

UNIVERSIDADE
CATÓLICA
DE PERNAMBUCO



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE MESTRADO

RAÍSSA BARROS VIEIRA ANDRADA

**ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES GERADAS PELA CRAVAÇÃO DE ESTACAS EM
OBRAS DA CIDADE DO RECIFE.**

RECIFE-PE

2023

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE MESTRADO

Raíssa Barros Vieira Andrada

**ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES GERADAS PELA CRAVAÇÃO DE ESTACAS EM
OBRAS DA CIDADE DO RECIFE.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação da Universidade Católica de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof.º Dr. Joaquim Teodoro
Romão de Oliveira

Coorientador: Prof.º Dr. Alexandre Duarte
Gusmão

Recife
2023

A553a Andrada, Raíssa Barros Vieira.

Análise das vibrações geradas pela cravação de estacas em obras da cidade do Recife / Raíssa Barros Vieira Andrada, 2023.

123 f. : il.

Orientador: Joaquim Teodoro Romão de Oliveira.

Coorientador: Alexandre Duarte Gusmão.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Mestrado em Engenharia Civil, 2023.

1. Estacaria (Engenharia civil). 2. Fundações (Engenharia).
3. Geofone. 4. Vibração. I. Título.

CDU 624.154

Pollyanna Alves - CRB-4/1002

TERMO DE APROVAÇÃO

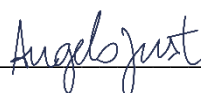
RAÍSSA BARROS VIEIRA ANDRADA

ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES GERADAS PELA CRAVAÇÃO DE ESTACAS EM OBRAS DA CIDADE DO RECIFE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP) para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. A presente dissertação foi defendida e aprovada em 12 de Abril de 2023 pela banca examinadora constituída pelos professores doutores:



Orientador(a) e Presidente da Banca: Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira



Titular Interno(a) – Prof. Dr. Angelo Just Costa e Silva



Titular Externo(a) – Prof. Dr. Paulo José Rocha de Albuquerque

Recife

2023

DEDICATÓRIA

A minha avó, Emerinda (in memoriam) e a minha
madrinha, Lourdes (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, dono do saber, que esteve sempre comigo. Obrigada por me dar forças e sabedoria para chegar até aqui e obrigado pelo que ainda está por vir.

À minha família, em especial minha mãe, Elizabeth, que sempre foi a minha maior incentivadora para os estudos e quem tornou o sonho de me tornar mestre acessível. Ao meu pai, Carlos Henrique pelos conselhos e sabedoria e minha irmã Larissa, por me ouvir nos momentos de aflição.

À Joaquim Oliveira, meu orientador, sócio e amigo, pelo suporte, incentivo, sabedoria, conhecimento e confiança depositada. Minha gratidão também à família Oliveira, Fernanda e Mariana, por me acolherem e serem presentes durante todo o processo.

À Pedro Oliveira, minha gratidão por se manter “rocha” durante os bons e maus momentos. Por ter sido o primeiro a acreditar em mim e ser um grande incentivador a ser uma profissional e pessoa melhor.

Ao engenheiro, Alexandre Gusmão, e a empresa Gusmão engenheiros e associados minha eterna gratidão pela parceria e oportunidades. Um agradecimento, também, aos colegas engenheiros que fazem parte da empresa e me ajudaram durante o processo.

À Ramon Burgos e Filipe Negromonte pela companhia, ensinamentos, apoio moral e físico (ajudando a carregar os equipamentos) e por tornarem as medições realizadas mais leves e divertidas.

Ao amigo Pedro Brasileiro pela amizade desde os tempos do ensino médio, pelos “puxões de orelha”, pela prestatividade, apoio durante todos esses anos e principalmente nessa reta final do mestrado.

Aos meus amigos e colegas mestrandos e mestres, meu muito obrigada pelas experiências vividas. Um agradecimento especial aos amigos: Guilherme Pereira,

Cláudio Campelo, Cristiano Romero, Klayne Santos, Jeovana Souto Maior, Antônio Paulo Carvalho e Marcelo Sabino.

Aos meus queridos chefes, Giovani Ribeiro, Marcel Fortes, Cíntia Rafaela e Fabiana Pontual, pela convivência na qual eu pude crescer como profissional e pessoa. Por, sempre me incentivarem a não parar de estudar e serem excelentes líderes que tenho como exemplo e levarei seus ensinamentos para o resto da vida.

Agradeço às Construtoras Rio Ave, em especial o Engenheiro Fernando. À Moinho Recife em especial o Engenheiro Fabian.

À empresa GNG fundações especiais pela receptividade e suporte em todas as obras. Em especial ao engenheiro José Neto e Harley Petrillo e aos funcionários pela ajuda.

A todos que, de alguma forma, contribuíram de forma direta e indireta para a realização deste trabalho, os meus mais sinceros agradecimentos.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação”.

(Simone de Beauvoir)

RESUMO

A escolha do tipo de fundação quando se pretende construir um empreendimento imobiliário é de extrema importância uma vez que, sua execução e cravação podem interferir nas edificações vizinhas tanto na perturbação do cotidiano com a geração de vibrações e sons quanto na questão de impactos estruturais nas residências vizinhas. Esses fatores acarretam uma série de conflitos judiciais entre a construtora e os residentes vizinhos. O presente trabalho visa estudar e analisar, por meio de ensaios realizados *in loco* utilizando o aparelho geofone, a aceleração das partículas em um meio nas direções: longitudinal, sagital e transversal que são expressos em velocidade de pico de partícula (PPV) e frequência. Essas medições foram realizadas em diversas obras, denominadas de estudo de casos, localizadas na cidade do Recife e Região Metropolitana (Ipojuca), Pernambuco. Cada estudo de caso continha um tipo de estaca e execução ou cravação a ser medida sendo elas: estaca pré-moldada em concreto, estaca metálica, estaca raiz, estaca em argamassa e hélice contínua. Com o auxílio do geofone, as medições foram realizadas a uma certa distância de segurança dos equipamentos de cravação/execução. Os resultados e valores de velocidade de pico de partícula e frequência foram analisados, e comparados com normas internacionais vigentes e com outros estudos de caso existentes. Foi verificado que as estacas do tipo pré-moldadas em concreto e o método de cravação utilizando o martelo hidráulico apresentaram os valores mais elevados de velocidade de pico de partícula. Em relação à frequência, as estacas do tipo raiz apresentaram os valores mais altos. Valendo ressaltar que mesmo não obtendo o valor de pico de partícula mais elevado, as estacas do tipo metálica também obtiveram valores significativos quanto a sua velocidade de pico de partícula.

Palavras-chaves: PPV; Vibração; Fundações; Geofone.

ABSTRACT

The choice of the type of foundation when intending to build a real estate development is extremely important since its execution and nailing can interfere with neighboring buildings both in the disturbance of daily life with the generation of vibrations and sounds and in the issue of structural impacts on homes. neighbors. These factors lead to a series of legal disputes between the construction company and neighboring residents. The present work aims to study and analyze, through tests carried out in situ using the geophone device, the acceleration of particles in a medium in the directions: longitudinal, sagittal, and transversal, which are expressed in Peak Particle Velocity (PPV) and frequency. These measurements were carried out in several works, called case studies, located in the city of Recife and Metropolitan Region (Ipojuca), Pernambuco. Each case study contained a type of pile and execution to be measured, named: precast concrete pile, metal pile, root pile, mortar pile and continuous flight auger. With the aid of the geophone, measurements were carried out at a certain safe distance from the execution equipment. The results and values of peak particle velocity and frequency were analyzed and compared with current international standards and other existing case studies. It was found that precast concrete piles and the method using a hydraulic hammer presented the highest values of peak particle velocity. Regarding frequency, root-type cuttings presented the highest values. It is worth noting that even though they did not obtain the highest particle peak value, the metallic type piles also obtained significant values in terms of their peak particle velocity.

Keywords: PPV; Vibration; foundations; geophone.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Tipos de movimentos vibratórios: a) movimento Harmônico; b) movimento periódico.	23
Figura 2 –	Tipos de movimentos vibratórios: a) movimento Aleatório; b) movimento Transiente	24
Figura 3 –	Tipos de Ondas Sísmicas	25
Figura 4 –	Propagação das ondas P e S no solo	26
Figura 5 –	Deslocamentos característicos das ondas R e L	28
Figura 6 –	Diagrama proposto pela AFTES das vibrações admitidas para as três classes de estrutura.	40
Figura 7 –	a) Segmento de perfil a ser recortado b) Detalhe da emenda com talas e solda	43
Figura 8 –	Etapas de Execução da Estaca Hélice Contínua: a) Perfuração b) Concretagem e c) Colocação de armadura	44
Figura 9 –	Imagem do maquinário executando a escavação para a estaca do tipo hélice contínua	45
Figura 10 –	Imagem de execução da estaca raiz	46
Figura 11 –	Estacas pré-moldadas em concreto	47
Figura 12 –	Processo executivo de estaca de compactação por vibro- substituição	48
Figura 13 –	Cravação à Percussão: a) Bate estaca com peso suspenso e b) Bate estaca com peso sob a estaca	50
Figura 14 –	Execução de estaca raiz	51
Figura 15 –	Processo de perfuração do solo de forma rotativa	52
Figura 16 –	Desenho esquemático de um geofone	55
Figura 17 –	Demonstração de geofone em obra	58
Figura 18 –	Sensor de geofone em obra	58
Figura 19 –	Demonstração de geofone e sensores em obra para medição de vibração	60
Figura 20 –	Imagens de Satélite das quatro Obras para Análise de Velocidade de Pico de Partícula	61

Figura 21 –	Imagens de satélite das três obras localizadas na cidade do Recife	62
Figura 22 –	Local do empreendimento no qual foi realizado o estudo de caso 1	63
Figura 23 –	Execução de estacas em obra: a) Vista Superior e b) Vista Frontal	63
Figura 24 –	Desenho esquemático apresentando locação das sondagens com cotas da boca de furo (mangueira de nível) de sondagem.	65
Figura 25 –	Perfil do subsolo da região na qual foram realizadas as medições	66
Figura 26 –	Imagens de Satélite dos Antigos Silos do Moinho de Trigo no Recife Antigo com círculo em Vermelho Determinando a Zona de Obra, com círculo e seta amarelos sob Vistas: a) Superior e B) Frontal	69
Figura 27 –	Locação de sondagem em edifício garagem - estaca tipo hélice contínua com Furos SP-01, SP-03, SP-04, SP-06, para a primeira etapa, e furos SP-02, SP-05 e SP-07 para a segunda etapa.	71
Figura 28 –	Perfil de Sondagem de área com cravação de estaca hélice contínua.	72
Figura 29 –	Locação de sondagem da região com cravação de estaca raiz	73
Figura 30 –	Perfil de sondagem de região com cravação de estaca raiz	74
Figura 31 –	Imagens de Satélite da Obra 3: a) Antiga Construção no Local, b) Terreno com Antiga Construção Demolida e c) Zoom da Antiga Construção.	78
Figura 32 –	Locação de sondagem na Obra 3	79
Figura 33 –	Perfil de sondagem do caso de Obra 3	80
Figura 34 –	Imagens de Satélite da Obra 4 com Vistas: a) Superior Frontal e b) Superior Lateral	83
Figura 35 –	Locação dos furos de sondagem da Obra 4 com furos SP 01, SP 02, SP 03, SP 04 e SP 05	84

Figura 36 –	Perfil de Sondagem do caso de Obra 4	85
Figura 37 –	Sensor fixado de forma horizontal em muro de divisão entre terrenos	86
Figura 38 –	Posicionamento do equipamento para medição na sapata P 57.	87
Figura 39 –	Gráfico PPV x Distância proveniente de dados do Caso de Obra 1.	90
Figura 40 –	Gráfico da Velocidade de Partícula x Frequência medidos em Obra 1.	93
Figura 41 –	Gráfico PPV x Distância proveniente de dados do Caso de Obra 2.	100
Figura 42 –	Gráfico da Velocidade de Partícula x Frequência medidos em Obra 2.	101
Figura 43 –	Gráfico PPV x Distância proveniente de dados do Caso de Obra 3.	103
Figura 44 -	Gráfico da Velocidade de Partícula x Frequência medidos em Obra 3	105
Figura 45 -	Resultados medidos do PPV (mm/s) ao longo da distância – Caso de Obra 4	107
Figura 46 -	Gráfico da Velocidade de Partícula x Frequência comparados entre os bancos de dados existentes com os novos dados adquiridos.	108
Figura 47-	Gráfico PPV x Distância proveniente de dados existentes x dados medidos	109
Figura 48 -	Gráfico da Velocidade de Partícula x Frequência entre os bancos de dados existentes com os novos dados adquiridos de medições de estacas metálicas cravadas por impacto.	110
Figura 49 -	Gráfico PPV x Distância proveniente de dados existentes x dados medidos de estacas metálicas com cravação por impacto.	111

