contínua, segundo Maragon (2009) é que, principalmente em centros urbanos, próximo a estruturas existentes, escolas, hospitais e

edifícios históricos, ela possui a capacidade de não produzir distúrbios ou vibrações e de não causar descompressão do terreno.

### 2.3. Avaliação da vibração

Ghasemi, Ataei e Hashemolhosseini (2012) afirmam que para prever e avaliar os efeitos e consequências de vibrações causadas a partir de detonação de rochas, diferentes indicadores propostos, como a velocidade de pico da partícula (PPV), a aceleração de pico da partícula (PPA) e deslocamento de pico da partícula (PPD). Ataei e Sereshki (2017) ainda acrescentam que a distância radial (DR) e a energia (E) são fatores que também influenciam na intensidade da vibração. Os mesmos autores apresentam uma tabela que resume a avaliação de 14 trabalhos científicos que verificaram a vibração gerada pelo desmonte de rochas através de 10 parâmetros diferentes, como pode ser vista da Tabela 01.

**Tabela 1 - Importância dos diferentes parâmetros utilizados para estimar os danos das vibrações por explosão**

Parâmetros	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Velocidade da Partícula														
Frequência														
Tipo de Dano														
Tipo da Estrutura														
Tipo da Rocha														
Aceleração														
Amplitude														
Distância														
Velocidade da Vibração														
Deslocamento														

1. United States Bureau of Mines (USBM),1942	8. Indian Standard Institute,1973
2. Rockwell's Energy Formula, 1934	9. Medearis's Approach, 1976
3. Crandell's Energy Ratio Concept, 1949	10. Canmet, Bauer and Calder, 1977
4. Langefors, Kihlstrom and Westerberg, 1957	11. USBM's Criterion,1980
5. Edwards and Northweed, 1959	12. German DIN Standard 4150, 1986
6. USBM's Criterion, 1971	13. Indian CMRI standards,1993
7. Langefors and Kihlstrom's Chart, 1967	14. Rosenthal and Morlock,1987

Fonte: Adaptado Ataei e Sereshki (2017)

Na avaliação dos parâmetros apresentados na Tabela 1, é importante salientar que parte dos estudos apresentaram medições não apenas das vibrações geradas na cravação de estacas, mas de desmonte e detonações de rocha. Porém, as ondas de vibrações geradas na detonação têm características similares às geradas na cravação de estacas, e o uso da velocidade de pico de

partícula como referência para quantificar a intensidade da vibração é amplamente utilizada pela engenharia civil e apresenta resultados confiáveis e compatíveis com o que é sentido.

De acordo com Bacci et al. (2004), é importante considerar as características próprias das vibrações, ou seja, a frequência, a repetitividade e a duração do fenômeno. Pode-se dizer que um edifício sofre danos, se os impulsos dinâmicos provocados pelas vibrações se sobrepõem aos impulsos estáticos, levando a uma superação das condições de resistência da estrutura. Madheswaran e Thandavamoorthy (2004) acrescentam que quando a frequência natural de uma estrutura for próxima à frequência de sua fonte de excitação, diz-se que ela se encontra em ressonância. Nesta situação, o movimento torna-se perceptível, muitas vezes incômodo e danos podem ocorrer na estrutura, principalmente nas ligações entre pilar e vigas.

Svinkin, Shaw e Williams (2003) consideram a frequência da vibração como um parâmetro essencial na avaliação do comportamento dinâmico da estrutura, particularmente a frequência dominante da perturbação. Svinkin (2004) afirma danos substanciais a estruturas podem ocorrer a longas distâncias das fontes, devido ao efeito dinâmico das vibrações de baixa frequência nos solos. Além disso, recalques em fundações resultantes de vibrações em solos não compactados podem ocorrer a várias distâncias da fonte.

Madheswaran e Thandavamoorthy (2004) observam que a intensidade da frequência é mais importante do que o tempo em que a estrutura está sujeita a vibração. Para isso, fazem uma analogia ao efeito de um terremoto, onde a duração total é de apenas alguns segundos e o tempo da vibração horizontal é de 400ms. Porém, independentemente da duração pulso, se a frequência da excitação coincidir com a frequência natural, irá acontecer ressonância.

#### **2.4. Normas e recomendações acerca de limites de vibrações**

No Brasil, existe uma norma para acompanhar vibrações, A NBR 9653/2005 - Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas – Procedimento; porém como diz o título, ela aborda apenas vibrações causadas por detonações. Svinkin (2017) afirma que a norma brasileira adotou a British Standard BS 7385-2, mas diferentemente da BS 7385, os limites são aplicados para o solo, e não para as estruturais.

Existem Normas estrangeiras definem valores máximos de PPV's para evitar que edificações próximas às construções sejam danificadas. Os limites estabelecidos variam em cada norma, junto com a tipologia da edificação. O Quadro 1 resume os limites máximos de PPV's e da frequência permitidos em estruturas, abordados pelas normas: A Norma americana AASHTO, a Norma Suíça SN640312, a Norma Britânica BS 7385-2 e a Norma Europeia Eurocode 3.

**Quadro 1 - Resumo dos limites de PPV's abordados por normas estrangeiras**

Referência	Alcance da frequência (Hz)	Estrutura e condições	Máximo PPV (mm/s)
AASHTO (1990)	-	Estruturas projetadas, sem reboco	25,4–38,1
		Edifício residencial em bom estado de conservação com paredes de borda em gesso	10,16–12,7
		Edifícios residenciais, paredes rebocadas	5,08–7,62
		Locais históricos ou outros locais críticos	2,54
Swiss Standard SN 640312 (SNV 1992)	10–30	(I) Edifícios em aço ou concreto armado, como fábricas, muros de contenção, pontes, torres de aço, abertas canais, câmaras subterrâneas e túneis com e sem alinhamento concreto	30,48
		(II) Edifícios com paredes e pisos de fundação concreto, paredes em concreto ou alvenaria, muros de contenção em alvenaria de pedra, câmaras subterrâneas e túneis com alinhamento de alvenaria, conduíte em material solto	17,78
		(III) Edifícios mencionados anteriormente, mas com tetos de madeira e paredes em alvenaria	12,7
		(IV) Construção muito sensível à vibração, objetos de interesse histórico	7,62
British Standard BS 7385-2 (BSI 1993)	4–15	Estruturas não reforçadas ou com estruturas leves, residenciais ou edifícios de tipo comercial leve	15–20
	> 15	Estruturas não reforçadas ou com estruturas leves, residenciais ou edifícios de tipo comercial leve	20–50
Eurocode 3 (CEN 1993)	-	Serviços enterrados	40
		Indústria pesada industrial	30
		Comercial leve	20
		Residencial	10
		Ruínas, construção de mérito arquitetônico	4

Fonte: Adaptado Hamidi, Rooz e Pourjenabi (2018)

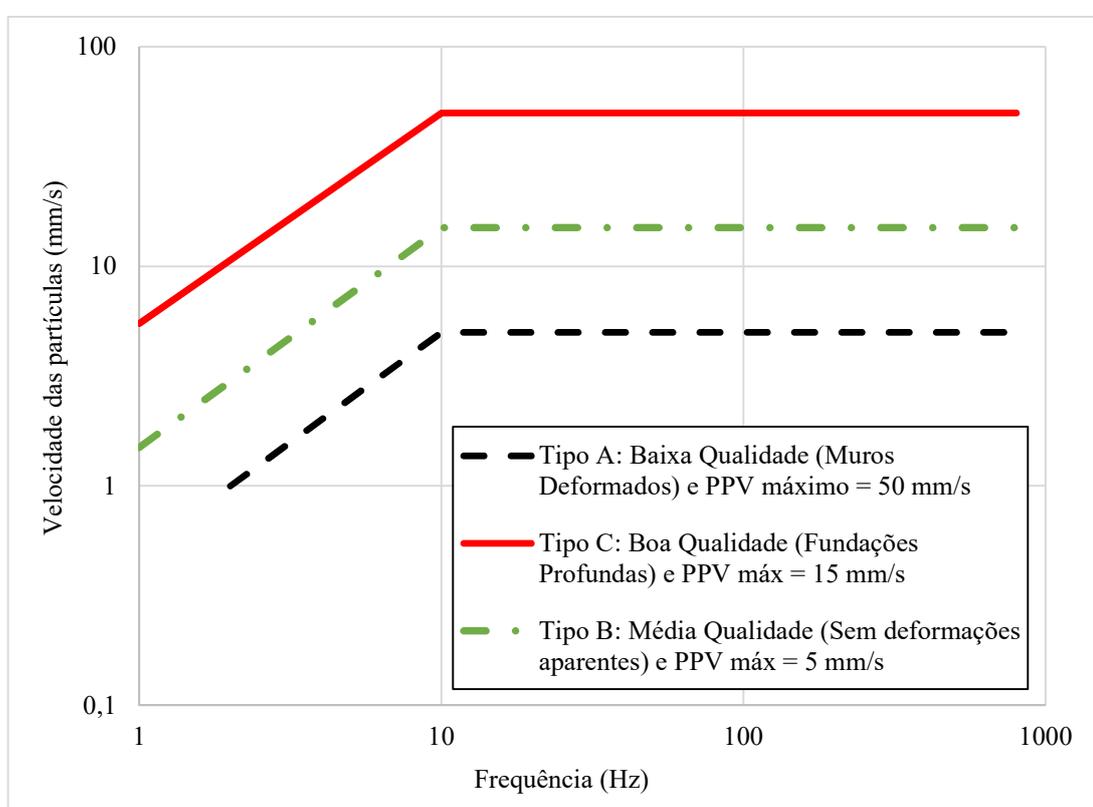
Outra norma amplamente utilizada no Brasil para a verificação da vibração é a recomendação sugerida pela AFTES (*Association Française des Travaux en Souterrain*), de 1974. A recomendação AFTES subdivide os edifícios em três classes:

- a) Tipo A - edifício de baixa qualidade mecânica (muros deformados).
- b) Tipo B - construções de média qualidade mecânica (sem deformações aparentes).

c) Tipo C - construções de boa qualidade mecânica (fundações profundas).

Os limites sugeridos de velocidade são mostrados no Gráfico 01. Para os 3 tipos de edifícios, os limites de PPV para frequências inferiores a 10 Hz aumentam em escala crescente. Para frequências acima dos 10 Hz, os limites do PPV são de 50 mm/s para edifício tipo A, 15 mm/s para edifícios tipo B e 5 mm/s para edifícios tipo C. Bacci et al. (2004), comenta que o valor discriminante de frequência a 10Hz é arbitrário, ignorando os fenômenos de ressonância que podem surgir nas estruturas.

**Gráfico 1 - Diagrama proposto pela AFTES das vibrações admitidas para as três classes de estrutura**



Fonte: Adaptado de AFTES (1974)

## 2.5. Casos de danos por vibrações excessivas

Alguns estudos investigaram danos a estruturas, desde recalques causados pela cravação de estacas ou outras operações de construção. Como um exemplo, Lacy e Gould (1985) descreveram recalques prejudiciais causados pela cravação de estacas metálicas perto de um edifício, onde, o recalque máximo alcançou 61 mm, enquanto a velocidade de pico de partícula

(PPV) no edifício foi de 2,5 mm/s. Recalques prejudiciais causados pela densificação do solo por vibração (shakedown) de areias não compactas podem ocorrer quando as amplitudes de tensão de cisalhamento excedem o limite amplamente aceito de 0,01% (Mohamad e Dobry, 1987), embora as vibrações em uma estrutura não excedam o limite de dano direto.

No Brasil, Albino, Lima e Souza (1996) apresentam 2 casos danos em edificações causados pela cravação de estacas.

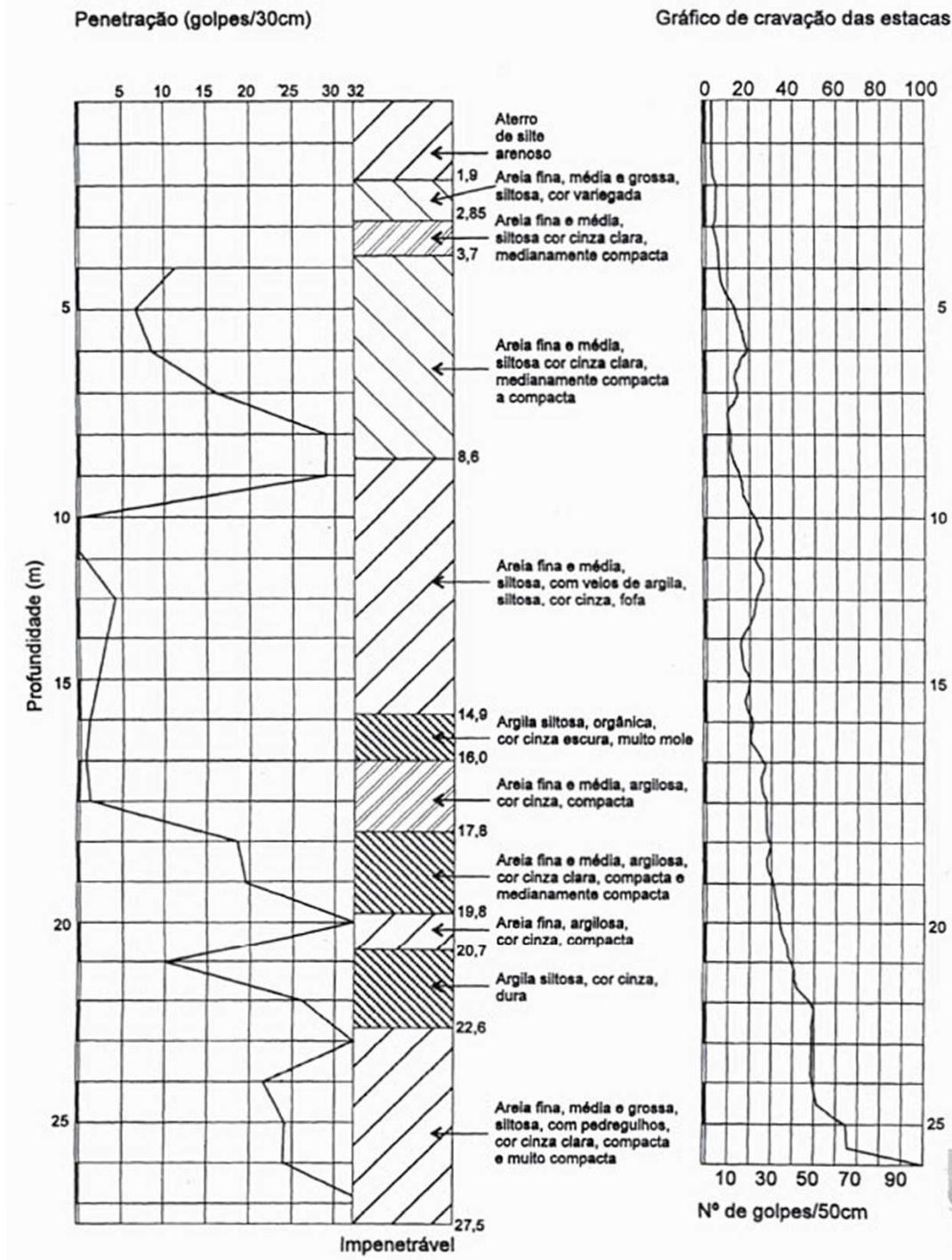
No primeiro caso, foi avaliada uma edificação constituída por 24 apartamentos distribuídos em 12 pavimentos, que apresentava desaprumo, segundo as primeiras informações. O imóvel foi desocupado, em vista dos resultados das avaliações preliminares, e o exame da superestrutura e vistoria de duas sapatas, assentadas a 2 m de profundidade, não indicaram nenhuma anomalia em sua integridade. Porém, foi verificada a inclinação progressiva da edificação, atingindo, nos dois primeiros dias, 5 cm de afastamento no seu topo, em relação ao prédio vizinho, além do processo de fissuração no nível do pavimento de acesso, de paredes de alvenaria e da cisterna.

A causa das patologias foi uma construção vizinha, com 13 pavimentos e mais um subsolo, com divisa direita do terreno. A solução de fundação na obra foi projetada em blocos sobre estacas metálicas, num total de 62 unidades - trilhos duplos TR57, TR50, TR45 e TR37. O relatório das sondagens (Figura 9) indica um subsolo constituído por camadas sedimentares predominantemente arenosas. A partir do nível de assentamento das sapatas do prédio existem camadas de areia fina e média, sendo as mais superficiais argilosas e pouco argilosas ou siltosas, com pequena espessura.

Durante a cravação das estacas, a travessia das primeiras camadas de areia do terreno provocou a compactação das mesmas no entorno das estacas devido ao efeito das vibrações provenientes dos golpes do martelo. O atrito maior resultante desse fato exigia cada vez mais energia para a sua penetração, à medida que a estaca alcançava maior profundidade.

Observando os relatórios da Figura 10, verificamos que entre 10m e 13m de profundidade, apesar de atravessar uma camada de areia fofa, com SPT entre 2 e 4 golpes, a cravação exigia, por cada 50cm de penetração, um esforço crescente. No trecho final, até a obtenção da "nega", a energia é elevada. A reação encontrada pela ponta das estacas nesta ocasião favoreceu a formação de vibrações que afetaram as camadas de suporte das sapatas do prédio acidentado.

Figura 10 – Sondagem do edifício acidentado e gráfico de cravação das estacas do edifício vizinho



Fonte: Albino, Lima e Souza (1996)

No segundo caso apresentado por Albino, Lima e Souza (1996), O problema apresentou-se em duas obras distintas, executadas por construtoras diferentes no bairro de Botafogo, no Rio de Janeiro. As obras distavam, entre si, cerca de 300 m e foram executadas com um intervalo de cerca de um ano.

A edificação a ser construída teve a solução de fundação em estaca Franki, pois, as sondagens mostram uma camada superficial de areia argilosa, compacta (SPT de cerca de 15 golpes), com cerca de 2,5 m de espessura. seguida de camadas de argila mole intercaladas de camadas finas de areia, compondo um pacote de cerca de 15 m, tudo assente sobre uma rocha alterada impenetrável a percussão. O projeto de fundações e a cravação de estacas foram realizados por empresas diferentes em cada obra.

As construções afetadas possuíam sistemas construtivos diferentes. Uma construção afetada era de alvenaria estrutural de tijolos cerâmicos maciços, assentados com argamassa de cimento, a outra construção era constituída por dois blocos: um mais antigo, era semelhante ao descrito acima e o outro, mais recente, era de concreto armado. Todas as construções tinham uma característica comum, fundações diretamente assentes sobre a camada superficial de areia compacta, pouco acima do lençol freático.

Dada as características do solo de fundação, já descritas, as estacas atravessaram uma camada inicial de areia compacta, em seguida atravessaram camadas de argila mole para, finalmente, atingirem um solo de alteração mais resistente onde era obtida a nega. A travessia da camada de areia provocou grandes vibrações nas camadas superficiais do terreno, justamente onde estavam assentes as fundações das construções afetadas. Essas vibrações causaram um adensamento das camadas superficiais do solo e provocaram recalques diferenciais nas fundações das casas, tendo como consequência o surgimento de grandes rachaduras nas paredes de alvenaria, com a inclinação típica das rachaduras oriundas de recalque de fundações.

Como modo de tranquilizar os residentes, o método de cravação foi modificado, sendo inicialmente executado, a trado, um pré-furo que atravessava a camada de areia compacta, reduzindo em muito as vibrações e praticamente cessando os danos. Infelizmente, os vizinhos não se contentaram nem com as explicações dos engenheiros, nem com suas promessas e nem com a mudança de método de cravação: em ambos os casos promoveram o embargo das obras por meio de ações judiciais de nulclação de obra nova.

Com consequências para os proprietários dos empreendimentos, além das dificuldades e custos adicionais por terem as obras paralisadas, foram processados por perdas e danos em decorrência de despesas e prejuízos comerciais em que os vizinhos incorreram (uma das casas era um

estabelecimento comercial e demonstrou ter tido perda de freguesia e quebra de receita). Os embargos resultaram, em ambos os casos, em longos processos judiciais com efeito cascata: os incorporadores, considerando haver contratado construtoras responsáveis, processaram-nas para se ressarcirem dos prejuízos; as construtoras, por sua vez, processaram as cravadoras de estacas, suas subcontratadas; todos processaram suas respectivas seguradoras.

Pinho (2012), acrescenta que na cidade de Vitória, no Espírito Santo, danos causados pela cravação por impacto de estacas pré-fabricadas de concreto causaram fissuras no piso de uma edificação vizinha, como pode ser visto da Figura 11.

**Figura 11 – Fissura causada pela cravação de estacas pré-fabricadas de concreto próximas a uma edificação vizinha**



Fonte: Pinho (2012)

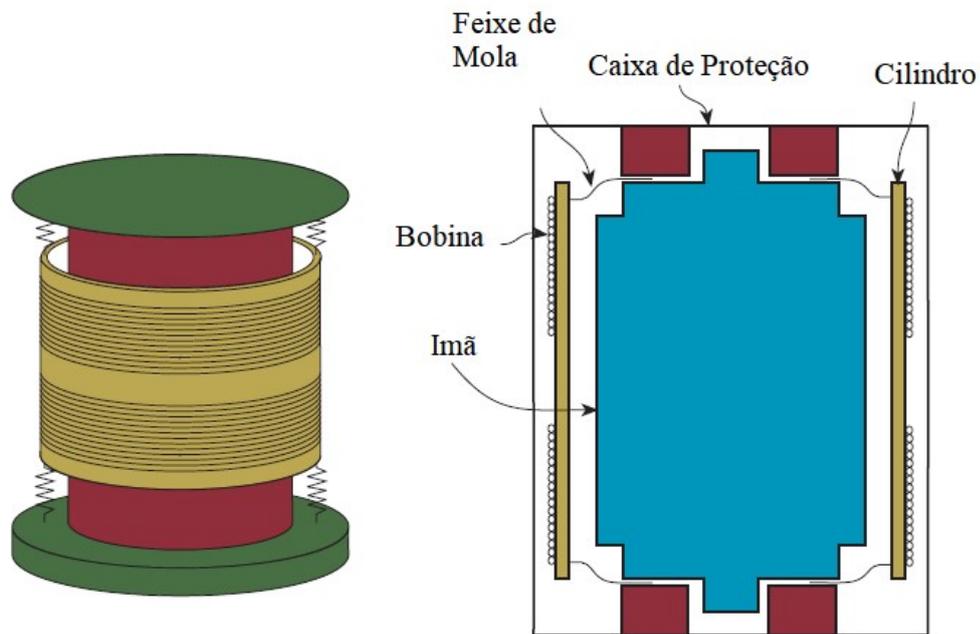
## 2.6. Equipamentos para medição da vibração

Os ensaios sísmicos resultam da propagação das ondas volumétricas e superficiais, produzidas pela fonte de vibração, e o registo da intensidade delas em receptores. A fonte utilizada na aquisição de dados sísmicos pode ser de várias naturezas: ativa, através do impacto de um martelo ou de outro objeto, vibratória ou passiva, registando apenas o ruído ambiente. Os receptores podem ser geofones, para medir a velocidade ou acelerômetros, para medir acelerações. Os geofones são o tipo de receptor mais frequente e registam apenas uma componente do movimento e uma determinada gama de frequências, associada a cada equipamento.

### 2.6.1. Geofone

Um Geofone é um tipo de transdutor ativo e sua operação é amplamente semelhante a um sistema de amortecimento massa-mola com um único grau de liberdade de movimento. O sistema consiste em uma massa, um amortecedor, uma mola e uma base vibrante (Figura 12).

**Figura 12 – Desenho esquemático de um geofone**



Fonte: Adaptado Barzilai Vanzandt e Kenny (1998).

Quando o solo é submetido a vibrações, as molas transferem a vibração aplicada da base para a massa com amortecimento da vibração aplicada do sistema. A saída de sinal elétrico de um Geofone é gerada por uma bobina se movendo em um ímã permanente. De acordo com a lei de Faraday, um ímã móvel em uma bobina de fios induz uma força eletromotriz (FEM) na bobina. A magnitude do FEM (volt) é proporcional à velocidade do movimento do ímã que, no caso do geofone, é proporcional à vibração do solo. Como o geofone usa esse princípio simples, e por causa de sua construção robusta (Figura 13), foi considerado o mais adequado transdutor para medir a vibração do solo (Uromeihy, 1990).

**Figura 13 - Geofone posicionado sobre o solo para realizar medição**



Fonte: Rockhill, Bolton e White (2003)

Os geofones medem a velocidade de oscilação das partículas do solo e são normalmente projetados para frequências acima de 5 Hz. O geofone geralmente mede em uma direção, mas conectando vários sensores uma configuração triaxial pode ser alcançada. Uma configuração normal é medir verticalmente, horizontalmente em linha com a propagação de vibração e horizontalmente através da direção de propagação (Lidén, 2012).

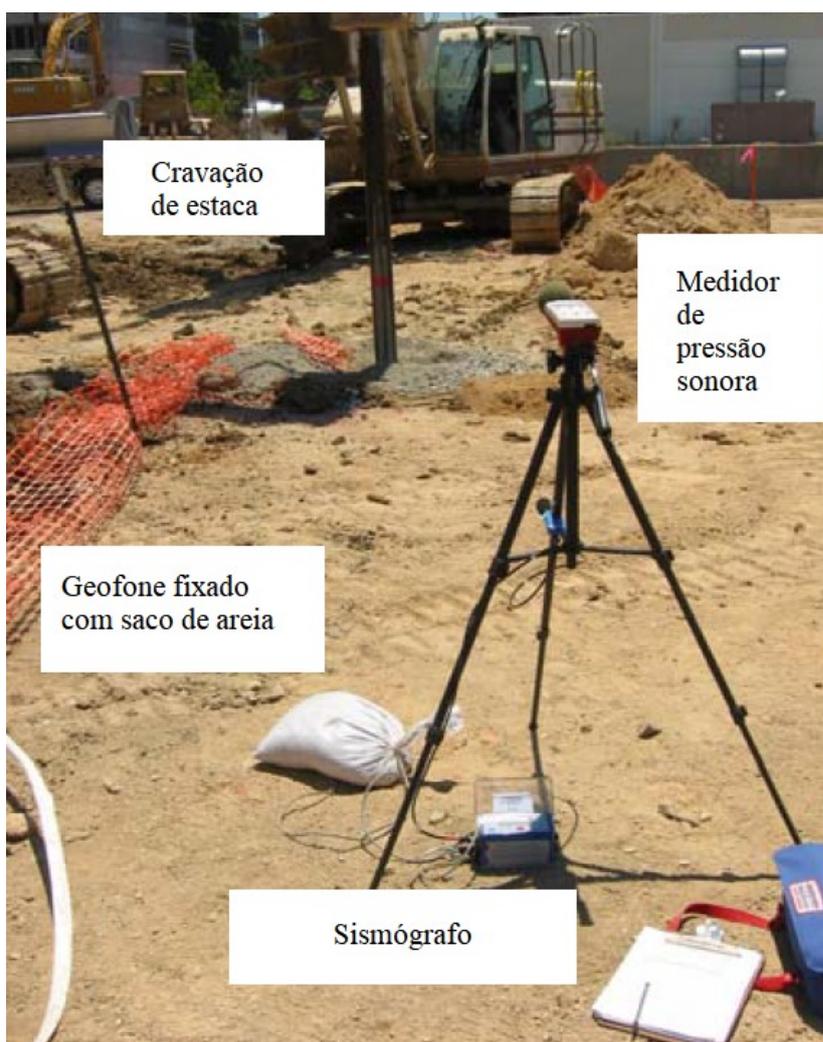
A combinação de atributos oferecidos por um geofone é uma boa escolha para aplicativos de medição sísmica, já que um geofone pode ter um ruído instrumental mínimo tão baixo quanto o ruído sísmico mínimo da Terra. A distorção harmônica total (DHT) de um geofone também é bastante baixa, menos de 0,2%. Os geofones também devem ser robustos, capazes de suportar 1000 vezes uma queda de um metro em um pedaço de madeira compensada (Barzilai Vanzandt e Kenny, 1998).

Usualmente emprega-se geofones de componente vertical e frequência de ressonância de 4,5Hz (tanto para as fontes ativas quanto passivas), embora geofones de frequências de ressonância

mais altas, como 10Hz por exemplo podem também ser empregados com fontes ativas e dependendo da profundidade de investigação desejada (Ardito, 2013).

A utilização dos para medir a vibração é feito o colocando em contato com o solo (Figura 14), em distâncias definidas pelo avaliador, da fonte de vibração.

**Figura 14 – Geofone perto medindo vibração gerada na cravação de estacas prancha por vibração**



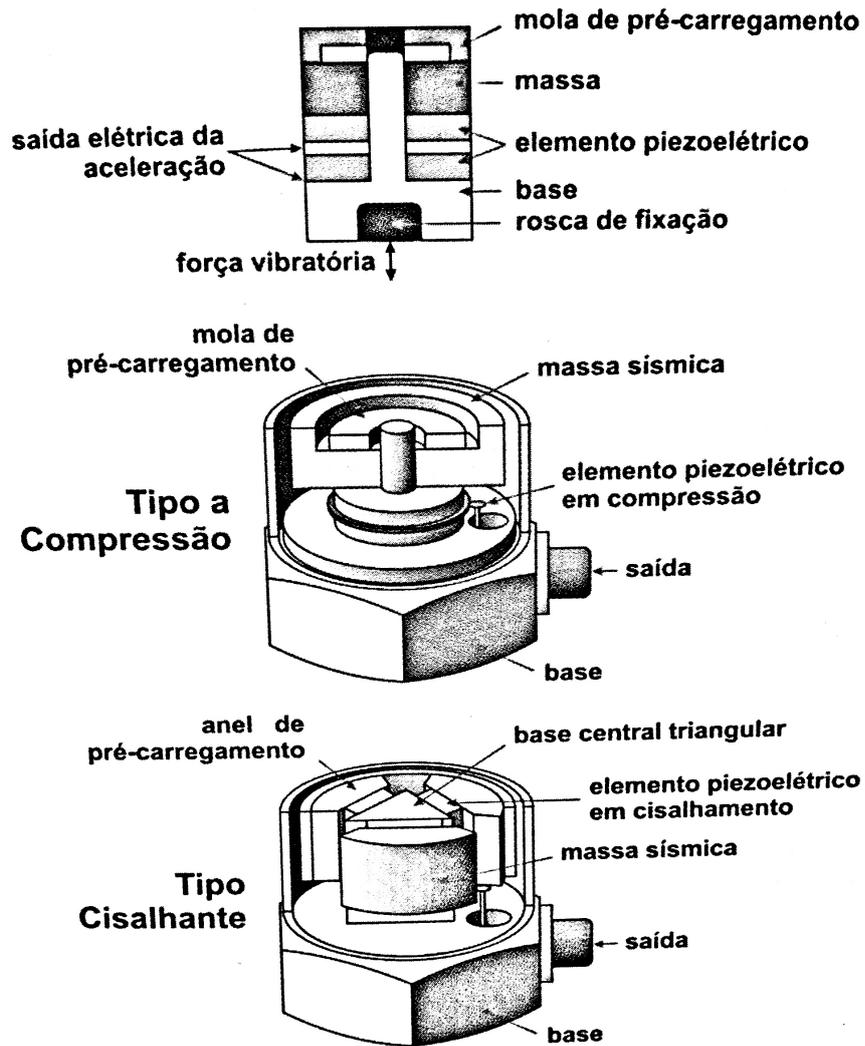
Fonte: Adaptado Fiegel (2008)

### 2.6.2. *Acelerômetro*

O princípio de funcionamento do transdutor de aceleração, baseia-se nos cristais piezoelétricos, que depois de sujeitos à compressão, geram um pequeno sinal elétrico proporcional à aceleração (Figura 15). Quando se encontra em funcionamento, o transdutor acompanha a vibração transmitida pelo equipamento em estudo, a massa no interior do

transdutor tende a manter-se estacionária no espaço. Um transdutor sensível à aceleração denomina-se por acelerômetro, e este é fixado numa superfície em movimento, onde haverá um deslocamento provocado pela força motriz “F” que dá origem ao movimento. Esta força é igual ao produto da aceleração com a massa sísmica (Sequeira, 2013).

Figura 15 – Composição de um acelerômetro piezoelétrico

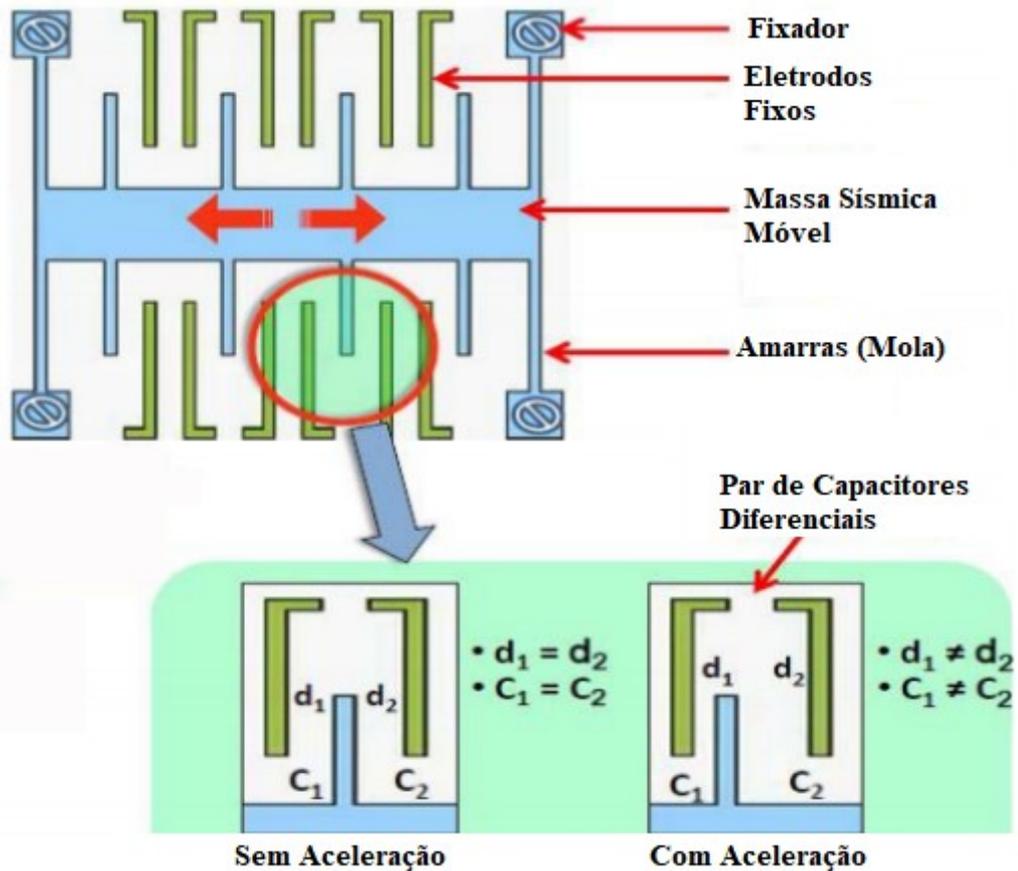


Fonte: Gonçalves, Bernardes e Neves (2010)

Outro tipo de acelerômetro bastante utilizado é o Acelerômetro MEMS. MEMS significa *Micro-Electro-Mechanical Systems*, que representa uma tecnologia que integra elementos mecânicos, sensores e eletrônicos dentro de um chip. O acelerômetro mede as forças de aceleração que podem ser causadas pela gravidade, pelo movimento ou pela ação de inclinação. Tais acelerações são medidas em termos de força g ( $m/s^2$ ) nos três eixos (x, y, z). Os

acelerômetros baseados em MEMS podem consistir em capacitores diferenciais. A Figura 16 mostra a arquitetura interna de um acelerômetro baseado em MEMS.

**Figura 16 – Composição e funcionamento de um Acelerômetro MEMS**



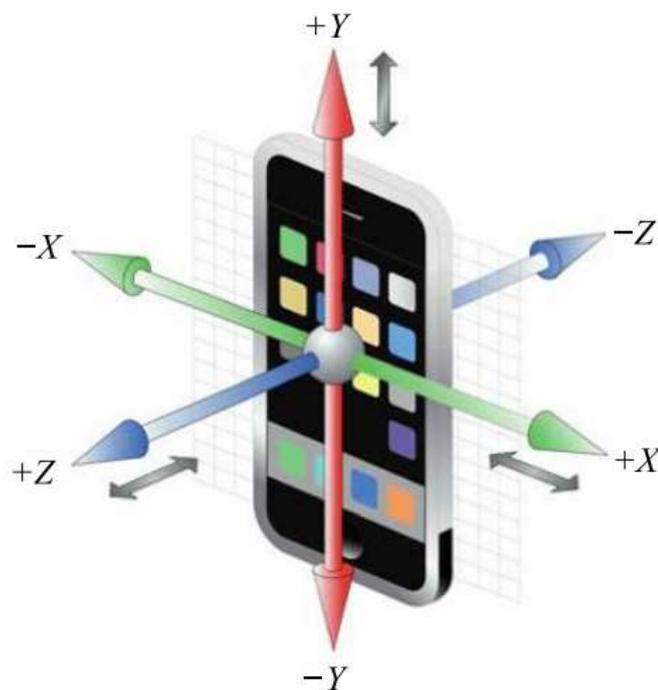
Fonte: Adaptado Amerini et al. (2016)

Como podemos ver, existem vários pares de eletrodos fixos e uma massa sísmica móvel. Sob nenhuma aceleração, as distâncias  $d_1$  e  $d_2$  são iguais e, como resultado, os dois capacitores são iguais, mas uma mudança na aceleração fará com que a massa sísmica móvel se desloque para mais perto de um dos eletrodos fixos, causando uma alteração na capacitância gerada. Essa diferença de capacitância é detectada e amplificada para produzir uma tensão proporcional à aceleração. A imprecisão instantânea na estrutura eletromecânica induz imperfeições entre os chips do acelerômetro.