Figura 50 -	Gráfico da Velocidade de Partícula x Frequência comparados entre os bancos de dados existentes com os novos dados adquiridos de medições de estacas tipo hélice contínua.	112
Figura 51 -	Gráfico PPV x Distância proveniente de dados existentes x dados medidos de estacas hélice contínua	113
Figura 52 -	Resumo das medições realizadas e aprovação nas normas.	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Diferentes Velocidades de Pico de Partículas de Acordo com Normas	29
Tabela 2 –	Modelos para Previsão de Vibração	35
Tabela 3 –	Limites Recomendados para Risco de Dano em Construções com Vibração de Estado Estacionário	37
Tabela 4 –	Resumo das medições do Caso de Obra 1 - PPV	89
Tabela 5 –	Resumo Medições de Frequência - Obra 1	92
Tabela 6 –	Resumo de medição do Caso de Obra 1 – PPV e Frequências – Pilar 1, Estaca 1	94
Tabela 7 –	Resumo das medições do Caso de Obra 1 – PPV e Frequências – Pilar 2, Estaca 2	95
Tabela 8 –	Resumo das medições do Caso de Obra 1 – PPV e Frequências – Pilar 3, Estaca 1	96
Tabela 9 –	Resumo das medições do Caso de Obra 1 – PPV e Frequências – Pilar 4, Estaca 1	97
Tabela 10 –	Resumo das medições do Caso de Obra 1 – PPV e Frequências – Pilar 5, Estaca 1	98
Tabela 11 –	Resumo das medições do Caso de Obra 1 – PPV e Frequências - Estacas em hélice contínua	99
Tabela 12 –	Resumo das medições do Caso de Obra 3 - PPV	102
Tabela 13 –	Resumo Medições de Frequência - Obra 3.	104
Tabela 14 –	Resultados das medições da vibração no solo	106
Tabela 15 –	Resultados das medições da vibração na parede	106

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Resumo dos limites de PPV's abordados por normas estrangeiras	39
Quadro 2 –	Quantitativos Totais das Torres "A" e "B"	68
Quadro 3 –	Resumo das características dos quantitativos das estacas do tipo hélice contínua.	75
Quadro 4 –	Resumo das características das estacas do tipo hélice contínua.	76
Quadro 5 –	Resumo das características dos quantitativos das estacas do tipo raiz	76
Quadro 6 –	Resumo das características das estacas do tipo raiz	76
Quadro 7 –	Resumo das características dos quantitativos das estacas do tipo pré-moldadas em concreto	81
Quadro 8 –	Resumo das características das cargas de trabalho permanente e total das estacas do tipo pré-moldadas em concreto.	82

LISTA DE ABREVIÇÕES E SIGLAS

AASTHO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABEF – Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia

AFTES – Association Française des Travaux en Souterrain

AMBS – Associação Brasileira de Mecânica dos Solos

ASTM – American Society for Testing and Materials

CFA - Continuous Flight Auger

ICSMFE - International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Amplitude da onda
a	Aceleração
APP	Aceleração de Pico de Partícula
D	Distância
dB	Decibéis
DPP	Deslocamento de Pico de Partícula
DR	Distância Radial
E	Energia
k	Constante de acordo com o tipo de cravação
LAeq	Nível de pressão sonora contínua equivalente
Hz	Hertz
PPV	Velocidade de Pico de Partícula
T	Período
t	Tempo
v	Velocidade
$v_{m\acute{a}x}$	Velocidade máxima
φ	Constante de fase
W	Energia de cravação do equipamento
ω	Velocidade angulas
x	Posição

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	18
1.1. JUSTIFICATIVA	19
1.2. OBJETIVOS	21
1.2.1. Objetivo Geral	21
1.2.2. Objetivos Específicos	21
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 ONDULATÓRIA E VIBRAÇÕES	22
2.1.1 Tipos de Ondas	22
2.1.1.1 Movimento Harmônico Simples	23
2.1.1.2 Movimento Periódico, Movimento Aleatório e Movimento Transiente	24
2.1.2 Propagação de Ondas	24
2.1.2.1 Ondas Sísmicas	25
2.1.2.2 Ondas Volumétricas	26
2.1.2.3 Ondas Superficiais	27
2.1.3 Velocidade do Pico de Partícula (PPV)	29
2.1.4 Métodos de Previsão de Vibração	31
2.2 NORMATIZAÇÃO	37
2.3 TIPOS DE ESTACAS	42
2.3.1 Estaca Metálica	42
2.3.2 Estaca Hélice Contínua	44
2.3.3 Estaca Raiz	47
2.3.4 Estaca Pré-moldada de Concreto	48
2.3.5 Estaca de Compactação	48
2.4.1 Cravação por Vibração	49
2.4.2 Cravação por Impacto – Cravação à Percussão	50
2.4.3 Cravação por Rotação	51
2.5 MELHORAMENTO DE SOLO	53
2.6 EQUIPAMENTOS PARA MEDIÇÃO DA VIBRAÇÃO	55
2.6.1 Geofone	55
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1 BANCO DE DADOS	57
3.2 CONFORTO ACÚSTICO	57
3.3 O GEOFONE	58
3.3.1 - Medições	58
3.4 ESTUDOS DE CASOS	62
3.4.1 Estudo de Caso 01 - Boa Viagem	63
3.3.1.1 - Localização e Características do empreendimento	63
3.4.1.2 – Características do subsolo	65

3.4.1.3 - Projeto de Fundações	68
3.4.2 – ESTUDO DE CASO 02 – Recife Antigo – Estaca Hélice e Estaca Raiz	69
3.3.2.1 - Localização e Características do empreendimento	69
3.4.2.2 – Características do subsolo	71
3.4.2.3 - Projeto de Fundações	77
3.4.3 – ESTUDO DE CASO 03 - Derby	78
3.3.3.1 - Localização e Características do empreendimento	78
3.3.3.2 – Características do subsolo	79
3.4.3.3 - Projeto de Fundações	83
3.4.4 – Estudo de Caso 04 – Porto de Galinhas	84
3.4.4.1 - Localização e Características do empreendimento	84
3.4.4.2 – Características do subsolo	85
3.4.4.3 – Projeto de Fundação	89
CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
4.1. OBRA 1	90
4.2 OBRA 2	95
4.3. OBRA 3	103
4.4. OBRA 4	107
4.5. COMPARAÇÃO DOS DADOS DE PESQUISA COM O BANCO DE DADOS EXISTENTE	110
4.6. RESUMO GERAL	116
CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUAÇÃO DA PESQUISA	118
5.1. OBRA 1	119
5.2. OBRA 2	119
5.3. OBRA 3	119
5.4. OBRA 4	119
5.5. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	120
REFERÊNCIAS	120

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento populacional e aumento da densidade demográfica do país, existe uma grande demanda de território para construções de infraestrutura e habitação. As cidades, principalmente, situadas em zonas costeiras vinculadas ao turismo “sol e praia” contaram um grande crescimento urbano desde os anos 60 até a modernidade. Esse crescimento acarretou o aumento gradativo de habitantes para essas áreas, causando como consequências: diversos problemas socioambientais e impactos sociais nas regiões próximas à construção do empreendimento. Na cidade do Recife - PE, a situação não poderia ser diferente. As construções vêm se desenvolvendo e a cidade chega a ser uma das áreas mais verticalizadas do Brasil (Silva, 2008), além de encontrar-se em constante crescimento.

À medida que há um aumento das construções nos grandes centros urbanos e em proximidades de outras estruturas, desenvolve-se um impacto considerável nas estruturas adjacentes. Tal fato se torna gradativamente mais comum e o tema se torna um tópico de interesse primordial.

No que diz respeito às cidades brasileiras, o padrão seguido no processo de urbanização litorânea visa a aproveitar as agradáveis paisagens oceânicas como incentivo à especulação imobiliária. Esse processo tem gerado um crescimento que tem pouco controle sobre a estrutura urbana e é dependente do mercado imobiliário e do atual ciclo econômico. Embora as cidades costeiras tenham acelerado seu desenvolvimento, também criaram desigualdades na posição dos diferentes grupos sociais e nas preferências dos consumidores que determinam a espacialização e a alocação urbana no longo prazo (Dantas et al., 2007).

Dessa forma, a decisão do tipo de fundação a ser executada em obra é fundamental importância e deve ser considerada uma série de fatores para essa escolha. Existe uma grande influência direta na qualidade de vida dos moradores, uma vez que a geração de ruídos e vibrações geram alguns incômodos e podem acarretar algumas alterações no solo devido ao bulbo de tensões. Ademais, muitas vezes, a escolha inapropriada do tipo de fundação, pode acarretar prejuízo aos moradores e construtoras porque as estruturas das edificações vizinhas podem ser comprometidas com a cravação das estacas. O que induz a realização da vistoria cautelar, evitando-se muitos problemas judiciais entre construtores e vizinhos (Morato, 2015).

Segundo Varela (2004), deve ser levado em conta que existe uma série de níveis de vibrações em limiar de percepção, baseados na amplitude e na frequência máxima de vibração – para um tempo de 5 a 20 minutos. Esses fatores vão de Limiar da percepção, desagradável a intolerável, e podem traduzir o que seria desconforto aos vizinhos das edificações. É importante ressaltar que não se deve confundir o desconforto que o ruído possa causar na realização de alguma atividade cotidiana como dormir, estudar, trabalhar e ter momentos de lazer com a percepção do fenômeno de vibração no ambiente. No Brasil, não existe uma norma que estabeleça limites de velocidade de partícula para desconforto humano, e esse varia muito de acordo com a percepção humana e se torna um estudo subjetivo. Nesse caso, são levados em consideração os pontos próximos das edificações no entorno da área da obra e das posições relativas aos locais de cravação das estacas, o manuseio de maquinário, entre outras características.

A grande maioria dos profissionais da engenharia tem o conceito de monitoramento de obras como um indicador de desempenho. Contudo, esse ponto de vista deveria ser alterado, visto que os monitoramentos mais servem como um controle tecnológico de obra – de forma positiva e construtiva – do que um mau indicativo de qualidade de obra. Inclusive, com o desenvolvimento de estudos sobre indicadores de desempenho (Todesco e Bogoni, 2011), existe uma série de equipamentos, métodos e inovações tecnológicas, os quais podem ser incorporados ao monitoramento para trazer benefícios relacionados à obra. O caso de monitoramento de vibrações, pois, pode ser considerado como um dos indicadores de desempenho.

1.1. JUSTIFICATIVA

Existe uma série de atividades relacionadas à construção civil que utiliza a energia de impacto ou vibração de energia, visando a melhoria e a modernização das construções. Como são os casos: da cravação de estacas, da detonação de explosivos, da perfuração, da compactação, dentre outros, mas pouco se argumenta sobre o controle das vibrações geradas por esses tipos de equipamento e aos reais danos às estruturas vizinhas (Norén-Cosgriff, et al. 2020).

Durante a época de pandemia devido ao coronavírus, esse tópico se tornou ainda mais relevante dado que a grande maioria da população desses grandes centros urbanos passou a adotar o estilo de trabalho remoto e, dessa forma, muitos trabalhadores passaram a exercer seus ofícios nas suas residências. Com isso, a

construção de edifícios e grandes empreendimentos nessas regiões causou um impacto ainda maior nas vizinhanças, visto que a maioria da população se encontrava em casa durante o horário de execução dos serviços. E esse fato, inclusive, afeta de forma significativa a qualidade de vida dos moradores. (Antczak e Horzela, 2021).

Recentemente, os estudos relacionados ao controle de vibração têm sido um assunto de extrema relevância visto que afeta uma parte significativa da população residente dos grandes centros e interfere diretamente na qualidade de vida dos moradores. Infelizmente, devido a escassa oferta de terrenos existentes nestes locais, passar por essa situação se torna inevitável. Afinal, é muito provável que construções de empreendimentos vizinhos tenham interferido no seu cotidiano em algum momento da vida (Domingo e Cândido, 2017; Lacerda, et al., 2005).

É de conhecimento da grande maioria dos engenheiros da cidade do Recife, que a cidade apresenta um solo com uma incidência de argilas moles e nível de água elevado, o que acarreta na utilização e preferência pelas fundações profundas. A associação do solo com predominância de argila mole e nível de água elevado introduz as condições que são necessárias para a propagação das ondas mecânicas. (Lúcio, 2010).

O trabalho em questão tem extrema importância visto que mesmo que se execute estacas em conformidade com as normas vigentes e com níveis de vibração do ruído (acima ou abaixo do permitido), a construção do empreendimento novo sempre irá gerar ansiedade nos moradores, os quais passarão a procurar algum dano estrutural em seus imóveis, causando sempre problemas entre a construtora e os vizinhos (Natanson, 2015).

Assim, com as medições e análises das velocidades de pico de partícula realizadas pelo geofone *in loco*, será possível analisar o impacto dessa etapa construtiva em várias distâncias diferentes e, dessa forma, analisar seu comportamento em estruturas próximas. Dessa forma, essa informação se torna mais acessível aos profissionais, os quais projetam os empreendimentos e tomam decisões importantes, como o tipo de estaca a ser utilizada no empreendimento a ser construído.

Quando essa análise é realizada juntamente aos estudos de impacto de vizinhança e vistoria cautelar, a construtora estaria resguardada para possíveis e futuros casos que possam argumentar sobre o comprometimento da construção pelo empreendimento. Portanto, esse fator economizaria além de custos judiciais tanto para a construtora quanto para os moradores vizinhos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

- Avaliar os dados obtidos através de medições de vibração de diversos tipos de estaca em casos de obras diferentes e comparar esses valores com normas vigentes nacionais e internacionais.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Coletar dados em obras com tipos de fundação diferentes com o aparelho geofone, visando a complementação de um banco de dados existente;
- Analisar os dados gerados principalmente a Velocidade de Pico de Partícula (PPV) máxima de cada cravação realizada;
- Comparar os valores de Velocidade de pico de partícula e frequências com as normas vigentes nacionais e internacionais;
- Obter conclusões através das análises realizadas e propor melhorias e novos estudos.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação divide-se em seis capítulos. A primeira parte contém a Introdução, seccionada em Considerações Iniciais, Justificativa e Objetivos Geral e Específicos. Nos Objetivos, descrevem-se os principais propósitos da dissertação.

Seguindo para o segundo capítulo, onde encontra-se a revisão bibliográfica a respeito dos tipos de estacas e tipos de execução de estacas utilizados durante os ensaios realizados. Além dos métodos de previsão de vibração, normas vigentes e aparelhagem utilizada para medição de vibração.

A terceira parte argumenta sobre os materiais e métodos utilizados para a realização dos ensaios em obras.

A quarta parte, destina-se à exposição dos estudos de casos realizados nas obras, com seus respectivos tipos de estaca e seu método de cravação, além de informações relevantes para a análise dos resultados.

Na quinta parte, são descritos os resultados dos ensaios realizados e comparação com as normas vigentes nacionais e internacionais.

No capítulo final são expostas as conclusões a partir das análises realizadas e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para uma maior compreensão das adversidades causadas pelas vibrações devido ao processo de cravação de estacas se faz necessário o conhecimento de um embasamento teórico relacionado à dinâmica e geodinâmica. Dessa forma, a revisão bibliográfica contém conceitos relacionados à dinâmica básica, a teorias e a conceitos sobre geodinâmica além da normatização desses comportamentos.

2.1 ONDULATÓRIA E VIBRAÇÕES

Historicamente comentando, Rao (2009) afirma que o interesse das pessoas pela vibração se deu a partir da descoberta dos primeiros instrumentos musicais como o apito e o tambor. O filósofo e matemático Pitágoras iniciou seus estudos em vibração a partir da aplicação de tensões iguais a cordas de comprimentos diferentes. Alguns registros de Galileu Galilei relatam suas pequenas contribuições em relação ao estudo das vibrações como a ideia do estudo com pêndulos a partir da observação dos movimentos pendulares de uma lâmpada em uma igreja na cidade de Pisa, na Itália. Rao (2009) afirma, ainda, que o historiador e astrônomo Zhang Heng, em 132 d.C., criou o primeiro sismógrafo do mundo devido à grande quantidade de terremotos na China. Esse aparelho era capaz de identificar a hora e a direção da ocorrência do terremoto. Portanto, apesar da baixa disponibilidade de recursos e das suas limitações, os estudos demonstraram uma elevada contribuição para o maior entendimento dos conceitos sobre vibrações.

2.1.1 Tipos de Ondas

Segundo Ferreira (2020), se faz possível definir vibração como: “todo o movimento que se repete com uma frequência associada em torno de uma posição de equilíbrio, sendo possível classificá-lo em termos de deslocamento (em relação à posição de equilíbrio), velocidade e aceleração”. Deckner (2013) conceitua que a vibração “é um movimento oscilatório em torno de um estado de equilíbrio e pode ser descrito sob a forma de deslocamento, velocidade ou aceleração”. O que são conceitos bem similares.

. De modo geral podem ser considerados quatro tipos de movimentos vibratórios:

- Harmônico ou sinusoidal;
- Periódico;

- Aleatório;
- Transiente

2.1.1.1 Movimento Harmônico Simples

O movimento oscilatório denominado harmônico, é considerado a forma mais simples de movimento vibratório. Halliday (2012) afirma que todo movimento que se repete em intervalos regulares, pode ser denominado de movimento periódico ou movimento harmônico. O movimento harmônico simples (MHS) é uma posição x em função do tempo (t). Essa posição depende das constantes de amplitude da onda (A), velocidade angular (ω) e constante de fase (φ). Dessa forma, pode ser representado na Equação 1.

$$x(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) \quad (1)$$

A derivada da Equação 1 representa a velocidade (v) do MHS, sendo representada pela Equação 2.

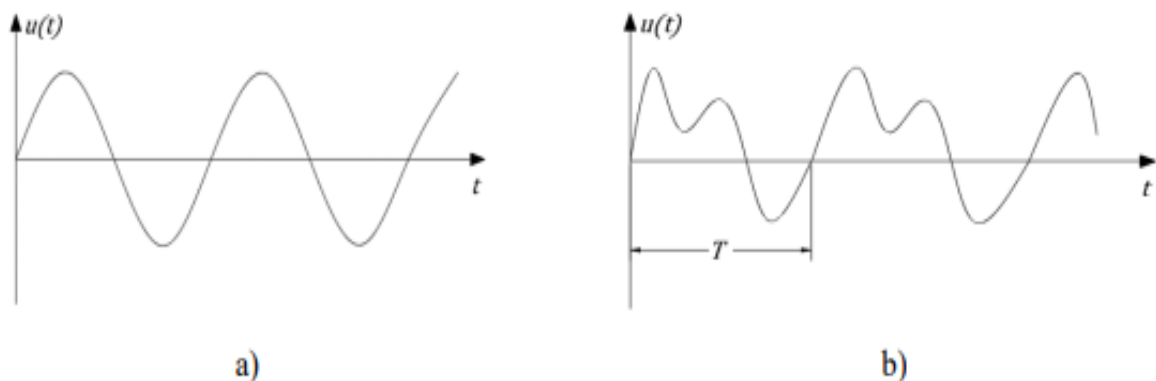
$$v(t) = \frac{dx}{dt} = -\omega \cdot A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi) \quad (2)$$

Finalmente, a segunda derivada da Equação representa a aceleração (a) no MHS, sendo representada pela Equação 3.

$$a(t) = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) \quad (3)$$

O movimento harmônico, também denominado de sinusoidal, pode ser representado através de uma função harmônica que pode ser verificado na Figura 1.

Figura 1 - Tipos de movimentos vibratórios: a) movimento harmônico; b) movimento periódico.

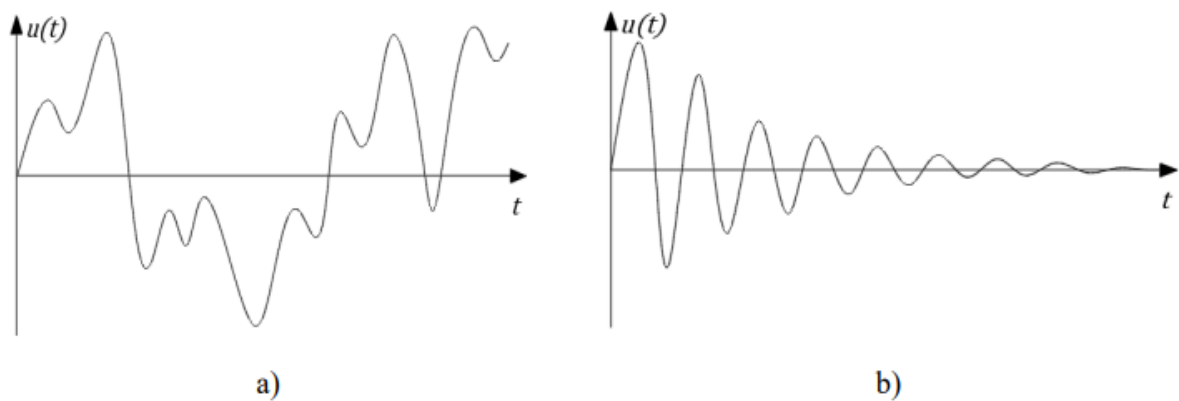


Fonte: Ferreira (2020)

2.1.1.2 Movimento Periódico, Movimento Aleatório e Movimento Transiente

De acordo com Ferreira (2020), o movimento periódico evidencia a repetição de um movimento vibratório em função de um período T , que torna possível a sua visualização na imagem infravermelha (Figura 2). Já o movimento aleatório representa um deslocamento sem qualquer padrão de repetição ao longo do tempo que possa ser reconhecido (Figura 2-a). Por último, o movimento transiente é caracterizado pela tendência de diminuição da amplitude com o decorrer temporal (Figura 2-b).

Figura 2 - Tipos de movimentos vibratórios: a) movimento Aleatório; b) movimento Transiente.



Fonte: Ferreira (2020).

2.1.2 Propagação de Ondas

Em relação a propagação das ondas através dos diversos métodos de cravação de estaca, entende-se que esse fenômeno ocorre devido a transferência de energia do equipamento de cravação para a estaca, o qual transfere energia para o maciço de solo. Essa propagação de ondas ocorre sob forma de ondas sísmicas. Contudo, existem outros tipos de ondas, as quais também fazem parte do processo de transferência de energia do martelo hidráulico ao solo.

2.1.2.1 Ondas Sísmicas

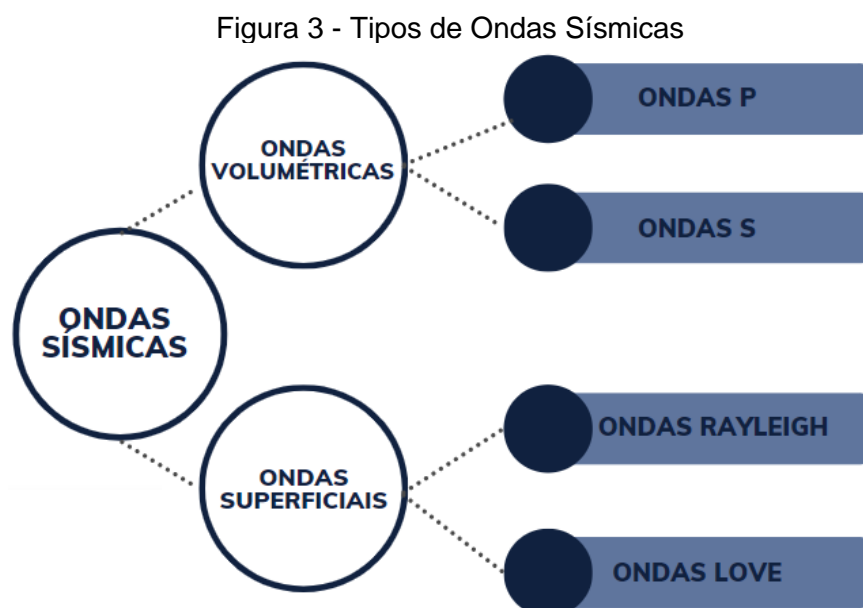
Em um meio sólido, qualquer ação proveniente de uma força que vá induzir o movimento de uma partícula, tem como consequência o movimento das partículas adjacentes e assim sucessivamente, o que resulta na formação de uma onda na qual se propaga ao longo do material, sendo o meio, nesse caso, considerado o solo. A propagação de ondas no meio consiste no transporte de energia sem que ocorra transporte material. (Deckner, 2013).

Castanheira (2016) afirma que a propagação das ondas acontece por conta da acumulação da energia potencial elástica e cinética na zona da perturbação, que vai induzir a deformação e movimento nas vizinhanças dessas zonas.

Há dois tipos de ondas sísmicas: as ondas volumétricas (que são consideradas ondas nas quais se propagam através do interior da Terra - dentro de um corpo ou em um meio de forma longitudinal e transversal) e as ondas superficiais (que são consideradas ondas que se propagam à superfície da Terra). (Lopes et al., 2008).

As ondas do tipo sísmicas volumétricas têm, segundo Dias (2008), na origem, uma vasta gama de frequências. Contudo, por conta de um aumento durante a propagação,

Se a frequência proveniente das ondas sísmicas, de acordo com Dias (2008), for análoga à frequência natural de vibração dos edifícios (que, de um modo geral, essa frequência, para edifícios de menor altura é maior do que comparada a frequência de edifícios mais altos), pode acarretar no fenômeno de ressonância, e estes prédios podem ser gravemente danificados ou destruídos. Como as ondas de alta frequência se atenuam mais rapidamente com a distância do epicentro do que as ondas de baixa frequência, os edifícios altos podem ser mais suscetíveis a danos do que as ondas de baixa frequência a distâncias relativamente grandes do epicentro (cerca de 100 quilômetros). Os edifícios baixos são mais sensíveis às vibrações sísmicas quando estão perto do local onde ocorreu o sismo. A Figura 3 demonstra os tipos de ondas sísmicas existentes e suas derivações.