A disseminação de acelerômetros MEMS está associada a utilização dos mesmos em celulares *Smartphone*, onde a sua principal função é detectar as alterações na orientação do *smartphone* (Figura 17) em relação a um dado e ajustar a orientação para se adequar ao ângulo de visão de

um operador. Por exemplo, quando você está procurando uma página da Web com largura aumentada, é possível obter essa visualização paisagem alterando a orientação do telefone para horizontal. Da mesma forma, o modo de câmera também altera o retrato para paisagem ou paisagem para o modo retrato quando alteramos a orientação do smartphone. Por fim, o acelerômetro detecta a mudança de orientação pela medição 3D (eixos X, Y e Z) da aceleração do dispositivo em relação à queda livre. Pode-se usar melhor esse sensor enquanto joga jogos de corrida, onde ele pode dirigir o carro na direção desejada, inclinando o telefone nessa direção, similar a um volante (Mi Fixer, 2016)

**Figura 17 – Direção dos eixos X, Y e Z no smartphone**



Fonte: Su e Tong (2014)

Nas medições de vibrações, há necessidade de se escolher o acelerômetro correto para cada frequência a ser medida, além de ser necessário usar um medidor de vibração conectado ao acelerômetro. Esse medidor contém um pré-amplificador, que indica o nível RMS (*Root Mean Square*) da aceleração ou velocidade ou deslocamento. Também pode ser usado um medidor portátil de vibração. A medição dos efeitos das vibrações em edificações é efetuada através da fixação desses acelerômetros em determinados pontos dessas edificações e, a distâncias pré-definidas entre os pontos de instalação desses acelerômetros e a fonte que emite as vibrações (Gonçalves, Bernardes e Neves, 2010)

O tamanho do acelerômetro (massa sísmica) vai influenciar a gama de frequências utilizável e a sua sensibilidade. Como regra geral, quanto maior for o acelerômetro, maior a sua sensibilidade e menor a gama de frequência máxima utilizável. O intervalo de frequência em que os acelerômetros trabalham situa-se abaixo da sua primeira frequência natural. A sua sensibilidade é medida em milivolts por unidade de aceleração “g” e é aproximadamente constante até 1/5 da frequência de ressonância. Por esse motivo, é aconselhável o uso do acelerômetro até este limite superior de frequência (Sequeira, 2013)

## 2.7. Métodos de previsão da vibração

Para evitar problemas relacionados a vibração gerada na cravação das estacas, as medições das vibrações inerentes a este processo, são passos importantes na prevenção de danos nas estruturas existentes e dos incômodos causados às pessoas. Como já citado, a monitorização deve ser feita utilizando um Geofone triaxial ou acelerômetros capazes de medir a velocidade nos eixos X, Y e Z no solo em estudo. Porém, outra forma de verificar a vibração que será gerada é utilizando fórmulas para a previsão da vibração, onde as mesmas utilizam variáveis como a distância da fonte de vibração, energia liberada pelo equipamento de vibração e parâmetros geotécnicos do solo.

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 gerada pelo equipamento de cravação 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:

$$PPV = k \frac{\sqrt{W}}{D}$$

**Equação 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.

$$\log PPV = -0,296 + 1,38 \log\left(\frac{W^{0,5}}{D}\right) - 0,234 \log^2\left(\frac{W^{0,5}}{D}\right) \quad \text{Equação 2}$$

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

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 eliminados, a Equação 4 demonstra o cálculo do PPV através de uma fórmula similar às apresentadas, porém com um KS que representa o coeficiente para ondas de superfície (Ondas R e Ondas Love), calculado de acordo com a Equação 5.

$$PPV = k_s \left(\frac{W}{D}\right)^{0,5} \quad \text{Equação 4}$$

$$K_s = \left(\frac{f}{V_r}\right) \times (0,8 \times \pi \times \rho)^{0,5} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

f = Frequência (Hz);

$\rho$  = Densidade de Massa do Solo (kg/cm<sup>3</sup>);

V<sub>r</sub> = Velocidade de propagação (m/s).

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

$$Vr = \left( \frac{0,862 + 1,14v}{1+v} \right) \times \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+v)}}$$

**Equação 6**

Onde:

$v$  = Coeficiente de Poisson;

$E$  = Módulo de Young (kPa);

A fórmula apresentada por P.J. More (1995) tem o  $ks$ , diferente do  $k$  na fórmula de Attewell e Farmer (1973). O  $ks$  apresenta valores calculados com base nos parâmetros geotécnicos do solo, quando o  $k$  varia de acordo com o tipo de cravação de estaca e o tipo de solo.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O programa de investigação empregado na pesquisa contempla de forma geral a realização de ensaios e a observação do processo de cravação de estacas. Sendo assim, na pesquisa, serão explicadas as seguintes etapas:

- Levantamento da literatura para adquirir embasamento técnico e teórico sobre o tema abordado;
- Criação de um banco de dados com medições de vibrações geradas na execução de estacas para comparação com os resultados obtidos neste trabalho.
- Caracterização dos empreendimentos como um todo a partir da localização e da avaliação dos projetos de fundação e ensaios de caracterização de solo;
- Realização de visitas técnicas à edificação estudada para efetuar as medições propostas no estudo;
- Desenvolvimento de um aplicativo para celular capaz de medir a velocidade das ondas de vibração.

#### 3.1. Revisão sistemática

Buscando conhecer melhor a influência da execução de estacas na vibração gerada, foi desenvolvida uma revisão sistemática utilizando a metodologia PRISMA. Tal metodologia permite a criação de um banco de dados com resultados de velocidade de pico de partícula (PPV) para comparação com os que serão obtidos nos resultados do presente trabalho.

Para cumprimento dos sucessivos passos metodológicos, e elaboração da revisão sistemática, foram consideradas as indicações do modelo PRISMA (Moher, 2015), que significa *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Metaanalyses* ou em tradução literal 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 5 de maio de 2019. 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”.

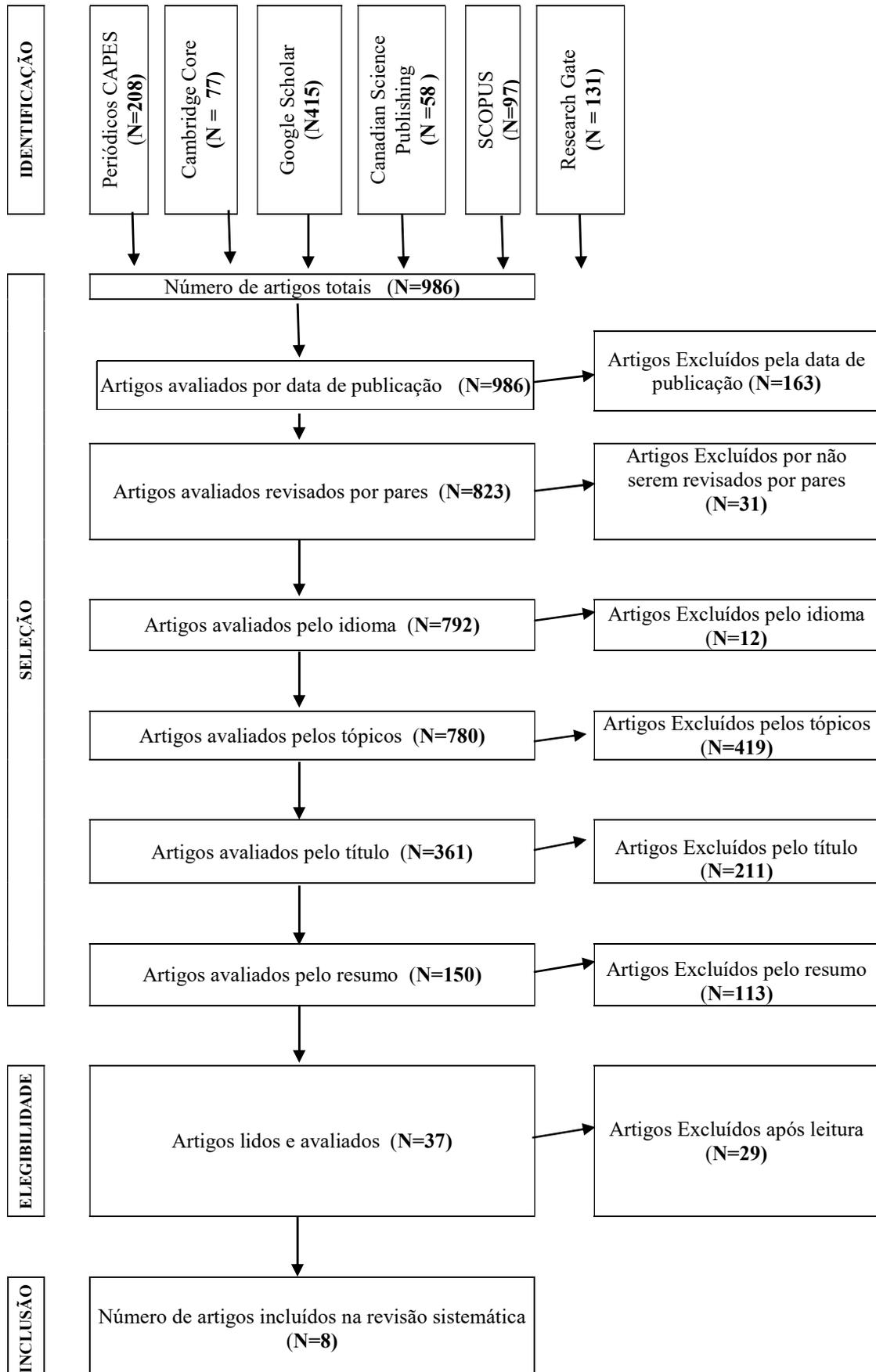
Nas buscas, foram utilizadas as palavras-chaves especificadas, juntamente com os Operadores Booleanos em língua inglesa “AND” e “OR”. Foram utilizadas como palavras-chaves: Pile Driving, Sheet Pile Driving, Vibrations, Foundations, Ground Vibration, Structures, Prediction, Vibration Prediction, Pilling, 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 986 artigos. No processo de avaliação, os 986 artigos encontrados passaram por uma filtragem, onde critérios de exclusão foram aplicados (Figura 18). Os critérios de exclusão foram: Artigos repetidos, data de publicação, revisão por pares, idioma, tópicos, avaliação do título, avaliação do resumo.

Figura 18 – Critérios de exclusão dos trabalhos científicos



Fonte: Autor (2020)

Após a aplicação dos critérios de exclusão, oito trabalhos foram selecionados: Uromeihy (1990), Silva (1996), Athanaspoulos (2000), Fiegel (2008), Yong Tan (2012), Deckner (2013), Achuhan (2016) e Deckner (2017).

A análise dos resultados foi feita de acordo com o método de cravação das estacas, sendo os dois grupos denominados “Estacas cravadas por impacto” e “Estacas cravadas por vibração”. Os dados obtidos foram apresentados em duas tabelas (Tabela 2 e Tabela 3 nos resultados), onde as colunas são formadas pelos critérios de seleção, já definidos neste capítulo.

Para cada resultado da cravação de estacas obtidas nos trabalhos selecionados pela metodologia PRISMA, foram retirados dois pontos de medição de vibração, em distância diferentes, denominados 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.

Como forma de avaliar os resultados obtidos nos trabalhos, foi feita uma comparação das medições do PPV em mm/s em referência a estimação do PPV a partir das fórmulas apresentadas no item 2.7 da presente dissertação.

## **3.2. Medição da vibração**

### **3.2.1. Medição com geofone**

Foram utilizados como referenciais os limites de PPV (mm/s) estabelecidos pelas Normas americana AASHTO, a Norma Suíça SN640312, a Norma Britânica BS 7385-2 e a Norma Europeia Eurocode 3, assim como, a recomendação Francesa da AFTES (1974) foi a referência para análise da frequência (Hz).

Após a inspeção de campo visando identificar alcance dos riscos de danos estruturais atribuídos às vibrações induzidas pelas operações, a identificação do local da cravação da estaca-teste e o levantamento dos dados operacionais da operação, iniciou-se a demarcação dos pontos de monitoramento sísmico.

Devido a medição do primeiro estudo de caso ter sido desenvolvido por uma empresa contratada pelo construtor, foi utilizado um tipo de geofone diferente para essa obra, denominado Geofone tipo 1. Sendo as demais obras medidas com o geofone tipo 2, cedido pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). As especificações dos geofones utilizados são:

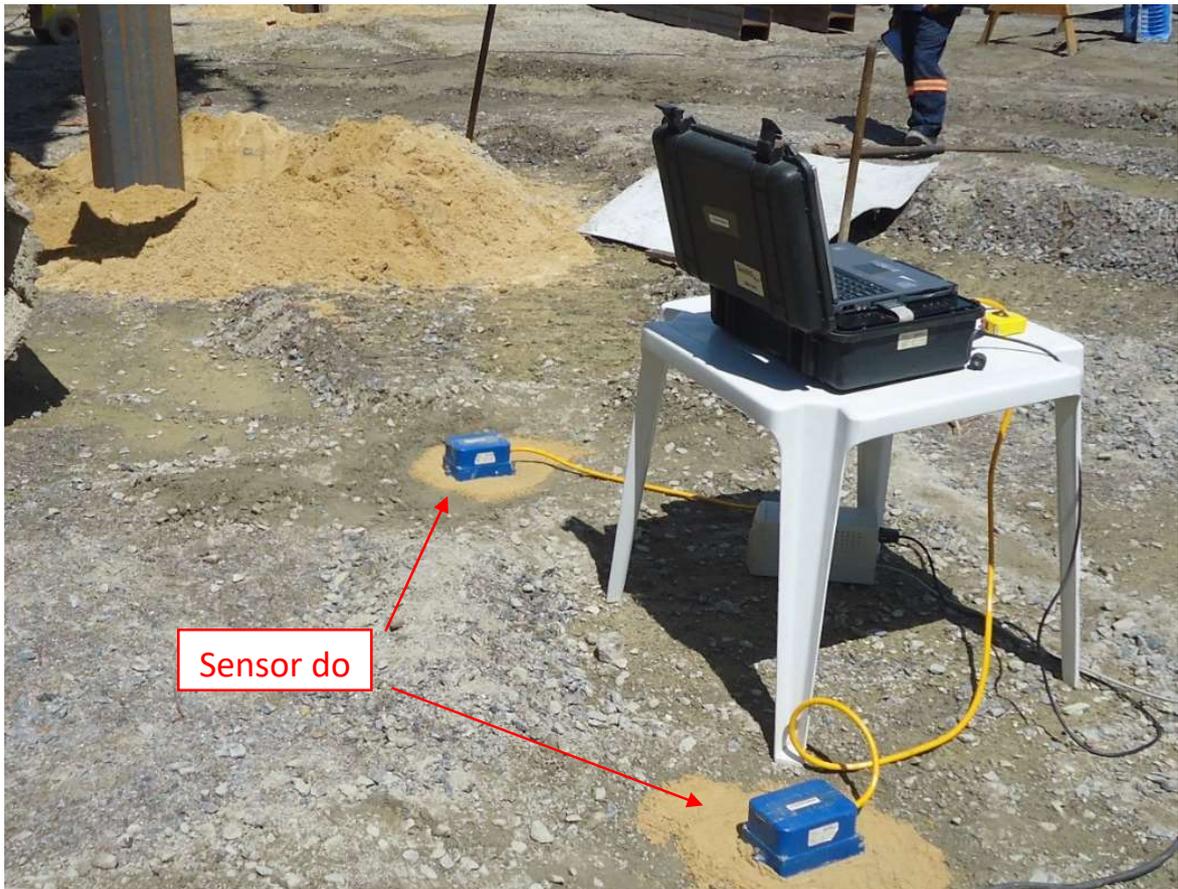
- Tipo 1 - GeoSonics Inc., modelo SSU3000EZ+ possui 01 sensor do tipo geofone e 01 microfone para medir pressão sonoras (Figura 19) pertencente a Ávila Engenharia;
- Tipo 2 - GEOsig Inc., modelo GSR-12PC possui 02 sensores do tipo geofone (Figura 20) pertencente a Universidade Federal da Bahia (UFBA).

**Figura 19 - Geofone da GeoSonics Inc., modelo SSU3000EZ pertencente a Ávila Engenharia**



Fonte: Autor (2020)

Figura 20 - GEOSig Inc., modelo GSR-12PC pertencente a UFBA



Fonte: Autor (2020)

Os dados colhidos são processados através do software GeoDAS da Geosig e toda manipulação das amostras são processadas através desse software.

Os parâmetros sísmicos medidos foram as velocidades de deslocamentos de partículas em 03 direções ortogonais entre si, e suas respectivas frequências. As direções estudadas foram a vertical e as duas horizontais com um eixo dirigido para o ponto de cravação da estaca e outro ortogonal a ele (Figura 21).

**Figura 21 – Eixos ortogonais de medição da vibração**



Fonte: Autor (2020)

A definição dos Pontos de monitoramento foi estabelecida após análise das condições encontradas no local, considerando o contexto situacional das edificações passíveis de riscos, ou seja, onde os usuários receavam pela integridade das estruturas prediais e de incômodos físicos frequentes devido aos níveis de vibração.

Geofone do tipo 1, foi utilizado no primeiro estudo de caso, onde foram dispostos 5 equipamentos do modelo e selecionados cinco pontos espaçados a cada 5 m a partir da estaca piloto no interior do terreno do canteiro de obras, os pontos de medição 1 a 4 foram dispostos em linha reta e igualmente espaçados de 5,0 m entre si. A distância entre o ponto de cravação da estaca e o ponto 01 também foi de 5,0 m, enquanto que o ponto 05 distava 23,0m da estaca, conforme mostrado na Figura 22.

**Figura 22 – Localização do equipamento de cravação e dos pontos de medição com os geofones**



Fonte: Google Maps (2020)

Já o Geofone tipo 2, foi utilizado nos demais estudos de caso, com apenas 1 equipamento, porém com o espaçamento entre os sensores variando de 2m a 3m, e a distância da fonte geradora de vibração entre 2m e 15m. Também foram feitos testes com os sensores fixados na parede, como pode ser visto na Figura 23.

**Figura 23 – Sensor fixado na parede**



Fonte: Autor (2020)

O critério de escolha das distâncias foi obter uma distribuição dos níveis de vibração que possa servir de padrão para avaliação das ações dinâmicas nas edificações vizinhas ao terreno, diante da impossibilidade física e financeira de se monitorar todas as edificações existentes no entorno do terreno. O geofone do tipo 2 teve seu alcance de captação de dados programados para captar 1.000 amostras por segundo (1 ponto a cada 1 milissegundo) no estudo de caso 02, e nos demais, captando 500 amostras por segundo (1 ponto a cada 2 milissegundos).

A movimentação do geofone tipo 1 ao longo da obra do estudo de caso 1 foi considerável fácil, visto que o equipamento funciona a bateria e o peso dele permite que seja facilmente carregado. Para a mobilização do geofone tipo 2 ao longo da obra, foram tidas dificuldades para chegar até o ponto de medição da vibração, visto que o equipamento funciona apenas ligado na energia. O geofone tipo 2 opera a uma voltagem de 110 v, o que obrigou a utilização de um estabilizador de energia, o que dificultou ainda mais a mobilidade com o equipamento ao longo da obra. Outro ponto que dificultou os trabalhos foi o aquecimento do computador do geofone tipo 2, que superaquece quando fica exposto ao sol por mais de 30 minutos, a solução foi utilizar tendas ou cabines existentes nas obras para o proteger.

### 3.2.2. Medição com acelerômetro do Celular

O acelerômetro utilizado foi o incluso no Celular utilizado durante a pesquisa. O aparelho é do fabricante ASUS no modelo ZENFONE LIVE A007 e o acelerômetro presente no celular é do fabricante MIRAMEMS e do modelo MIR3DA Accelerometer, com uma resolução de  $0.0095825195 \text{ m/sec}^2$ , um alcance máximo de  $19.613297 \text{ m/s}^2$  e um atraso (*delay*) de 8333 milissegundos. O acelerômetro do Celular, capta em média, 1 amostra a cada 6-9 milissegundos.

O Celular foi disposto em distâncias variadas, alternando também a superfície em que estava colocado, por vez era apoiado diretamente no solo (Figuras 24 e 25) ou em cima do sensor do geofone tipo 02.

**Figura 24 - Celular no solo ao lado do sensor**



Fonte: Autor (2020)

**Figura 25 - Celular em contato direto com o solo**

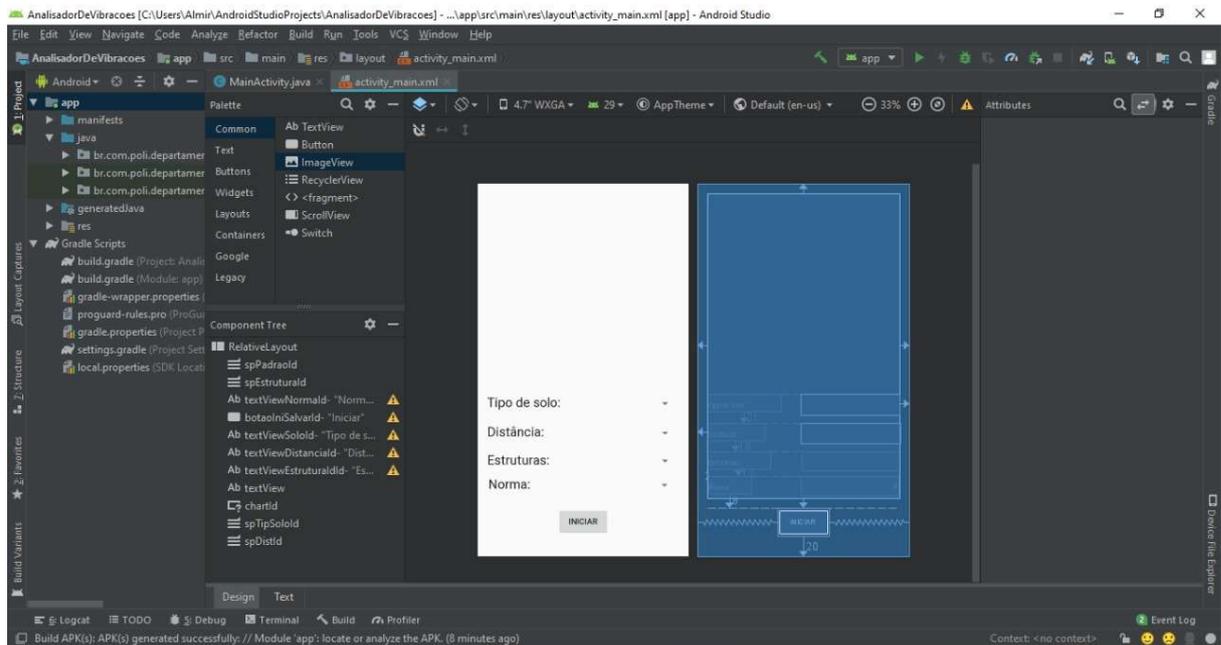


Fonte: Autor (2020)

### 3.3. Desenvolvimento do aplicativo para celular

O aplicativo foi desenvolvido na plataforma Android Studio 3 (Figura 26) para Smartphones com Android 4.3 ou superior.

**Figura 26 – Interface do Android Studio 3**



Fonte: Autor (2020)

De acordo com a Google (2020), O Android Studio é o Ambiente de desenvolvimento integrado (IDE, na sigla em inglês) oficial para o desenvolvimento de apps Android e é baseado no IntelliJ IDEA. A linguagem de programação utilizada foi JAVA, que de acordo com Plácido (2019), dentre as linguagens de Programação Orientadas a Objetos, a mais utilizada é o Java. O mesmo autor a define como uma linguagem de programação de alto nível e propósito geral desenvolvida pela Sun Microsystems. O código do aplicativo desenvolvido pode ser visto na Figura 27.

**Figura 27 – Código do aplicativo para medir vibrações**

```
protected void onCreate(Bundle savedInstanceState) {

    super.onCreate(savedInstanceState);
    setContentView(R.layout.activity_main);
    ...
    //Inicializa o acelerometro, define parametros como
    velocidade do sensor e detecta variação na aceleração
    sensorManager = (SensorManager)
    getSystemService(Context.SENSOR_SERVICE);
    accelerometer =
    sensorManager.getDefaultSensor(Sensor.TYPE_ACCELEROMETER);
    sensorManager.registerListener(this, accelerometer,
    SensorManager.SENSOR_DELAY_NORMAL);
    ...
}

public void onSensorChanged(SensorEvent event) {

    if(iniciar) {
        ...
        //armazena os valores do acelerometro
        sensorX = event.values[0];
        sensorY = event.values[1];
        sensorZ = (float) ((event.values[2] - 9.81));
        ...
        calculaVelocidade((tempoDecorrido - tempoDecorridoAnt),
        sensorXAnt, sensorYAnt, sensorZAnt, sensorX, sensorY, sensorZ);
        ...
    }

    public void calculaVelocidade(float tempo, float xAnt, float yAnt,
    float zAnt, float xAtu, float yAtu, float zAtu){

        //Calcula a velocidade nos eixos x, y e z
        velocidadeX = (xAtu + xAnt) * tempo *500;
        velocidadeY = (yAtu + yAnt) * tempo *500;
        velocidadeZ = (zAtu + zAnt) * tempo *500;
        ...
    }
}
```

Fonte: Autor (2020)

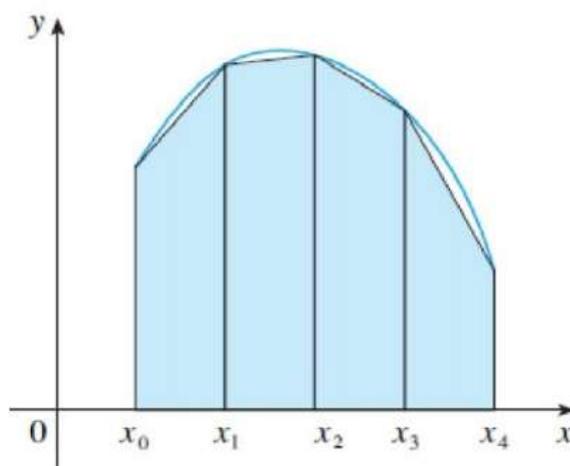
A análise dos níveis de vibração do solo se dá pelo nível da velocidade de deslocamento das partículas, como foi proposto o uso de acelerômetros se faz necessário a transformação da

aceleração em velocidade. Esse tipo de conversão é possível devido a relação existente entre as duas grandezas vetoriais.

Dentre os métodos numéricos de integração, Santos (2017) afirma que a simplicidade da fórmula do método dos Trapézios é um dos fatores que o tornam atrativo para solução de problemas, pois é de fácil aplicação. Além disso, o método dos Trapézios pode ser aplicado a qualquer número de subintervalos  $n$ .

Nesse método, é calculada a área aproximada de dois pontos em uma curva, a exemplo da Figura 23. A estratégia para melhorar a qualidade da aproximação é dividir o intervalo o intervalo de integração em diversos subintervalos menores, aproximando a integral em cada um desses subintervalos pela área dos respectivos trapézios. Como os dados do acelerômetro são próximo, casa de milésimos de segundos, a taxa de erro é baixa, e, a depender do resultado, pode ser desprezível.

**Figura 28 – Integração pela regra dos trapézios**



Fonte: Stewart, 2013

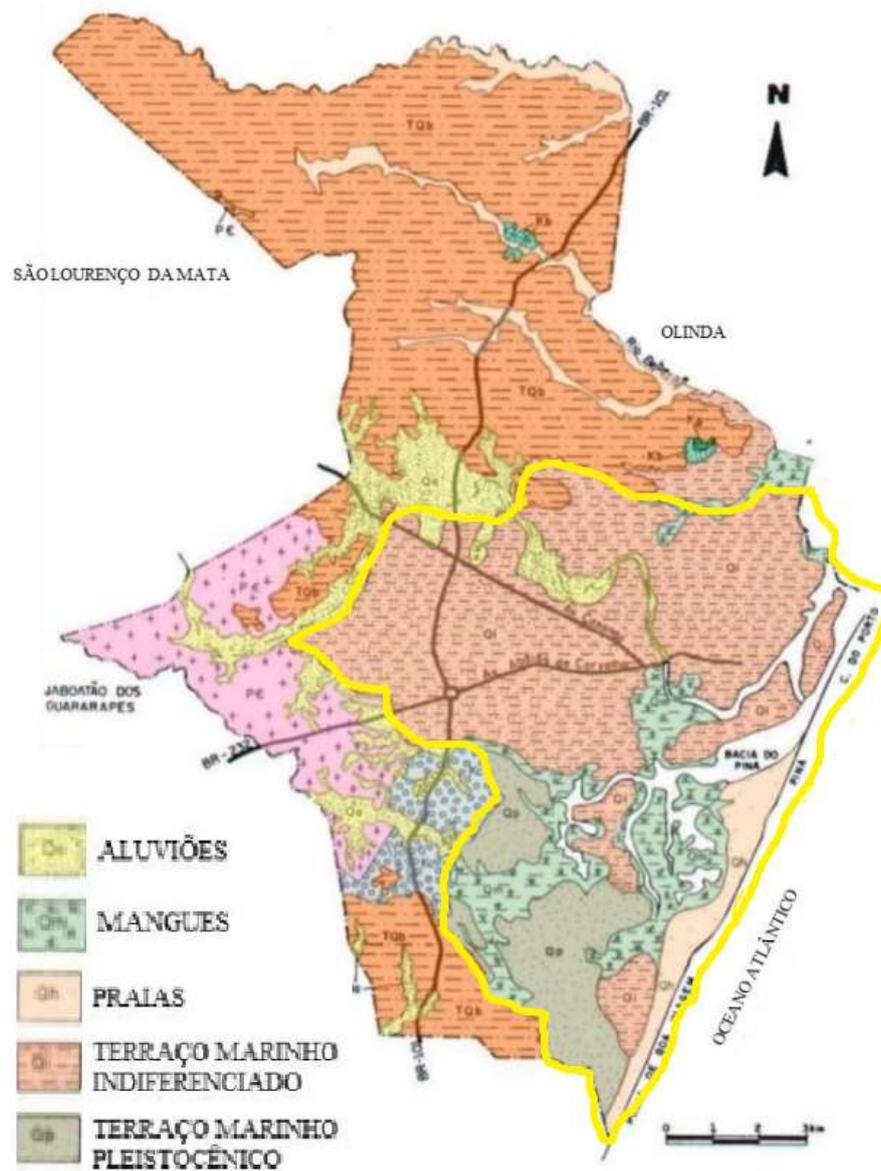
O aplicativo desenvolvido realiza a integração em tempo real, e os dados apresentados no eixo “Y” do gráfico já estão em unidade de mm/s. O aplicativo desenha um gráfico com os valores de velocidade nos 3 eixos e o limite superior e inferior, é ainda mostrado no gráfico a quantidade média de pontos coletados por segundo. Ainda na tela existem também dois spinners (Botões de seleção), que servem para selecionar qual o tipo do solo e a distância que o smartphone está da cravação. Há ainda um botão para iniciar a análise, que, após ser clicado, fica aguardando

por 3 segundos para então começar a gerar o gráfico. É importante alertar que o botão para iniciar só funciona quando os spinners são acionados.

### 3.4. Estudo de casos

As obras selecionadas ficam na planície da cidade de Recife, delimitada em amarela na Figura 29, que é uma representação do mapa geológico do Recife.

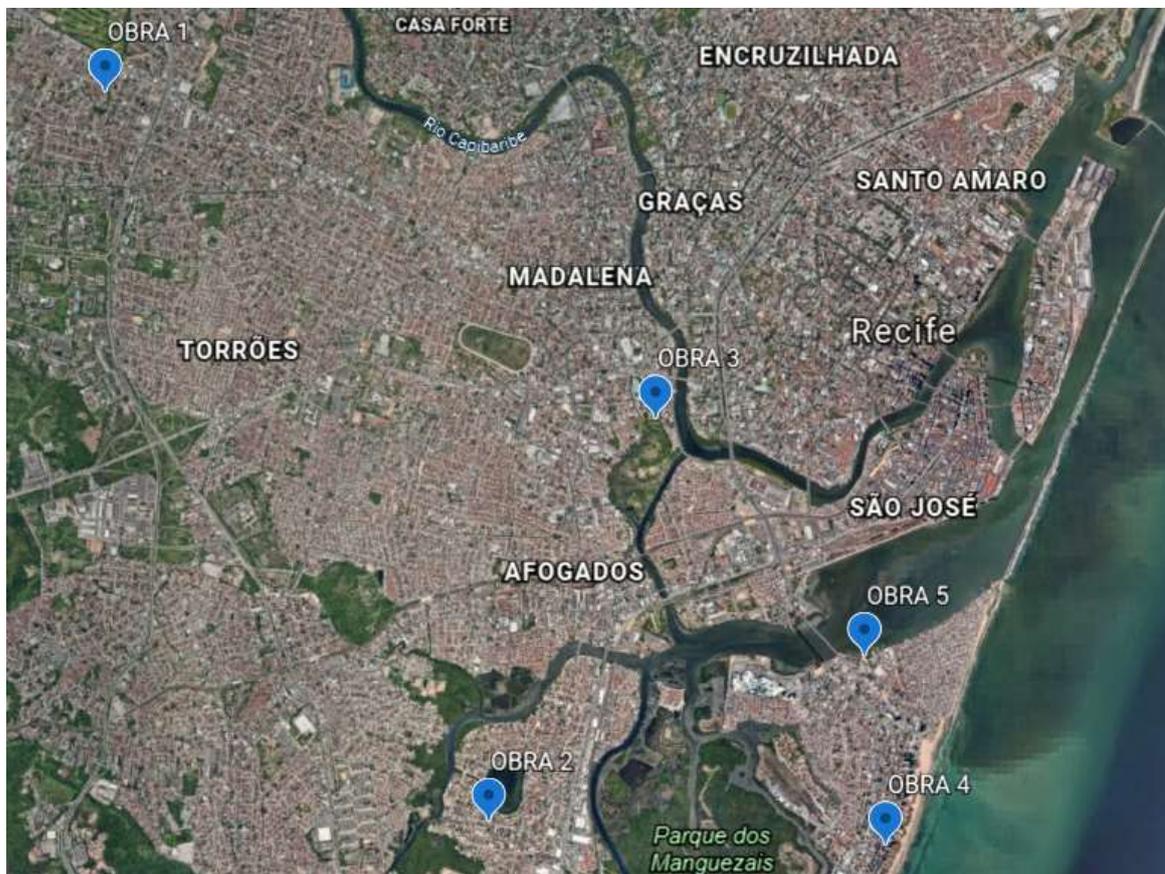
**Figura 29 – Mapa geológico da cidade do Recife**



Fonte: Adaptado Alheiros (1990)

Na Figura 30, é possível localizar no mapa da cidade do Recife onde estão localizadas as 5 obras em estudo.

**Figura 30 – Localização das obras em estudo na cidade do Recife**



Fonte: Google Earth (2020)

### **3.4.1. OBRA 01 – Estaca metálica cravada por vibração**

A obra em estudo sofreu um embargo judicial devido ao tipo de fundação adotada no empreendimento, que era estaca pré-fabricada de concreto, cravada com martelo de impacto. O embargo judicial foi solicitado por conjuntos habitacionais vizinhos, que no passado, já sofreram de problemas estruturais e foram devidamente solucionados. Porém, como as estruturas já tiveram falhas, os moradores temiam que durante a cravação das estacas, novos problemas estruturais se desencadeassem e representassem danos humanos e financeiros aos residentes.

Para solucionar o embargo, a construtora optou por modificar o projeto de fundação inicial, e trocou as estacas pré-fabricadas por estacas metálicas cravadas através de um martelo vibratório, visando reduzir as vibrações geradas pela cravação das estacas.

Além da modificação na solução das fundações, foi solicitado pelo juiz responsável que fossem cravadas estacas metálicas pilotos e que as vibrações geradas fossem medidas utilizando um equipamento competente.

#### *3.4.1.1. Localização*

A localização do empreendimento é na zona oeste do da cidade do Recife, no bairro Várzea. Ao norte do empreendimento, fica a Avenida Caxangá, ao sul a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), ao leste a BR-101 e ao oeste a praça da Várzea.

O bairro da várzea é conhecido por ser uma área com diversos prédios caixões construídos com a técnica de alvenaria resistente, caracterizada pela utilização de alvenaria de vedação com finalidades estruturais. Devido a fragilidade de tais estruturas, diversos edifícios foram condenados pela Defesa Civil.

Analisando a Figura 31, onde está o terreno do empreendimento que terá todas as estacas cravadas entre o período de maio e dezembro de 2018, está dentro do contorno vermelho, é possível localizar ao sul do empreendimento um conjunto composto por sete blocos, onde uma parte deles já sofreu recuperação da estrutura.