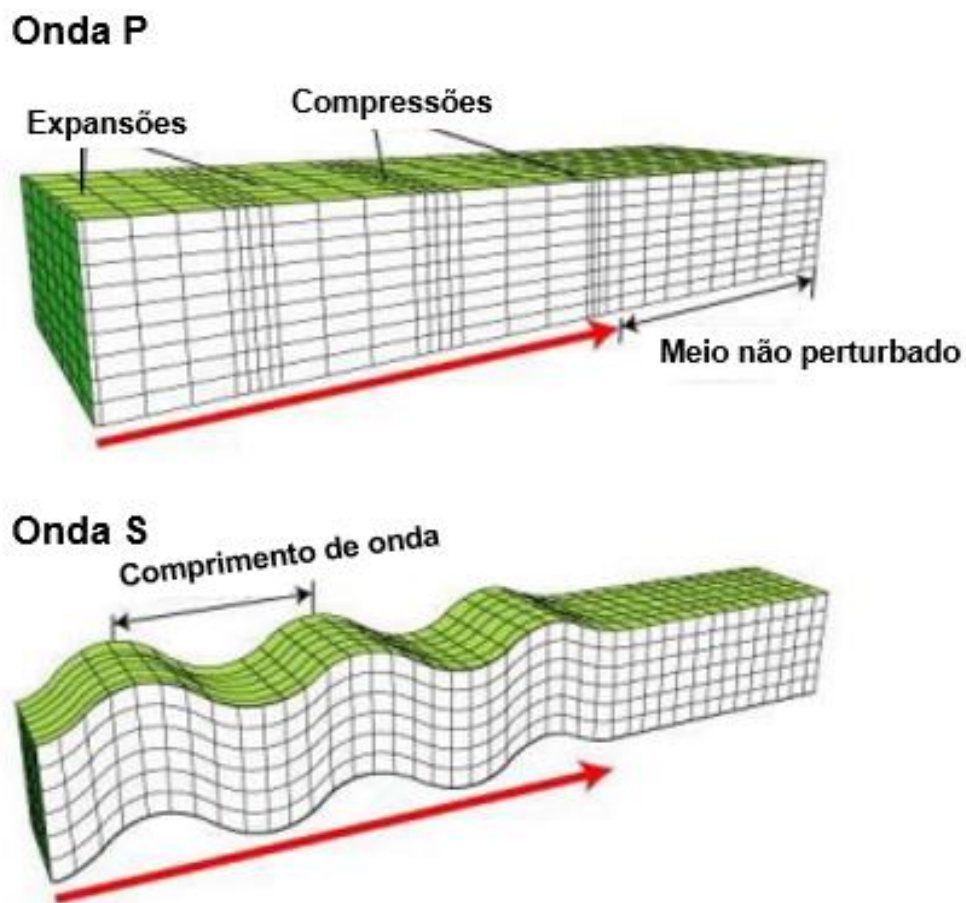


Fonte: Autor (2023).

2.1.2.2 Ondas Volumétricas

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. Lopes et al. (2008) conceitua que as ondas volumétricas podem se dividir em dois tipos: as Ondas Primárias - também denominadas de “Ondas P” e as Ondas Secundárias - denominadas também de “Ondas S”. No caso das ondas P, as partículas do meio vibram de forma paralela à direção de propagação (de forma longitudinal) e as Ondas S, as vibrações das partículas ocorrem de forma perpendicular à direção de propagação. A Figura 4 demonstra como as ondas do tipo S e P se propagam no solo.

Figura 4 - Propagação das ondas P e S no solo



Fonte: Adaptado Ferreira (2015).

2.1.2.3 Ondas Superficiais

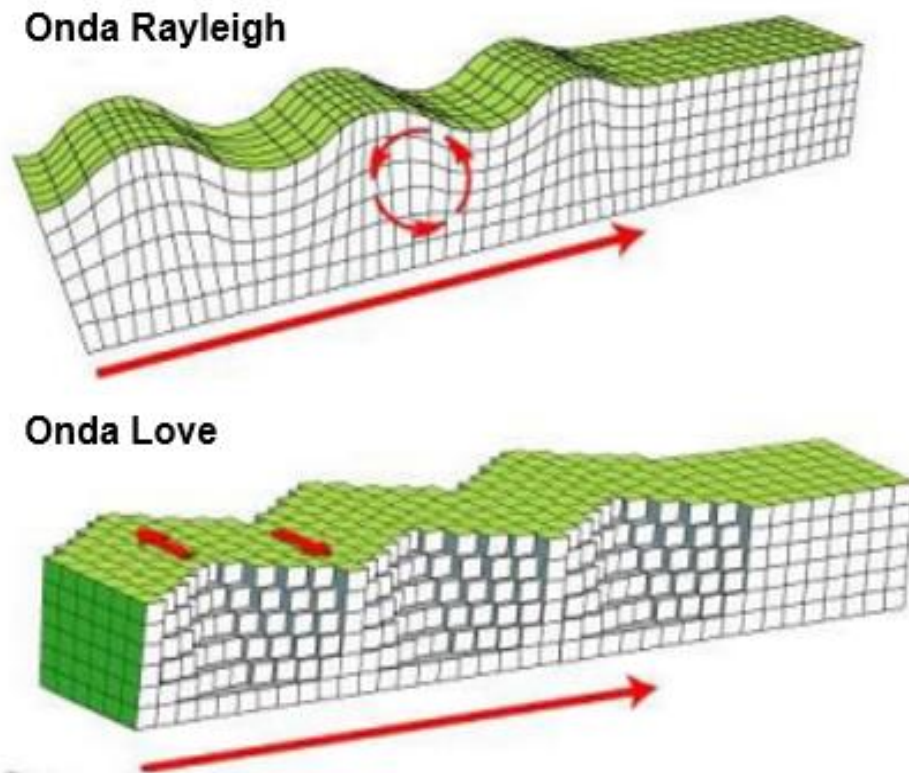
As ondas do tipo superficiais têm como principais características uma frequência baixa, longa duração e grande amplitude. Características essas que provocam no solo perturbações análogas às ondas marinhas. Contudo, esse tipo de onda só pode ser considerado caso o meio seja elástico, homogêneo e isotrópico. (LÚCIO, 2010).

Usualmente, as frequências das ondas superficiais não passam de 1 Hertz. Por conta dessa baixa frequência, longo período de duração e grande amplitude, as ondas superficiais podem ser consideradas ondas sísmicas mais destrutivas. Para esse tipo de onda, de acordo com Lúcio (2010), há a seguinte classificação:

- Ondas R, também denominadas de Ondas de Rayleigh, são denominadas assim devido ao título do físico inglês John William Strutt, Lord Rayleigh, no qual previu a existência desse tipo de onda. As ondas do tipo R se propagam do mesmo modo em que as ondas se propagam na superfície da água e pode ser entendida como uma combinação das vibrações do tipo P e do tipo S. Da mesma forma ocorre com as ondas do mar, no qual o deslocamento das partículas não se limita apenas à superfície livre do meio, mas as partículas que se encontram abaixo desta, também são afetadas pela passagem da onda. Lúcio (2010) também define que as ondas de Rayleigh são mais lentas do que as ondas volumétricas.
- Ondas L (ou ondas de Love), que são essencialmente ondas de cisalhamento polarizadas horizontalmente (o movimento das partículas processa-se apenas no plano horizontal). A energia destas ondas permanece nas camadas superiores da Terra por ocorrer reflexão interna total. São altamente destrutivas. A designação “ondas de Love” provém do nome do físico inglês Augustus Edward Hough Love (1863-1940), que em 1911 desenvolveu um modelo matemático destas ondas.

Na Figura 5 a seguir, pode-se observar os deslocamentos característicos dos tipos de onda L e onda R.

Figura 5 - Deslocamentos característicos das ondas R e L



Fonte: Adaptado Ferreira (2015).

2.1.3 Velocidade do Pico de Partícula (PPV)

Após a revisão bibliográfica a respeito da propagação de ondas, ressalta-se nesse item a questão da quantificação dessas vibrações visando atentar para possíveis danos que as mesmas podem ocasionar nas estruturas.

A variável utilizada para quantificação da vibração em uma superfície é denominada de “Velocidade do Pico de Partícula” (ou a sigla PPV), dado que tem o conceito relacionado ao conceito de tensão, e sendo também esse valor diretamente ligado aos principais danos estruturais. No caso da aceleração, esta estaria relacionada com a deformação sendo adotada por sismologistas em análises de terremotos (ATTEWELL; SELBY; UROMEIHY, 1989).

A velocidade de pico de partícula (PVP) indica o máximo valor do movimento de uma partícula em um ponto da superfície ou de uma estrutura. A PPV deve ser analisada pelo vetor resultante das medidas nos três eixos ortogonais (X, Y, Z) em função do

tempo, mas haverá situações em análises estruturais em que velocidades em eixos específicas devem ser monitoradas. (ATTEWELL; SELBY; O'DONNELL, 1992).

Outro conceito pouco abordado, mas que possui grande eficiência seria o conceito de frequência de vibração de partícula, que segundo a NBR 9653 (2018) conceitua como “o número de oscilações por segundo em que o terreno vibra conforme energia sísmica criada pela detonação de explosivos que passa por um ponto determinado, obtido a partir da análise do registro de velocidade de vibração de partícula, dado em hertz (Hz)”.

A amplitude da vibração pode ser mensurada em modos como nível pico-a-pico, nível de pico, nível médio e o nível quadrático médio ou valor eficaz. Para a determinação do valor de velocidade de pico de partícula (PPV) utiliza-se a medição através de pico-a-pico. (WENG et al. 2020)

Weng et al. (2020) determina alguns parâmetros sobre as diferentes velocidades de pico de partículas consideradas de acordo com o país e as normas utilizadas em cada país no qual pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Diferentes Velocidades de Pico de Partículas de Acordo com Normas Internacionais

Norma	País	Ano	Componente do Pico de Velocidade de Partícula (PPV) considerada	Observações
BS 7385-2	Reino Unido	1993	Componente máxima de PPV = máximo (velocidade longitudinal, velocidade vertical e velocidade radial)	Limite para danos estruturais devido à vibração transitória
DIN 4150-3	Alemanha	2016	Componente máxima de PPV = máximo (velocidade longitudinal, velocidade vertical e velocidade radial)	Para vibrações contínuas, o pico da velocidade de partícula da direção horizontal é considerada
SS 02 52 11	Suécia	1999	Componente máxima de PPV = velocidade vertical máxima • fator de construção • fator de material • fator de solo	A velocidade do pico de partícula é futuramente corrigida, aplicando fatores de construção, de material e de solo
SN 640-312a	Suíça	1992	Componente máxima de PPV = velocidade vertical máxima	Recomendações de 4 categorias de estruturas são dadas em base aos diferentes tipos de fontes vibracionais

Fonte: Weng et al (2020)

2.1.4 Métodos de Previsão de Vibração

As patologias provenientes de vibrações estruturais no Brasil, nunca foram alvos de grandes investimentos em aprofundamentos teóricos ou até em tecnologias de última geração, visto que por o Brasil ser um país com baixa incidência de terremotos, furacões e fenômenos causadores de vibrações não há um incentivo para o estudo do assunto (LÚCIO, 2010).

Existem aparelhos para a realização da medição das vibrações emitidas pelos equipamentos de cravação de estaca, e existem métodos relativamente antigos que fazem uma previsão da velocidade do pico de partículas. De acordo com o Weng et al. (2020) os métodos que preveem e estimam vibrações de construções são estudados desde a década de 60, e existem vários tipos de métodos de previsão de vibração.

Attewell e Farmer (1973)

O método de Attewell e Farmer de 1973 é considerado o primeiro método registrado sobre o método de previsão de Velocidade de Pico de Partícula (PPV). Esse método, de acordo com Burgos (2020) foi desenvolvido de forma empírica com a realização de regressão linear com os dados obtidos após diversas análises provenientes de ensaios de medição de vibração utilizando as estacas por impacto. A partir das análises, foi verificado que para a obtenção do valor de velocidade de pico de partícula (PPV) eram necessários os dados de distância da fonte de vibração, energia gerada pelo equipamento de cravação e uma constante denominada de “k” que dependerá do tipo de cravação – sendo: vibração – 0,7; cravação por impacto – entre 1,0 e 0,5). A fórmula desenvolvida por Attewell e Farmer pode ser visualizada na Equação 4 apresentada abaixo:

$$PPV = K \times \frac{\sqrt{W}}{D} \quad (4)$$

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 (No caso do martelo de impacto, considera-se o peso do pilão multiplicado pela altura de queda, e para vibração considera-se a frequência multiplicada pela pressão hidráulica máxima);

D = Distância (m).

Wiss (1981)

Outra abordagem semelhante à de Attewell e Farmer de (1973) foi a abordagem escolhida por Wiss, em 1981, que se estendeu pelo modelo preditivo empírico inicial em (1967) “for driven pile applications as per equation”. Nesse caso, não foi definido nenhum valor específico para a constante de proporcionalidade (k) ou taxa de atenuação (n). Com base em observações sucessivas e literatura da época, foi observado, por Wiss, que a faixa típica da taxa de atenuação se encontra entre os valores de 0,80 e 1,70. Esses valores variam de acordo com as diferentes condições do solo. A Equação 5 abaixo demonstra o modelo adotado de acordo com Wiss (1981):

$$\text{Log (PPV)} = \text{log } K - n \times \text{log} \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right) \quad (5)$$

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 (No caso do martelo de impacto, considera-se o peso do pilão multiplicado pela altura de queda, e para vibração considera-se a frequência multiplicada pela pressão hidráulica máxima);

D = Distância (m).

Attewell et al., (1992a, 1992b)

Attewell e Farmer (1973), conforme supracitado, inicialmente propuseram um modelo empírico que previsse o PPV de estacas cravadas por martelos de impacto e vibro flutuação. Essa abordagem, que é uma abordagem empírica de distância escalada, considera o efeito da distância e da energia no PPV gerado. Attewell e Farmer (1973) argumentaram que os valores de 1,50 para a constante de proporcionalidade e 1,00 para o coeficiente de amortecimento geométrico são mais adequados para uma aproximação conservadora, embora 0,76 e 0,87 tenham sido avaliados respectivamente a partir do ajuste de curva. Para explicar a não linearidade das correlações de distância escalada e PPV, Attewell et al. (1992a, 1992b) posteriormente propôs o uso de um ajuste log-log quadrático (tanto o eixo das abcissas quanto o eixo das ordenadas são expostos por uma escala logarítmica). Eles

usaram a lei de potência para propor a relação, conforme mostrado na Equação 6 abaixo, e definiram os parâmetros k_1 , k_2 e k_3 como constantes de proporcionalidade que dependem das condições do solo.

$$\log (PPV) = k_1 + k_2 \times \log \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right) + k_3 \times \log^2 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right) \quad (6)$$

Onde:

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

k_1 , k_2 e k_3 = Constante de acordo com o tipo de cravação – sem unidade

W = Energia de cravação do equipamento em Joules;

D = Distância (m).

Ko et al. (1990)

A abordagem empírica e sem considerar a distância utilizada pelos autores supracitados difere da abordagem utilizada por Ko et al (1990). Nesse método de previsão de vibração é considerada a distância e o efeito do amortecimento do material, que nesse caso é o solo. E os autores propuseram um modelo de estaca acionadas que inclui um amortecimento geométrico e material. Sendo, no amortecimento geométrico, a amplitude das vibrações tende a reduzir quando a distância à fonte aumenta - visto que o volume de material envolvido também aumenta e gera uma sensação de espalhamento de energia. (Costa, 2012; Deckner, 2013).

E o amortecimento material, parte da energia que se encontra envolta do processo de propagação de onda, quando esse fenômeno ocorre, é absorvida pelo amortecimento que são inertes às propriedades materiais presentes nos diversos tipos de estratificação do solo (Soares, 2013). Esse modelo, pode ser visualizado na Equação 7.

$$PPV = 70 \times \left(\frac{1}{\sqrt{D}} \right) \times e^{-0.04x(D-1)} \quad (7)$$

Onde:

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

D = Distância (m).

Hiller and Crabb (2000)

Para vibrações do solo devido a técnicas de vibração profundas, um estudo significativo das vibrações do solo foi realizado no trabalho de Hiller e Crabb (2000), que também foi incluído na BS 5228-2:2009 (BSI, 2008). Vibrações de campo documentadas de três projetos de vibro-substituição no Reino Unido foram avaliadas para dar o melhor “ajuste à curva”, conforme mostrado na Equação 8.

$$PPV = \frac{33}{D^{1.4}} \quad (8)$$

Onde:

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

D = Distância (m).

Achmus et al. (2010)

Achmus et al. (2010) também discutiram as vibrações do solo causadas pela vibro compactação. Seu estudo abrange vibradores de profundidade com classificações de energia na faixa de 700 a 6000 J. (Weng, 2020). O método proposto por Achmus et al. (2010) pode ser visualizado na Equação 9, abaixo:

$$PPV = 1.18 x \left(\frac{D}{\sqrt{Wt}} \right)^{-1} \quad (9)$$

Onde:

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

D = Distância (m);

W = Energia de cravação do equipamento em Joules.

Além das metodologias supracitadas, ainda existem uma série de estudos e métodos de previsão de vibração. Métodos esses, não necessariamente voltados para a cravação de estacas, mas também, relacionado à previsão do PPV para desmonte de rochas. Ghasemi, Ataie e Hashemolhosseini (2012), inclusive, afirmam que quando for necessário fazer a avaliação das repercussões e consequências da vibração (proveniente das detonações de rochas), existem uma série de indicadores propostos para sua avaliação e criação de método/ fatores que devem ser levados em consideração sendo: a velocidade de pico de partícula (PPV), aceleração de pico de partícula (APP) e deslocamento de pico de partícula (DPP). Outros autores, como

Ataei e Sereshki (2017) também defendem a utilização dos critérios de distância radial (DR) e energia (E) utilizada na intensidade da vibração. Mostrando, assim, que existem diversos métodos e fatores que podem ser considerados quando o assunto citado é a previsão da vibração.

Abaixo segue a Tabela 2, comparando e resumindo os diferentes tipos de modelos para previsão de vibração apresentados acima.

Tabela 2 – Modelos para Previsão de Vibração

Autor(es)	Ano(s)	Observação	Modelo
Attewell e Farmer	1973	Modelo empírico para prever a PPV de acordo com a cravação de estacas por impacto de martelo e por vibro flutuação.	$PPV = K x \frac{\sqrt{W}}{D}$
Wiss	1981	Abordagem modificada do autor (Wiss, 1967).	$\log (PPV) = \log K - n x \log \left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)$
Attewell et al.	1992a e 1992b	O modelo explica a não-linearidade da distância escalada e as correlações de PPV através de um ajuste log-log quadrático.	$\log (PPV) = k1 + k2 x \log \left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right) + k2 x \log^2\left(\frac{D}{\sqrt{W}}\right)$
Ko et al.	1990	O modelo inclui os amortecimentos geométrico e do material para a cravação de estacas.	$PPV = 70 x \left(\frac{1}{\sqrt{D}}\right) x e^{-0.04x(D-1)}$
Hiller e Crabb	2000	Modelo desenvolvido pelo Transport Research Laboratory (Reino Unido), considerando 3 casos onde colunas de pedras vibratórias foram utilizadas.	$PPV = \frac{33}{D^{1.4}}$
Achmus et al.	2010	Modelo para trabalhos de vibro substituição e vibro compactação, baseado em quatro vibradores de profundidade diferentes.	$PPV = 1.18 x \left(\frac{D}{\sqrt{Wt}}\right)$

Fonte: Weng (2020).

2.2 NORMATIZAÇÃO

Nesse item, foram reunidas algumas das principais normas vigentes relacionadas ao controle de vibração nível nacional e internacional. Vale ressaltar que, no Brasil, não existe uma norma específica que acompanhe os efeitos provenientes das vibrações causadas pela cravação das estacas e sim pela detonação de explosivos que são as normas: ABNT NBR 15928 (2001) - Ensaio não destrutivo - Análise de vibrações - Terminologia” e NBR 9653 (2018) – “Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas – Procedimento”. Svikin (2017) atesta que esta norma da ABNT adotou a norma britânica BS (British Standard) 7385-2, contudo, na norma brasileira, os limites de vibrações são aplicados para o solo ao invés das estruturas.

Existem algumas normas a nível nacional utilizadas visando o controle de vibrações são elas:

- A NBR 15928 (2001) – “Ensaio não destrutivo – Análise de vibrações – Terminologia”, na qual substitui a NBR 7497 (1981) – “Vibrações mecânicas e choques”, e define a terminologia e os termos empregados em vibrações mecânicas, choques e aplicações em monitoramento de máquinas. Grande parte dos conceitos utilizados neste trabalho, são provenientes desta norma;
- A norma NBR 9653 (2018) – “Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas – Procedimento”. Contudo, como o título menciona, essas previsões de vibração se dão para o uso de explosivos em áreas urbanas e pouco se argumenta em relação à cravação de estacas e seu impacto nas regiões urbanas;
- NBR 10082 (2011) – “Ensaio não destrutivo — Análise de vibrações — Avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 600 r/min a 5.000 r/min” na qual Estabelece as regras a serem utilizadas na avaliação do estado de funcionamento de máquinas rotativas que operam entre 600 rpm e 15000 rpm, com potência acima de 15 kW e frequência de vibração entre 10 Hz e 1000 Hz, através da

medição de vibrações mecânicas na carcaça do mancal ou no pedestal que suporta o mancal.

Contudo, observa-se que mesmo havendo normas relacionadas ao controle de vibração, pouco se aplica para o caso de cravação de estacas. Alguns autores também defendem alguns valores de referência, como é o caso do proposto por Chik (2021). Na Tabela 3 se faz possível observar os limites recomendados de acordo com os riscos de danos em construções com vibração de Estado Estacionário.

Tabela 3 – Limites Recomendados para Risco de Dano em Construções com Vibração de Estado Estacionário

Descrição do Dano	Velocidade Vertical Máxima de Vibração do Pico ($v_{m\acute{a}x}$, de 0 ao pico, 10-100 Hz), [mm/s]
Seguro	$v_{m\acute{a}x} < 3$
Nível de Cuidado (Dano Não Necessariamente Inevitável)	$3 \leq v_{m\acute{a}x} < 5$
Dano Mínimo	$5 \leq v_{m\acute{a}x} \leq 30$
Dano Máximo	$v_{m\acute{a}x} > 30$

Fonte: Chik (2021).

Com a ausência de normas nacionais que possam se aplicar ao caso de valores máximos de PPV na realização cravação de estacas, utiliza-se como referência normas estrangeiras. Para o estudo de caso dessa dissertação, foram utilizadas as seguintes normas:

- A Norma americana AASHTO de (1990) - Standard recommended practice for evaluation of transportation-related earth borne vibrations;
- Norma Suíça SN 640312 (SNV 1992) - Vibrations— Vibration effects in buildings;
- Norma Britânica BS 7385-2 (BSI 1993) - Evaluation and measurement for vibration in buildings. Guide to measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings;
- Norma Europeia Eurocode 3 (ENV 1993 - 5) – Design of steel structures: Parte 5: Piling.

Dessas normas, foram extraídos os valores de alcance da frequência, em Hertz (Hz), os tipos de estruturas de suas condições e os valores máximos de Velocidade de Pico de Partícula (PPV) em mm/s. Vale ressaltar, que existem outras normas internacionais que abordam o tema, contudo, como a dissertação seria um complemento de um banco de dados às outras medições existentes, optou-se pela utilização apenas dessas normas internacionais, visto que os dados existentes apenas foram verificados a partir das normas supracitadas. Apesar das normas terem uma data de publicação antiga, cerca de trinta anos, não houve uma versão atualizada da mesma norma. Inclusive, normas atualizadas indicam a consulta nas normas acima. O Quadro 1, abaixo, resume as informações necessárias dos limites de PPV's abordados nessas normas e que serão os parâmetros utilizados para a avaliação dos resultados obtidos nesta presente pesquisa.

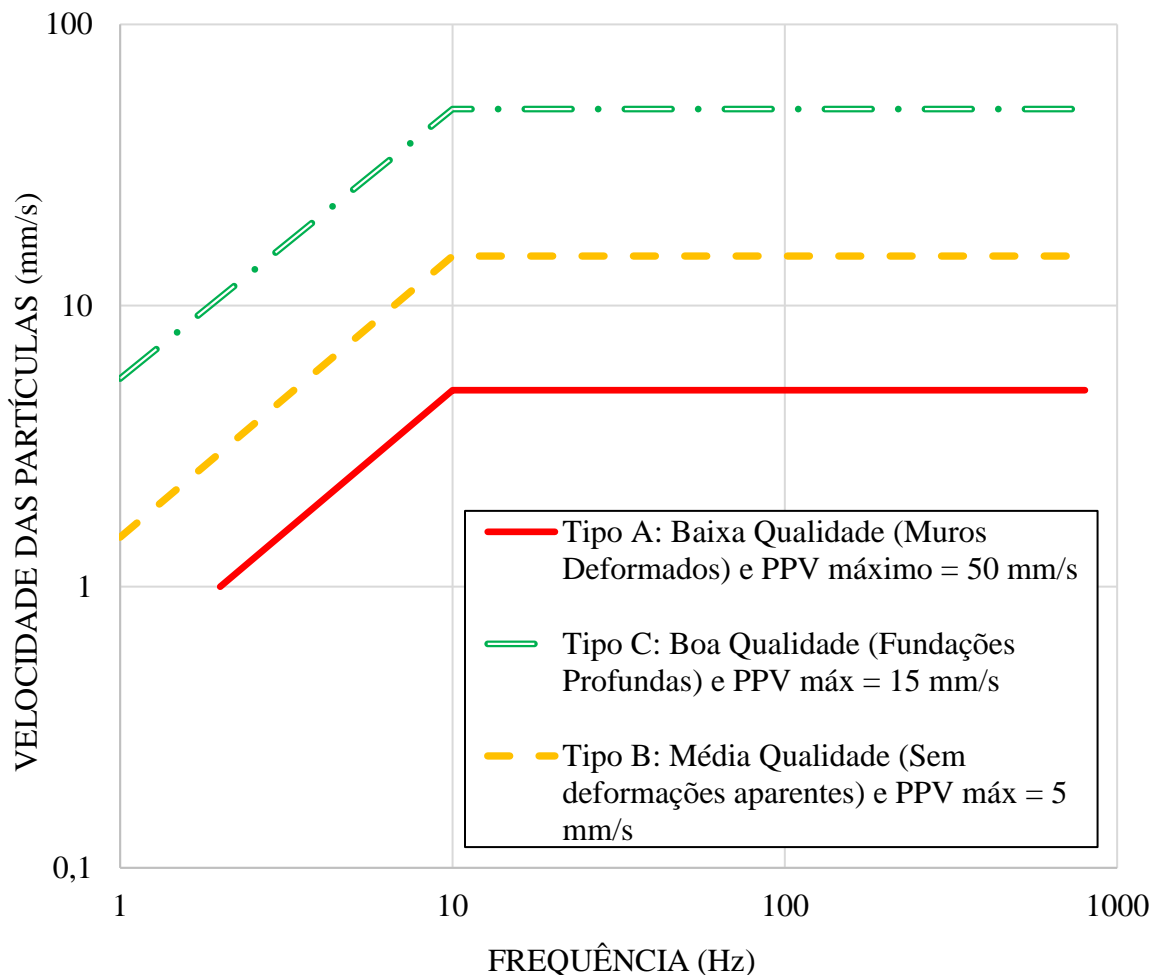
Quadro 1 - Resumo dos limites de PPV's abordados por normas estrangeiras

Referencia	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	
		(III) Edifícios mencionados anteriormente, mas com tetos de madeira e paredes em alvenaria	
		(IV) Construção muito sensível à vibração, objetos de interesse histórico	
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: Burgos (2020).