**Figura 31 - Situação do terreno que receberá o do estudo de caso 01**



Fonte: Google Maps (2020)

Também é possível notar que na divisa do terreno oposto ao da Avenida General polidoro, as construções vizinhas apresentam características de precariedade em sua execução, como pode ser verificado nas Figuras 32 e 33.

**Figura 32 – Divisa norte da obra com edificações de baixa qualidade coladas ao muro**



Fonte: Autor (2020)

**Figura 33 – Edificação muito precária na divisa norte da obra**

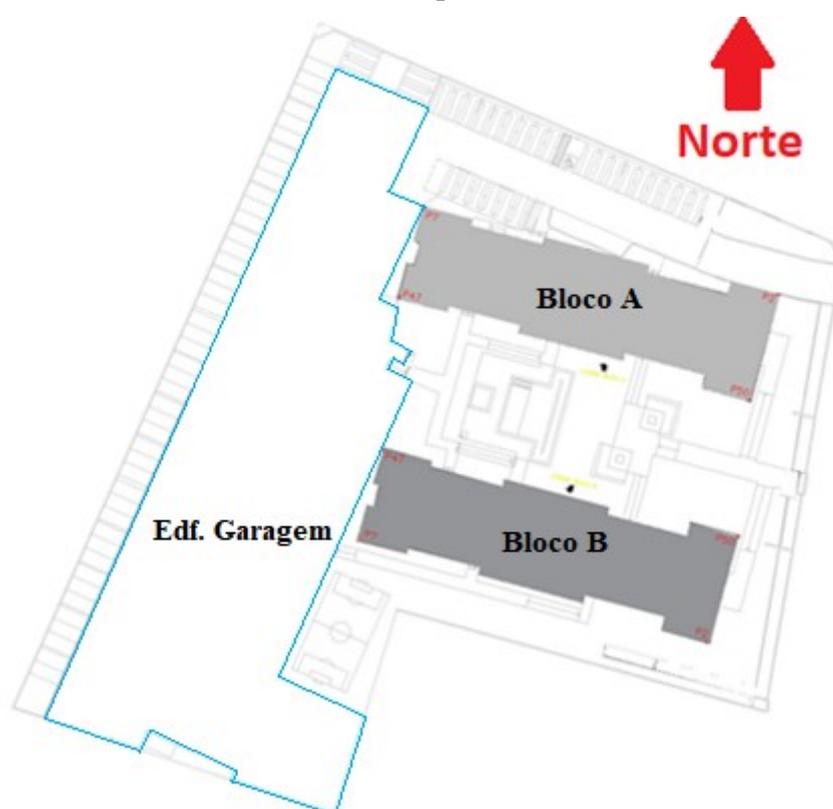


Fonte: Autor (2020)

### 3.4.1.2. Caracterização do empreendimento

A obra em estudo trata-se de um empreendimento residencial composto por duas torres principais, definidos como Bloco “A” e Bloco “B”, além de um edifício garagem. As edificações analisadas são 03 (três) estruturas aporricadas de concreto armado, as torres com 20 (vinte) lajes cada e o edifício garagem com 2 lajes. A disposição de cada edificação no terreno está apresentada na Figura 34, onde as duas torres estão em coloração cinza e o edifício garagem delimitado pela linha azul. Há um total de 36 (trinta e seis) pilares na lâmina de cada torre, e 106 (cento e seis) pilares na periferia (edifício garagem).

**Figura 34 – Locação das 03 estruturas previstas no terreno do estudo de caso 01**



Fonte: Autor (2020)

### 3.4.1.3. Caracterização do solo

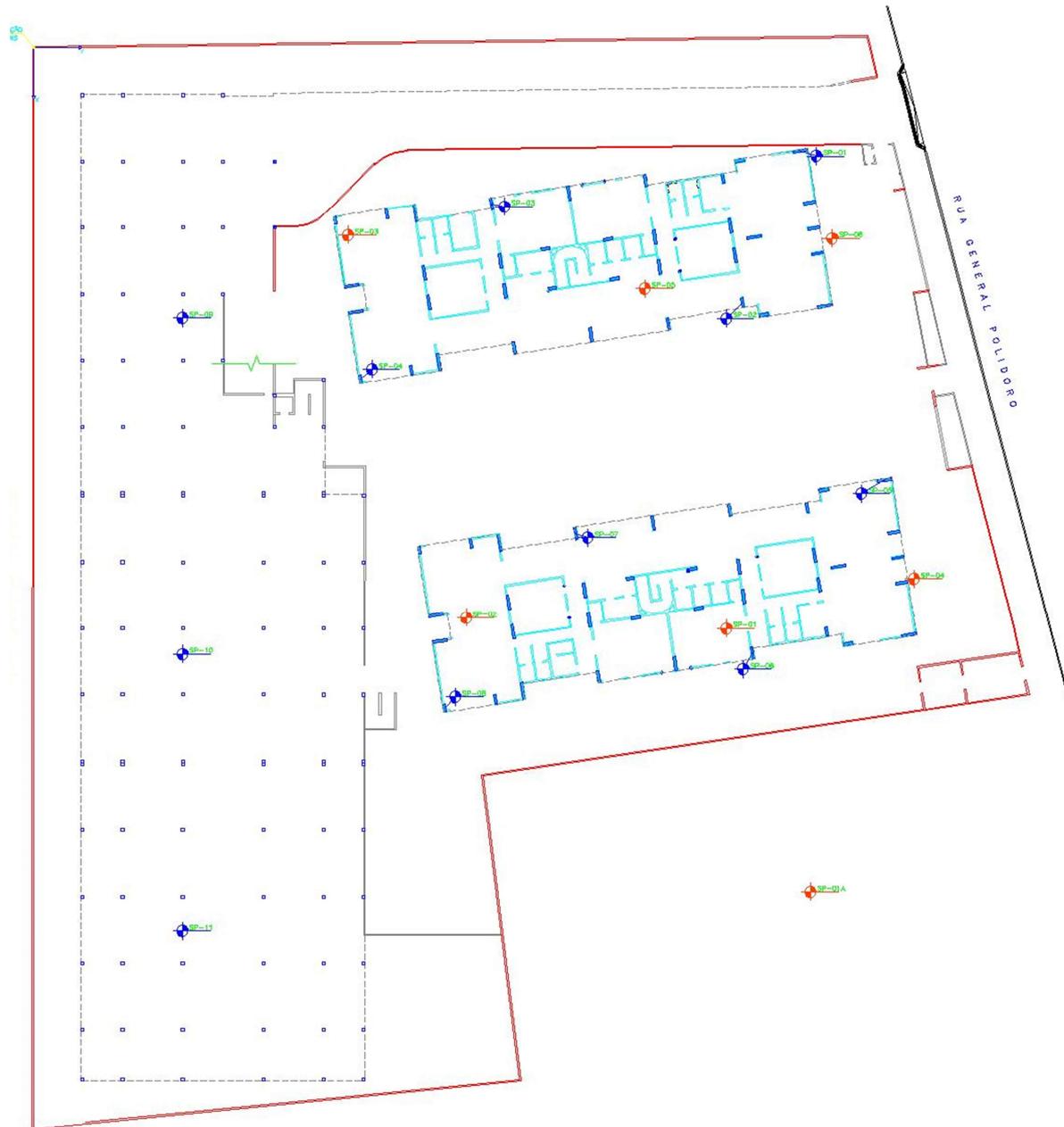
No terreno de implantação da obra foram executados 17 (dezesete) furos de sondagem, realizados por duas empresas diferentes. A primeira empresa que realizou as sondagens às executou em setembro de 2012, sendo 6 furos distribuídos pela lâmina das torres A e B. Já a

segunda empresa, realizou 11 furos de sondagem, entre junho e julho de 2013, ao longo de todo o terreno (Lâminas das torres e edifício garagem).

Inicialmente, encontra-se uma camada de aterro de areia siltosa, fofa, até a cota -0,87; segue uma camada de areia siltosa com matéria orgânica, fofa, intercalada com argila orgânica, mole, até a cota -34,00 para as sondagens SP-03 e SP-05, e até -23,00 para as demais sondagens. Em seguida, para as sondagens SP-01 e SP-04, existe uma camada de argila siltosa, média, até a cota -27,00; e para as sondagens SP-02, SP-05 e SP-06, a camada é composta por areia argilosa, medianamente compacta, até as cotas -27,00, -42,00, e -31,00, respectivamente. E por fim, existe uma camada de areia siltosa, compacta, até o limite das sondagens, variando entre as cotas -34,50 e -44,50.

As sondagens executadas estão apresentadas na Figura 35, onde os pontos vermelhos representam as sondagens realizadas pela primeira empresa, e os pontos azuis os furos feitos pela segunda empresa.

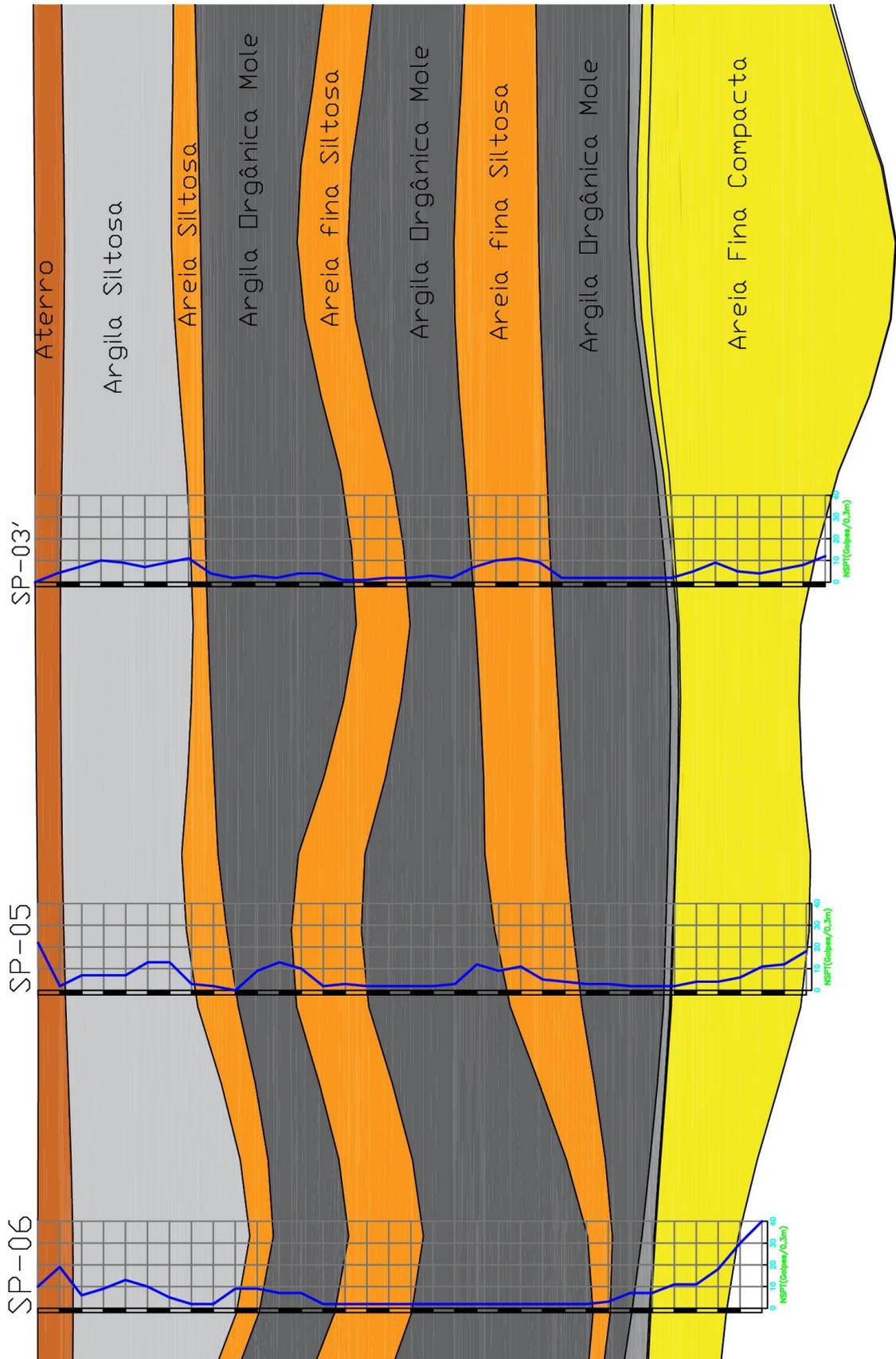
Figura 35 - Planta de Localização das sondagens do estudo de caso 01



Fonte: Autor (2020)

A Figura 36, abaixo, representa o perfil geotécnico do terreno.

Figura 36 - Perfil geotécnico do estudo de caso 01



Fonte: Autor (2020)

#### *3.4.1.4. Tipo de fundação e execução*

Em virtude das características geotécnicas do terreno superficial, e do porte da torre, não se recomenda a adoção de fundações diretas para o projeto, nem mesmo a utilização de técnicas de compactação. Ainda levando em consideração a espessa camada de solo mole, o que leva à necessidade de se atingir grandes comprimentos, recomenda-se uma solução em fundação profunda para a lâmina e periferia.

Dentre as opções avaliadas pelos projetistas, a alternativa de fundação profunda com estacas pré-moldadas de concreto para a torre e periferia foi a que teve melhor desempenho e viabilidade financeira para o empreendimento. Porém, devido as demasiadas perturbações que a cravação por impacto das estacas iria causar na vizinhança, a utilização das estacas de concreto pré-moldada foi descartada.

Visando reduzir as vibrações geradas na execução das fundações, foi adotada a solução em estacas metálicas cravadas por vibração.

### **3.4.2. OBRA 02 – Estaca pré-moldada cravada por impacto**

#### *3.4.2.1. Localização*

A localização do empreendimento é na zona sul da cidade do Recife, no bairro Imbiribeira. Ao norte do empreendimento, fica a Lagoa do Araçá, ao sul e leste existem poucas residências e logo após área de mangue e ao oeste a Rua Arquiteto Luiz Nunes.

O bairro da Imbiribeira é caracterizado por ser uma área com várias residências, prédios caixões construídos com a técnica de alvenaria resistente, inclusive com alguns edifícios condenados pela Defesa Civil. A área também é vista como um bairro de expansão imobiliária para a zona sul do Recife, visto que no bairro de Boa Viagem existem poucas áreas livre para construção. Atualmente existem várias construções de edifícios imobiliários com mais de 5 andares nos arredores da Obra 02.

Analisando a Figura 37, onde o terreno que irá receber o empreendimento está dentro do contorno vermelho, é possível notar que existem diversas casas na área próxima da construção.

Figura 37 - Situação do terreno que receberá o do estudo de caso 02



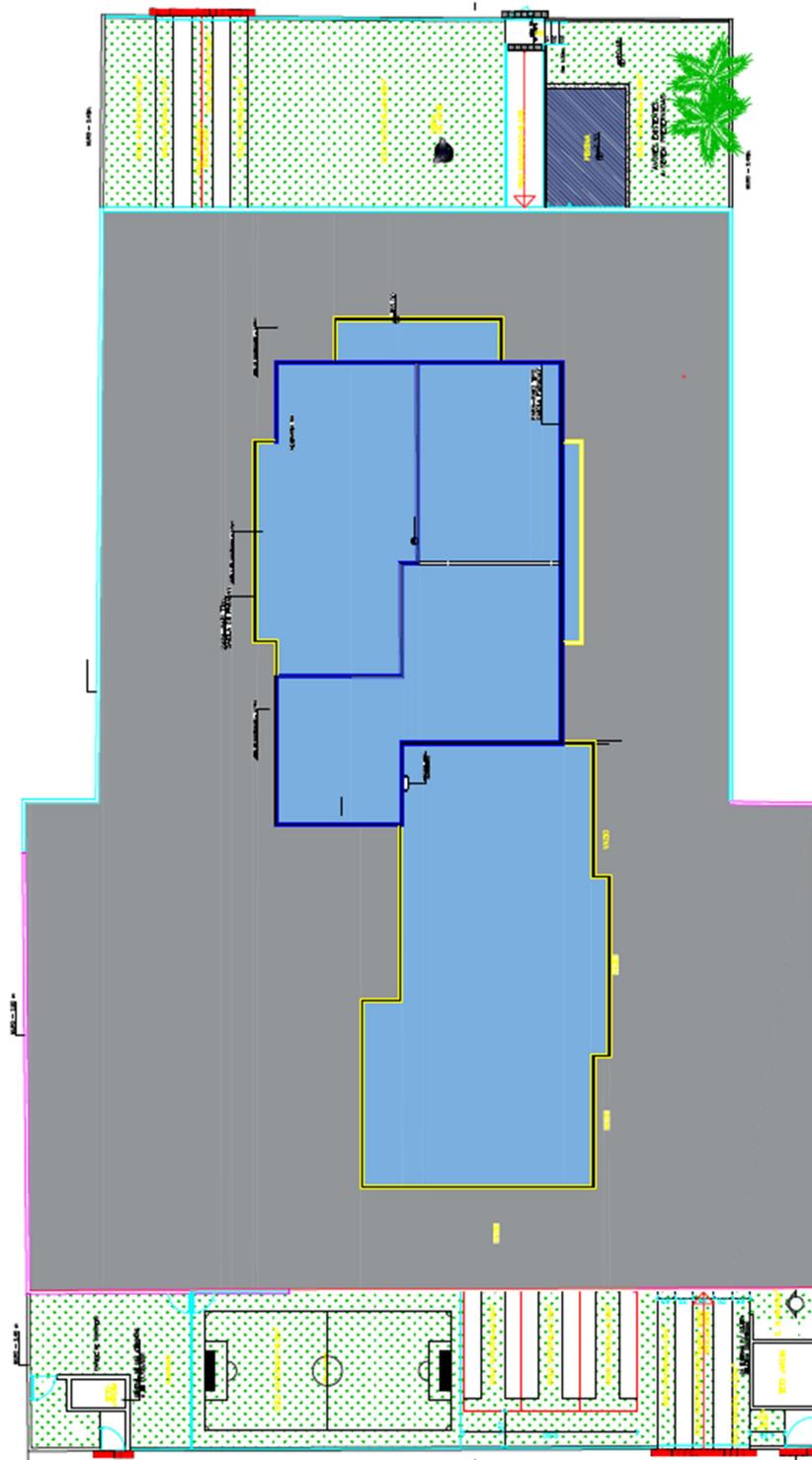
Fonte: Google Maps (2020)

#### 3.4.2.2. Caracterização do empreendimento

A obra em estudo se trata de um empreendimento residencial composto por uma torre de estrutura aporticada de concreto armado com 18 (dezoito) lajes. Há um total de 19 (dezenove) pilares na torre e 34 (trinta e quatro) na periferia. As cargas verticais permanentes na lâmina variam de 1.530 a 6.560 kN e na periferia variam de 100 a 780 kN.

No terreno do edifício, praticamente toda a área estará ocupada entre a lâmina do edifício e o estacionamento. Na Figura 38, é possível ver em azul o que será a lâmina do edifício, em cinza o pavimento elevado e os demais são área de lazer no térreo.

Figura 38 – Locação da estrutura prevista no terreno do estudo de caso 02



Fonte: Autor (2020)

### 3.4.2.3. Caracterização do solo

No terreno de implantação da obra foram executados 4 (quatro) furos de sondagem com profundidades variando entre 38,03 m a 39,62 m, totalizando 156,51 metros de sondagem executados. A cota da boca de furo das sondagens variou entre 0,33 e 0,57 metros.

As sondagens realizadas mostram que o terreno se encontra por volta da cota +0,43. Inicialmente encontra-se uma camada de aterro de areia siltosa com restos de construção, até a cota -0,50; segue uma camada de areia silto-argilosa ou silte areno-argiloso, pouco a medianamente compacta, até as cotas -5,50 e -8,50. Em seguida, existe uma camada de argila siltosa com turfa, muito mole a mole, até as cotas -11,50 e -15,60.

Logo abaixo, existe uma camada de areia siltosa, pouco a medianamente compacta, até a cota -20,50; existe um bolsão nos furos SP-01, SP-02 e SP-03 de argila silto-arenosa ou silte areno-argiloso, muito mole a mole, até a cota -17,00. Em seguida, foi encontrada uma camada de argila siltosa, com turfa e fragmentos de conchas, muito mole, até as cotas -35,00 a -37,00.

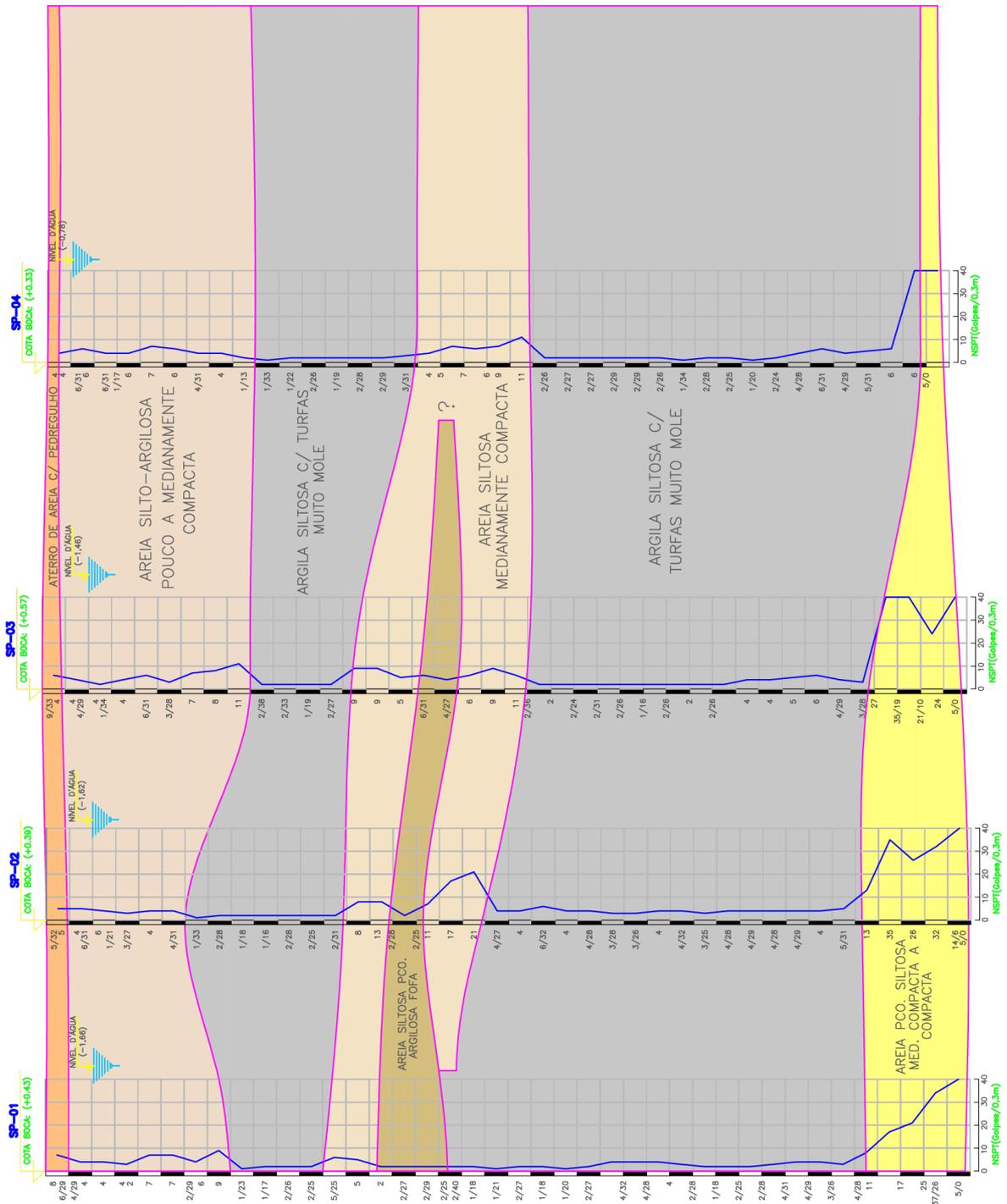
Por fim, existe uma camada de areia com pedregulhos, medianamente compacta a compacta, até o limite das sondagens, até as cotas -38,00 e -39,50.

Foi encontrado nível d'água freático variando entre as cotas -0,78 e -1,66. Encontra-se, na Figura 40, o perfil geotécnico acima descrito.

As sondagens executadas estão apresentadas na Figura 39 pelos pontos laranjas.



Figura 40 - Perfil geotécnico do estudo de caso 02



Fonte: Autor (2020)

### 3.4.2.4. Tipo de fundação e execução

Em virtude das características geotécnicas do terreno superficial, e do porte da torre, não se recomenda a adoção de fundações diretas para o projeto, nem mesmo a utilização de técnicas

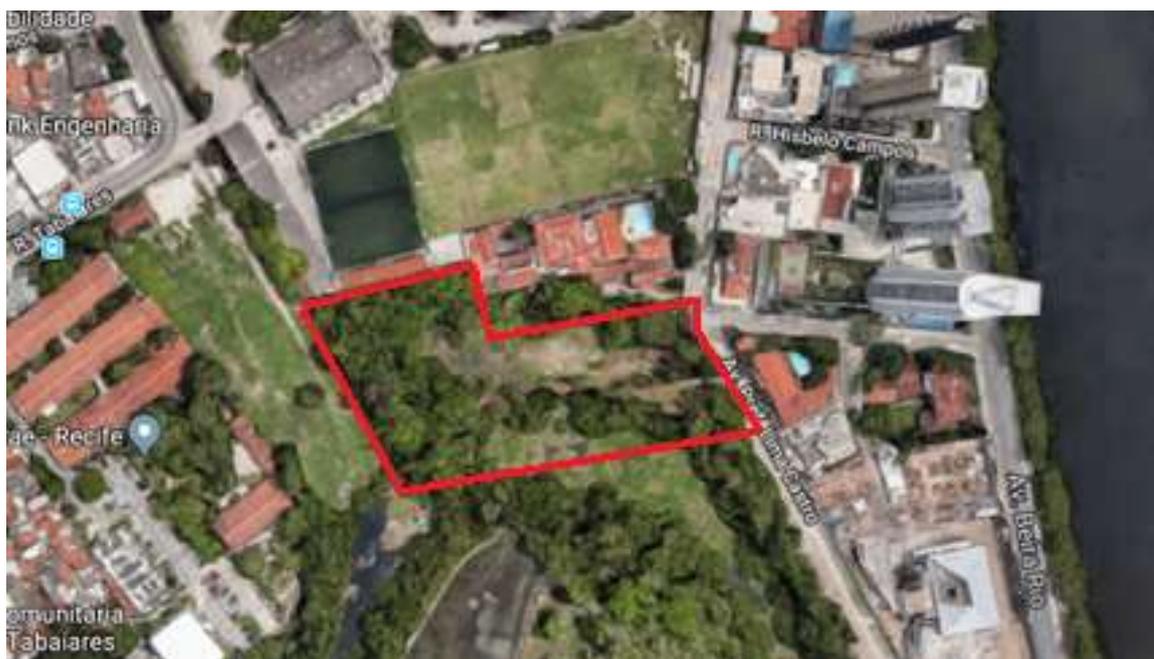
de compactação. Ainda levando em consideração a espessa camada de solo mole, o que leva à necessidade de se atingir grandes comprimentos, recomenda-se uma solução em fundação profunda para a lâmina e periferia. Dentre as opções avaliadas pelos projetistas, a alternativa de fundação profunda com estacas pré-moldadas de concreto para a torre e periferia foi a que melhor se adequou ao empreendimento.

### 3.4.3. *Obra 03 – Estaca metálica cravada por impacto*

#### 3.4.3.1. *Localização*

A localização do empreendimento é na zona norte da cidade do Recife, no bairro da Ilha do Retiro. Ao norte do empreendimento, fica Estádio da Ilha de Retiro, ao sul e leste existem áreas de mangue e o Rio Capibaribe e ao oeste existem várias residências. O bairro da Ilha do Retiro é um bairro predominantemente residencial, com edifícios de alto padrão presentes principalmente na Av. Beira Rio, porém a maioria das residências nos arredores são de casas com primeiro andar (Casa Sobrado). Analisando a Figura 41, onde o terreno que irá receber o empreendimento está dentro do contorno vermelho, é possível notar que existem diversas casas na área próxima da construção.

**Figura 41 - Situação do terreno que receberá o do estudo de caso 03**



Fonte: Google Maps (2019)

### 3.4.3.2. *Caracterização do empreendimento*

A obra em estudo se trata de um empreendimento residencial composto por 02 (duas) estruturas aporticadas de concreto armado com 43 (quarenta e três) lajes cada. Há um total de 22 (vinte e dois) pilares na lâmina de cada estrutura e 81 (oitenta e um) na periferia. As cargas verticais permanentes das lâminas variam de 2.220 a 21.250kN, e na periferia variam de 50 a 1.620kN. No terreno do edifício, praticamente toda a área estará ocupada entre a lâmina do edifício e o estacionamento.

### 3.4.3.3. *Caracterização do solo*

No terreno de implantação da obra foram executados 10 (Dez) furos de sondagem com profundidades variando entre 57,14 m a 60,19 m, totalizando 586,07 metros de sondagem executados. A cota da boca de furo das sondagens variou entre -0,52m e 0,37 metros.

As sondagens realizadas do perfil mostram que o terreno varia entre as cotas +0,20 e -0,38. Inicialmente, encontra-se uma camada de aterro de areia, com restos de construção, variando até as cotas -2,00 a -4,00; segue-se uma camada de argila orgânica, siltosa, muito mole, variando até as cotas -33,00 e -41,00. A camada seguinte é composta por uma areia medianamente compacta a muito compacta, até o limite das sondagens, variando até as cotas -56,00 e -61,00. Nas sondagens SP-05 a SP-09 foi encontrada uma camada de argila orgânica, rija a média, entre as cotas -45,00 e -50,00. O nível d'água encontra-se variando entre as cotas -0,85 e -1,58. A Figura 42 representa o perfil geotécnico do terreno.



#### 3.4.3.4. Tipo de fundação e execução

Visto a composição do terreno com profundas camadas de argila muito mole, a utilização de fundações superficiais é inviável. A presença da camada de argila muito mole também inviabiliza a execução de estacas tipo hélice contínua, devido ao estrangulamento do fuste. Dessa forma, a solução de fundação mais adequada ao empreendimento, é a execução de estacas de perfil metálico com seção variável, cravados através de martelo de impacto.

#### 3.4.4. Obra 04 – Estaca do tipo hélice contínua

##### 3.4.4.1. Localização

A localização do empreendimento é na zona sul da cidade do Recife, no bairro de Boa Viagem. Ao Norte e sul do empreendimento existem edifícios de alto padrão, no Oeste está a Rua Navegantes e a leste está a orla da praia de boa viagem.

Analisando a Figura 43, onde o terreno que irá receber o empreendimento está dentro do contorno vermelho, é possível notar que existem diversas casas na área próxima da construção.

**Figura 43 - Situação do terreno que receberá o do estudo de caso 04**



Fonte: Google Maps (2019)

#### 3.4.4.2. Caracterização do empreendimento

A obra em estudo se trata de um empreendimento residencial composta por 01 (uma) estrutura aporticada de concreto armado com 34 (trinta e quatro) lajes. Há um total de 15 (quinze) pilares na lâmina. As cargas verticais permanentes na lâmina variam de 3.340 a 13.850 kN.

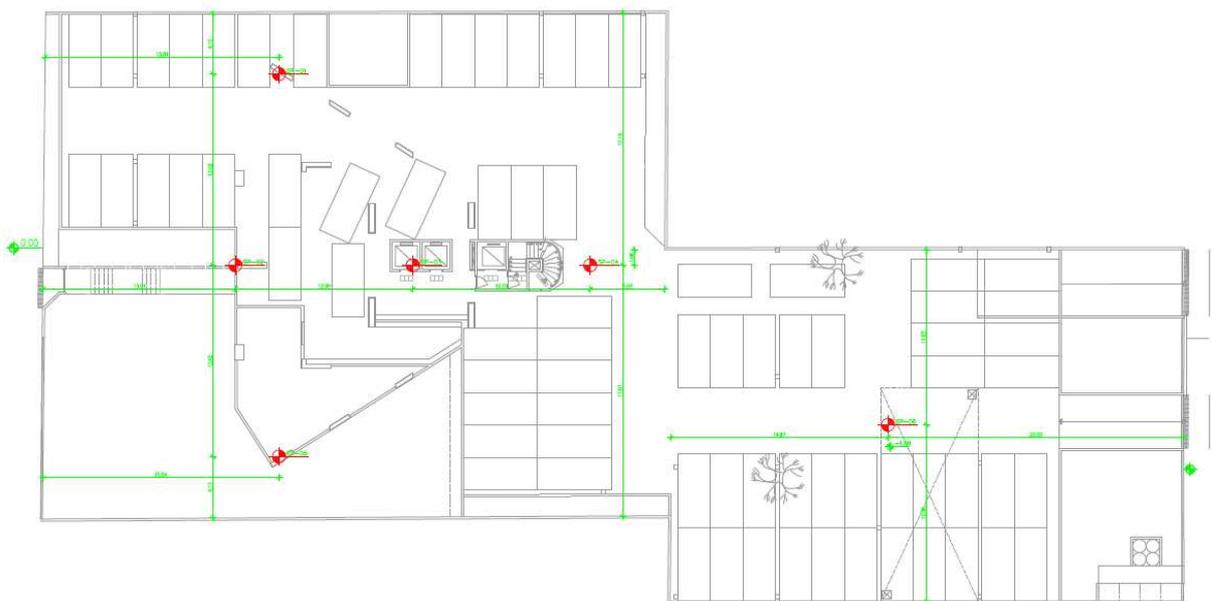
#### 3.4.4.3. Caracterização do solo

No terreno de implantação da obra foram executados 06 (Seis) furos de sondagem com profundidades variando entre 25,02 m a 30,01 m, totalizando 157,08 metros de sondagem executados. A cota da boca de furo das sondagens variou entre -0,52m e 0,37 metros.

As sondagens realizadas mostram que o terreno encontra-se variando entre as cotas -2,40 e -2,27. A camada inicial é composta por um aterro arenoso, até a cota -5,00; segue-se uma camada de silte arenoso, medianamente compacto, até a cota -8,50. Em seguida, até o limite das sondagens existe uma camada de areia fina, medianamente compacta a compacta, variando entre as cotas -28,00 e -32,00. O nível d'água encontra-se variando entre as cotas -3,41 e -3,84.

As sondagens executadas estão apresentadas na Figura 44 pelos pontos azuis e vermelhos.

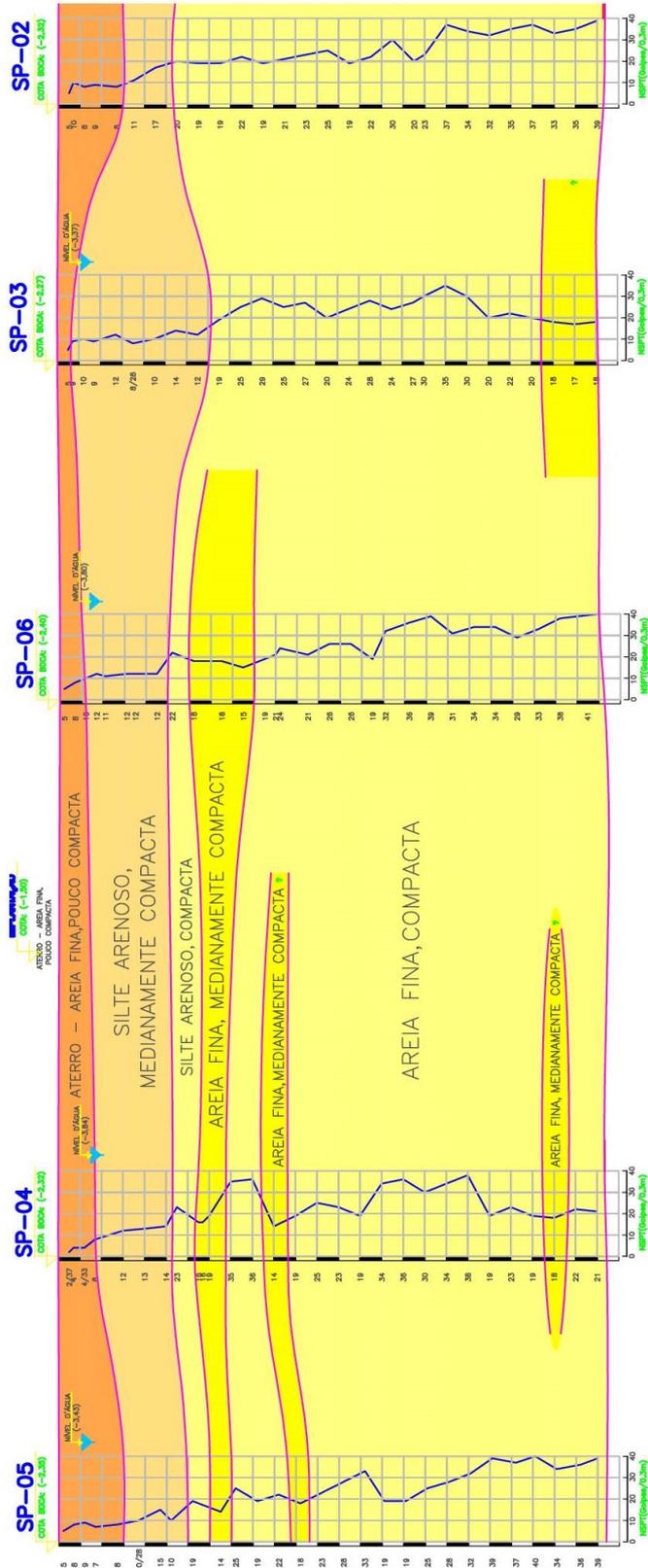
**Figura 44 - Planta de Localização das sondagens do estudo de caso 04**



Fonte: Autor (2020)

A Figura 45, abaixo, representa o perfil geotécnico do terreno.