Outra referência utilizada como parâmetro de verificação de vibração é a recomendação que foi sugerida pela AFTES (*L'association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain*, traduzindo: Associação Francesa de Túneis e Espaços Subterrâneos – que foi fundada em 1972 visando responder às recomendações da Conferência Internacional sobre Obras Subterrâneas realizada em Washington em 1970 que recomendava a criação em cada país de uma organização em trabalhos subterrâneos). A AFTES sugere alguns valores relacionados a velocidade das partículas e frequências, sendo possível sua visualização no Figura 6.

Figura 6 - Diagrama proposto pela AFTES das vibrações admitidas para as três classes de estrutura.



Fonte: Adaptado de Burgos (2020).

A Figura 6 é um diagrama no qual subdivide a Velocidade das Partículas x Frequência em três tipologias:

- Tipo A: Edifícios de baixa qualidade mecânica (com muros deformados);
- Tipo B: Edifícios com média qualidade mecânica (sem deformações aparentes);
- Tipo C: Edifícios de boa qualidade mecânica (fundações profundas).

No gráfico acima, observa-se que os limites de frequência e velocidade de pico de partícula sugeridos para os três tipos de edifícios. Nos três tipos de edifícios citados, os limites de PPV para frequências inferiores a 10 Hz aumentam de forma crescente. Após os edifícios possuírem 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 (Burgos, 2020).

Em outras palavras, entende-se que para cada tipo de edificação estabelecida pela AFTES, existe um valor máximo de velocidade de pico de partícula que pode ser atingido (até uma frequência de 10 Hz) sem gerar significativos impactos nas edificações vizinhas. Após essa frequência atingida, os valores de PPV podem se tornar significativos, podendo gerar impactos estruturais nas edificações vizinhas.

2.3 TIPOS DE ESTACAS

A cravação de estacas pode ser considerada como um processo intenso de transferência de energia que pode ocorrer de diversas formas e gerar alguns danos, principalmente às obras adjacentes. Visando prognosticar o real impacto das vibrações, deve-se analisar de que maneira a execução da cravação de estacas se realiza em relação a forma em que essas estacas estão sendo executadas.

Os tipos de estaca abordados nos subitens a seguir, foram as estacas utilizadas durante o processo de medição da velocidade de pico de partícula e frequência nesta pesquisa. Por essa razão, é importante descrever seus conceitos de forma detalhada.

2.3.1 Estaca Metálica

De acordo com a NBR 6122 (2019), define a estaca metálica como: “estaca cravada, constituída de elemento estrutural metálico produzido industrialmente,

podendo ser de perfis laminados ou soldados, simples ou múltiplos, tubos de chapa dobrada ou calandrada, tubos com ou sem costura e trilhos”.

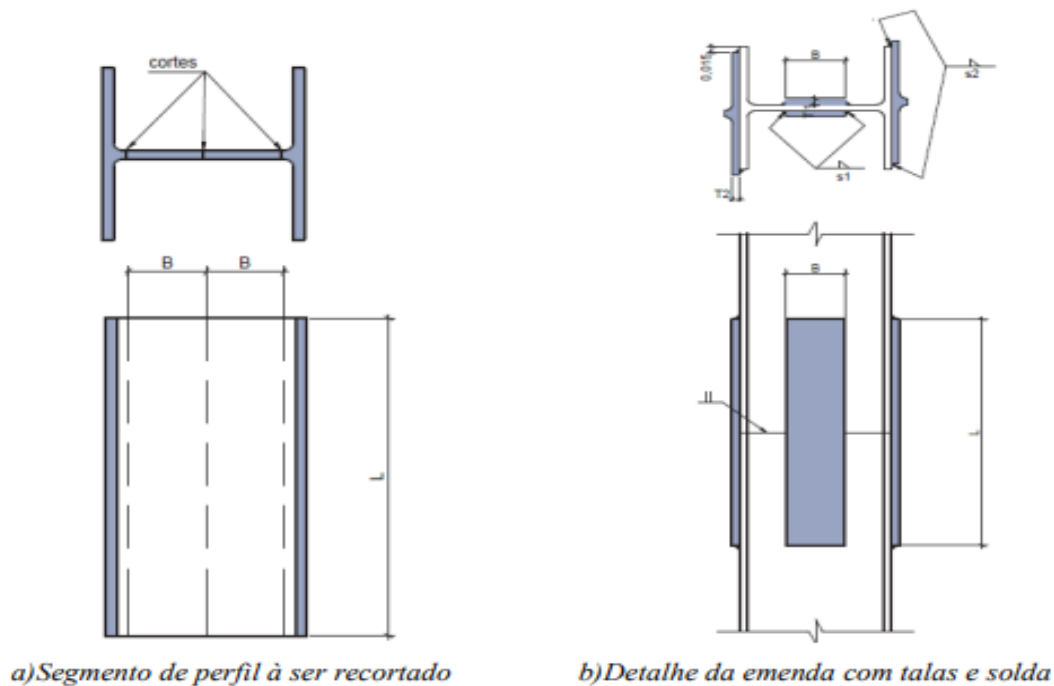
As estacas metálicas ou estacas de aço são, frequentemente, empregadas em fundações e contenções, e principalmente quando se necessita atingir profundidades elevadas. Estas estacas são encontradas em diversas formas visando atender a grande demanda dos executores e podem ser encontradas na forma de perfis tubulares ou laminados ou soldados. Devido a essa facilidade, esse tipo de estaca é considerado de alta eficiência e rápida execução. O perfil pode ser utilizado em sua forma simples ou conectado por soldagem (CARVALHO, 2018).

A Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia (ABEF, 2016) faz referência a produtividade das estacas metálicas cravadas à percussão em média, seria de 50 metros por dia ou 1.000 metros por mês. Porém, entende-se que a produtividade das estacas varia, principalmente, devido a uma série de condições como características do subsolo, condições meteorológicas, topográfica do canteiro, entre outras.

De um ponto de vista historicamente argumentando, esse modelo de estaca era utilizado no Brasil, inicialmente, como estrutura de contenção e eram associados a pranchas de madeira ou elementos pré-fabricados de concreto. Contudo, o uso da estaca metálica como elemento de fundação se tornou uma opção competitiva e vantajosa uma vez que é uma alternativa mais econômica e produtiva e hoje, essa escolha de fundação é um dos métodos mais utilizados no país (GERDAU, 2015).

Quando o subsolo possui uma cota maior que a cota disponível para a estaca, deve-se fazer uma emenda entre os dois segmentos para o aumento do comprimento da estaca. Segundo Gerdau (2015), essa emenda deve ser realizada com talas soldadas ou através de solda de topo com penetração total (a solda de topo é pouco utilizada pois é difícil de ser executada em obra) e são executadas, geralmente, utilizando um segmento do próprio perfil metálico. A Figura 7 demonstra como essas emendas são recortadas e os detalhes nas emendas.

Figura 7 – a) Segmento de perfil a ser recortado b) Detalhe da emenda com talas e solda.



Fonte: Gerdau (2015).

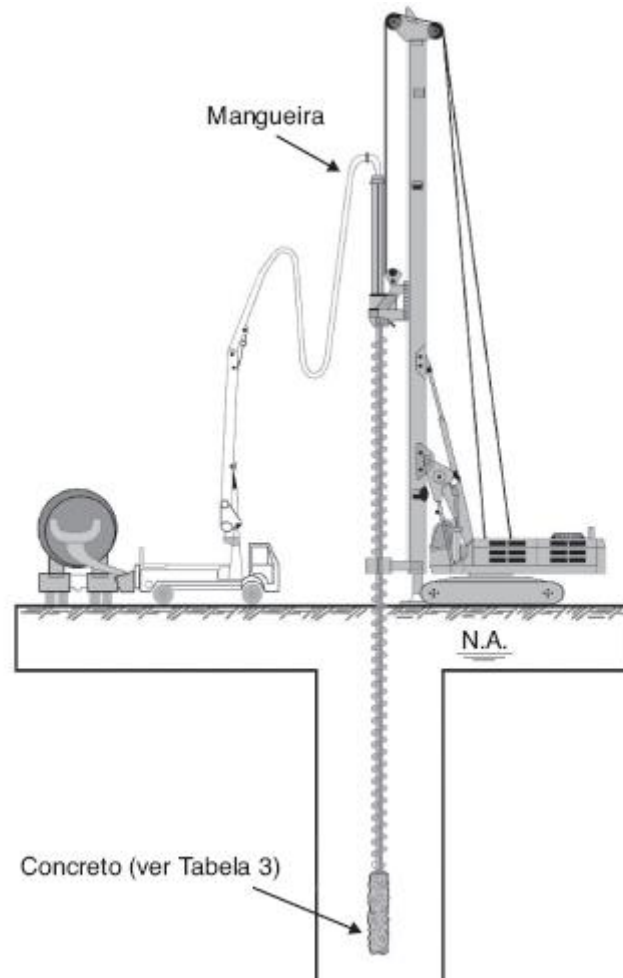
Vale ressaltar que durante o processo de cravação destas estacas, a NBR 6122 (2019) exige que se faça a medição da nega e do repique em todas as estacas. Sendo nega a medida da penetração ocorrida pela estaca durante um golpe de martelo (sendo medida a uma sequência de 10 golpes) e o repique é definido como a parcela elástica do deslocamento máximo suportado pela estaca no decorrer de um golpe do martelo. Além disso, a nega é um dos critérios imprescindíveis para a interrupção da cravação. Seu valor mínimo e comprimento devem ser previstos e estabelecidos em projeto.

2.3.2 Estaca Hélice Contínua

As estacas do tipo hélice contínua, também conhecidas por *Continuous Flight Auger – CFA* é uma estaca escavada, moldada “in loco”, executada a partir de um trado contínuo em formato de hélice em formato de espiral que realiza uma escavação no solo simulando um “saca-rolhas”. A execução das estacas hélice contínua é dividida em três etapas: a perfuração (na qual é executada através do trado em hélice espiral por rotação, com um torque aplicado por meio de uma mesa rotativa presente no topo da hélice, apropriado para que a hélice consiga vencer a resistência do solo e atinja a profundidade definida em projeto), concretagem simultânea (que ocorre através do bombeamento do concreto a

uma pressão entre 50 a 100 kPA por meio de uma haste tubular presente dentro da estaca escavada que garante a continuidade e a integridade do fuste da estaca) e colocação da armadura (a armadura deve ser formada por barras grossas e o estribo em formato circular soldado, e essas armaduras são instaladas posteriormente ao processo de concretagem através da gravidade, por vibração e até pela compressão de um pilão – que é o método mais utilizado no Brasil atualmente). Na Figura 8 é possível observar as etapas de execução da estaca hélice contínua e na Figura 9 também se faz possível observar o maquinário para a execução da estaca do tipo hélice contínua realizando a escavação.

Figura 8 – Detalhe dos equipamentos empregados na execução da estaca hélice contínua.



Fonte: Albuquerque e Garcia (2020) apud ABEF (2016).

Figura 9 – Imagem do maquinário executando a escavação para a estaca do tipo hélice contínua



Fonte: Autor (2022).

No Brasil, a utilização das estacas do tipo hélice contínua é datada de 1987. E, de acordo com Antunes e Tarozzo (1996), apenas em 1989 na Cidade do Rio de Janeiro, durante a realização do XII ICSMFE (*International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*), com a publicação denominada de “*ABEF Research on Foundation Engineering*” foi quando as estacas do tipo hélice contínua realmente começaram a ser abordadas. Vale ressaltar que, o trabalho publicado foi proveniente de estudos realizados no Campus da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e, naquela época, o processo para executar estas estacas eram pouco desenvolvidos e instrumentados. Em outras palavras, inicialmente não existiam equipamentos adequados e o que se fazia eram adaptações como por exemplo a utilização de guindastes adaptados com torre acoplada e dotados de uma mesa giratória com um torque de 35 kN.M e diâmetros e podiam variar entre 275, 350 e 452 mm, além disso, essas adaptações permitiam apenas que as estacas fossem executadas em até 15 metros de profundidade.

Segundo Almeida Neto (2002), apenas a partir da década de 90 (1993) que ocorreu realmente o desenvolvimento e utilização das estacas do tipo hélice contínua no Brasil devido a chegada de equipamentos específicos e mais potentes para a execução de forma correta e mais eficiente.

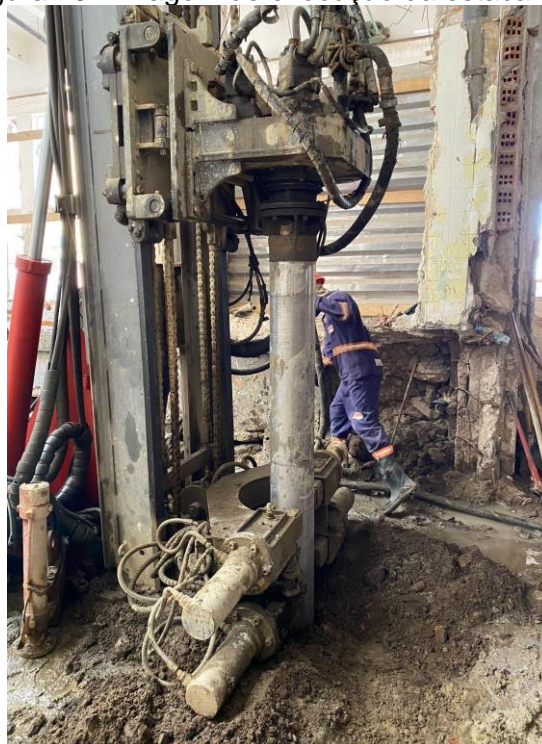
2.3.3 Estaca Raiz

A NBR 6122 (2019) conceitua a esta raiz como “estaca armada e preenchida com argamassa de cimento e areia, moldada *in loco* executada por perfuração rotativa ou roto percussiva, revestida integralmente, no trecho em solo, por um conjunto de tubos metálicos recuperáveis”.

Estas estacas foram desenvolvidas, inicialmente, visando a contenção de encostas, pois as mesmas eram cravadas formando reticulados. Contudo, essa técnica acabou sendo aprimorada para a utilização de reforço de fundações e como fundações (propriamente ditas).

Esse tipo de estaca, nada mais é do que uma estaca moldada *in loco*, porém executada por meio de perfuração rotativa no trecho em solo, revestida totalmente neste trecho por um do tubo metálico, que assegura a estabilidade das paredes durante a perfuração. Na Figura 10, observa-se a perfuração do solo para, posteriormente, ocorrer a execução da estaca raiz *in loco*.

Figura 10 - Imagem de execução da estaca raiz.



Fonte: Autor (2021).

2.3.4 Estaca Pré-moldada de Concreto

Segunda a NBR 6122 (2019), a definição de estaca pré-moldada ou pré-fabricada em concreto seria uma “estaca constituída de segmentos de pré-moldado ou pré-fabricado de concreto e introduzida no terreno por golpes de martelo de gravidade, de explosão, hidráulico ou por martelo vibratório”.

As estacas do tipo pré-moldadas, como o próprio nome define, são estacas que são produzidas em uma fábrica, normalmente de acordo com algumas especificações de projeto - dimensão, formato, fck - e então, são deslocadas para a obra, onde podem ser cravadas no solo através do método escolhido para cravação. Na Figura 11 é possível observar diversas estacas pré-moldadas em concreto cravadas.

Figura 11 - Estacas pré-moldadas em concreto.



Fonte: Autor (2021).

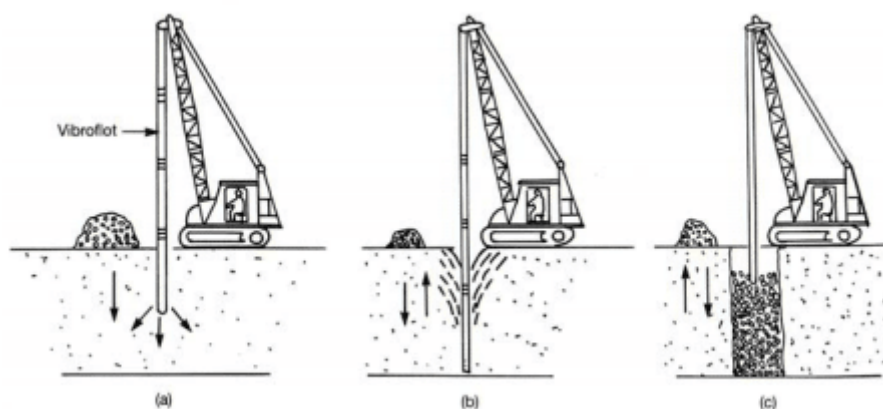
2.3.5 Estaca de Compactação

De acordo com Soares (2002), as estacas de compactação, podem ser definidas como estacas compostas de areia e brita que são instaladas no solo através de processos dinâmicos e que têm a finalidade de aumentar a densidade e reduzir os recalques da fundação.

Além da técnica de melhoramento de estacas utilizando estacas compostas por areia e brita, foi desenvolvida, segundo Amorim (2019), uma variante visando às

condições adversas do subsolo na Cidade do Recife, em Pernambuco. O processo denominado de melhoramento de solo utilizando estacas de argamassa, nada mais é do que a substituição de estacas usualmente utilizadas para melhorar o solo com areia e brita substituídas por um material de concreto simples. Na Figura 12, é possível observar o processo executivo de uma estaca de compactação.

Figura 12 - Processo executivo de estaca de compactação por vibro-substituição.



Fonte: Soares (2002).

2.4 TIPOS DE CRAVAÇÃO DE ESTACAS

2.4.1 Cravação por Vibração

O martelo vibratório aplica uma carga constante, relativamente baixa, com alta frequência. Através da geração de vibrações entre partículas vizinhas, o martelo vibratório rompe a estrutura do solo ao redor da estaca, reduzindo assim o atrito entre os dois e facilitando a cravação. Graças ao baixo impacto do martelo vibratório, o risco de fissuras e trincas é eliminado. (FALCONI, 2016).

De acordo com Masoumi (2008), a técnica utilizada para a cravação por vibração consiste em induzir o movimento vibratório na própria estaca, transmitindo vibrações de natureza harmônica para o solo. Esse método faz com que o solo realmente perca a sua resistência e a estaca penetre no solo sem grandes esforços.

Deckner (2013) divide os equipamentos de cravação por vibração em três categorias, abaixo:

- 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.

É de extrema importância ressaltar que, quando a frequência de cravação e a frequência característica do solo coincidem, os efeitos de ressonância ocorrem, o que acarreta a amplificação das vibrações do solo. (FALCONI, 2016).

2.4.2 Cravação por Impacto – Cravação à Percussão

Segundo Masoumi (2008), a técnica de cravação por impacto se resume em aplicar um golpe na cabeça da estaca (independentemente do tipo de estaca), o que resulta na propagação de uma força que consegue deslocar a estaca (penetração no solo) uma vez que essa força é maior que a resistência imposta pelo solo.

De acordo com Velloso e Lopes (2012), a cravação por impacto – também denominada de cravação à percussão, é realizada através de um martelo ou pilão. Na Figura 13 é possível observar a execução da cravação da estaca por impacto em obra.

Figura 13 – Cravação à Percussão



Fonte: Autor (2021).

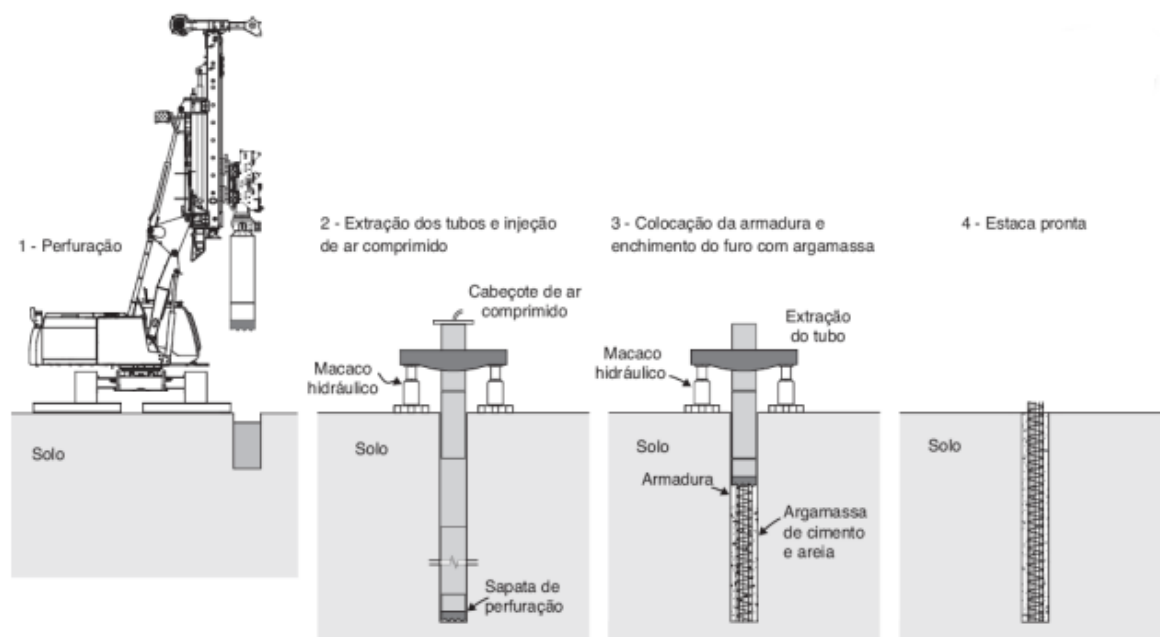
2.4.3 Cravação por Rotação

As estacas do tipo raiz, são executadas com perfuratrizes hidráulicas que podem ser de diferentes dimensões a depender do caso, o que facilitará, também, obras de reforço no interior de edificações, com ou sem inclinação (AMANN; MASSAD, 2002).

Velloso e Lopes (2012) afirmam que sua execução se divide em três etapas: perfuração (através do processo de rotação de um tubo de revestimento, com o auxílio da circulação de água ou lama bentonítica), armadura (quando ocorre a introdução da armadura, devidamente estribada, após a finalização da perfuração do subsolo) e concretagem (onde a argamassa composta de areia e cimento é bombeada por uma tubulação até a ponta da estaca e logo após a estaca estar preenchida, ocorre o processo de adensamento da argamassa através de golpes de ar comprimido).

Na Figura 14 é possível observar a execução da estaca raiz, onde o processo divide-se em quatro etapas: perfuração, extração dos tubos e injeção de ar comprimido, colocação da armadura e enchimento do furo com argamassa e, por último, a estaca finalizada e na Figura 15 observa-se uma imagem de um dos estudos de caso em que o processo de perfuração ocorria para a posterior concretagem e instalação da armadura ocorrer).

Figura 14 – Execução de estaca raiz: 1) perfuração, 2) extração dos tubos e injeção de ar comprimido, 3) colocação da armadura e enchimento do furo com argamassa e 4) estaca pronta.



Fonte: Albuquerque e Garcia (2020).

Figura 15 – Processo de perfuração do solo de forma rotativa



Fonte: Autor (2021)

2.5 MELHORAMENTO DE SOLO

As estacas de compactação, são estacas executadas através de processos dinâmicos que tem a finalidade de aumentar a densidade do solo e, conseqüentemente, aumentar sua resistência e reduzir sua compressibilidade (MORAES, 2008).

A técnica de melhoramento de solo, na verdade, é uma técnica adotada para o melhoramento de solos de composição predominantemente arenosa. Pacheco (2002) descreve que essa técnica visa densificar o solo arenoso por três efeitos:

- Introdução do material compactado no terreno;
- Deslocamento do material do terreno igual ao volume de material introduzido;
- O efeito da vibração decorrente do processo de cravação dinâmica.

O objetivo da utilização do melhoramento de solo da camada superficial através do uso das estacas de compactação pode tornar viável o emprego das fundações superficiais e, dessa forma, reduzir significativamente os custos da fundação. A técnica de melhoramento de solo também torna possível o aumento da taxa de trabalho do terreno, possibilitando uma diminuição considerável dos volumes de escavação e de concreto das fundações projetadas. (GUSMÃO FILHO, 1998).

Amorim (2019) afirma que a adoção desse método é determinada em função da granulometria do terreno superficial e da presença de camadas argilosas moles superficiais nas quais podem ser ultrapassadas para redução dos seus recalques.

Para a execução das estacas de argamassa, Amorim (2019) afirma que algumas operações devem ser consideradas:

- Quando o estaqueamento é projetado para abaixo de uma sapata, e o espaço entre eles é menor do que duas vezes e meia (2,5x) o diâmetro, considera-se como um conjunto/grupo com a transferência de carga para a camada base das estacas.
- A carga na estaca vai depender do espaçamento entre as estacas e da tensão admissível da sapata.
- O espaçamento das estacas é quem vai definir a geometria da sapata, na qual deve ter todas as estacas contidas na sua projeção, transmitindo uma tensão total menor do que a admissível do solo.

Amorim (2019) ainda reforça que após a execução dessas estacas, existem três tipos de controles que devem ser efetuados visando garantir a eficiência do método utilizado: sondagens à percussão, ensaios de placa e monitoramento de recalques.

Duas opções que são utilizadas na construção de estacas são as estacas de areia e brita e as estacas de argamassa. Estacas de areia e brita são construídas pela inserção de colunas de agregados granulares compactados no solo, enquanto as estacas de argamassa são formadas pela perfuração de um furo no solo e posterior enchimento com argamassa. Ambos os métodos podem ser eficazes na melhoria da capacidade de carga do solo, redução do assentamento e controle da deformação. As estacas de areia e brita normalmente são mais utilizadas, principalmente na região sul do Brasil, enquanto as estacas argamassadas, são mais encontradas na região nordeste devido a predominância de algumas áreas com o solo muito argiloso. Juran & Chalhoub, 2017).

2.6 EQUIPAMENTOS PARA MEDIÇÃO DA VIBRAÇÃO

Para a captação de ensaios do tipo sísmico, existe uma série de tipos de equipamentos que podem ser utilizados para a realização da medição desses dados sísmicos. As grandezas físicas que existem no mundo, muito raramente possuem natureza elétrica, sendo necessário assim, fazer a transformação dessas grandezas, que nesse caso, são através de sensores e transdutores (VARELLA NETO, 2017).