Figura 45 - Perfil geotécnico do estudo de caso 04



Fonte: Autor (2020)

#### 3.4.4.4. *Tipo de fundação e execução*

No caso em análise, em virtude das características favoráveis de granulometria e compacidade do terreno arenoso superficial, foi estudada inicialmente uma solução em fundação superficial tipo sapatas, associada a uma compactação superficial com estacas de argamassa. Também foi estudada uma solução em fundação profunda com estacas tipo hélice contínua.

Levando em consideração o prazo para finalização da execução das fundações, a solução que apresentou desempenho, viabilidade financeira e adequação ao prazo da obra foram as estacas do tipo hélice, definidas como solução de fundação pelos projetistas.

#### 3.4.5. **OBRA 05 – Estaca de compactação**

##### 3.4.5.1. *Localização*

A localização do empreendimento é na zona sul da cidade do Recife, no bairro do Pina. Ao Norte do empreendimento está o rio Capibaribe, ao sul e oeste existem edifícios comerciais e lojas e Oeste existem galpões. Analisando a Figura 46, onde o terreno que irá receber o empreendimento está dentro do contorno vermelho, é possível notar que o mesmo está margeando o rio Capibaribe e que existem vários galpões nas proximidades.

**Figura 46 - Situação do terreno que receberá o do estudo de caso 05**

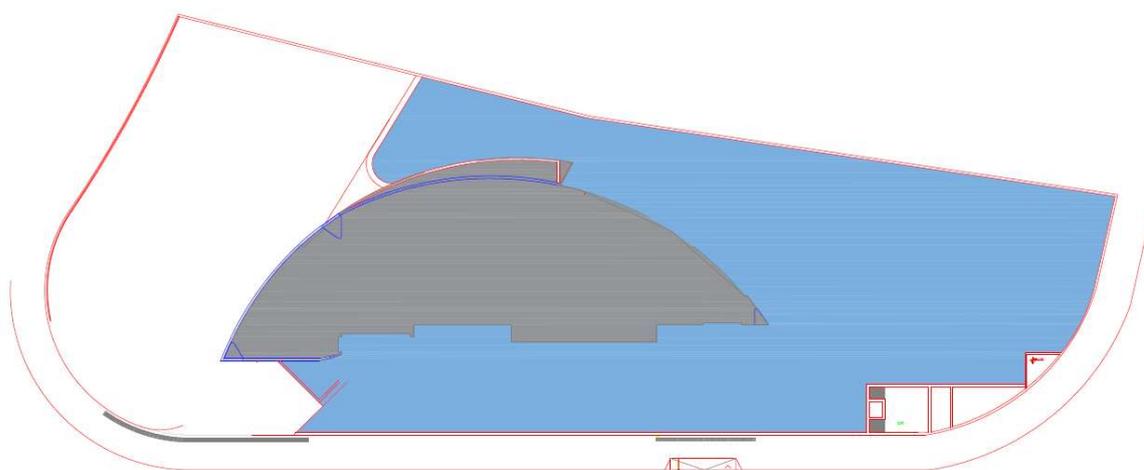


Fonte: Google Maps (2020)

##### 3.4.5.2. *Caracterização do empreendimento*

A obra em estudo se trata de uma estrutura apertada de concreto armado com 25 (vinte e cinco) lajes. Há um total de 10 (dez) pilares na torre e 21 (vinte e um) na periferia. As cargas verticais permanentes na torre variam de 5.660 a 14.560 kN e na periferia de 50 a 1.200 kN. No projeto arquitetônico foi concebido um semienterrado com cota de -1,40m. A Figura 47 apresenta a locação da lâmina do edifício (Em azul), o edifício garagem (Em Cinza) e o terreno descoberto.

**Figura 47 – Locação da estrutura prevista no terreno do estudo de caso 05**



Fonte: Autor (2020)

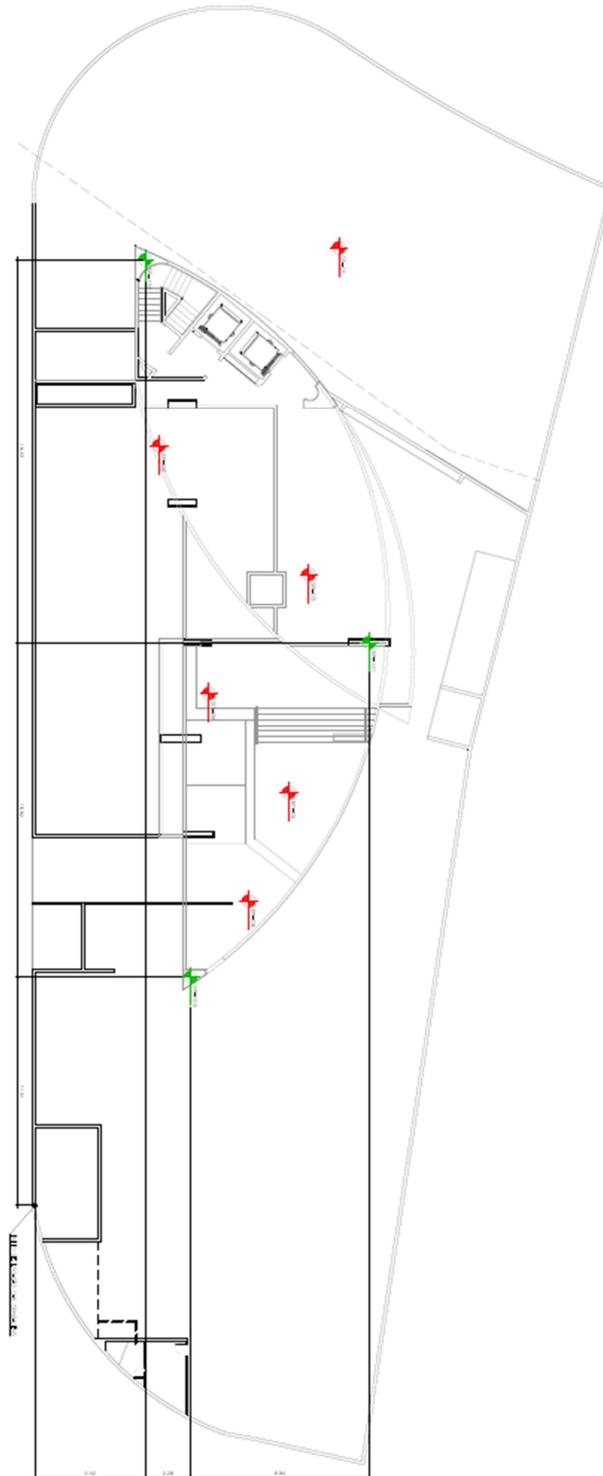
#### 3.4.5.3. Caracterização do solo

No terreno de implantação da obra foram executados 09 (Nove) furos de sondagem com profundidades variando entre 31,70 m a 36,69 m, totalizando 313,86 metros de sondagem executados. A cota da boca de furo das sondagens variou entre -0,07 m e 0,25 metros.

As sondagens realizadas mostram que o terreno encontra-se variando entre as cotas +0,11 e +0,20. Inicialmente, encontra-se uma camada de aterro arenoso, com metralhas, até a cota -0,50; segue-se uma camada de areia, com fragmentos de conchas, pouco a medianamente compacta, até a cota -5,50. A camada seguinte é composta por areia compacta a medianamente compacta, até a cota -19,50. Em seguida, existe uma camada de silte argilo-arenoso, médio, variando até as cotas -21,50 a -24,00. E por fim, foi encontrada uma camada de areia, pouco siltosa, medianamente compacta a compacta, até o limite das sondagens, variando até as cotas

-31,50 e -34,00. O nível d'água freático varia entre as cotas -1,35 a -1,83. As sondagens executadas estão apresentadas na Figura 48 pelos pontos verdes e vermelhos.

**Figura 48 - Planta de Localização das sondagens do estudo de caso 05**



Fonte: Autor (2020)

A Figura 49, abaixo, representa o perfil geotécnico do terreno.



No caso em análise, em virtude das características favoráveis de granulometria e compacidade do terreno arenoso superficial, foi estudada inicialmente uma solução em fundação superficial tipo sapatas, associada a uma compactação superficial com estacas de argamassa. Essa solução tem o objetivo de diminuir o volume de concreto das sapatas, além de uniformizar o desempenho da fundação. A solução consiste no uso de estacas ou colunas de argamassa, que é um tipo de armação do terreno, de modo a transferir as cargas das sapatas para cotas mais profundas, ultrapassando as camadas superficiais.

Este tipo de melhoramento do solo tem sido largamente utilizado na Cidade do Recife, com resultados bastante satisfatórios. A técnica consiste na execução de uma malha de estacas de argamassa debaixo de cada sapata.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Banco de dados com resultados de medições apresentadas na literatura

Para estimar o valor do PPV através das fórmulas apresentadas no item 2.7, 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.

Os resultados de medição de PPV retirado da literatura foram divididas em duas tabelas. A primeira tabela (Tabela 2) exhibe os resultados para estacas cravadas por impacto, onde as legendas para estão ao fim da tabela.

**Tabela 2 - Revisão sistemática dos trabalhos científicos para estacas cravadas por impacto.**

Autor	Ponto	Estaca	Tipo do Martelo	Comp. (m)	Solo	Pilão (ton.)	H <sub>Queda</sub> (m)	Equip. de Medição
Uromeihy (1990)	U1	PM	Hydraulic-hammer (BSP 357)	9	Argila Dura	5	0,8	Geof.
Uromeihy (1990)	U5	EMH	Diesel (BSP5Oc)	32	Argila Arenosa	4	0,8	Geof.
Silva (1996)	S1	Fr	-	27,4	Argila Muito Mole	4	6	Acele.
Silva (1996)	S2	PCA	Martelo Diesel	12	Argila Muito Mole	8	1,25	Acele.
Silva (1996)	S3	PCA	Martelo Diesel	12	Argila Muito Mole	8	1,25	Acele.
Silva (1996)	S4	PCA	Martelo Diesel	12	Argila Muito Mole	8	1,25	Acele.
Silva (1996)	S5	PCA	Martelo Diesel	12	Argila Muito Mole	8	1,25	Acele.
Silva (1996)	S6	PCA	Martelo Diesel	12	Argila Muito Mole	8	1,25	Acele.
Silva (1996)	S7	PCA	Martelo Diesel	12	Argila Muito Mole	8	1,25	Acele.
Fiegel (2008)	F1	RAP	Rammed Aggregate Piers	4,6	Argila Dura	15,6		Geof.
Yong Tan (2012)	YT1	PMC	Martelo Diesel	35	Areia Siltosa	4,6	-	-
Achuhan (2016)	AC1	PMC	-	-	Argila Média	5	3	Geof.

Fonte: Autor (2020)

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.

Já a Tabela 3, exhibe às informações para as estacas cravadas por vibração. Para cada ponto, foram obtidas 2 medições em distâncias diferentes.

**Tabela 3 - Revisão sistemática dos trabalhos científicos para estacas cravadas por vibração.**

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

Fonte: Autor (2020)

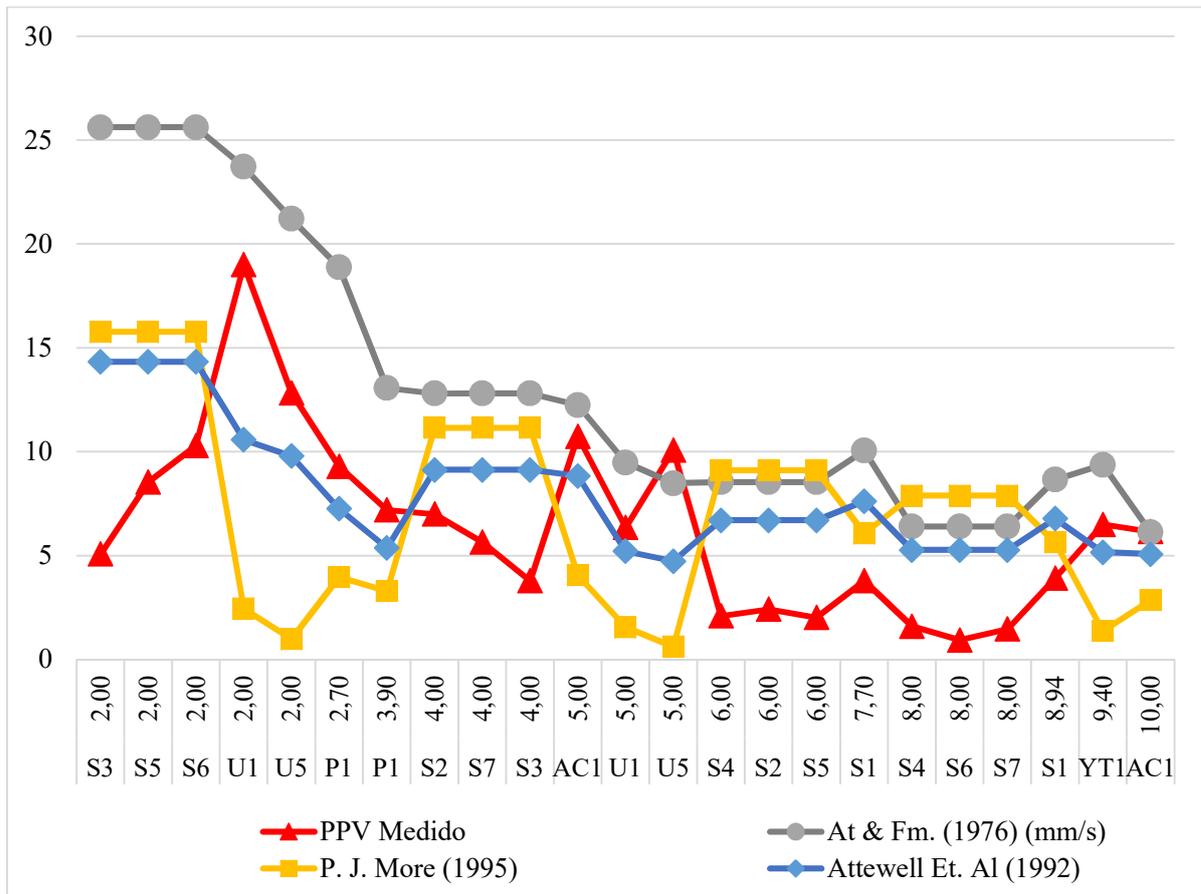
RAP – Estaca de Compactação, Fr=Franki, PCA=Prancha de Concreto Armado, PMC=Pré-moldada em Concreto, PM=Prancha Metálica, TM=Tubos Metálicos, EMH=Estaca Metálica “H”, Geof = Geofone Triaxial, Acel. = Acelerômetro Triaxial e PMH = Pressão Hidráulica Máxima.

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, foram obtidos através dos manuais técnicos da empresa fabricante do equipamento.

Os resultados dos PPV's obtidos pelo cálculo através da formula de Attewell e Farmer (1976), Attewell et al. (1992) e P.J. More (1995) estão apresentadas nas Figuras 50 e 51, de acordo com as cores especificadas na legenda.

Na Figura 50, está exposto a comparação dos resultados, onde no eixo Y está o PPV em escala, e no eixo X, estão as distâncias de cada ponto fora de escala, com a função apenas de comparar os 4 resultados na mesma distância. Abaixo da distância de cada ponto estão os códigos definidos na primeira coluna da Tabela 2 para o autor de cada trabalho.

**Figura 50 - Comparação dos valores do PPV para cravação por impacto**

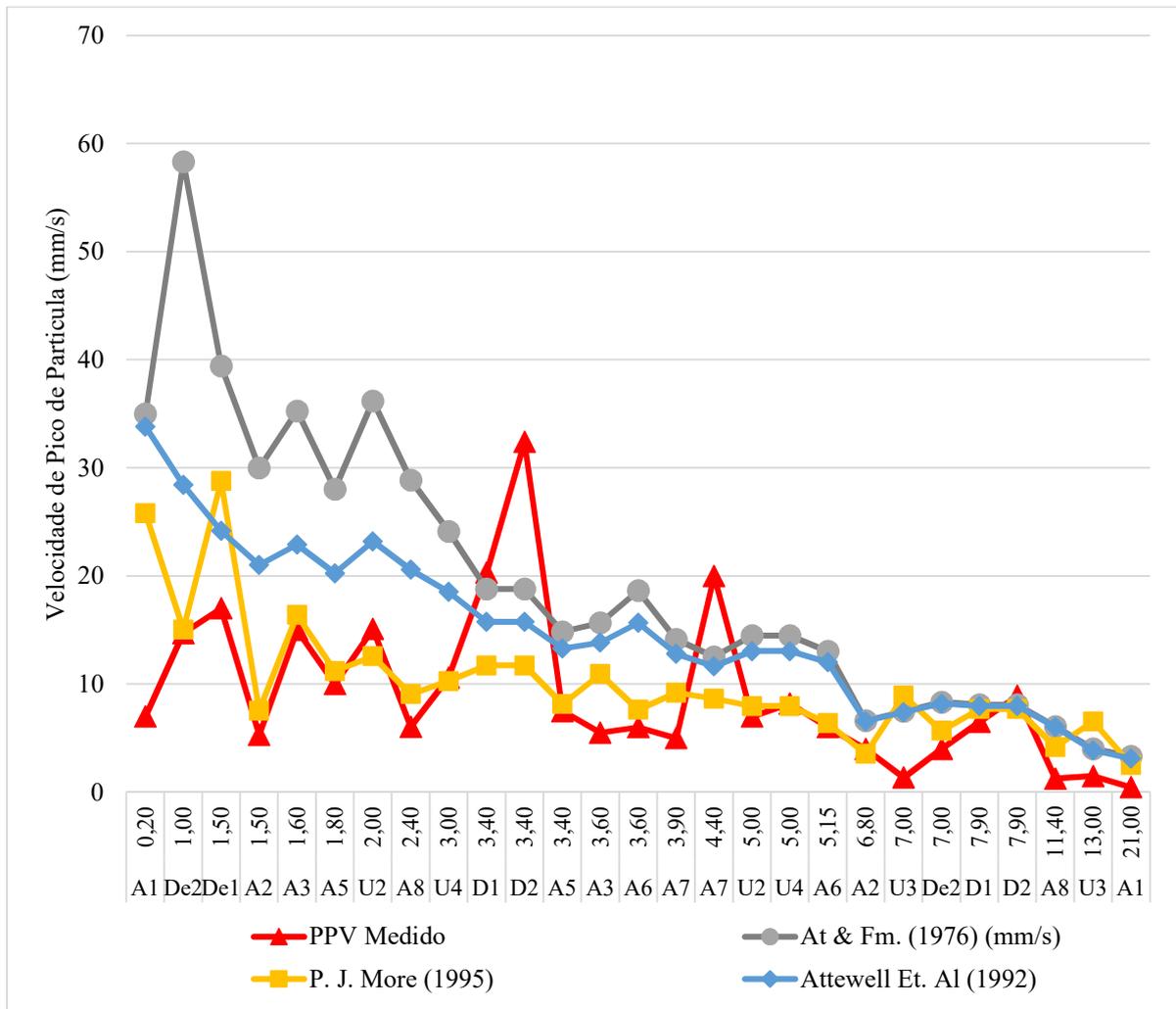


Fonte: Autor (2020)

O PPV medido pelos trabalhos científicos apresentados na Tabela 2, estão representados em vermelho, e analisando a linha que possui uma tendência similar a ela, é notável que a linha dos resultados obtidos através da formula estabelecida por Attewell et al. (1992) 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 formulas de P.J. More (1995) e Attewell et al. (1992).

Para as estacas cravadas através da vibração (Figura 51), fica visível que a linha da fórmula de P.J. More (1995) 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.

**Figura 51 - Comparação dos valores do PPV para cravação por vibração**



Fonte: Autor (2020)

Para uma análise numérica dos resultados, foi calculado o mínimo quadrado do PPV medido e os resultados estimados. Foi usada 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, onde os resultados estão na Tabela 4.

**Tabela 4 - Média e desvio padrão da diferença dos resultados medidos e previstos**

<b>Cravação</b>		<b>At &amp; Fm (1976)</b>	<b>PJ More (1995)</b>	<b>Attewell et al. (1992)</b>
	Média	6,87	6,6	3,84
<b>Impacto</b>	Desvio Padrão	4,92	3,23	2,1
	Coeficiente de Variação	72%	49%	55%
	Média	11,35	4,37	7,98
<b>Vibração</b>	Desvio Padrão	9,9	5,49	5,61
	Coeficiente de Variação	87%	126%	70%

Fonte: Autor (2020)

Para as estacas cravadas por impacto, a que teve o menor coeficiente de variação foi a previsão por P.J. More (1995). Para estacas cravadas por vibração, os resultados mostram que o método apresentado por Attewell et al. (1992) é o que tem menor coeficiente de variação.

#### **4.2. Estudo de caso 01**

Nesse estudo do caso, foi utilizado o geofone do tipo 1 para fazer a medição do PPV. O monitoramento das vibrações foi executado durante a cravação da estaca-teste com os pontos de medições espaçados em intervalos de 5 m (Pontos 1 a 4), sendo o Ponto 5 distante 23 m do limítrofe do terreno da obra com edificação residencial.

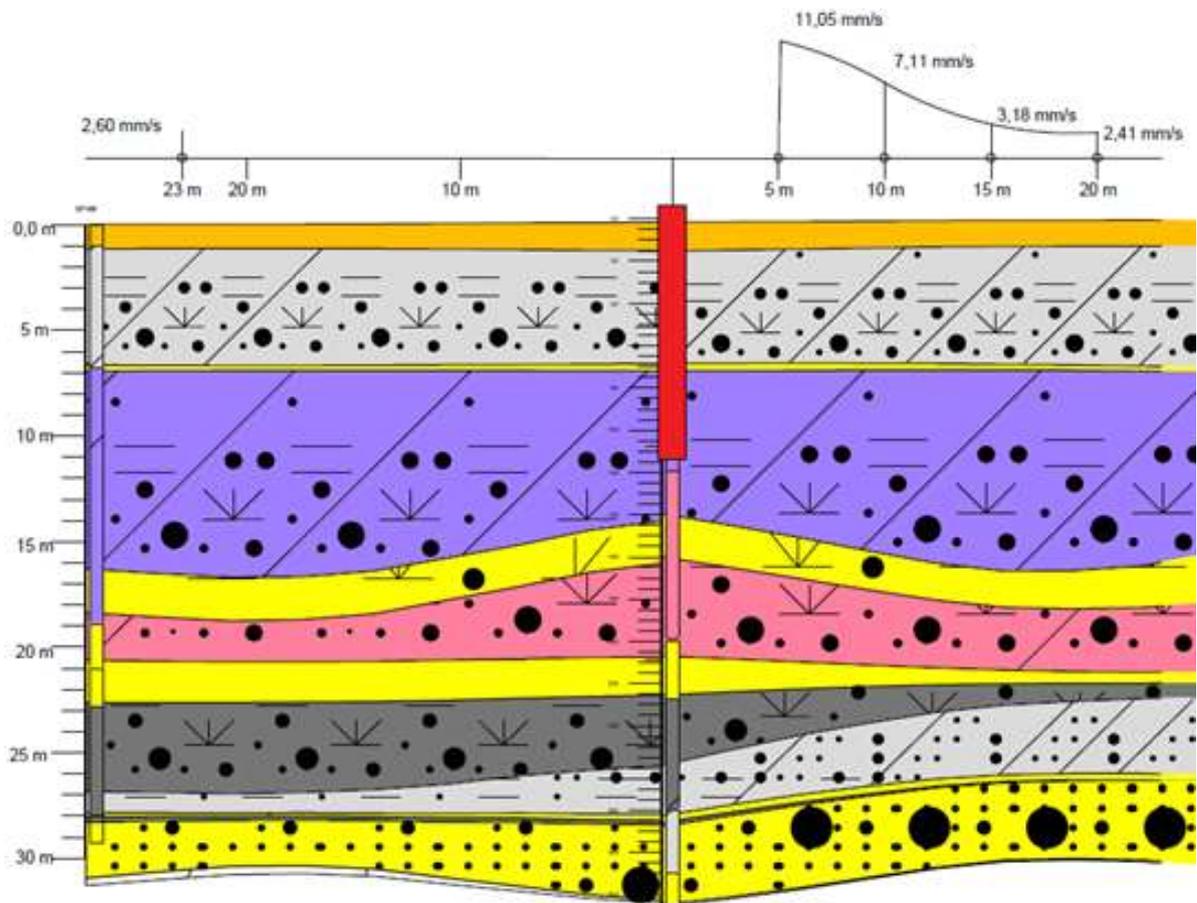
A sequência de cravação da estaca-teste foi resultante das condições operacionais no momento da cravação, gerando um total de 4 eventos por cada ponto de medição, conforme especificado a seguir:

- 1º Evento: 1ª Estaca de 12 m – penetração 12 m;
- 2º Evento: 2ª Estaca de 12 m – penetração 12 m;
- 3º Evento: 3ª Estaca de 6 m – penetração 6 m;

- 4ª Estaca de 12 m – penetração 0,9 m; e

A Figura 52 representa a cravação do primeiro elemento de 12 m (em vermelho) da estaca piloto e os resultados dos geofones P1, P2, P3 e P4 estão do lado direito do elemento, em mm/s.. No lado esquerdo do elemento, está o geofone P5, a 23 m do ponto de cravação.

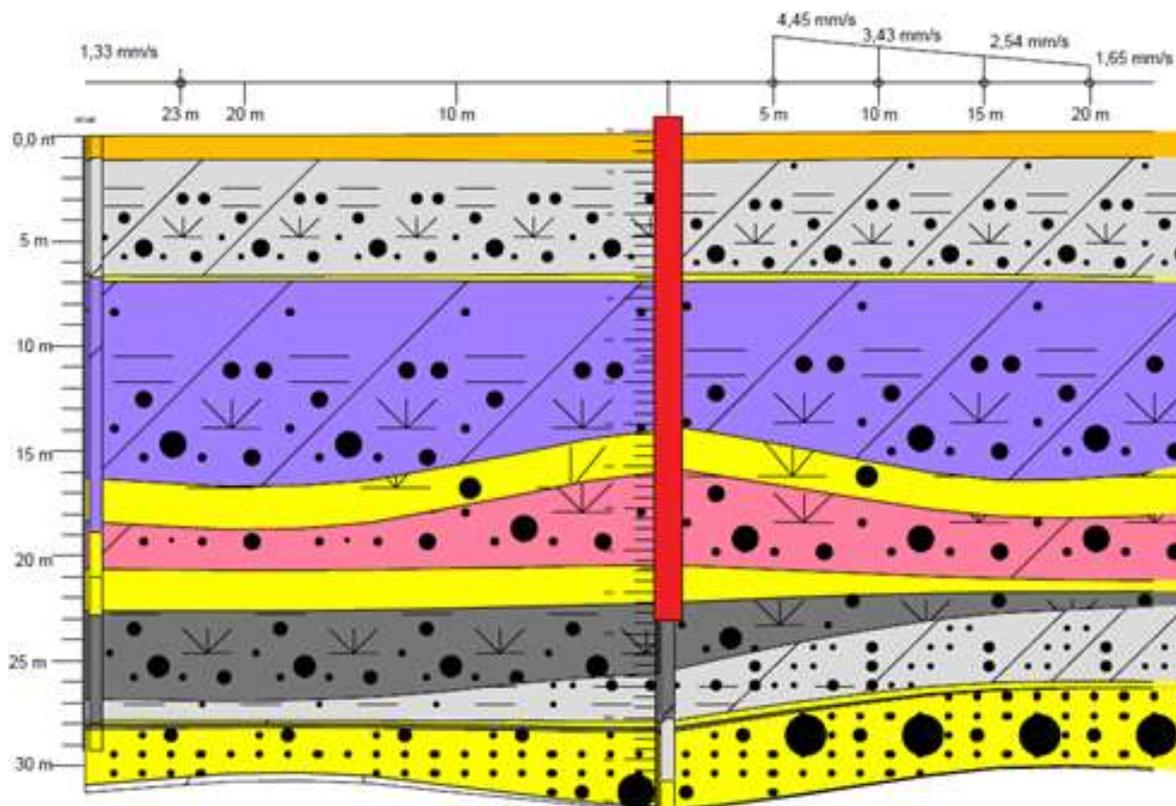
**Figura 52 - Cravação do primeiro elemento metálico da estaca piloto**



Fonte: Autor (2020)

A Figura 53 representa a cravação do segundo elemento da estaca piloto, também com 12 m de comprimento (em vermelho), e alcançando a profundidade de 23,20 m.

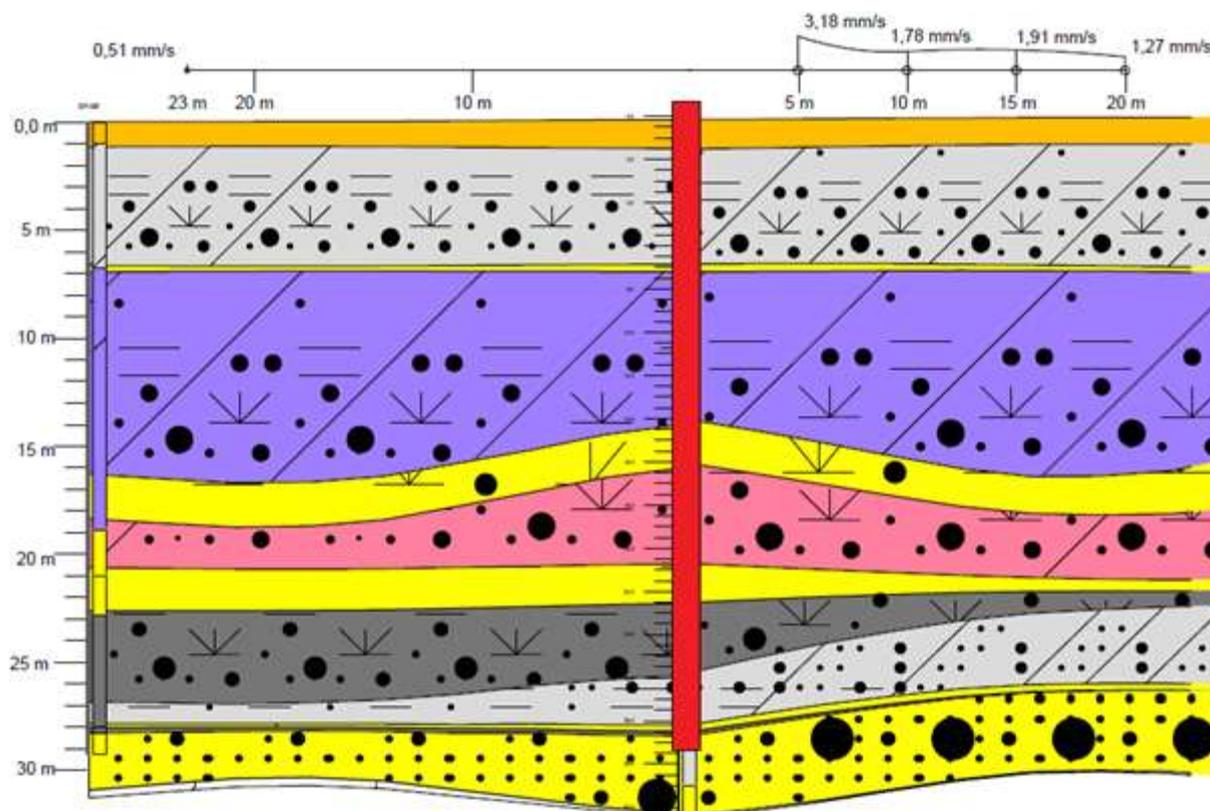
Figura 53 - Cravação do segundo elemento metálico da estaca piloto



Fonte: Autor (2020)

A Figura 54 representa a cravação do terceiro elemento da estaca piloto, com 6 m de comprimento (em vermelho), e alcançando a profundidade de 29,20 m.

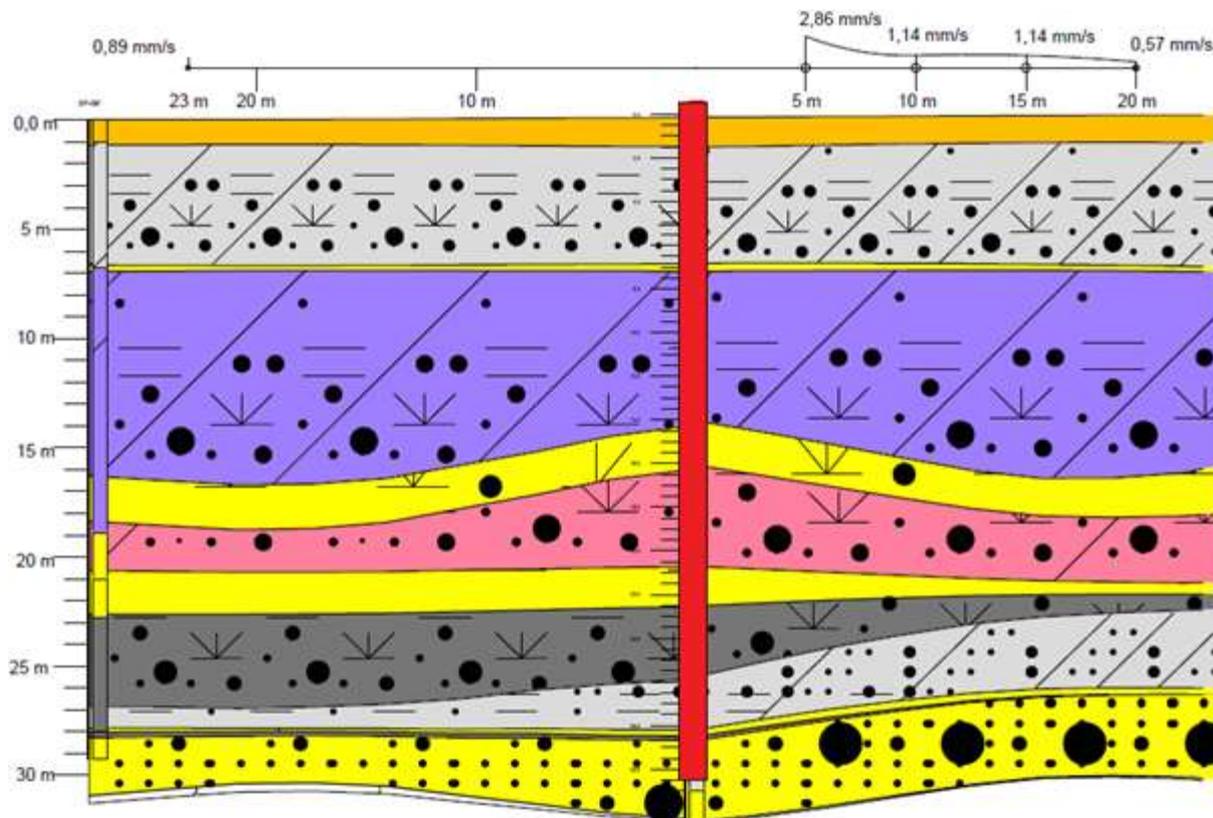
Figura 54 - Cravação do terceiro elemento metálico da estaca piloto



Fonte: Autor (2020)

Por fim, a Figura 55 representa a cravação do quarto, e último elemento da estaca piloto, com apenas 0,9 m de comprimento (em vermelho), e alcançando a profundidade de 30 m.

Figura 55 - Cravação do quarto elemento metálico da estaca piloto



Fonte: Autor (2020)

A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados obtidos no estudo de caso 01.

Tabela 5 - Resultado dos PPV's medidos com o geofone no estudo de caso 01

Obra	Pilar/ Estaca	Elemento	Prof. Inicial (m)	Tipo da estaca	Estaca	PPV (mm/s)				
						D = 5m	D = 10m	D = 15m	D = 20m	D = 23m
Estudo de caso 01	Estaca Piloto	1	0	Metálica	HP 310x79	11,05	7,11	3,18	2,41	2,6
		2	-12	Metálica	HP 310x79	4,45	3,43	2,54	1,65	1,33
		3	-24	Metálica	HP 310x79	3,18	1,78	1,91	1,27	0,51
		4	-30	Metálica	HP 310x79	2,86	1,14	1,14	0,57	0,89

Fonte: Autor (2020)

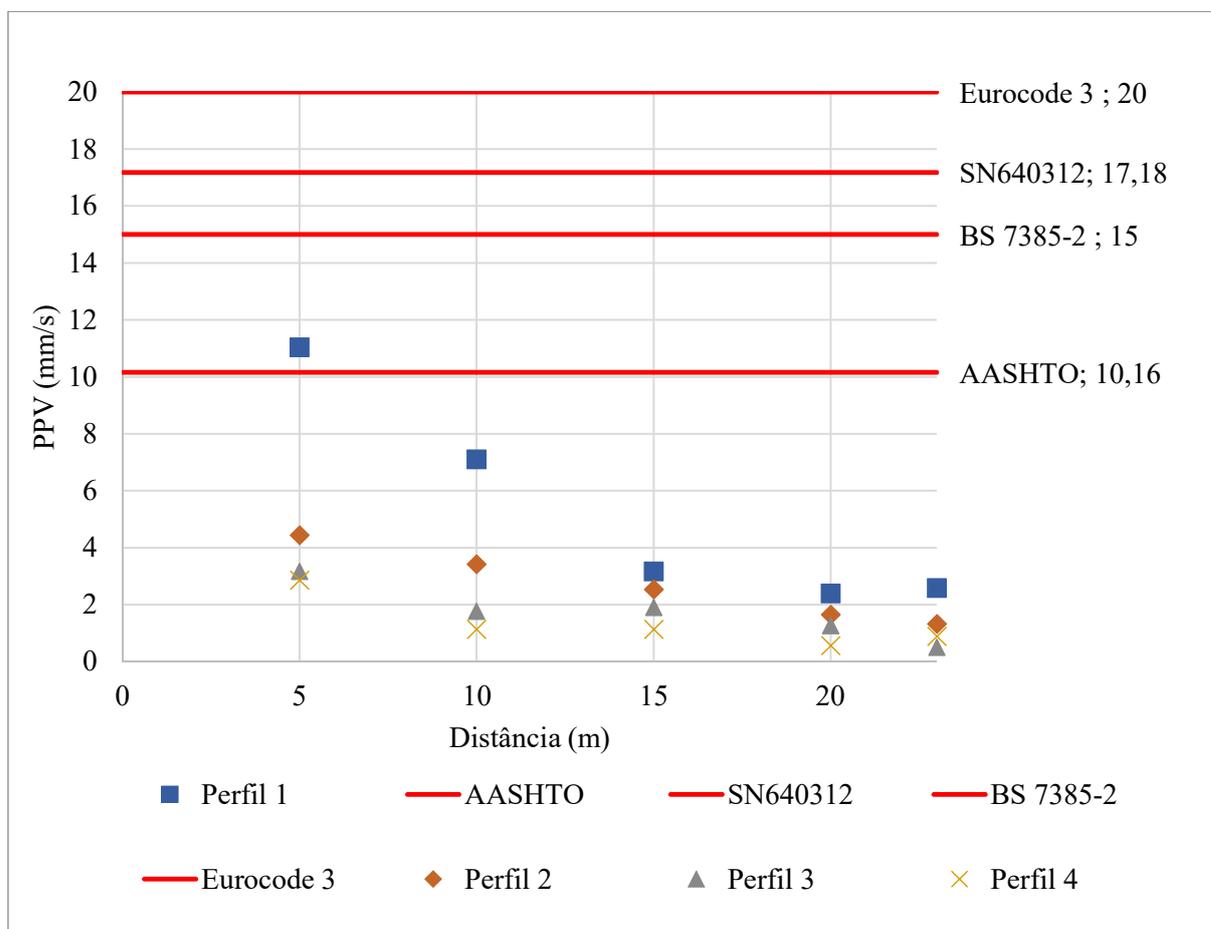
Os resultados apresentados na Tabela 5 mostram que a intensidade da vibração diminui à medida que a distância da fonte de vibração aumenta. O maior registro foi medido a 5 m de

distância, com PPV igual a 11,05 mm/s, no elemento que foi cravado entre 0 m e -12,00 m de profundidade, porém o segundo elemento (-12,00 m até -24,00 m) na mesma distância já apresentou uma redução de mais da metade em relação ao primeiro. A cravação do primeiro elemento foi o que causou perturbações mais intensas, pois mesmo a 10 m de distância, o PPV de 7,11 mm/s pode ser considerado agressivo para edificações de má qualidade.

Em relação a proximidade com a vizinhança, o ponto que fez essa medição foi o a 23 m de distância, onde os resultados ficaram entre 2,6 mm/s e 0,89 mm/s, classificados como inofensivos para a estrutura.

O Gráfico 2 abaixo apresenta os resultados obtidos no estudo de caso 01, comparados com os limites de vibração apresentados nas normas abordadas no desenvolvimento desse trabalho, para uma residência padrão.

**Gráfico 2 – Vibração gerada na cravação de estacas metálicas por vibração do Caso 01**



Fonte: Autor (2020)

Avaliando o Gráfico 2, apenas a cravação do primeiro elemento a 5 m de distância ficou acima do limite permitido pela Norma Americana para edificações em boas condições. Porém, o resultado ainda foi tido como dentro dos limites estabelecidos pelas outras norma aplicadas.

Na avaliação conjunta do PPV com a frequência gerada pelas vibrações no estudo de caso 01, em comparação a recomendação Francesa da AFTES, temos os resultados apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Resultado da frequência medidos com o geofone no estudo de caso 01**

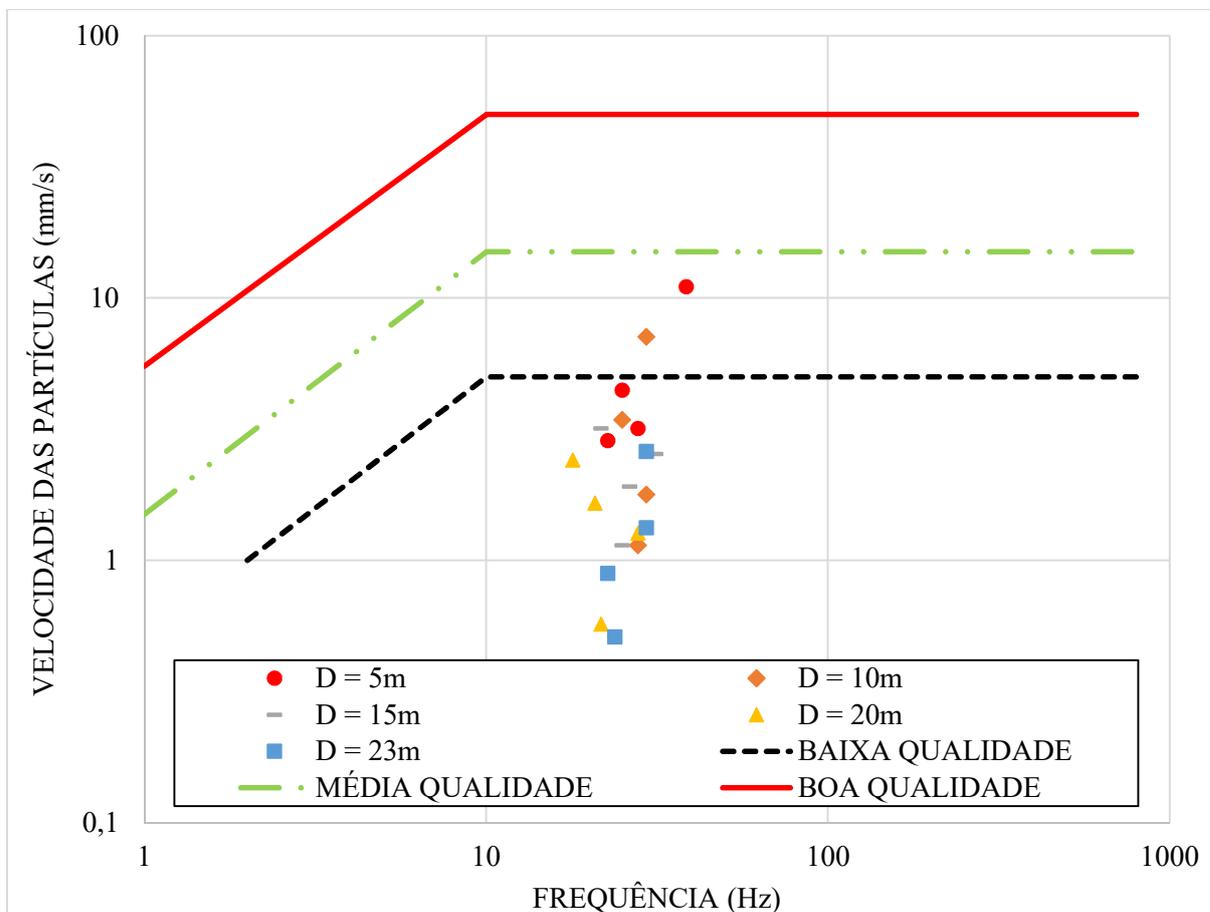
Obra	Pilar/ Estaca	Elemento	Prof. Inicial (m)	Tipo da estaca	Estaca	Frequência (Hz)				
						D = 5m	D = 10m	D = 15m	D = 20m	D = 23m
<b>Estudo de caso 01</b>	<b>Estaca Piloto</b>	1	0	Metálica	HP 310x79	38,5	25	27,8	22,7	16,1
		2	-12	Metálica	HP 310x79	29,4	25	29,4	27,8	23,8
		3	-24	Metálica	HP 310x79	21,7	31,3	26,3	25	19,2
		4	-30	Metálica	HP 310x79	17,9	20,8	27,8	21,7	21,7

Fonte: Autor (2020)

Diferente da tendência de reduzi ao longo da distância e profundidade, a frequência se mostrou mais variável, principalmente na distância de 15 m, onde os resultados de 3 elementos foram maiores do que em distâncias mais próximas do local onde estava se cravando à estaca. A frequência usada pelo martelo vibratório para cravação das estacas foi de 40 Hz, dessa forma, todos os resultados ficaram abaixo da frequência fonte da vibração, não evidenciando ressonância.

Os resultados da avaliação conjunta do PPV com a frequência gerada pelas vibrações no estudo de caso 01, em comparação a recomendação Francesa da AFTES, pode ser verificado no Gráfico 3.

**Gráfico 3 – Verificação do PPV e Frequência na Obra 1 em relação aos limites da recomendação AFTES (1974)**



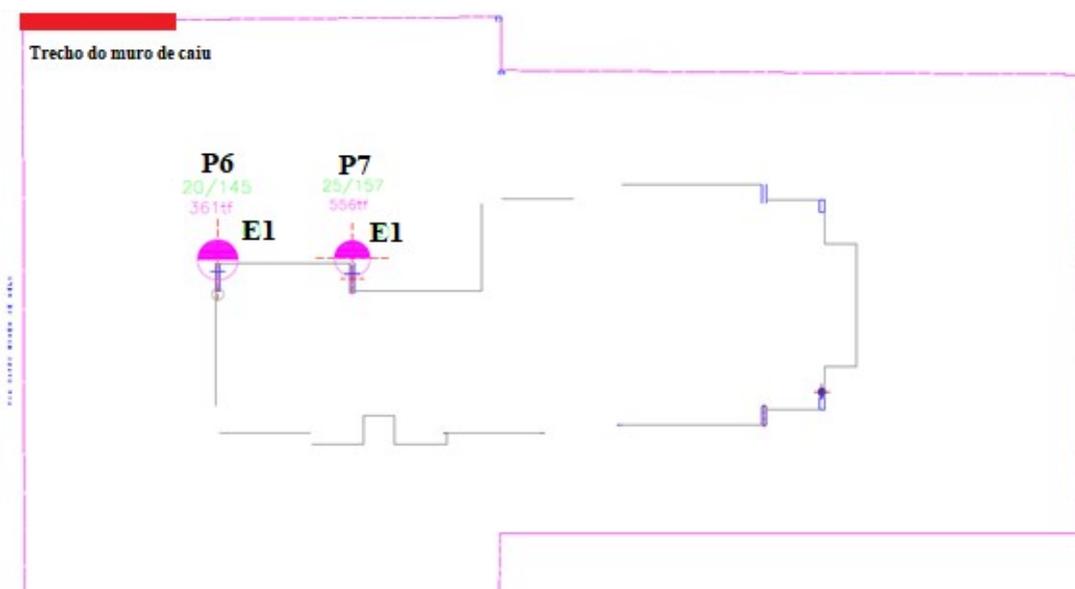
Fonte: Autor (2020)

Na avaliação dos resultados do Gráfico 3, a frequência não influenciou consideravelmente na intensidade das vibrações, visto que nenhuma medição ficou abaixo de 10 Hz. Dos 20 eventos medidos, apenas 2 pontos a 5 m e 10 m ficaram acima do permitido para construções de baixa qualidade.

### 4.3. Estudo de caso 02

No estudo de caso 2, foram medidas as vibrações geradas na cravação de 2 estacas pré-moldadas de 600 mm de diâmetro, sendo elas denominadas: P6E1 e P7E1 (Figura 56). A cravação foi feita com um martelo hidráulico de impacto, com a referência FR-16, o qual possui um pilão de 7.000kg e a altura de queda foi em média 0,50m.

**Figura 56 – Locação das estacas que foram medidas no estudo de caso 02**



Fonte: Autor (2020)

Na estaca P6E1, os sensores foram colocados a 2 m e 5 m de distância da estaca (Figura 57) e foram medidas as vibrações dos perfis:

- Elemento 2 - 12 m de comprimento e cravado da profundidade -12m até os -24 m e;
- Elemento 3 – 12 m de comprimento e cravado da profundidade -24 m os -36 m.

**Figura 57 –Disposição do sensores na estaca P6E1**



Fonte: Autor (2020)

Os resultados obtidos foram tratados e processados pelo GeoDAS e geradas imagens dos gráficos com o PPV no eixo vertical (Eixo “Y”) e o tempo no eixo horizontal (Eixo “X”).

Na estaca P7E1, os sensores também foram colocados a 2 m e 5 m de distância da estaca e foram medidas as vibrações dos perfis:

- Elemento 2 - 12 m de comprimento e cravado da profundidade -12m até os -24 m;
- Elemento 3 – 12 m de comprimento e cravado da profundidade -24 m os -36 m e;
- Elemento 4 – 12 m de comprimento e cravado da profundidade -36 até -38,50 m.

Durante a cravação da estaca P6E1, as vibrações geradas levaram a ruína de parte de um muro de divisa do terreno (Figura 58), onde um trecho de aproximadamente 5 m tombou no momento da cravação do primeiro elemento da estacas. Nas Figuras 58 e 59 é possível ver o antes e depois de como ficou o muro

**Figura 58 – Parte do muro antes da queda**



Fonte: Autor (2020)

**Figura 59 – Trecho do muro após a ruína parcial**



Fonte: Autor (2020)

Na avaliação do trecho que ruiu, é notável que o muro não tinha uma amarração correta e que sua condição era de baixa qualidade (Figura 60)

**Figura 60 – Pilar do muro em péssima qualidade**



Fonte: Autor (2020)

A Tabela 7 apresenta o resumo dos resultados obtidos nas medições do PPV e da frequência com o geofone no estudo de caso 02.

**Tabela 7 – Resultado dos PPV’s medidos com o geofone no estudo de caso 02**

Obra	Pilar/ Estaca	Elem.	Prof. Inicial (m)	Tipo da estaca	Estaca	Dist. 1 (m)	PPV 1 (mm/s)	Freq. (Hz)	Dist. 2 (m)	PPV 2 (mm/s)	Freq. (Hz)
<b>Estudo de caso 02</b>	<b>P6E1</b>	2	-12	Pré- moldada	600mm	2	16,49	32,2	5	11,46	12
		3	-36	Pré- moldada	600mm	2	15,68	26,5	5	12,1	13,5
	<b>P7E1</b>	2	-12	Pré- moldada	600mm	2	14,29	28,6	5	10,08	14,7
		3	-36	Pré- moldada	600mm	2	14,25	33,4	5	8,62	16,1
		4	-38,5	Pré- moldada	600mm	2	11,66	35,8	5	6,53	19,1

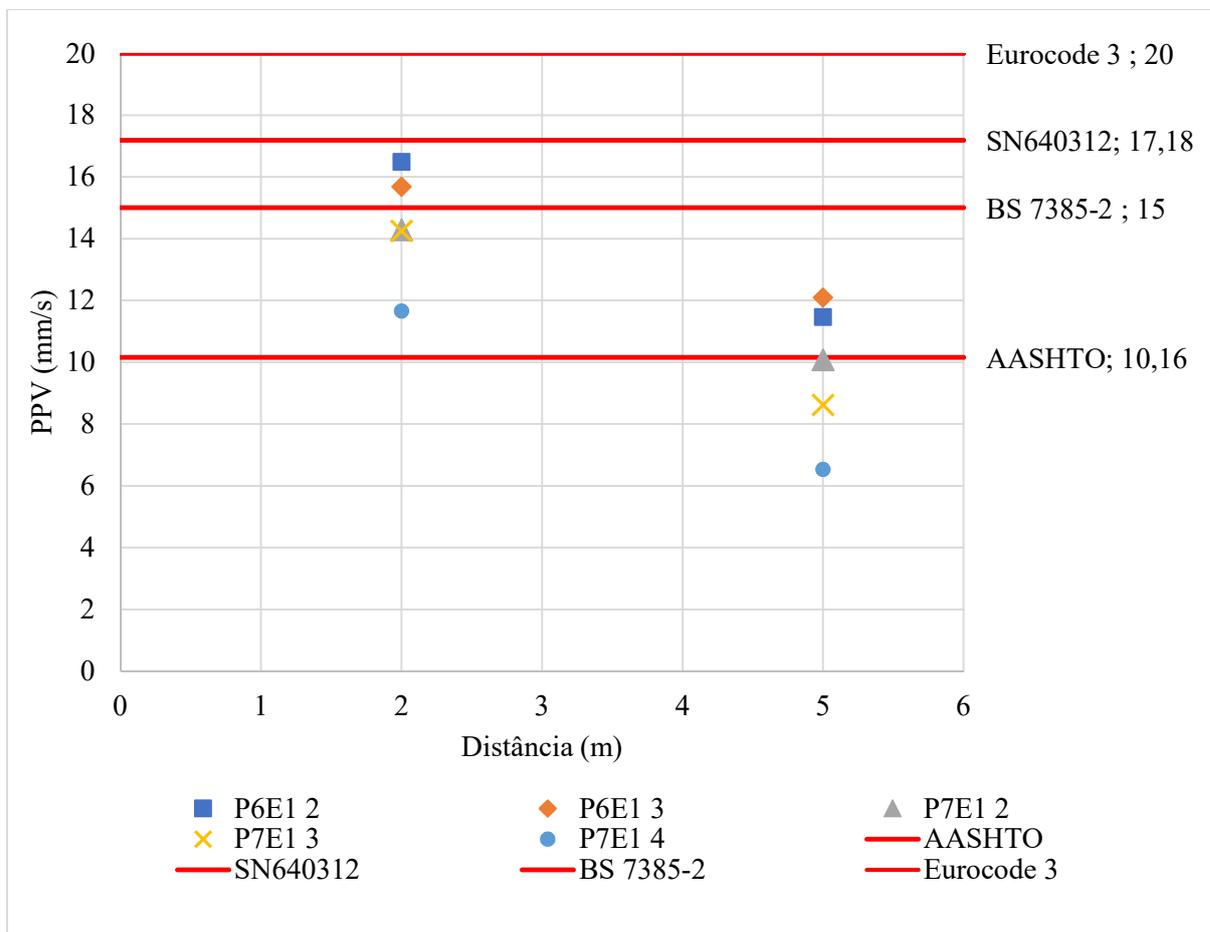
Fonte: Autor (2020)

Os resultados do PPV foram consideravelmente altos a 2 m de distância, porém aos 5 metros ocorre uma redução da intensidade da velocidade de pico da onda. A profundidade em que os elementos se encontram também reduz a medida que o elemento se afasta da superfície, porém a redução não é expressiva e fica na média de menos 0,09 mm/s a cada metro que a estaca penetra no terreno. Tais resultados altos justificam a queda do muro, visto que a qualidade do mesmo era bastante baixa.

A redução da frequência com a distância é expressiva, o que não representa uma característica favorável, visto que frequências baixas podem levar edificações a entrarem em ressonância, caso ela tenha uma vibração natural na mesma intensidade.

O Gráfico 4 abaixo apresenta os resultados obtidos no estudo de caso 02, comparados com os limites de vibração apresentados nas normas abordadas no desenvolvimento desse trabalho, para uma residência padrão.

**Gráfico 4 – Vibração gerada na cravação por impacto de estacas pré-moldadas de concreto no Caso 02**



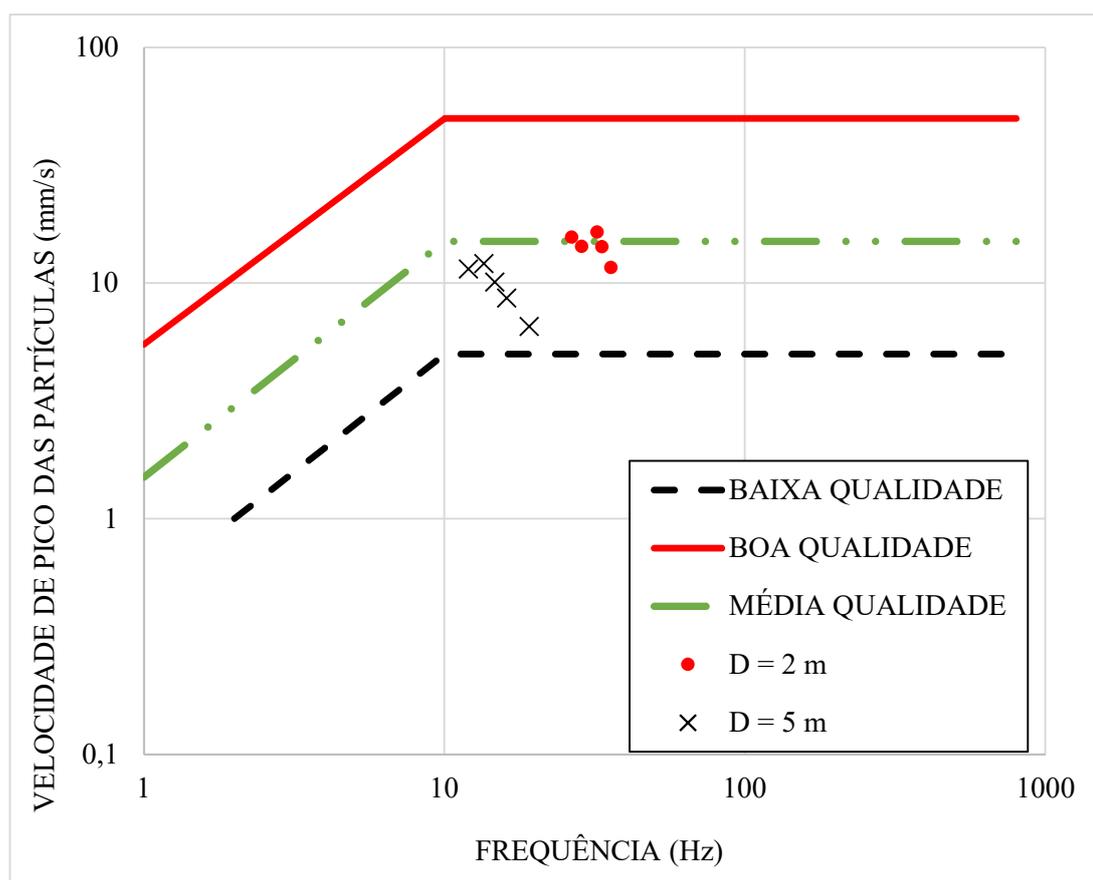
Fonte: Autor (2020)

Avaliando o Gráfico 4, é notável que todos os resultados do PPV a 2 m de distância ficaram acima do limite estipulado pela norma americana, agravado ainda pelos resultados do segundo e terceiro elementos da estaca P6E1, a qual também ficaram acima do limite da norma Britânica BS7385. A 5 m de distância, 3 eventos ficam abaixo de todas as normas, apesar do segundo elemento do pilar P7E1 estar bem próximo do limite. Os mesmos segundo e terceiro elemento da estaca P6E1 ficaram acima do limite da norma Americana a 5 m de distância, porém abaixo das outras 3 normas.

Apesar do muro estar a aproximadamente 20 m de distância da cravação da estaca, a péssima qualidade da estrutura acelerou a situação de degradação e trouxe o mesmo a ruína parcial. Pelas medições realizadas, o PPV a 20 m de distância não representaria risco para estruturas de baixa qualidade, diferente do que aconteceu. A situação do muro pode ter sido agravada devido a materiais de construção estarem apoiados nele, adicionando cargas não previstas.

Para avaliar a frequência junto com o PPV, foi elaborado o Gráfico 5 que utiliza os limites da recomendação da AFTES (1974).

**Gráfico 5 - Verificação do PPV e Frequência na Obra 2 em relação aos limites da recomendação AFTES (1974)**



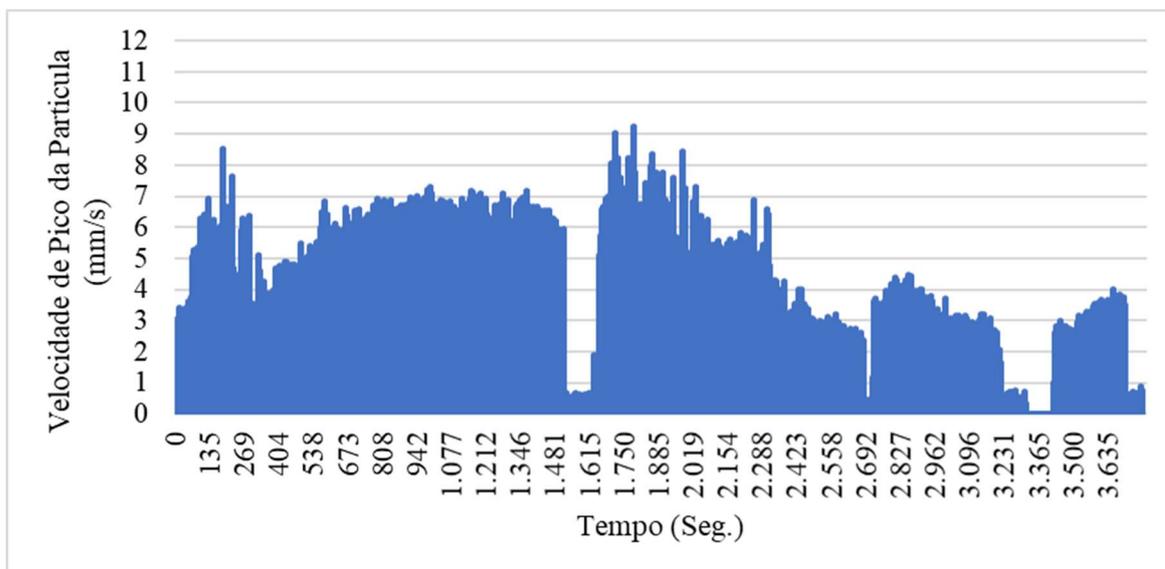
Fonte: Autor (2020)

Em relação a recomendação francesa, todos os eventos medidos ficaram acima dos limites para edificações de baixa qualidade, agravado por 4 medições, das 5 medições, feitas a 2 m de distância estarem no limite para edificações de média qualidade.

Durante a medição com o geofone do P7E1, também foi utilizado o celular para verificar a vibração gerada a 5m da estaca. Foi instalado no Celular o aplicativo (App) chamado *Accelerometer Analyzer* que mede as vibrações geradas na forma de aceleração ( $\text{mm/s}^2$ ). Dessa forma, os dados obtidos foram convertidos em velocidade, através de uma integração numérica pelo método dos trapézios, e com os resultados em velocidade foi calculado o PPV.

O Gráfico 6 apresenta as medições feitas com o celular a 5m de distância dos perfis 2, 3 e 4, com início na profundidade -12m até -38,50m, onde foram colhidos 451.126 pontos de vibração ao longo de 3785,8 segundos.

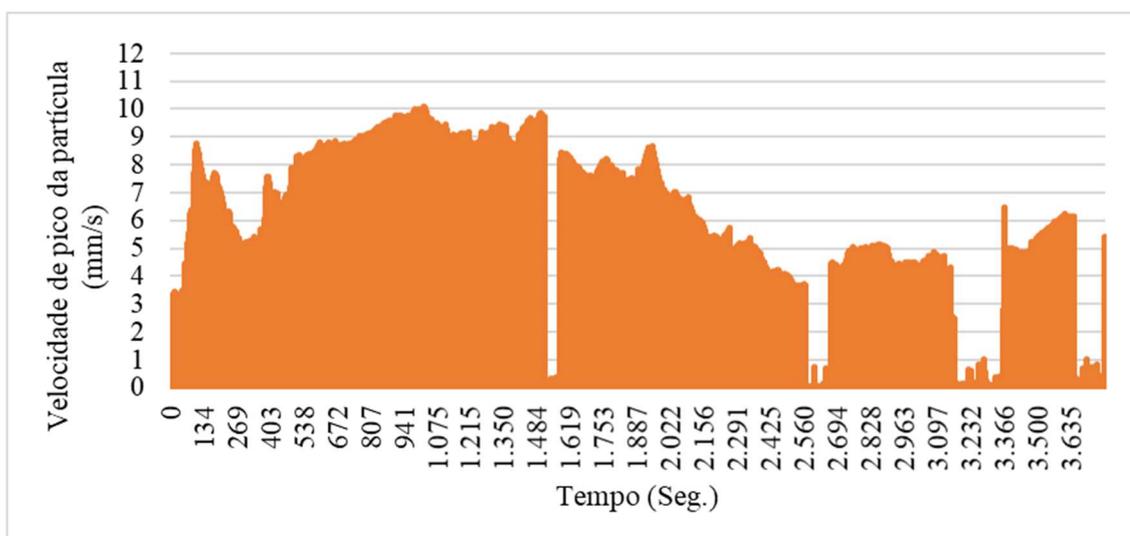
**Gráfico 6 - Medição do PPV com o celular na estaca P7E1 do Estudo de caso 02**



Fonte: Autor (2020)

Já o Gráfico 7 apresenta as medições feitas com o geofone a 5m de distância nos elementos 2, 3 e 4, com início na profundidade -12m até -38,50m. Na medição, foram colhidos 3.769.249 ao longo de 3.769,249 segundos.

**Gráfico 7 - Medição do PPV com Geofone na estaca P7E1 do Estudo de caso 02**



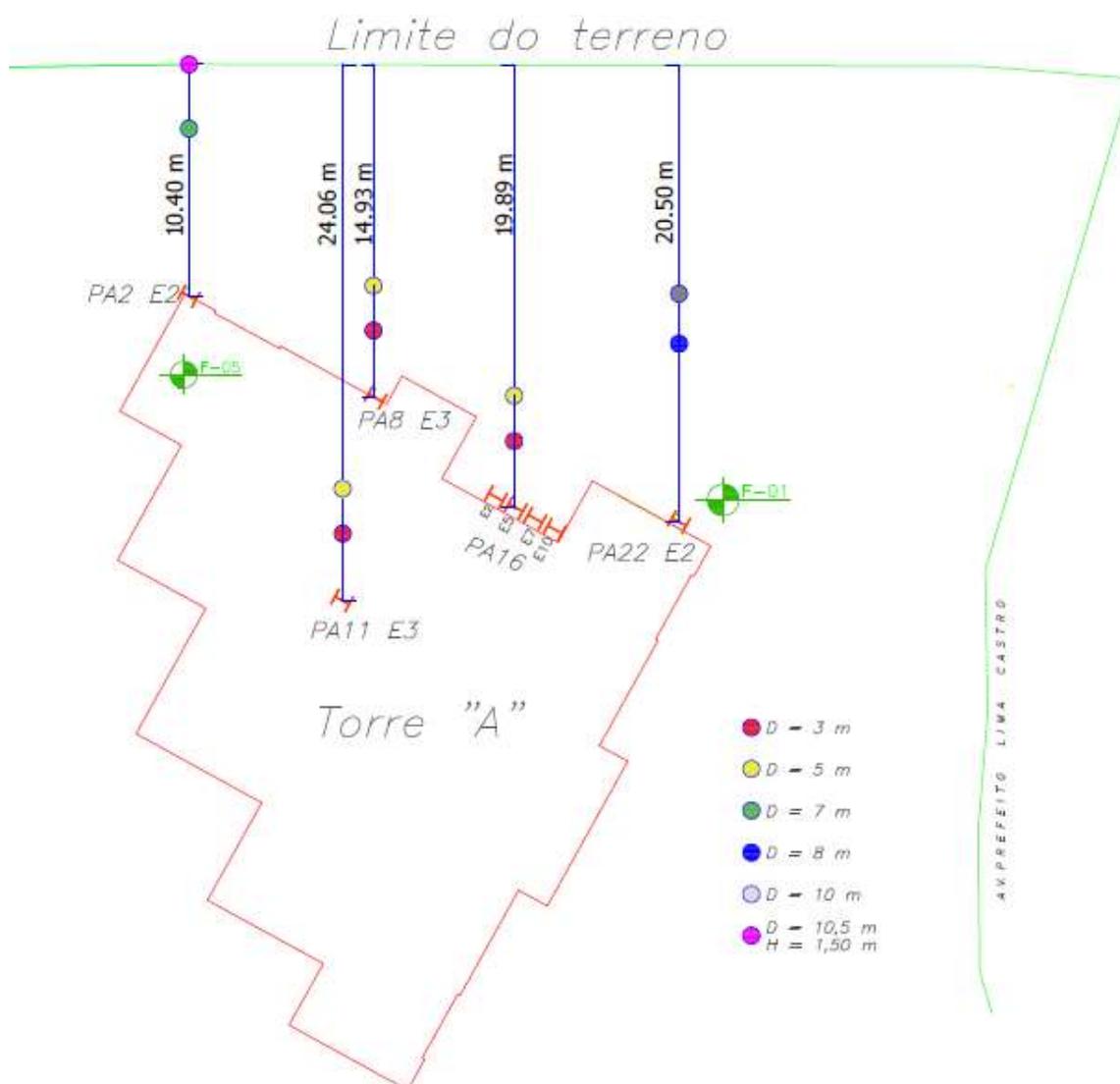
Fonte: Autor (2020)

Comparando os resultados do geofone e do celular, existe uma mesma tendência nos gráficos. Assim, enquanto o celular mede de 1 ponto a cada 5 ou 6 milissegundos, o geofone capta 1 ponto a cada 1 milissegundo. Tal diferença favorece o geofone e reduz a possibilidade de erros. Porém, o PPV máximo medido pelo celular foi 9,21 mm/s no instante 1.787 segundos e o geofone registrou o PPV máximo de 10,01 mm/s aos 985,189 segundos, o que representa uma variação de apenas 8% no resultado de geofone para o resultado medido no celular. Visto que a medição com o Celular foi feita sem uma metodologia bem definida, e utilizando um app que não tinha a função específica de medir velocidade, uma variação de aproximadamente 8% é tida como excelente.

#### **4.4. Estudo de caso 03**

No estudo de caso 3, foram medidas as vibrações geradas na cravação de 8 estacas metálicas, sendo elas denominadas: PA2E2, PA8E3, PA11E3, PA16E2, PA16E5, PA16E7, PA16E10 e PA22E2. A cravação das estacas foi feita com um martelo hidráulico de impacto, o qual possui um pilão de 7.000kg e a altura de queda foi em média 0,50 m, porém houveram quedas de 0,20 m e 0,60 m. As estacas medidas podem ser vistas na Figura 61.

Figura 61 – Localização das estacas que foram medidas no estudo de caso 02



Fonte: Autor (2020)

Na estaca PA2E2, os sensores foram colocados a 7,50 m e a 10,50 m de distância da estaca, sendo o sensor a 10,50 m fixado na parede a uma altura de 1,50 m, como pode ser visto na Figura 62.

**Figura 62 – Posicionamento do equipamento para medição do PA2E2**



Fonte: Autor (2020)

Foram medidas as vibrações dos perfis:

- PA2E2 Elemento 4: 12 m de comprimento e cravado da profundidade inicial -35 m até os -47 m e;
- PA2E2 Elemento 5: 8 m de comprimento e cravado da profundidade inicial -47 m os -55 m.

Na estaca PA8E, os sensores foram colocados a 3 m e 5 m de distância da estaca e foram medidas as vibrações dos perfis:

- PA8E1 Elemento 4: 12 m de comprimento e cravado da profundidade inicial -36 m os -48 m e;
- PA8E1 Elemento 5: 7,5 m de comprimento e cravado da profundidade inicial -48 até -55,50 m.

Na estaca PA11E3, os sensores foram colocados a 3 m e 5 m de distância da estaca e foram medidas as vibrações dos perfis:

- PA11E3 Elemento 5: 7,5 m de comprimento e cravado da profundidade inicial -48 até -55,50 m.

Na estaca PA16E2, os sensores foram colocados a 3 m e 5 m de distância da estaca e foram medidas as vibrações dos perfis:

- PA16E2 Elemento 1 - 12 m de comprimento e cravado da profundidade inicial 0 m até os -12m;
- PA16E2 Elemento 2 - 12 m de comprimento e cravado da profundidade inicial -12m até os -24 m;
- PA16E2 Elemento 3 – 12 m de comprimento e cravado da profundidade inicial -24 m os -36 m e;
- PA16E2 Elemento 4 – 12 m de comprimento e cravado da profundidade inicial -36 até -48 m;
- PA16E2 Elemento 5: 7,5 m de comprimento e cravado da profundidade inicial -48 até -56,50 m.

Na estaca PA16E5, os sensores foram colocados a 3 m e 5 m de distância da estaca e foram medidas as vibrações dos perfis:

- PA16E5 Elemento 1: 12 m de comprimento e cravado da profundidade 0 até os -12m.

Na estaca PA16E7, os sensores foram colocados a 3 m e 5 m de distância da estaca e foram medidas as vibrações dos perfis:

- PA16E7 Elemento 1 - 12 m de comprimento e cravado da profundidade inicial 0 m até os -12m;
- PA16E7 Elemento 2 - 12 m de comprimento e cravado da profundidade inicial -12m até os -24 m;
- PA16E7 Elemento 3 – 12 m de comprimento e cravado da profundidade inicial -24 m os -36 m e;
- PA16E7 Elemento 4 – 12 m de comprimento e cravado da profundidade inicial -36 até -48 m;
- PA16E7 Elemento 5: 7,5 m de comprimento e cravado da profundidade inicial -48 até -55,50 m.

Na estaca PA16E10, os sensores foram colocados a 3 m e 5 m de distância da estaca e foram medidas as vibrações dos perfis:

- Elemento 1: 12 m de comprimento e cravado da profundidade inicial 0 m até os -12m.

A Tabela 8 apresenta o resumo dos resultados obtidos nas medições com o geofone no estudo de caso 03.

Tabela 8 – Resultado dos PPV's medidos com o geofone no estudo de caso 03

Obra	Pilar/ Estaca	Perfil	Prof. Inicial (m)	Dist. 1 (m)	PPV 1 (mm/s)	Freq. (Hz)	Dist. 2 (m)	PPV 2 (mm/s)	Freq. (Hz)
Jardins da Ilha - Torre A	PA2 E2	4	-35	7,5	3,677	16,3	10,5 (h=1,5)	0,3369	16
		5	-47	7,5	3,354	16	10,5 (h=1,5)	0,2539	-
	PA8 E3	4	-35	3	11,71	15,6	5	7	15,5
		5	-47	3	11,26	15,3	5	5,386	15,5
	PA11 E3	5	-47	3	11,71	42,5	5	8,364	25,6
	PA16E2	1	0	3	26,22	29,4	5	13,28	-
		2	-12	3	11,39	40,1	5	6,84	15,4
		3	-24	3	10,55	32,9	5	5,66	26,9
		4	-36	3	16,02	32,8	5	8,94	12,7
		5	-48	3	20,85	49,7	5	8,84	54,1
	PA16E5	1	0	3	29	32,9	5	11,08	19,7
	P16E7	1	0	3	14,4	33	-	-	-
		2	-12	3	13,28	37,2	5	8,01	36
		3	-24	3	7,52	42,2	5	5,03	24
		4	-36	3	13,13	42,09	5	6,69	13,9
		5	-48	3	21,04	40,9	5	9,57	15,5
PA16E10	1	0	3	30,27	27,4	5	11,18	20,4	
PA22 E2	4	-35	8	3,423	16,1	10	3,491	9	

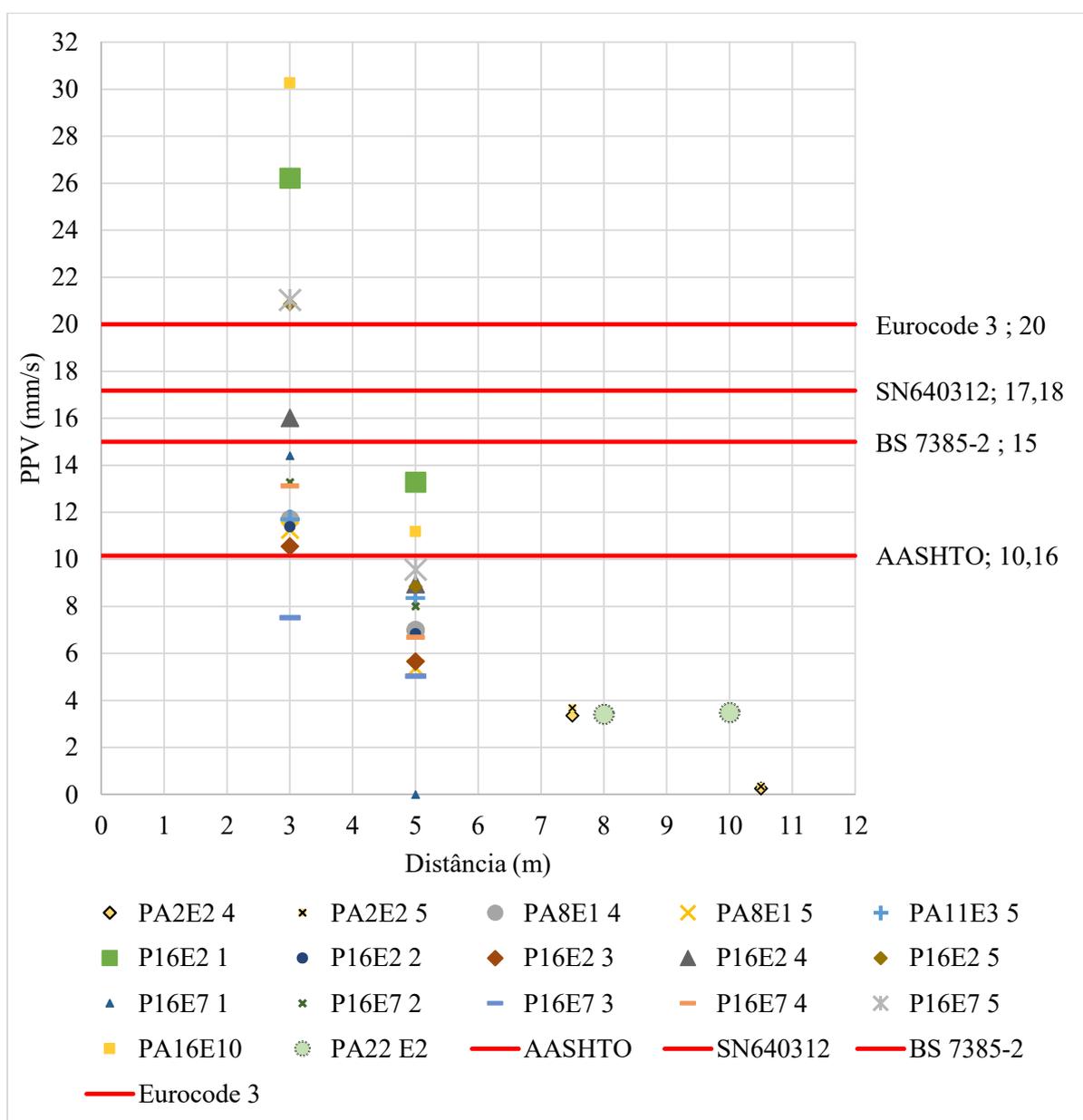
Fonte: Autor (2020)

Os resultados para o PPV a 3 m se apresentaram bastante elevados, com um valor mínimo de 7,52 mm/s na cravação do terceiro elemento da estacas PA16E7 e o máximo valor medido de 30,27 mm/s na cravação do primeiro elemento da estaca PA16E10. De maneira geral, a cravação do primeiro elemento das estacas PA16E10, PA16E2 e PA16E5 apresentaram maiores níveis de vibração, apenas a PA16E7 teve o PPV do primeira elemento menor do que o medido na cravação do quinto elemento. Tal vibração foi gerada nos momentos iniciais da cravação, quando a estaca precisou transpassar a camada de aterro na superfície.

A 5 m de distância, a variação das medições foi do mínimo medido de 5,03 mm/s no terceiro elemento da estaca PA16E7 e o máximo de 13,28 mm/s no primeiro elemento da estaca PA16E2. Entre 5 m e 10 m, os níveis foram na ordem dos 3 mm/s, considerados baixos.

O Gráfico 8 abaixo apresenta os resultados obtidos no estudo de caso 03, comparados com os limites de vibração apresentados nas normas abordadas no desenvolvimento desse trabalho, para uma residência padrão. Cada linha no gráfico representa um elemento cravado e a medição em 2 pontos com distâncias distintas.

**Gráfico 8 - Vibração gerada na cravação por impacto de estacas metálicas no Caso 03**

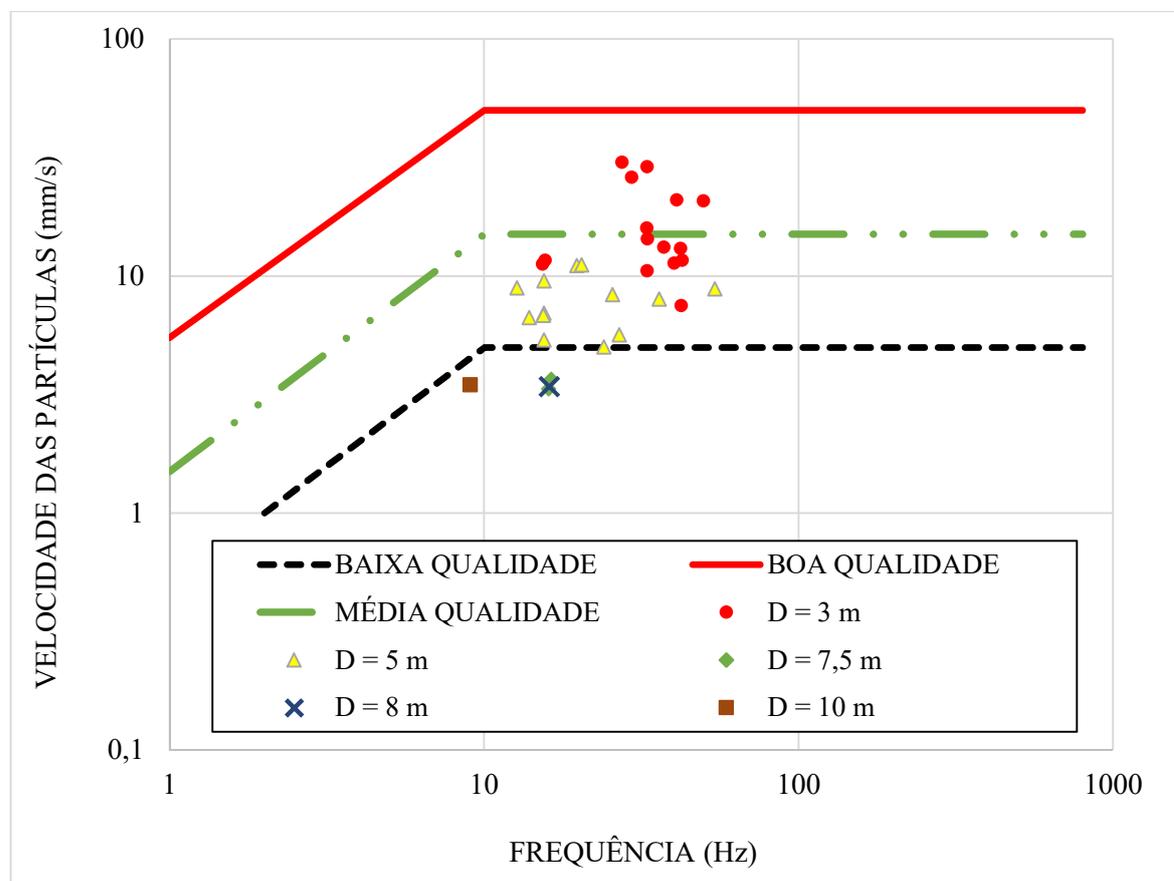


No Gráfico 8, é notável que aos 3 m de distância, as vibrações geradas no processo de cravação em 4 pontos desenvolveram valores de PPV acima dos limites definidos por todas as normas analisadas. Majoritariamente, as medições a 3 m ficaram apenas acima dos limites da norma americana, na exceção dos pontos já citados e o medido no terceiro elemento da estaca PA16E7.

Nas distâncias medidas entre 5 m e 10 m, apenas 2 eventos ficaram acima dos limites da norma americana, sendo eles os primeiros elementos das estacas PA16E10 e PA16E2 das normas. Todos os demais valores medidos ficaram abaixo do estipulado pelas normas, assim como os resultados para os pontos entre 7,50 m e 10,00 m. Também fica claro que no ponto fixado no muro de divisa do terreno, as vibrações medidas ficaram próximas de 0,3 mm/s, não representando percepção de vibração na estrutura.

Outra comparação feita, foi em relação às recomendações francesas da AFTES. Onde o Gráfico 9 apresenta os resultados do PPV versus a frequência (Hz) medidas na cravação das estacas.

**Gráfico 9 - Verificação do PPV e Frequência na Obra 3 em relação aos limites da recomendação AFTES (1974)**

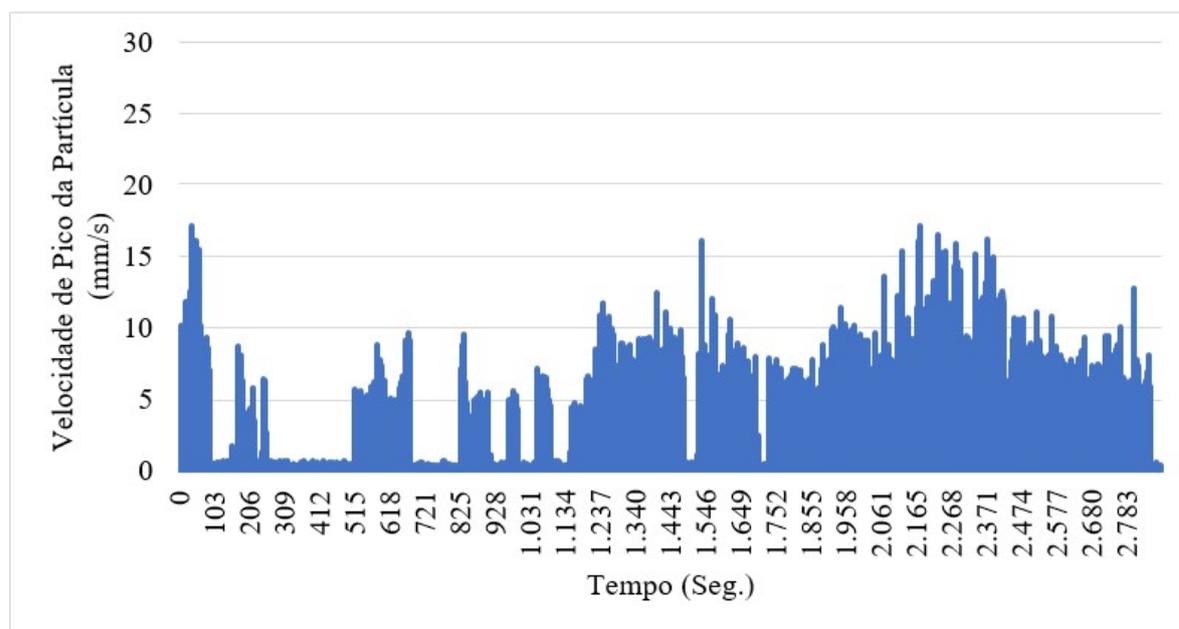


Na comparação dos resultados, 6 pontos a 3 m de distância tiveram resultados acima dos limites para residência de média qualidade e todos os pontos medidos a 5m ficaram abaixo dos limites para residências de média qualidade, porém acima para residências de baixa qualidade. Já os pontos entre 7,50m e 10m apresentam resultados inferiores a limites para residências de baixa qualidade.

Durante a medição com o geofone do P16E2, também foi utilizado o celular para verificar a vibração gerada a 3m da estaca. Foi instalado no Celular o aplicativo (App) chamado *Accelerometer Analyzer* que mede as vibrações geradas na forma de aceleração ( $\text{mm/s}^2$ ). Dessa forma, os dados obtidos foram transformados em velocidade ( $\text{mm/s}$ ) através da integração pelo método dos trapézios e foi calculado o seu PPV.

O Gráfico 10 apresenta as medições feitas com o celular a 5 m de distância dos perfis 1, 2, 3, 4 e 5 com início na profundidade 0m até -56,50 m, onde foram medidos 343.917 pontos ao longo de 2886,032 segundos.

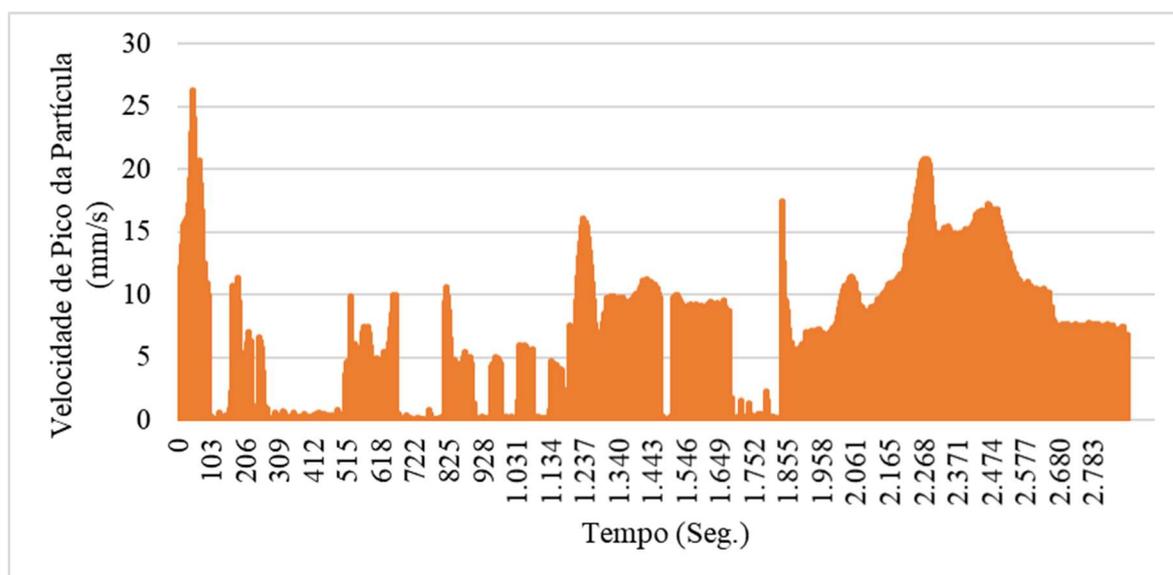
**Gráfico 10 - Medição do PPV com celular na estaca PA16E21 do Estudo de caso 03**



Fonte: Autor (2020)

Já o Gráfico 11 apresenta as medições feitas com o geofone a 5 m de distância dos perfis 1, 2, 3, 4 e 5 com início na profundidade 0 m até -56,50 m, onde foram medidos 1.443.016 pontos ao longo de 2886,032 segundos.

**Gráfico 11 - Medição do PPV com Geofone na estaca PA16E21 do Estudo de caso 03**



Fonte: Autor (2020)

Comparando os resultados do geofone e do celular, existe uma mesma tendência nos gráficos. Assim, enquanto o celular mede de 1 ponto a cada 5 ou 6 milissegundos, o geofone capta 1 ponto a cada 2 milissegundos. Tal diferença favorece o geofone e reduz a possibilidade de erros. Porém, o PPV máximo medido pelo celular foi 17,11 mm/s no instante 2178,55 segundos e o geofone registrou o PPV máximo de 26,24 mm/s aos 45,848 segundos, o que representa uma variação de 34,79% no resultado de geofone para o resultado medido no celular. Visto que a medição com o Celular foi feita sem uma metodologia bem definida, e utilizando um app que não tinha a função específica de medir velocidade, uma variação de aproximadamente 35% é tida como aceitável.

#### 4.5. Estudo de caso 04

No estudo de caso 4, foram medidas as vibrações geradas execução de 9 estacas do tipo hélice contínua, sendo elas denominadas: P4E2, P6E1, P12E3, P40E1, P46E2, P47E1, P51E1, P54E1 e P61E1. A cravação das estacas foi feita com um trado helicoidal fixado em uma retroescavadeira (Figura 63). Foram utilizados trados de 600 mm de diâmetro e de 400 mm de diâmetro, com as de 600 mm atingindo profundidade próxima dos -26,50 m, e as de 400 mm ficando entre -9,00m e -13,00 m.

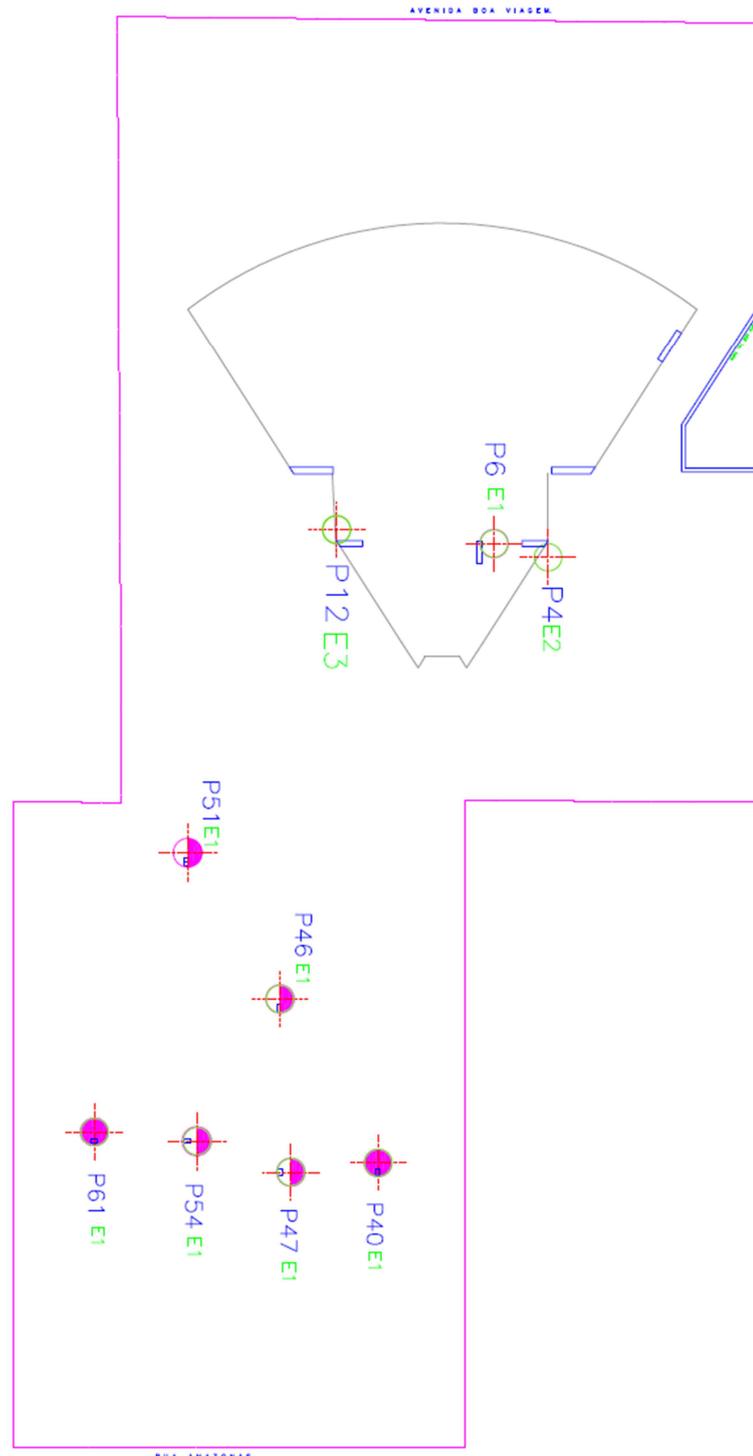
**Figura 63 - Trado helicoidal utilizado na execução das estacas**



Fonte: Autor (2020)

A locação das estacas que foram medidas podem ser vista na Figura 64. Durante a execução das estacas, as medições tiveram início a partir da escavação do terreno pelo trado e foram finalizadas quando o trado foi retirado do terreno, sendo captadas as vibrações durante o processo de escavação e também durante a concretagem das estacas.

**Figura 64 – Locação das estacas que foram medidas no estudo de caso 04**



As 3 primeiras estacas medidas tiveram comprimento maior do que 25 m, o que tornou necessário a utilização do prolongador do trado, como pode ser visto na Figura 65.

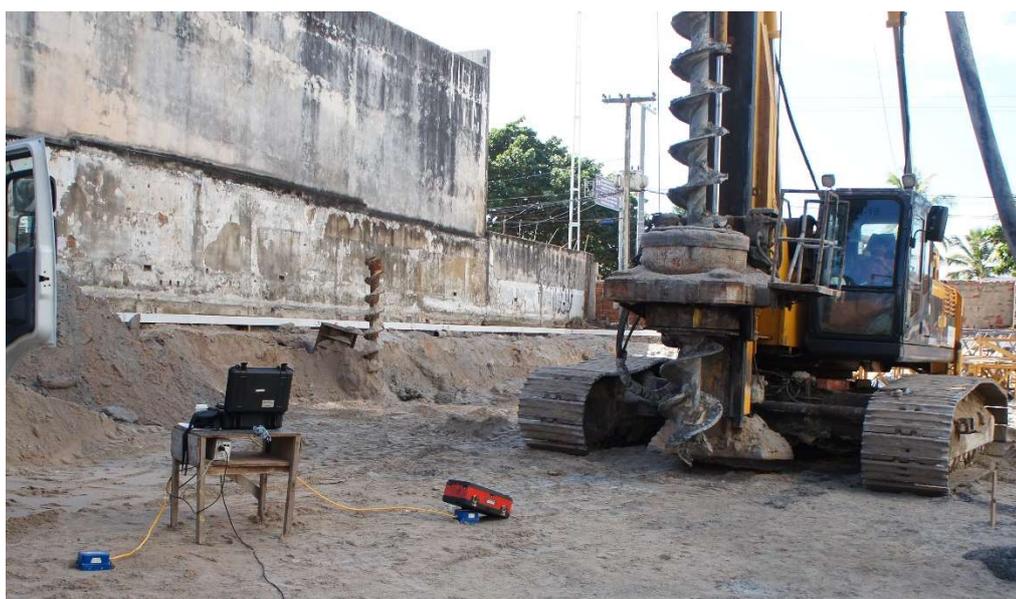
**Figura 65 – Posicionamento do equipamento para medição do PA2E2**



Fonte: Autor (2020)

Os sensores foram dispostos em distâncias variadas entre 2 m e 9 m, como pode ser visto nas Figuras 66 e 67.

**Figura 66 - Disposição dos sensores para medição de estacas de 600mm**



Fonte: Autor (2020)

**Figura 67 - Disposição dos sensores para medição de estacas de 400mm**



Fonte: Autor (2020)

A Tabela 9 apresenta o resumo dos resultados obtidos nas medições com o geofone no estudo de caso 04.

Tabela 9 – Resultado dos PPV's medidos com o geofone no estudo de caso 04

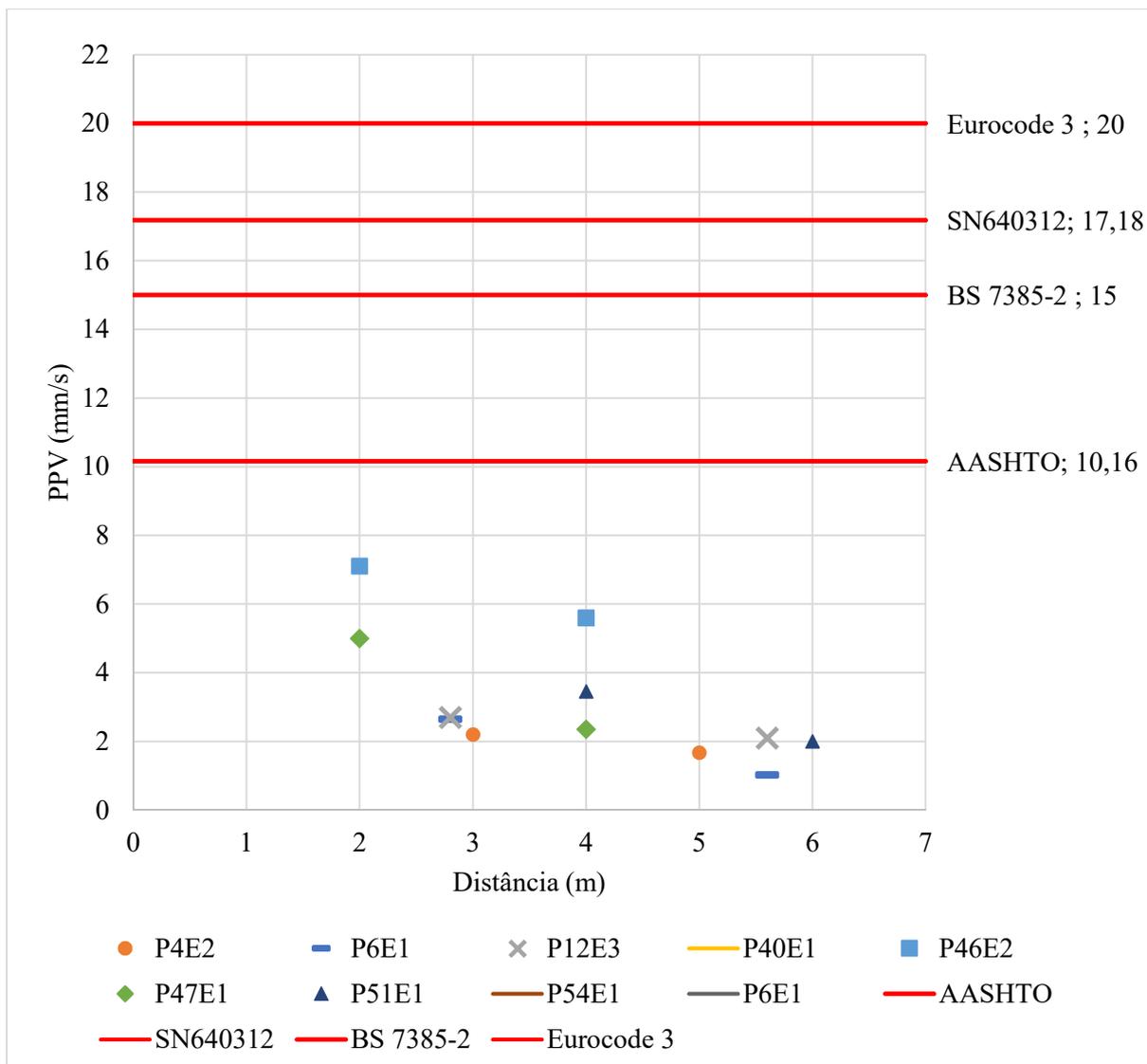
Obra	Pilar/ Estaca	Cota final (m)	Tipo da estaca	Estaca	Dist. 1 (m)	PPV 1 (mm/s)	Freq. 1 (Hz)	Dist. 2 (m)	PPV 2 (mm/s)	Freq. 2 (Hz)
Estudo de caso 04	P4E2	-26,55	Concreto moldado <i>in loco</i>	600mm	3	1,67	33,3	5	2,2	31,7
	P6E1	-26,55	Concreto moldado <i>in loco</i>	600mm	2,8	2,64	32,6	5,6	1,02	32,6
	P12E3	-26,55	Concreto moldado <i>in loco</i>	600mm	2,8	2,7	33	5,6	2,1	32,7
	P40E1	-13,00	Concreto moldado <i>in loco</i>	400mm	2	4,39	33	4,5 (h=1,5)	1,61	107,2
	P46E2	-9,00	Concreto moldado <i>in loco</i>	400mm	2	7,1	24,9	4	5,6	16,6
	P47E1	-9,00	Concreto moldado <i>in loco</i>	400mm	2	5	24,9	4	2,35	23,7
	P51E1	-13,00	Concreto moldado <i>in loco</i>	400mm	4	3,45	36,1	6	2	12,5
	P54E1	-9,00	Concreto moldado <i>in loco</i>	400mm	7	2,197	32,7	9	2	31,3
	P6E1	-13,00	Concreto moldado <i>in loco</i>	400mm	2	4,05	65,9	4	3,37	61,5

Fonte: Autor (2020)

Como esperado, os resultados das vibrações foram baixos, mesmo a 2 m de distância da cravação. Para distâncias a 2 m, o maior evento medido foi execução da estaca P46E2 com um PPV de 7,1 mm/s. Já o menor valor na mesma distância foi 4,05 mm/s na execução da estaca P6E1. Nas distâncias acima de 2 m, o PPV se manteve abaixo dos 4 mm/s, com exceção da estaca P46E2 a 4 m de distância, onde foi medido um PPV de 5,6 mm/s.

O Gráfico 12 apresenta os resultados obtidos no estudo de caso 04, comparados com os limites de vibração apresentados nas normas abordadas no desenvolvimento desse trabalho, para uma residência padrão.

**Gráfico 12 - Comparação dos resultados obtidos no estudo de caso 04 com os limites de vibração impostos para residências em 4 normas internacionais**

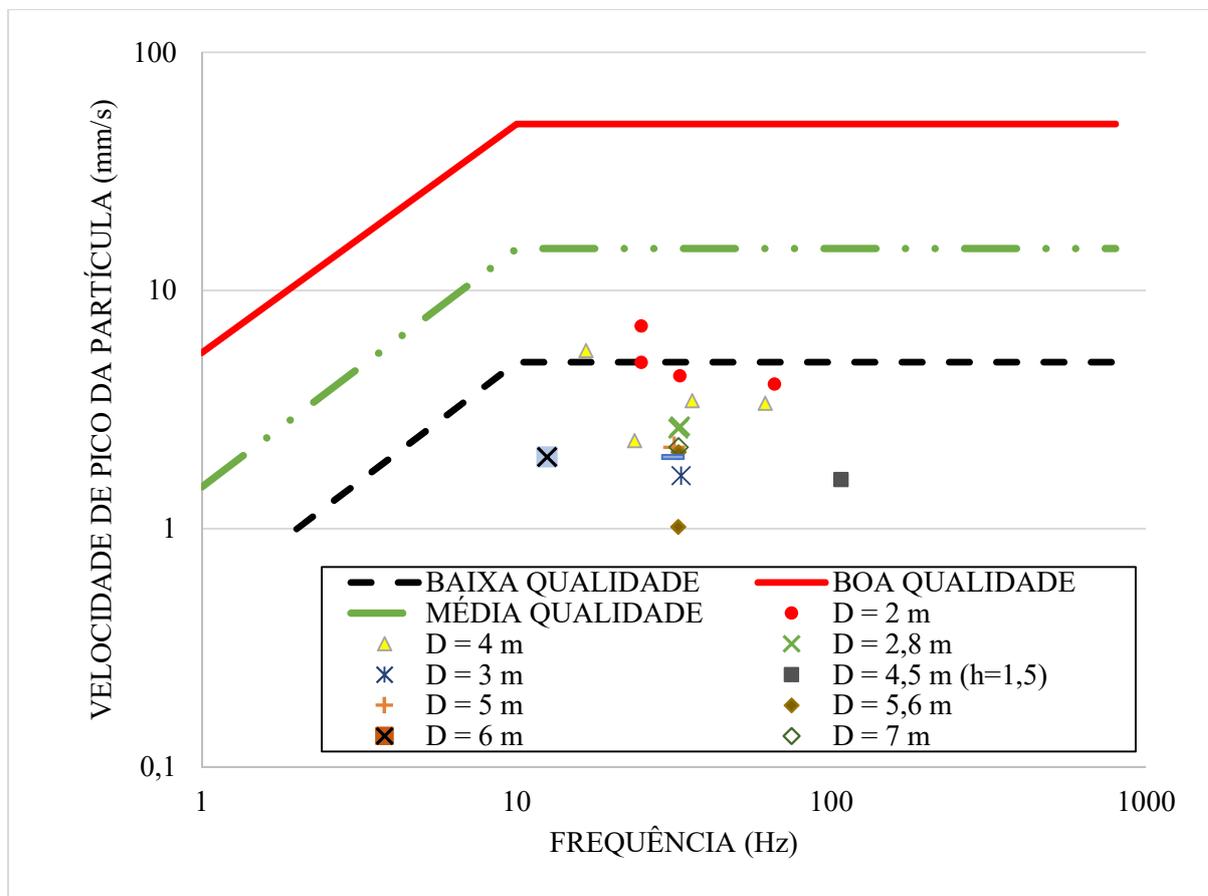


Fonte: Autor (2020)

Na comparação do PPV com os limites das 4 normas avaliadas, todos os eventos ficaram abaixo dos limites, seguindo o que foi apresentado na revisão bibliográfica a respeito das estacas escavadas, onde a mesma tem característica de não gerar vibrações intensas.

Outra comparação feita, foi em relação às recomendações francesas da AFTES. Onde o Gráfico 13 apresenta os resultados do PPV versus a frequência (Hz) medidas na cravação das estacas.

**Gráfico 13 -Verificação do PPV e Frequência na Obra 4 em relação aos limites da recomendação AFTES (1974)**



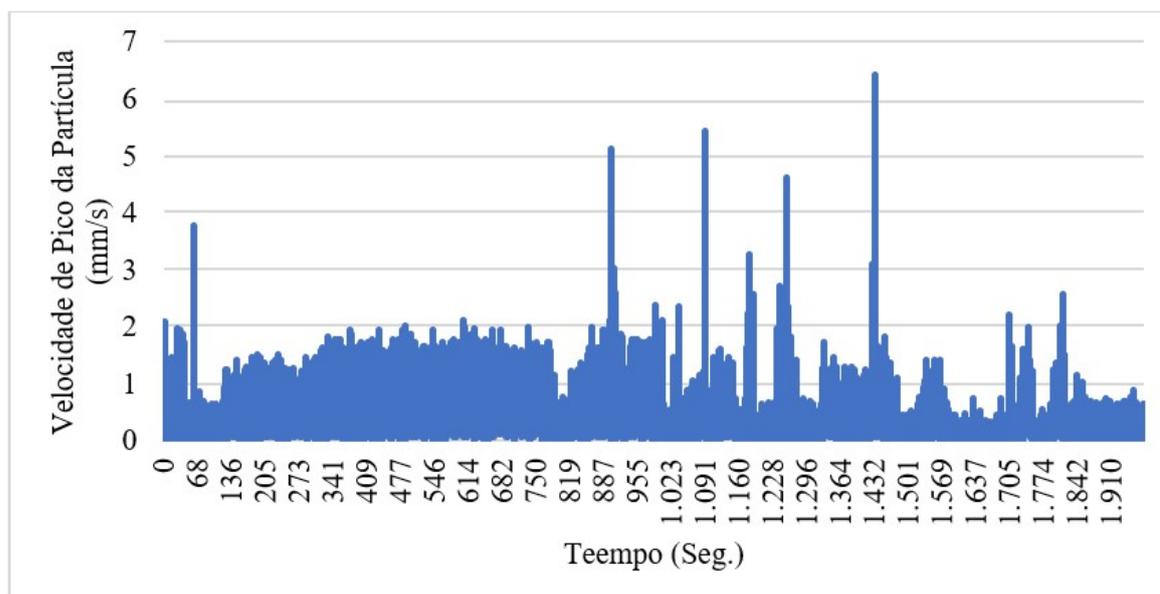
Fonte: Autor (2020)

Na avaliação em relação a recomendação AFTES, os resultados foram de níveis baixos de vibração, com uma concentração de frequência a níveis de 30 Hz a 40 Hz. Apenas 3 pontos tiveram níveis de vibração acima do permitido para construções de baixa qualidade, sendo 1 ponto a 4 m de distância e 2 pontos a 2 m.

Durante a medição com o geofone do P12E3, também foi utilizado o celular para verificar a vibração gerada a 3 m da estaca. Foi instalado no Celular o aplicativo (App) chamado *Accelerometer Analyzer* que mede as vibrações geradas na forma de aceleração ( $\text{mm/s}^2$ ). Dessa forma, os dados obtidos foram transformados em velocidade ( $\text{mm/s}$ ) e foi calculado o seu PPV.

O Gráfico 14 apresenta as medições feitas com o celular a 3m de distância da estaca P12e3 com início na profundidade 0m até -26,50 m, onde foram medidos 235.691 pontos ao longo de 1977,99 segundos.

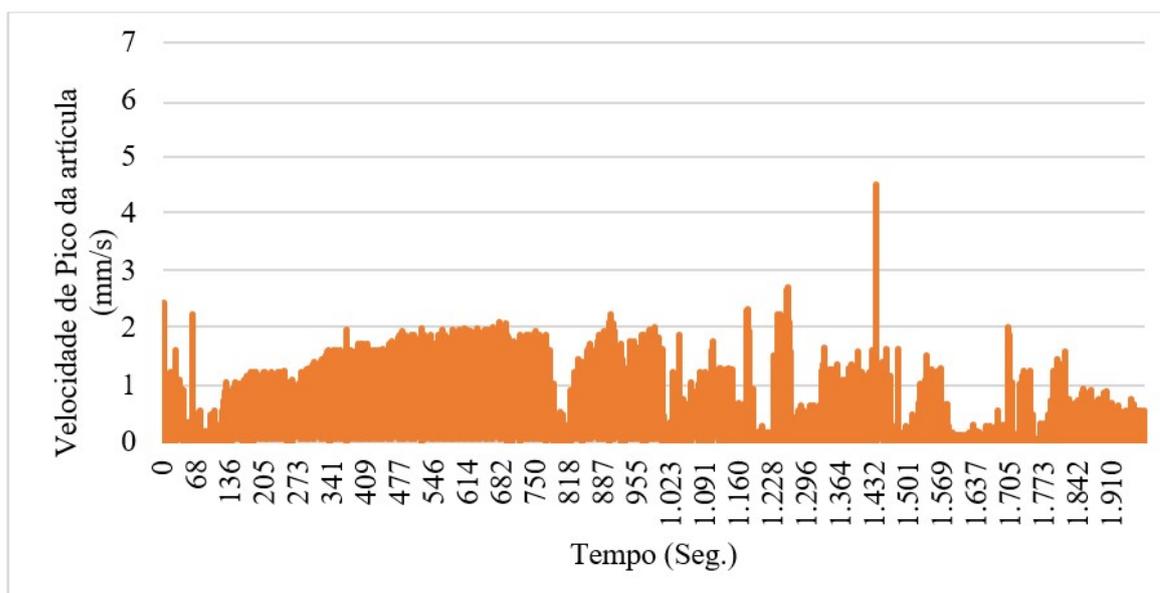
**Gráfico 14 - Medição do PPV com o celular na estaca P12E3 do Estudo de caso 04**



Fonte: Autor (2020)

Já o Gráfico 15 apresenta as medições feitas com o geofone a 3m de distância da estaca P12E3 com início na profundidade 0m até -26,50 m, onde foram medidos 989.000 pontos ao longo de 1.978,00 segundos.

**Gráfico 15 - Medição do PPV com celular o celular na estaca P12E3 do Estudo de caso 04**



Fonte: Autor (2020)

Comparando os resultados do geofone e do celular, existe uma mesma tendência nos gráficos. Assim, enquanto o celular mede de 1 ponto a cada 5 ou 6 milissegundos, o geofone capta 1 ponto a cada 2 milissegundos. Tal diferença favorece o geofone e reduz a possibilidade de erros. O PPV máximo medido pelo celular foi 6,40 mm/s no instante 1435,89 segundos e o geofone registrou o PPV máximo de 4,52 mm/s aos 1434,254 segundos, o que representa uma variação de 29,38% no resultado de geofone para o resultado medido no celular. Visto que a medição com o Celular foi feita sem uma metodologia bem definida, e utilizando um app que não tinha a função específica de medir velocidade, uma variação de aproximadamente 30% é tida como aceitável.

#### 4.6. Estudo de caso 05

No estudo de caso 5, foram medidas as vibrações geradas execução de 20 estacas de compactação, sendo elas denominadas: P5E6, P5E7, P5E8, P5E9, P5E10, P5E11, P5E12, P5E13, P5E14, P5E15, P5E16, P5E17, P5E18, P5E19, P5E20, P5E21, P5E22, P5E23, P5E24 e P5E25. A cravação das estacas foi feita com um tubo vazado com tampa na base até -3,00m de profundidade (Figura 68). Inicialmente o tubo iria descer até -4,5m, porém aos -3,0 m a máquina não conseguia mais avançar e forçava bastante contra o terreno

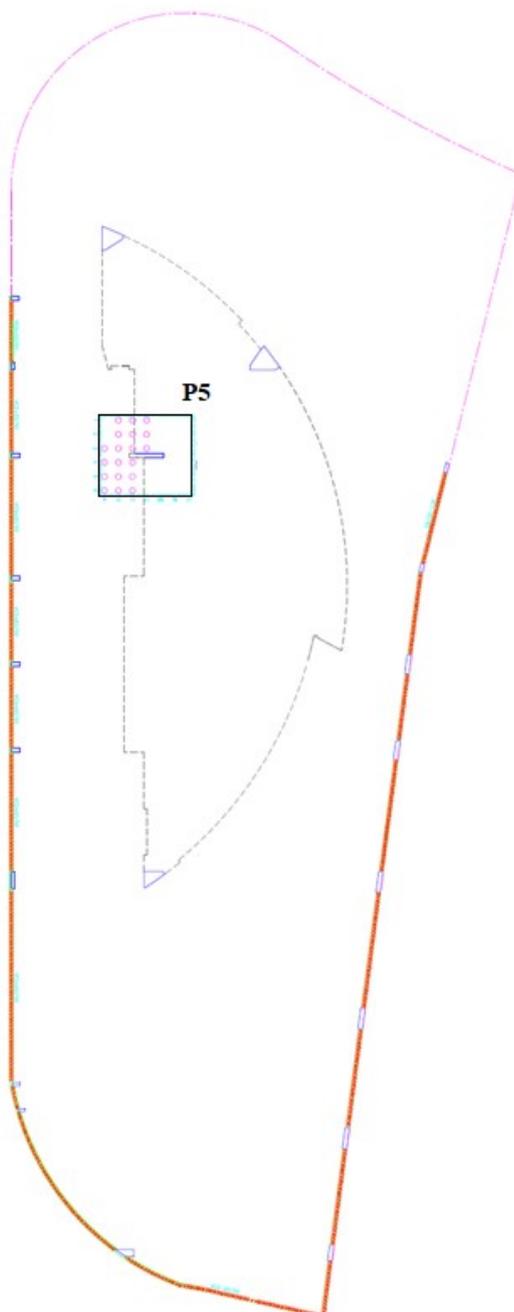
**Figura 68 – Braço vibratório e o tubo vazado com tampa durante cravação de estaca**



Fonte: Autor (2020)

A locação das estacas que foram medidas podem ser vista na Figura 69. Durante a execução das estacas, as medições tiveram início a partir da penetração do tubo com bucha seca do terreno e foram finalizadas quando o tubo foi retirado do terreno, sendo captadas as vibrações durante o processo de cravação e também durante a concretagem das estacas.

**Figura 69 – Locação das estacas que foram medidas no estudo de caso 05**



Fonte: Autor (2020)

Os sensores foram dispostos em distâncias variadas entre 2 m e 15 m, como pode ser visto nas Figuras 70 e 71.

**Figura 70 - Disposição dos sensores para medição de estacas de compactação**



Fonte: Autor (2020)

**Figura 71 - Disposição dos sensores**



Fonte: Autor (2020)

A Tabela 10 apresenta o resumo dos resultados obtidos nas medições com o geofone no estudo de caso 05.

Tabela 10 – Resultado dos PPV's medidos com o geofone no estudo de caso 05

Obra	Pilar/ Estaca	Cota final (m)	Tipo da estaca	Estaca	Dist. 1 (m)	PPV 1 (mm/s)	Freq. 1 (Hz)	Dist. 2 (m)	PPV 2 (mm/s)	Freq. 2 (Hz)
	E6	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	2	42	38,3	4	19,5	10,6
	E7	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	8	13,7	62,4	10	11,9	9,00
	E8	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	8	18	38,5	10	13	31,4
	E9	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	8	17	39,4	10	15	36,5
	E10	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	8	21,14	42,3	10	14,89	31,9
	E11	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	8	15	35,9	10	14,45	20
	E12	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	10	5,1	25,5	12	3,1	-
	E13	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	13	5,1	21,3	15	2,7	-
	E14	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	13	4,3	-	15	2,3	-
<b>Estudo de caso 05</b>	E15	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	10	5,2	-	12	3,76	-
	E16	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	11	5,18	-	13	3,32	-
	E17	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	11	4,7	-	13	3,08	24,9
	E18	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	12,5	4	-	14,5	2,7	25,6
	E19	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	13	3,7	-	15	2	-
	E20	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	3	24,71	-	5	15	-
	E21	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	3	16	40,8	5	9,7	20
	E22	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	5	12	37,6	7	8,3	25,8
	E23	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	6,5	10	-	8	8,39	-
	E24	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	7	8,8	-	8,5	7,6	-
	E25	-3,00	Estaca de compactação	Argamassa	5	24	-	8	10	-

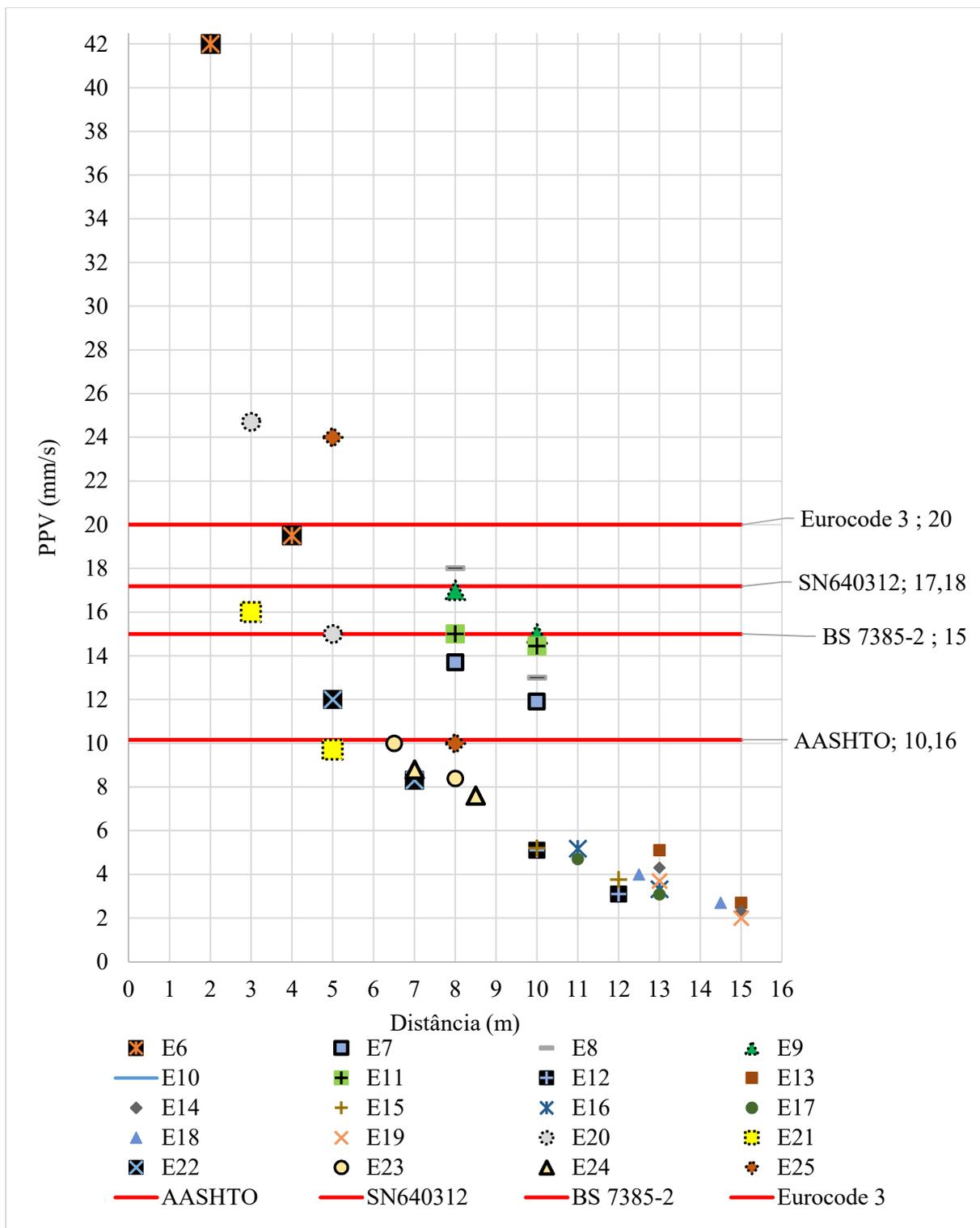
No único evento medido a 2 m de distância, foi registrado o maior PPV a 42,00 mm/s. Seguindo a tendência dos outros casos, o PPV vai sendo reduzido a medida que a distância aumenta. Porém, até os 10 m de distância, pontos como P5E10 apresentaram vibrações na ordem de 14,89 mm/s, o que é considerado alto.

A frequência foi bastante variada, com o mínimo de 9 Hz e o máximo de 62,4 Hz, o que pode ser explicado pelo método de execução das estacas de compactação, que foi através do vibro-deslocamento. Apesar da grande variação entre a frequência máxima e mínima, a faixa da frequência medida ficou entre 20 Hz e 40Hz.

O Gráfico 16 apresenta os resultados obtidos no estudo de caso 05, comparados com os limites de vibração apresentados nas normas abordadas no desenvolvimento desse trabalho, para uma residência padrão.

Na comparação com os limites estabelecidos nas normas em estudo, dos 22 eventos medidos numa distância entre 2 m e 10 m, apenas 7 eventos (P5E21 a 5 m; P5E22 a 7 m; P5E23 a 6,5 m e 8 m; P5E24 em 7 m e 8,5 m; P5E25 a 8 m). Todos os outros ficaram acima do valor limite da norma americana. Outro ponto a se observar é que 3 eventos tiveram PPV acima de todas as normas, sendo eles: P5E6 a 2 m; P5E20 a 3 m e; P5E25 a 5 m.

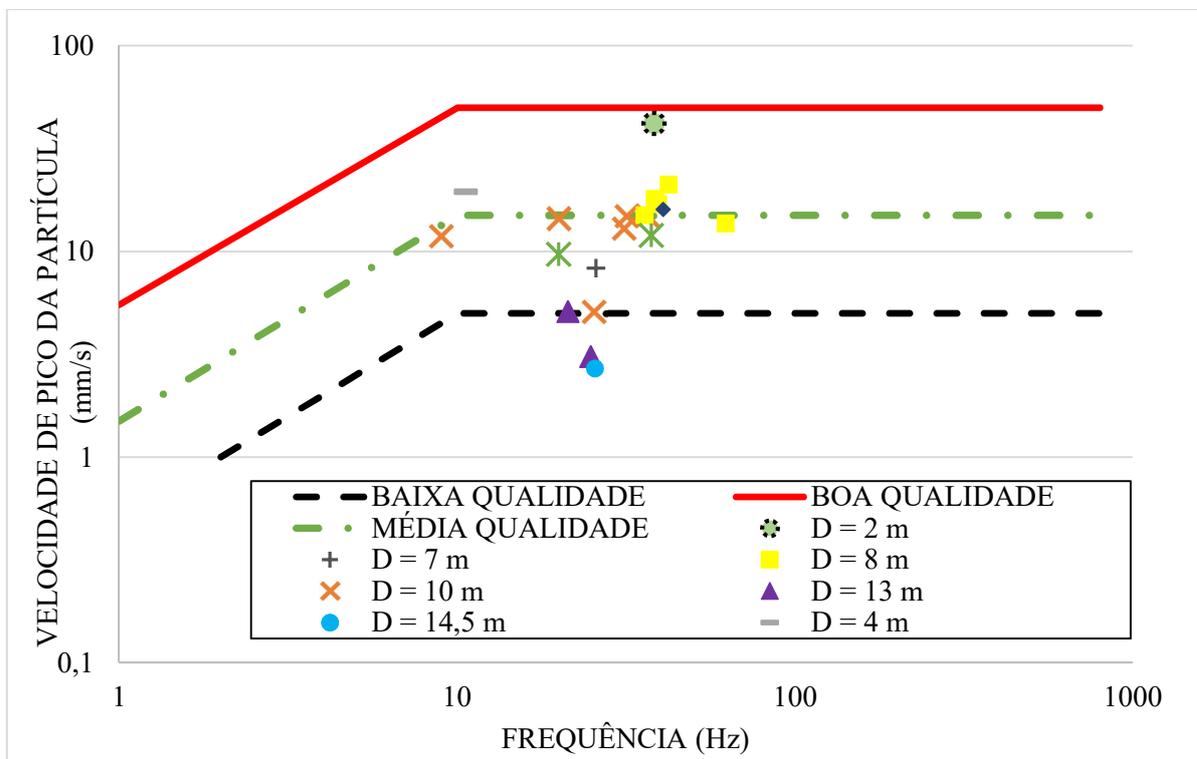
**Gráfico 16 - Comparação dos resultados obtidos no estudo de caso 05 com os limites de vibração impostos para residências em 4 normas internacionais**



Fonte: Autor (2020)

Outra comparação feita, foi em relação às recomendações francesas da AFTES. Onde o Gráfico 17 apresenta os resultados do PPV versus a frequência (Hz) medidas na cravação das estacas.

**Gráfico 17 - Verificação do PPV e Frequência na Obra 5 em relação aos limites da recomendação AFTES (1974)**



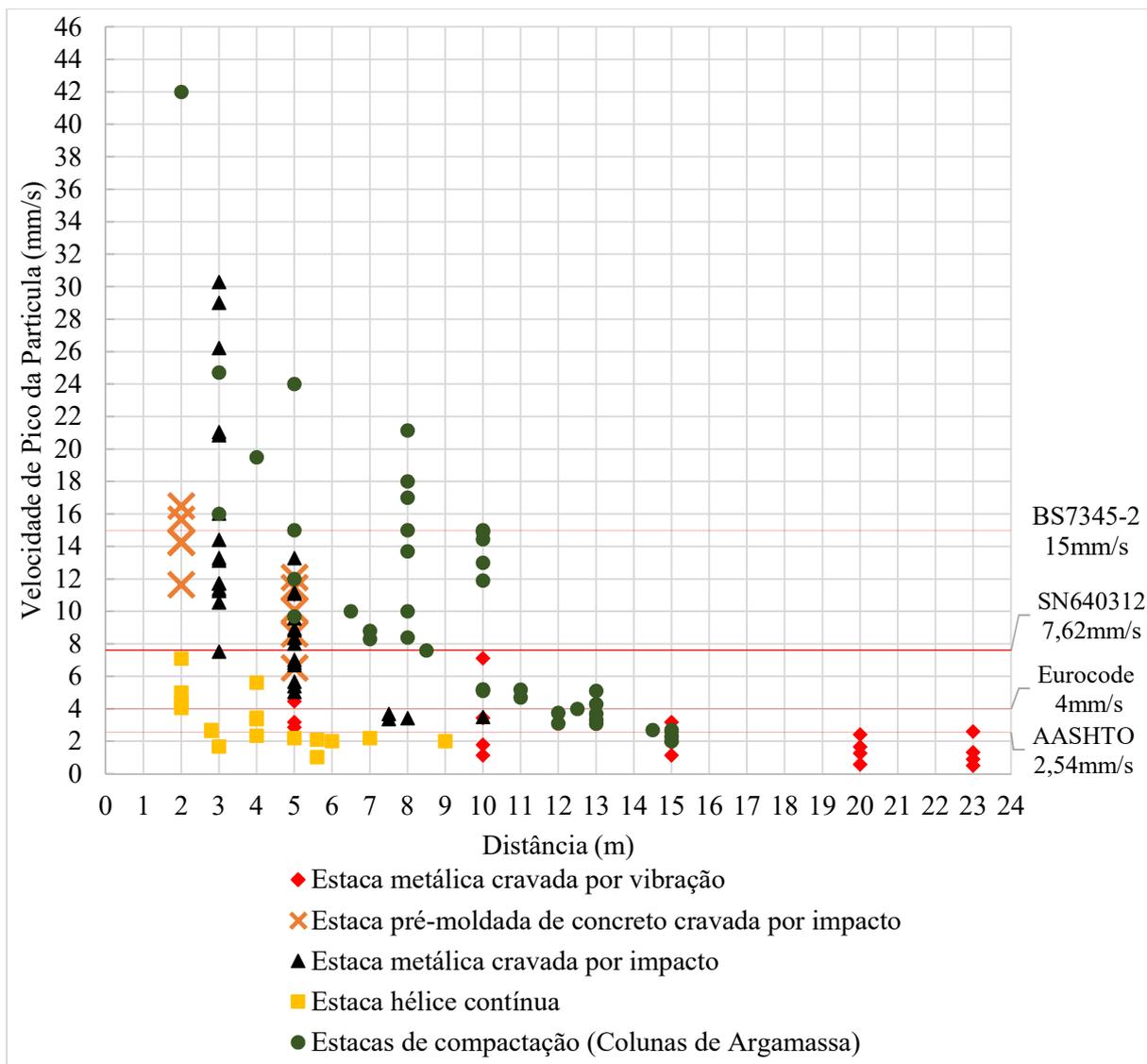
Fonte: Autor (2020)

É notável que no Gráfico 17, a concentração dos pontos foi acima do limite para edifícios de baixa qualidade, com 7 eventos também superando os limites para edificações de média qualidade. Apesar de um ponto ter gerado uma frequência abaixo de 10 Hz, o que é considerado perigoso para estruturas, esse resultado não influenciou na tendência de danos gerados por tal evento.

#### 4.7. Avaliação dos métodos de cravação e execução de estacas

Para uma comparação da vibração gerada pelos diversos métodos de cravação, todos eventos medidos foram compilados em gráfico de pontos. Como forma de avaliar a influência nas estruturas, foram utilizadas as normas americana AASHTO, a Norma Suíça SN640312, a Norma Britânica BS 7385-2 e a Norma Europeia Eurocode 3. Dentro das normas, foram estabelecidos limites para edificações de qualidade muito boa, qualidade média e baixa qualidade, de acordo com os valores presentes no Quadro 1. O Gráfico 18 apresenta os PPV's para edificações de baixa qualidade.

**Gráfico 18 – Resultados do PPV dos 5 estudos de caso comparados com limites para construções de baixa qualidade da AASHTO, BS7345-2, Eurocode e SN640312**



Fonte: Autor (2020)

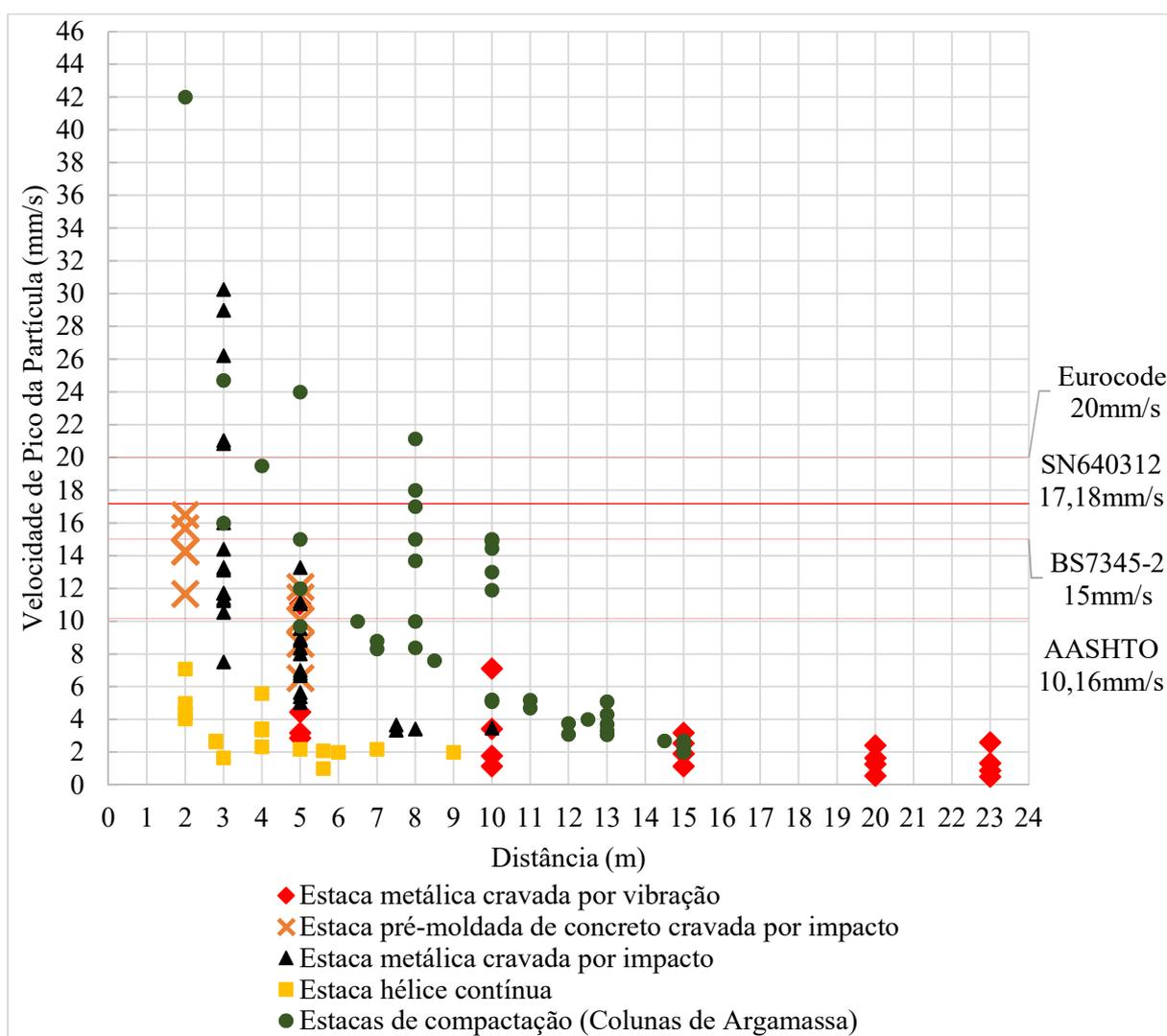
Na avaliação em relação a edificações de baixa qualidade, as estacas metálicas cravadas por vibração e as estacas tipo hélice contínua foram as que apresentaram menor índice de vibração. Entre 2 m e 5 m, de distância a vibração gerada pelos 2 tipos de estacas citados ficam acima dos limites estipulados pelas normas da AASHTO e do Eurocode. Após os 5 m de distância o PPV cai bastante e apenas um evento da estaca metálica a 10 m fica acima da norma americana e nenhuma da hélice contínua ultrapassa os limites.

As estacas metálicas e pré-moldadas de concreto, entre 2 m e 5 m tiveram PPV's altos e a maioria dos eventos ficou com valores acima dos limites das normas AASHTO e do Eurocode.

Os eventos da estaca metálica por impacto após os 5 m tiveram valores baixos de PPV, ficando apenas acima do limite estipulado pela norma americana. As estacas de compactação representam um risco para edifícios de baixa qualidade em um raio de 10 m de distância. Entre 10 m e 15 m a maioria dos valores ultrapassou apenas a norma americana.

Para avaliar os níveis de vibração em relação às construções com boas condições de conservação, foi desenvolvido o Gráfico 19, similar ao Gráfico 18.

**Gráfico 19 - Resultados do PPV dos 5 estudos de caso comparados com limites para construções de média qualidade da AASHTO, BS7345-2, Eurocode e SN640312**



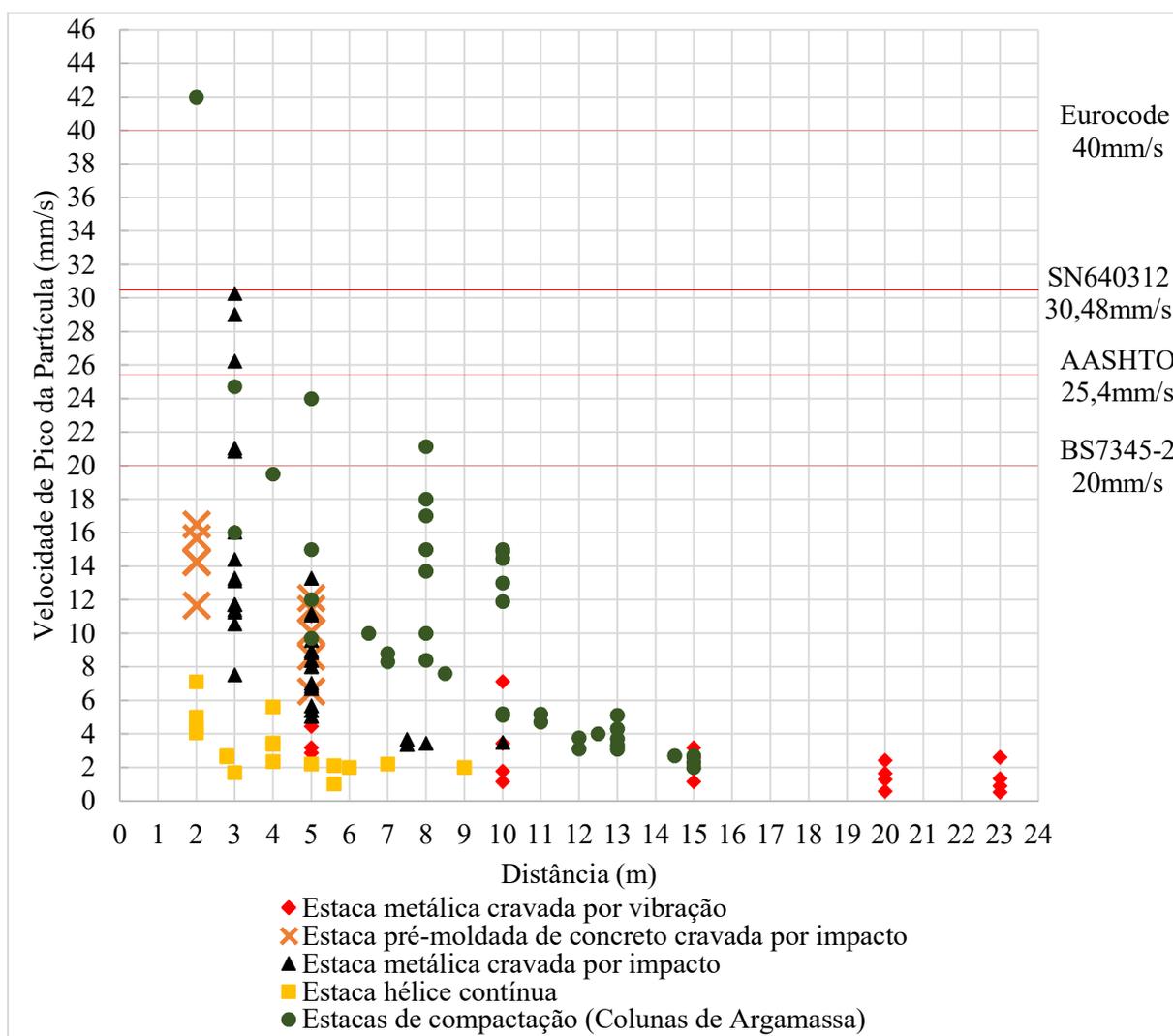
Fonte: Autor (2020)

Para edificações com boa qualidade construtiva, entre 2 m e 5 m, apenas a estaca hélice contínua não apresentou pelo menos um ponto acima da norma americana. Um evento da estaca metálica

cravada por vibração, a 5 m, ficou acima da norma americana e abaixo das outras 3 normas, porém todos os outros pontos apresentaram PPV aceitável. Nas estacas metálicas cravadas por impacto, apenas 6 pontos a 3 m ficaram acima do limite estipulado pela norma britânica, sendo todos os demais aceitáveis pela norma da Suíça e pelo Eurocode. Ainda é importante considerar que 5 eventos da citada estaca ficaram acima de todas as 4 normas. As estacas de compactação entre 3 m e 10 m apresentaram a maioria dos eventos acima da norma americana, constando ainda 10 pontos com PPV acima do limite da norma britânica.

Para avaliar os níveis de vibração em relação às construções com condições de conservação muito boa, foi desenvolvido o Gráfico 20.

**Gráfico 20 - Resultados do PPV dos 5 estudos de caso comparados com limites para construções de qualidade muito boa da AASHTO, BS7345-2, Eurocode e SN640312**



Fonte: Autor (2020)

Para os limites definidos para construções muito boas, apenas estacas metálicas cravadas por impacto e as estacas de compactação apresentaram PPV's maior do que o permitido pela norma britânica. 1 evento da estaca de compactação ficou acima de todas as normas, 3 eventos da estaca metálica cravada por impacto ficaram acima das normas britânica e americana e 3 eventos das estacas de compactação e 1 evento da estaca metálica cravada por impacto ficou acima da norma britânica. Todos os demais eventos ficaram abaixo dos limites de todas as normas.

## **5. APLICATIVO PARA VERIFICAÇÃO DAS VIBRAÇÕES GERADAS NA CRAVAÇÃO DE ESTACAS – “Analisador de Vibrações”**

Como resultado da verificação da medição com o aparelho celular, foi desenvolvido o aplicativo (App) “Analisador de Vibrações”. O download do aplicativo está disponível no link:

<https://drive.google.com/open?id=15MuBix0e092rBmJuUBPDdCP5IY11-ctQ>

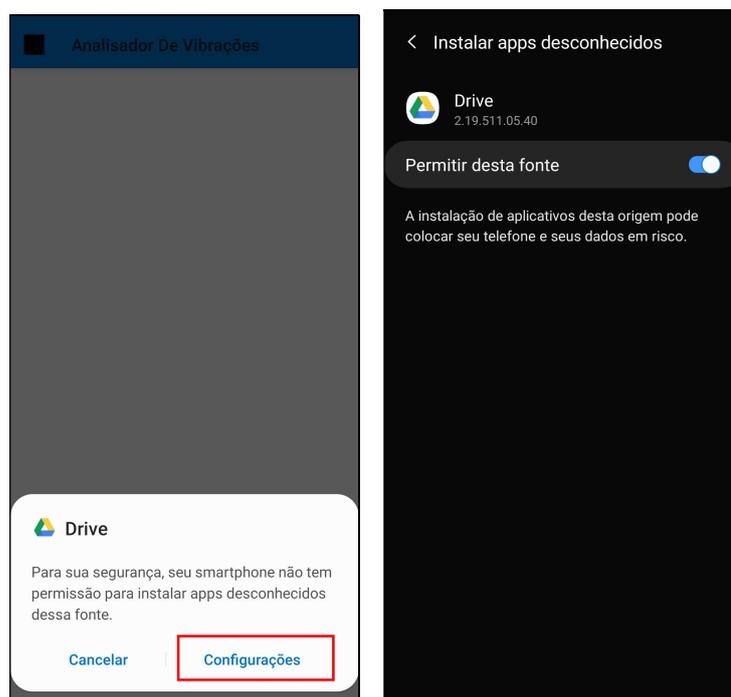
Ou através do QR Code na Figura 72

**Figura 72 – QR Code para download do app Analisador de Vibrações**



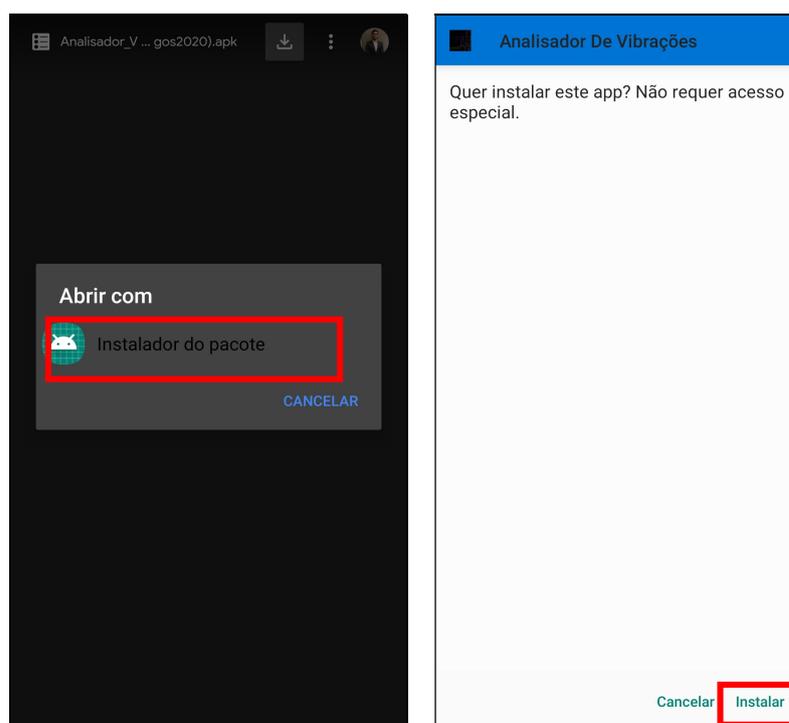
Fonte: Autor (2020)

Acessando uma das duas fontes, o direcionamento será uma página do Google Drive a qual está o arquivo “Analisador\_Vibrações\_(Burgos2020).apk”. Após o download do arquivo, é preciso permitir que o Google Drive realize a instalação de apps, como demonstrado na Figura 73.

**Figura 73 – Como Realizar a permissão para o Google Drive instalar Apps**

Fonte: Autor (2020)

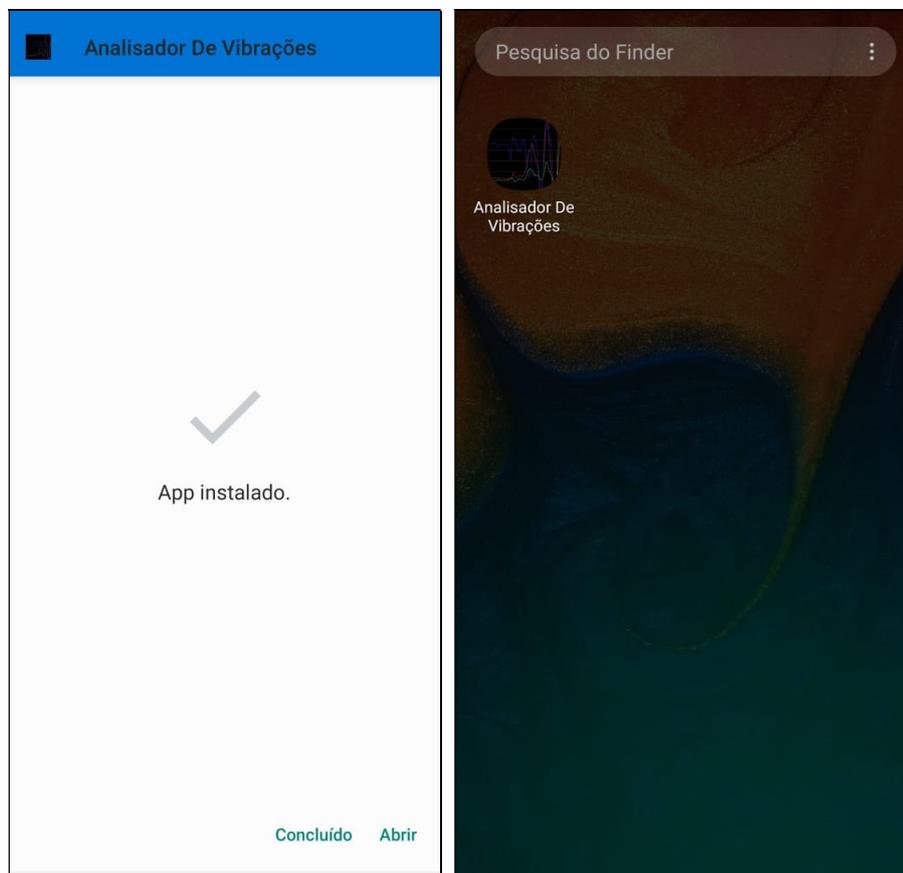
A próxima etapa é instalar o aplicativo, seguindo as recomendações da Figura 74.

**Figura 74 – Instalação do aplicativo**

Fonte: Autor (2020)

Após a instalação, o aplicativo estará disponível no menu do celular (Figura 75).

**Figura 75 – Conclusão da instalação e app no menu do celular**



Fonte: Autor (2020)

Quando aberto, irá aparecer na tela inicial quatro lacunas a serem preenchidas (Figura 76a), sendo elas: Tipo de Solo, Distância, Estruturas e Norma. Para a medição começar a rodar, é preciso preencher às 4 lacunas.

O tipo de solo e a distância não irão influenciar no resultado do PPV, porém ficarão registrados no relatório gerado ao fim da medição. A seleção da Norma e da Estrutura irá definir o limite a ser escolhido para ser referência na medição, com base nessa escolha será delimitada uma linha de cor vermelha

Quando se seleciona o tipo de solo, aparecem 3 opções, como pode ser visto Figura 76b

Figura 76 – Tela inicial e opções do tipo de solo

Figure 76 consists of two side-by-side screenshots of a mobile application interface titled "Analisador De Vibrações".

Screenshot (a) shows the main screen with four dropdown menus for selection:

- Tipo de solo: selecione u..
- Distância: selecione u..
- Estruturas: Selecione u..
- Norma: selecione u..

At the bottom of the screen is a button labeled "INICIAR".

Screenshot (b) shows the same screen, but the "Tipo de solo" dropdown menu is open, displaying three options:

- selecione uma opção
- arenoso
- argiloso
- siltoso

The "INICIAR" button is also visible at the bottom of this screenshot.

Fonte: Autor (2020)

Na seleção da distância, aparecem 5 opções (Figura 77a): 5 m, 10 m, 15 m, 20 m e 25 m. A escolha das distâncias foi feita de acordo com as utilizadas ao longo do trabalho, porém não impedem a medição em outras distâncias definidas pelo operador.

Após a escolha da Distância, é preciso selecionar a Norma que será tida como referência. O app oferece duas opções: A norma da AASHTO e o Eurocode. É possível visualizar as opções na Figura 77b.

**Figura 77 – Opções de distância e Norma**

The figure displays two screenshots of the 'Analisador De Vibrações' application interface, labeled (a) and (b). Both screenshots show a form with the following fields: 'Tipo de solo:', 'Distância:', 'Estruturas:', and 'Norma:', along with an 'INICIAR' button.

**(a)** The 'Distância' dropdown menu is open, showing the following options: 'selecione uma opção', 5, 10, 15, 20, and 25. The other fields are currently empty.

**(b)** The 'Norma' dropdown menu is open, showing the following options: 'selecione uma opção', AASHTO, and EUROCODE 3. The 'Distância' field is empty.

Fonte: Autor (2020)

Após a escolha da Distância, é preciso selecionar a Norma que será tida como referência. O app oferece duas opções: A norma da AASHTO e o Eurocode. É possível visualizar as opções na Figura 78b.

Não é possível selecionar o tipo de estrutura sem selecionar a norma referência. Dessa forma, caso seja selecionada a norma da AASHTO, irão aparecer 4 opções de estruturas (Figura 78a) com os limites definidos com base nos valores de PPV apresentados na Quadro 1. Da mesma forma, caso seja selecionada a norma do Eurocode, irão ser exibidas na lacuna Estruturas 5 opções de estruturas (Figura 78b), também definidos pelos limites do PPV apresentados no Quadro 1.

**Figura 78 – Tipos de estruturas para a Norma da AASHTO e do Eurocode**

The figure displays two screenshots of the 'Analisador De Vibrações' application interface, labeled (a) and (b). Both screens feature a green header with the text 'Analisador De Vibrações'. Below the header, there are several input fields and dropdown menus. In screenshot (a), the 'Tipo de solo:' dropdown is open, showing options: 'Edf projetada', 'Edf residencial em bom estado', 'Edf residencial', and 'Edf Historico/Criticos'. The 'Estruturas:' dropdown is also open, showing 'Selecione u..' and a downward arrow. The 'Norma:' dropdown is set to 'AASHTO'. In screenshot (b), the 'Estruturas:' dropdown is open, showing options: 'Serviços enterrados', 'Industria pesada', 'Comercial leve', 'Residencial', and 'Patrimonio'. The 'Norma:' dropdown is set to 'EUROCODE..'. Both screens have an 'INICIAR' button at the bottom.

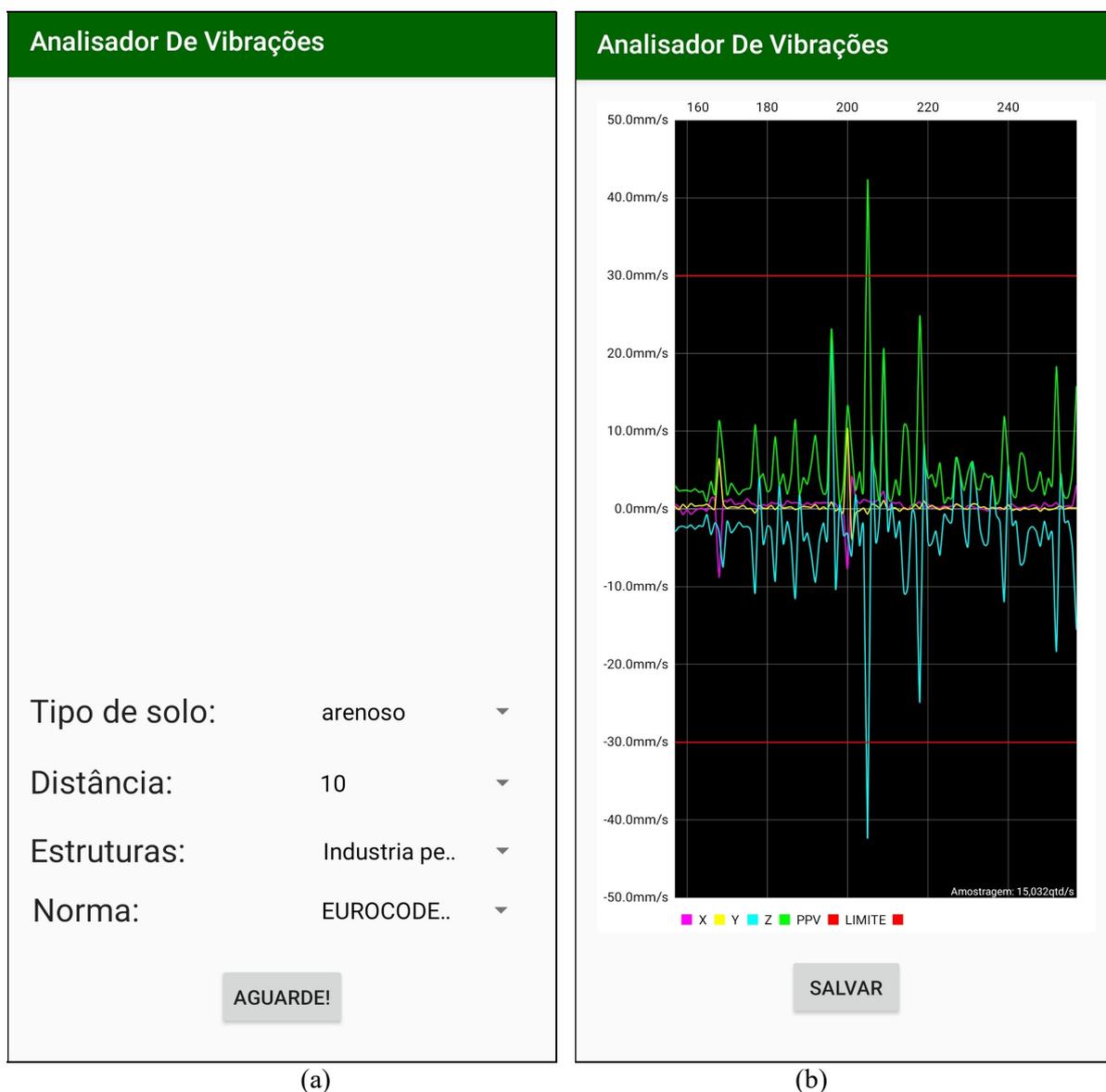
Fonte: Autor (2020)

Após selecionados todos os parâmetros, é possível iniciar a medição. Quando se aperta o botão “Iniciar”, é dado um atraso de 3 segundos no início da medição, e a exibição de uma mensagem de “Aguarde” (Figura 79a). Esse atraso é devido a influência da vibração gerada apertado do botão no momento do início da medição, tal erro foi verificado nos testes com o app *Accelerometer Analyzer*.

Quando se inicia a medição da vibração, a tela do app muda para um gráfico (Figura 79b) onde o Eixo Y é a Velocidade em mm/s e o Eixo X é o tempo em milissegundos, o qual segue mudando à medida que o tempo avança. No gráfico estão dispostas 6 linhas, onde as 2 vermelhas paralelas ao eixo X representam os limites do PPV para a Norma e Estrutura

selecionada. As demais linhas representam as medições de vibrações no eixo X (Linha Roxa), Y (Linha Amarela), Z (Linha Azul) e o PPV (Linha Verde).

**Figura 79 – Atraso de 3 segundos com mensagem e gráfico gerado durante a medição da vibração**



Fonte: Autor (2020)

Ao fim da verificação das vibrações, o operador deve apertar o botão “Salvar” para finalizar a medição. Quando finalizada, aparecerá na tela do aplicativo uma mensagem de onde o arquivo em txt foi salvo (Figura 80).

**Figura 80 – Mensagem exibida ao fim da medição**

The screenshot shows the 'Analisador De Vibrações' application interface. At the top, there is a green header with the text 'Analisador De Vibrações'. Below the header, the interface displays several parameters with their corresponding values and dropdown arrows:

Tipo de solo:	arenoso	▼
Distância:	10	▼
Estruturas:	Industria pe..	▼
Norma:	EUROCODE..	▼

Below these parameters, a grey rounded rectangle contains the message: 'As informações foram salvas em documentos/acelerometro'. At the bottom of this rectangle is a button labeled 'INICIAR'.

Fonte: Autor (2020)

O arquivo é gerado em arquivo de texto (Extensão .txt) com os resultados dos registros nos eixos X, Y, Z em unidades de aceleração e velocidade, assim como o PPV e demais informações acerca da medição (Figura 81). O título do arquivo vem no padrão “acelerometro dia mês data hora\_minutos\_segundos GMT-03\_00 ano.txt”, um exemplo é: “acelerometro Fri Jan 03 09\_43\_56 GMT-03\_00 2020.txt”

**Figura 81 – Arquivo de texto gerado com os registros da medição**

acelerometro Fri Jan 03 09\_43\_56 GMT-03\_00 2020.txt - Bloco de Notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

Data: Fri Jan 03 09:43:56 GMT-03:00 2020

Tipo do solo:

Distancia:

Foi atingida uma taxa de amostragem de 17.663136 valores colhidos por segundo.

Foram colhidos em media de 56.615093 milissegundos.

TEMPO (segundos);AceleraçãoX(mm/s<sup>2</sup>);AceleraçãoY(mm/s<sup>2</sup>);AceleraçãoZ(mm/s<sup>2</sup>); VelocidadeX(mm/s<sup>2</sup>); VelocidadeY(mm/s<sup>2</sup>); VelocidadeZ(mm/s<sup>2</sup>)

0.0;0,000;0,000;0,000;0,000;0,000;0,000;0,000

0.037;0,036;-0,063;0,014;0,664;-1,174;0,266

0.104;0,072;-0,037;-0,205;2,406;-1,243;-6,858

0.171;0,051;-0,071;-0,080;1,724;-2,366;-2,687

0.237;0,072;-0,038;0,031;2,370;-1,264;1,027

0.32;0,129;-0,002;-0,133;5,365;-0,099;-5,514

0.378;0,050;-0,012;-0,105;1,458;-0,347;-3,055

0.437;0,008;-0,022;-0,145;0,247;-0,636;-4,273

0.504;-0,011;-0,029;0,043;-0,361;-0,962;1,444

0.57;-0,051;-0,037;-0,293;-1,699;-1,225;-9,679

0.648;-0,111;-0,008;0,071;-4,342;-0,327;2,754

0.711;0,062;-0,011;-0,079;1,961;-0,339;-2,489

0.771;0,127;0,012;-0,157;3,807;0,359;-4,705

0.837;-0,001;-0,035;-0,069;-0,040;-1,146;-2,291

0.905;0,008;-0,041;-0,056;0,285;-1,384;-1,913

0.971;-0,045;-0,053;-0,014;-1,501;-1,738;-0,474

1.038;-0,066;-0,068;-0,029;-2,206;-2,286;-0,962

1.104;0,066;-0,108;-0,224;2,173;-3,555;-7,387

1.171;-0,012;-0,110;0,091;-0,401;-3,689;3,048

1.237;0,024;-0,056;-0,090;0,790;-1,857;-2,963

1.305;0,068;-0,050;-0,230;2,320;-1,709;-7,815

1.373;-0,024;-0,099;-0,043;-0,814;-3,378;-1,465

1.438;0,035;-0,142;-0,115;1,128;-4,630;-3,735

1.504;0,011;-0,079;-0,059;0,356;-2,607;-1,936

1.571;0,068;-0,083;-0,198;2,286;-2,767;-6,617

1.639;0,001;-0,122;-0,059;0,041;-4,152;-1,994

1.704;0,026;-0,110;-0,124;0,856;-3,579;-4,046

1.771;0,029;-0,060;-0,043;0,962;-2,005;-1,444

1.84;0,071;-0,066;-0,099;2,437;-2,271;-3,428

1.905;-0,024;-0,092;-0,041;-0,778;-2,996;-1,323

Fonte: Autor (2020)

## 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 P.J. More (1995) o que ficou mais próximo dos resultados para cravação através de impacto, e o método apresentado por Attewell et al. (1992) 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.

Nas medições da vibração gerada durante a cravação das estacas metálicas por vibração, apenas 2 eventos apresentaram PPV's acima do recomendado para edificações de baixa qualidade pelas normas tomadas como referência. Quando é feita a avaliação para edificações de boa qualidade, apenas a cravação do primeiro elemento apresentou níveis de vibração acima do limite. Visto que os pontos que excederam os limites se encontravam em distâncias iguais ou abaixo dos 10 m, é possível afirmar que após os 10 m, os níveis de vibração não representam riscos para as edificações próximas.

Em relação às estacas metálicas cravadas por impacto, geração da vibração apresentou comportamento similar, onde entre 2 m e 5 m, o PPV foi considerado muito alto. É notável que a cravação das estacas por impacto apresentou resultados superiores a limites estipulados para edificações de qualidade muito boa em duas normas, porém tais medições foram em distâncias de 2 m. A redução dos níveis de vibração fica aceitável após os 5 m, onde foram registrados valores de PPV que não consideram riscos mesmo para as estruturas em estado mais crítico.

Nas estacas pré-moldadas de concreto, dos 5 elementos medidos nas distâncias entre 3 m e 5 m, 3 elementos tiveram os níveis registrados de vibração acima dos limites estabelecidos em norma para edificações de baixa qualidade e boa qualidade. Sendo apenas os elementos 3 e 4 da estaca P7E1 a 5 m de distância ficando abaixo de todas as normas para edifícios de boa qualidade. Quando avaliado para edifícios de baixa qualidade, todos os eventos ficam acima de pelo menos 2 normas, o Eurocode e a americana.

Para os 3 casos de estacas cravadas, os maiores níveis de PPV foram registrados na cravação dos primeiros elementos das estacas. Tais níveis são devido a presença de aterros muito

compactos e da menor distância da ponta da estaca em relação a superfície do terreno. Uma forma de reduzir a vibração gerada, é através da realização de um pré-furo, para transpassar às camadas mais compactas próximas a superfície e permitir que a vibração de maior intensidade seja gerada em camadas de solo com menos resistência.

Na execução de estacas de compactação foram registrados os maiores níveis de vibração. A maioria das medições com distâncias entre 2 m e 10 m, ficaram com valores de PPV acima das normas, já as com distâncias entre 10 m e 15 m ficaram abaixo dos valores mínimos de PPV. É notável que as medições entre 2 m e 8 m apresentaram níveis de vibrações acima dos limites estipulados para edifícios de qualidade muito boa, o que pode ser um risco, visto que 8 m de distância é um raio de influência elevado para uma cidade com uma aglomeração urbana intensa, que é o caso do Recife. Após os 10 m, as vibrações geradas na execução das estacas de compactação ainda são consideradas um risco para edificações de baixa qualidade, apenas apresentando níveis aceitáveis após os 15 m de distância. Outro risco a ser considerado nesse tipo de fundação é o tipo de terreno em que ela é normalmente utilizada, pois em terrenos arenosos, o risco de recalques é maior.

Por fim, as estacas do tipo Hélice contínua apresentaram PPV's baixos, mesmo a 2 m de distância, e quando é verificada sua influência em edificações de boa qualidade, os níveis podem ser considerados aceitáveis. Porém, em relação a estruturas de baixa qualidade, as vibrações geradas a 2 m são passíveis de promover danos.

Conforme o esperado, as velocidades decrescem à medida que a distância entre a estaca e o ponto medido cresce. Pode-se notar nos gráficos que os pontos próximos da fonte de excitação apresentam maiores intensidades das ações dinâmicas do que os mais afastados. Diferenças do PPV em estacas do mesmo tipo, à mesma distância podem ser tidas como variações no tipo de material em que a cravação foi executada, ou mesmo à superfície em que os sensores foram dispostos.

Na comparação dos resultados obtidos com o geofone e o celular, foi verificado uma compatibilidade entre os dados. O comportamento dos dados no gráfico, tendem a mesma linha de tendência, porém existe uma diferença entre os resultados que devem ser melhor estudadas. Com base em uma análise preliminar, tal variação pode ser vista como a não utilização de uma

metodologia definida para realizar às medições, podendo gerar movimentações do aparelho durante as medições.

Os resultados preliminares das medições com o geofone foram bastantes conclusivos para verificação da influência da distância e do tipo de material nas vibrações geradas. É necessário um estudo mais aprofundado quanto a influência do tipo de material na propagação da vibração. A aplicação dos métodos empíricos para propagação da vibração pode esclarecer dúvidas quanto a propagação, assim se faz necessário a aplicação dos resultados obtidos nos métodos e a verificação da influência dos fatores geotécnicos do solo na propagação das vibrações.

Com base nos resultados positivos do Celular, foi desenvolvido o app “Analisador de Vibrações”, porém não foram realizados testes para verificar sua precisão e a falta de uma metodologia para medição das vibrações reduzem a confiabilidade dos resultados nele obtidos. A utilização do app deve ser como um equipamento de auxílio na medição da vibração com equipamentos de maior precisão, como o geofone, e resultados obtidos no app não devem ser utilizados como parâmetros de decisão em projetos de geotecnia e cálculo estrutural.

Como sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar a influência do tipo de solo na propagação de vibrações geradas na cravação de estacas;
- Comparar resultados de PPV medidos com obtidos através da modelagem numérica, pelo método dos elementos finitos;
- Relacionar os níveis de vibração gerados ao longo da profundidade da estaca com os diagramas de cravação;
- Calibrar o aplicativo/acelerômetro do celular em relação a um geofone;
- Desenvolver uma metodologia para medição com o celular que reduza a quantidade de erros.

## 7. REFERÊNCIAS

AASHTO. **Standard recommended practice for evaluation of transportation-related earthborne vibrations**. Washington DC. 1990.

ACHUHAN R., Subashi De Silva G.H.M.J. and Sudhira. **Comparison between ground vibrations induced by impact piling and bored piling**. International Conference on Sustainable Built, Kandy, Sri Lanka, 2016.

A.F.T.E.S. GROUPE DE TRAVAIL. **Racommandations concernant l'étude des effets sismiques de l'explosif. Tunnels et Ouvrages Souterrains (2)**. p. 89-93, 1974.

ALBINO, J. P. C.; LIMA, N. A.; SOUZA, V. C. M. **Acidentes Estruturais na Construção Civil**. Editora Pini, Volume 1, São Paulo/SP, 1996.

ALHEIROS, M. M. et al. **Carta geotécnica da cidade do Recife: Subárea Geologia/Geologia de Engenharia – relatório final**. 1990a. Relatório - Convênio FINEPFNDCT/ LSI-UFPE, 1990.

AMERINI, I., BESTAGINI, P., BONDI, L., CALDELLI, R., CASINI, M., & TUBARO, S. . Robust smartphone fingerprint by mixing device sensors features for mobile strong authentication. **Electronic Imaging**, v. 2016, n. 8, p. 1-8, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 9653: Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas**. São Paulo, 2005.

ATAEI, M.; SERESHKI, F. Improved prediction of blast-induced vibrations in limestone mines using Genetic Algorithm. **Journal of Mining and Environment**, v. 8, n. 2, p. 291-304, 2017.

ATHANASOPOULOS, G.A.; PELEKIS, P.C. Ground vibrations from sheetpile driving in urban environment: Measurement, analysis and effects on buildings and occupants. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 19(5), 371–387, 2000.

ATTEWELL PB, Selby A. R. and O'Donnell L. Estimation of ground vibration from driven piling based on statistical analyses of recorded data. **Geotechnical**, 1992.

ARDITO, J. C., **O uso do método de análise de ondas superficiais empregando fontes passivas e ativas**. Dissertação de mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e ciências Atmosféricas da universidade de São Paulo. Pp. 1-98, 2013.

AZOCAR, G. B. **Avaliação do método de trincheiras para redução de vibração na cravação de estacas pré-moldadas**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2017.

BACCI, D.C., LANDIM, P. M. B., ESTON, S. M., IRAMINA, W.S. Principais normas e recomendações existentes para o controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas. Parte I. REM - **Revista Escola de Minas**. v.1, n.56, p.51-57, 2003.

BARZILAI, A.; VANZANDT, T.; KENNY, T. Improving the performance of a geophone through capacitive position sensing and feedback. In: **American Society of Mechanical Engineers International Congress**, 1998.

BRITO, L.A. Avaliação das Principais Fontes de Vibração no Meio. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 233-249, 2014.

BS-7385 - Parte 2 - **Evaluation and measurement for vibration in buildings. Guide to measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings**. British Standard. 1990

DECKNER, F. **Ground vibrations due to pile and sheet pile driving**: influencing factors, predictions and measurements, in Department of Civil and Architectural Engineering. KTH, Royal Institute of Technology: Stockholm. p. 126, 2013.

DECKNER, F., VIKING, K., HINTZE, S. **Wave Patterns in the Ground**: Case Studies Related to Vibratory Sheet Pile Driving. *Geotechnical and Geological Engineering* December, Volume 35, Issue 6, pp 2863–2878, 2017.

DUTRA, L. H., **Estacas pré-fabricadas de concreto**: avaliação do reforço para tensões geradas na cravação, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

FALCONI, F. F. Cravação de estacas metálicas com martelos hidráulicos e vibratórios. **Conferência em tecnologia de fundações – CTF**, 2016.

FERREIRA, J. **Vibrações induzidas pela cravação de estacas. Análise e modelação numérica**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.

FIEGEL, G. L.; Farrell, T. M.. **Measurement of Vibration and Noise During the Installation of Rammed Aggregate Piers**. International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 9, 2008.

GOOGLE, D. 2020 “Conheça o Android Studio” **Developers**. Disponível em: <<https://developer.android.com/studio/intro>>. Acesso em: 12/01/2020.

GONÇALVES, C.; BERNARDES, G. P.; NEVES, F. S. **Estacas Pré-Fabricadas de Concreto**: teoria e prática. São Paulo, 2007.

GONÇALVES, C.; BERNARDES, G. P.; NEVES, F. S. **Estacas Pré-Fabricadas de Concreto**: Quebras, vibrações e ruídos. São Paulo, 2010.

GRIZI, A.; ATHANASOPOULOS-ZEKKOS, A.; WOODS, R. Ground vibration measurements near impact pile driving. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering** / Volume 142 Issue 8 – August, 2016.

GUSMÃO, A. D., GUSMÃO FILHO, J. D. A., OLIVEIRA, J. T. R. D., & MAIA, G. D. B. **Geotecnia no Nordeste**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2005.

GUSMÃO FILHO, J. A. **Fundações do conhecimento geológico à prática de engenharia**. Ed. Universitária, da UFPE, Recife, 1998.

HAMIDI, A.; ROOZ, A. F. H.; POURJENABI, M. Allowable Distance from Impact Pile Driving to Prevent Structural Damage Considering Limits in Different Standards. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, 01 February 2018, Vol.23(1), 2018.

KLENK, G.; NETO, L. R. Análise da cravabilidade de estacas através de simulações computacionais com uso da teoria da propagação da onda. **Revista Técnico-Científica**, v. 1, 2017.

LACY, H. S.; GOULD, J. P. Settlement from pile driving in sands. **Vibration problems in geotechnical engineering**: proceedings of a symposium sponsored by the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, New York, 152–173, 1985.

LOPES, F. R.; VELLOSO, D. A. **Fundações** - Volume completo. Oficina de Textos, 2012.

LOPES, I.; STROBBIA, C.; SANTOS, J. & ALMEIDA, I. 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, 2008.

LIDÉN, M. **Ground Vibrations due to Vibratory Sheet Pile Driving**. Master of Science Thesis, Division of Soil- and Rock Mechanics, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2012.

MADHESWARAN, C.K., and THANDAVAMOORTHY, T.S., **Field Investigations on Ground and Structural Vibrations during Prototype Pile Driving**. The Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, New York; April 13–17, 2004.

MAGALHÃES, P. H. L. **Avaliação dos métodos de capacidade de carga e recalque de estacas hélice contínua via provas de carga**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

MARANGON, M. **Geotecnia de fundações**. Disponibilizado pela Universidade Federal de , 2009.

MASSARSCH, K. Rainer; FELLENIUS, Bengt H.; BODARE, Anders. Fundamentals of the vibratory driving of piles and sheet piles. **Geotechnik**, v. 40, n. 2, p. 126-141, 2017.

Mi Fixer. 2016 “All About Accelerometer Sensor and Troubleshooting”. **Mi Community**. Disponível em: < <https://in.c.mi.com/thread-1415082-1-1.html>>. Acesso em: 12/01/2020.

MOHAMAD, R.; DOBRY, R. Settlements of cohesionless soils due to pile driving. **9th Southeast Asian Geotechnical Conference**, Southeast Asian Technological Society, Klong Luang, Pathum Thani, Thailand, 7-23–7-30, 1987.

MOUTINHO, C. M. R. **Controle de vibrações em estruturas de engenharia civil**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade do Porto, Porto, 2007.

MOHER D, LIBERATI A, TETZLAFF J, ALTMAN DG, ALTMAN D, ANTES G; PRISMA Group. **Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement**. *Ann Intern Med*, 2015.

MORAES, M. L. **Estacas de compactação para melhoramento de solos arenosos fofos e uso de penetrômetro dinâmico pesado na avaliação dos resultados**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória/ES, 2008.

MOORE P. J., Styles J. R., Ho W-H. **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, 1995.

NATANSON, A. 2015 “Monitoramento dos níveis de vibração e ruído em obras”. **ALEC**. Disponível em: <<http://alec.org.br/novo/rental/monitoramento-dos-niveis-de-vibracao-e-ruído-em-obras/#>>. Acesso em: 03/01/2020.

NORDAL, S. **PhD Course of Geodynamics**. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2009.

OLIVEIRA, M. S. **Influência geológico-geotécnica na escolha dos tipos de fundações do bairro de Boa Viagem/Recife e elaboração de banco de dados de medições de recalques em edifícios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica de Pernambuco (UPE), Recife, 2018.

PENICHE, B. S. V. **Utilização de ensaios sísmicos para a caracterização dinâmica local 2D**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2015.

PINHO, G.C.S. **Incidências de manifestações patológicas causadas por construções nas edificações vizinhas no município de Vitória – ES**. Vitória, 2012. 112f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo. 2012.

PLÁCIDO, D. L. **Modelagem de uma aplicação web para gerenciamento e apoio ao desenvolvimento do futebol amador no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina-IFSC. Florianópolis, Santa Catarina. 2019.

PRADELOK, S.; ŁUPIEŻOWIEC, M.; BĘTKOWSKI, P.; RUDZIK, A. In-situ testing of vibration propagation while driving the prefabricated piles. **14th SGEM GeoConference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining**, 2014.

RESENDE, L. M. d. **Análise do risco de danos por vibração mecânica nos monumentos setecentistas do caminho tronco de Ouro Preto**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

ROCKHILL, D. J.; BOLTON, M. D.; WHITE, D. J. Ground-borne vibrations due to press-in piling operations. In: **Proceedings of the British Geotechnical Association International Conference on Foundations, Dundee, Scotland**. p. 743-756. 2003.

SANTOS, R.A.M. **Análise dos tipos de Fundações na Região Metropolitana do Recife de 2000 a 2010**. Projeto Final de Curso (TCC). Escola Politécnica de Pernambuco (UPE), Recife, 2011.

SANTOS, P., R., dos. **Definição intervalar do método de integração dos trapézios**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2017.

SENA, R. D.; OLIVEIRA, J. T. R.; GUSMÃO, A. D. O uso do martelo vibratório em obras no Grande Recife. **XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG**, 2016.

SEQUEIRA, C. Sensores para medições de vibrações mecânicas – acelerômetros. **Manutenção**, Nº116, p. 4-6, 2013.

SILVA, C. B. L. **Estudo do efeito vibratório Causado por Cravação de estacas**. Dissertação de Mestrado. Coppe/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1996.

DA SILVA, P. M. S. R. **Estacas cravadas–pré-fabricadas**. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2015.

SNV (Swiss Association for Standardization). **Vibrations— Vibration effects in buildings**. SN640312, Winterthur, Switzerland. 1992.

SOARES, W. C. **Estacas de compactação para melhoria de solo**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.

STEWART, J. **Cálculo**, Volume I. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

Steel Piling Group, **PILE DRIVING INSTALLATION METHODS**. **Steel Piling Group**, 2018. Disponível em: <<https://www.steelpilinggroup.org/guidance/construction/pile-driving-installation-methods/>>. Acesso em: 01 de nov. de 2018.

SVINKIN, M. R., SHAW, A. G., & WILLIAMS, D. Vibration environmental effect of construction operations. **VibraConsult**, Cleveland, EUA. 2003.

SVINKIN, M. Minimizing construction vibration effects, **Practice Periodical on Structural Design and Construction**. ASCE, V. 9, No. 2, pp. 108-115. 2004.

SVINKIN, M. Tolerable limits of construction vibrations. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, 17 May Vol. 20, Issue 2, 2015.

SVINKIN, M. A choice of proper criteria for soil and structural vibrations from construction and industrial sources. **Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**, Seoul, 2017.

SU, Xing; TONG, Hanghang; JI, Ping. Activity recognition with smartphone sensors. **Tsinghua science and technology**, v. 19, n. 3, p. 235-249, 2014.

UROMEIHY, A. **Ground vibration measurements with special reference to pile driving**. Tese de Doutorado. Durham University, 1990.

VIKING, K.; DIETEL, R.; ROBERTS, T. A case study of vibratory pile installation monitoring of a precast prestressed concrete pile. In: **Proceedings, DFI 29th Annual Conference on Deep Foundations**, Vancouver, BC, Canada. p. 273-281, 2004.

WAGNER, M. R. **Situações de vizinhança no condomínio edilício**: soluções de conflito, mediação e paz social - aspectos filosóficos, urbanísticos e ambientais. Dissertação (Mestrado em Direito) - Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2014.

WANDERLEY, E. Recife vertical: os 10 prédios mais altos da capital pernambucana. **Diário de Pernambuco**, Recife, 2016. Disponível em: <<https://curiosamente.diariodepernambuco.com.br/project/recife-vertical-os-10-predios-mais-altos-da-capital-pernambucana/>>. Acesso em: 20 de dez. de 2019.

YONG TAN; Lan, Hongliang. Vibration effects attributable to driving of PHC pipe piles. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 26, n. 5, p. 679-690, 2011.