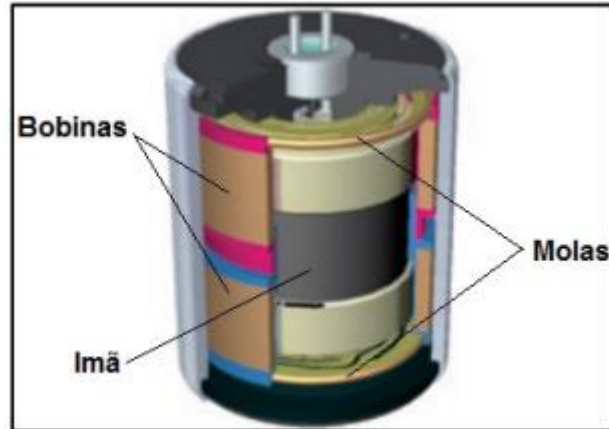
Burgos (2020) afirma que a fonte utilizada na aquisição desses dados sísmicos pode ser de natureza ativa (através do impacto de um martelo ou de algum outro objeto) ou de natureza vibratória ou passiva (na qual registra apenas o ruído ambiente).

2.6.1 Geofone

Geofones são dispositivos que identificam vibrações e convertem-nas em sinais elétricos. Esse equipamento é utilizado para detectar e localizar ondas subaquáticos ou subterrâneos. No caso dessa pesquisa, o mesmo se aplica para a cravação de estacas e é utilizado para monitorar as cravações e detectar possíveis problemas ou obstáculos no solo e a influência da velocidade do pico de partícula e frequência nas regiões próximas.

O geofone eletromagnético é constituído por um sistema dito “massa-mola”. Nesse sistema, existe uma bobina móvel na qual fica suspensa por molas ao redor de um núcleo magnético que se encontra fixo na estrutura. O aparelho funciona pela indução eletromagnética segundo a lei de Faraday-Neumann-Lenz, quando é submetido a vibrações através do solo – fornecidas pelo processo de cravação de estacas e então o deslocamento do ímã em relação a bobina induz uma força eletromotriz, na qual é diretamente proporcional à velocidade de oscilação da bobina, e proporcional à vibração do solo. Dessa forma, a vibração aplicada no sistema que é computadorizada pelo software e expresso em velocidade de pico de partícula (PPV) e frequência, (Varella Neto, 2017). Na figura 16 em anexo, observa-se um desenho esquemático de um geofone.

Figura 16 - Desenho esquemático de um geofone



Fonte: Varella Neto (2017)

Segundo Burgos (2020), o aparelho geofone mede a velocidade de oscilação das partículas do solo e medem em uma direção. Contudo, se outros sensores estiverem conectados, pode haver uma configuração de medição triaxial. Geralmente, mede-se de forma vertical, horizontal e em linha conjunta com a propagação da vibração e horizontalmente pela direção da propagação.

CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Essa pesquisa, tem como principal objetivo a realização das medições de vibrações através dos ensaios e a cravação das estacas. Neste capítulo, visa-se esclarecer as seguintes etapas:

- Continuação do banco de dados existente com as medições das vibrações captadas na cravação das estacas medidas neste trabalho;
- Equipamento e metodologia utilizada para a realização das medições;
- Caracterização dos empreendimentos nos quais foram realizadas as medições.

3.1 BANCO DE DADOS

O principal objetivo dessa pesquisa é a captação de dados visando o acréscimo do banco de dados existente a respeito de valores relacionados ao pico de partícula e frequência que são gerados a partir da cravação de estacas. Em outras palavras, se faz necessária a captação dos picos de partícula e frequências geradas durante a cravação de estacas para a obtenção desses dados.

Para a medição ser considerada como válida, várias obras (denominadas de “estudos de casos”) e estacas diferentes foram cravadas para a obtenção de dados suficientes para estatisticamente ser possível obter resultados.

3.2 CONFORTO ACÚSTICO

Vale salientar que, em alguns casos de obra, foi possível notar que a emissão sonora provocada pelos equipamentos de cravação da estaca resultava em um impacto de ruído maior que a vibração da própria cravação da estaca e, assim, também foram medidos os impactos sonoros provenientes dessas cravações.

A construção de edifícios é uma atividade que pode gerar um alto nível de ruído, seja durante a fase de demolição, construção ou mesmo após a conclusão da obra. É importante que sejam tomadas medidas para minimizar o impacto acústico dessas atividades na vizinhança, a fim de garantir o conforto e bem-estar dos moradores.

Segundo a NBR 10151 (2000), norma brasileira que estabelece os níveis de ruído aceitáveis em áreas habitadas, os valores de níveis de pressão sonora

contínuos equivalentes (LAeq) para o período diurno devem ser inferiores a 55 dB(A) e para o período noturno devem ser inferiores a 50 dB(A). Valores acima desses limites podem causar desconforto e prejudicar a qualidade de vida dos moradores.

Um estudo realizado em 2016 na cidade de São Paulo avaliou o impacto acústico causado pela execução de estacas de fundação em uma obra de um edifício residencial. Os resultados mostraram que os valores de LAeq ultrapassaram os limites estabelecidos pela norma em alguns momentos, chegando a 71 dB(A) durante o dia e 67 dB(A) à noite. Esses valores foram considerados muito elevados e foram responsáveis por causar desconforto e estresse nos moradores da vizinhança. (ZANNIN et al., 2016).

Durante a execução das estacas do tipo raiz, sentiu-se um incomodo de causas sonoras, por não haver decibelímetro, foi utilizado um aplicativo de celular que capta as ondas sonoras e transforma em decibéis (simula o funcionamento de um decibelímetro). Durante a medição sonora realizada no local, a cerca de 5 metros de distância do maquinário de execução de estaca, as medições variaram entre 92,55 dB até 94,18dB. Valores esses considerados elevados de acordo com o que informa a norma da ABNT vigente.

3.3 O GEOFONE

Para a medição das vibrações durante os casos de obra, optou-se pela utilização do aparelho do geofone devido a uma série de motivos que foram explanados anteriormente.

3.3.1 - Medições

Para a realização das medições, o aparelho fornecido e utilizado durante todos os ensaios, foi o geofone cedido pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). A utilização desse equipamento só foi possível através de uma parceria realizada entre a Universidade Católica de Pernambuco e a empresa Gusmão Engenheiros Associados LTDA. Juntamente, também, com a Universidade Politécnica de Pernambuco visto que essa dissertação se trata de um acréscimo de dados à criação de um banco de dados.

O equipamento possui as seguintes especificações: GeoSonics Inc, Modelo GSR-12PC possuindo 2 (dois) sensores do tipo geofone. Em outras palavras, o equipamento é dividido em duas partes: o geofone (computador) que transforma as ondas em velocidade de pico de partícula e dois sensores que estão acoplados no geofone através de cabos. Na Figura 17, observa-se o aparelho geofone e os cabos (em amarelo) acoplados no mesmo e na Figura 18, tem-se a imagem do sensor.

Figura 17 – Demonstração de geofone em obra.



Fonte: Autor (2021).

Figura 18 – Sensor de geofone em obra.



Fonte: Autor (201).

O ensaio ocorre, primeiramente, instalando o computador e acoplado os seus sensores através de cabeamento. Esses sensores podem ser acoplados horizontalmente nas delimitações do empreendimento (muro de divisória) ou podem ficar em contato direto ao solo, em uma distância relativamente próxima de onde a estaca será cravada. Nesse caso, a distância dos sensores foi estabelecida de acordo com as distâncias já utilizadas nos bancos de dados existentes visando uma comparação mais fidedigna e para comparar os valores de vibração mantendo as distâncias “fixas”.

Apenas houve mudança da distância quando não era possível por motivos de logística e segurança a instalação dos sensores e equipamento próximo ao local de medição.

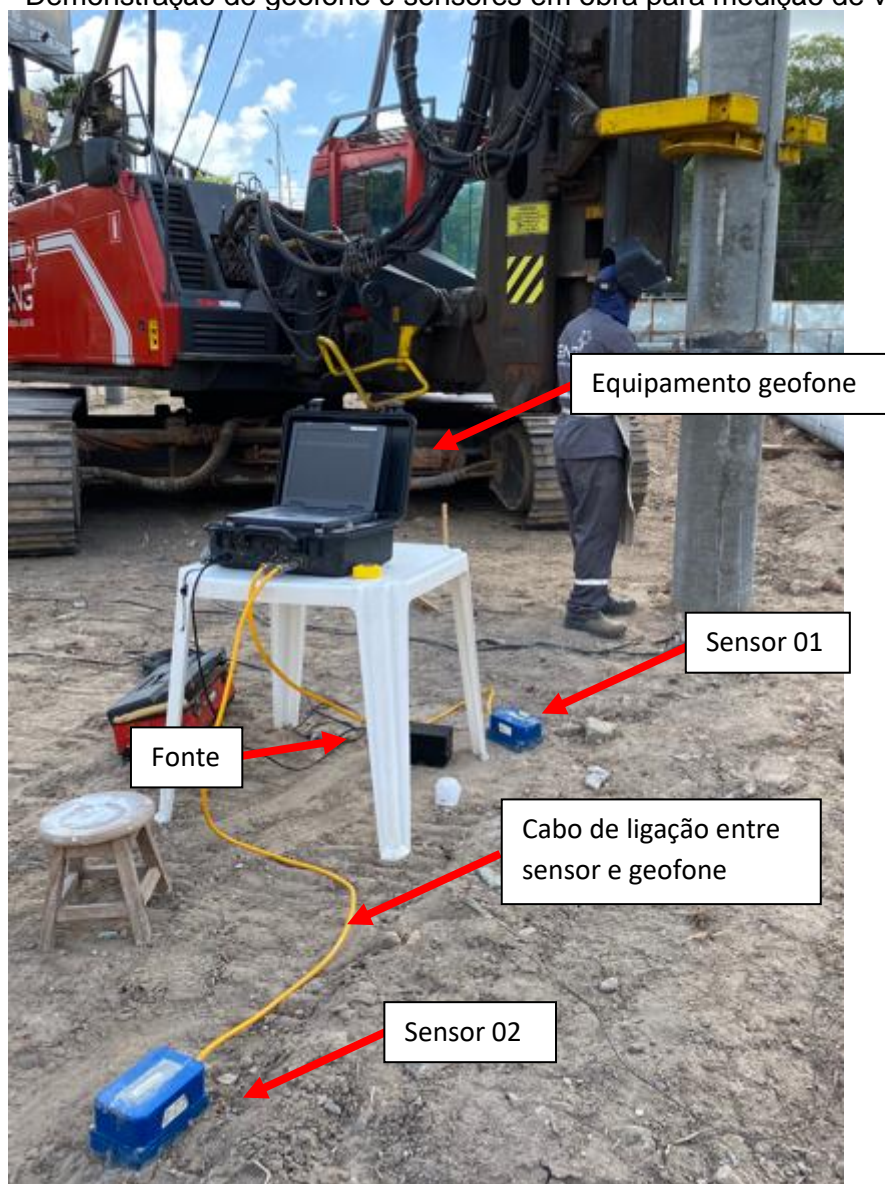
O aparelho, quando utilizado durante a execução de estacas em obras de construção civil, gera dados nos quais são processados através de um software denominado GeoDAS da Geosig, além do que, toda a manipulação das amostras realizadas durante os ensaios é processada através do GeoDAS. As vibrações emitidas são denominadas de PPV (Velocidade de pico de partícula) e possui sua unidade em mm/s. O método utilizado para a obtenção da velocidade do pico de partícula foi o método de Attewell e Farmer (1973).

A realização desse ensaio com o aparelho geofone é de suma importância para a engenharia civil, pois permite que os engenheiros e construtores obtenham informações mais precisas sobre as propriedades geotécnicas do solo e possam verificar a influência dos diversos tipos de solo e escolha do tipo de fundação no canteiro de obras e regiões vizinhas. Essas informações são cruciais para garantir a estabilidade e segurança das estruturas e edificações construídas, bem como as estruturas.

Após as coletas dos dados realizados nos ensaios em campo, esses dados serão utilizados como referenciais para comparação dos limites de velocidade do pico de partícula (PPV) estabelecidos nas normas, são elas, a Norma Americana (AASHTO 1990), Norma Suíça (SN 640312), Norma Britânica (BS 7385-2) e a Norma Europeia e os trabalhos existentes e componentes do banco de dados a ser construído. Além da Norma Francesa (AFTES 1974) na qual é utilizada para análise de frequência (em Hz). Esses valores estão sendo comparados com normas estrangeiras visto que no Brasil, a norma referente a vibrações (ABNT – NBR 9653/2005 – “Guia para avaliação dos efeitos

provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas”) abrange apenas vibrações causadas por detonações e, no caso, não seria aplicável ao trabalho. Na Figura 19, é possível observar o aparelho geofone, operando em campo. Onde se faz possível observar, também, os sensores - um fixado no chão próximo ao computador e o outro fixado no muro para captar as possíveis vibrações no local, o cabeamento que liga os sensores ao computador, e a fonte no qual provê energia para o funcionamento do aparelho.

Figura 19 – Demonstração de geofone e sensores em obra para medição de vibração



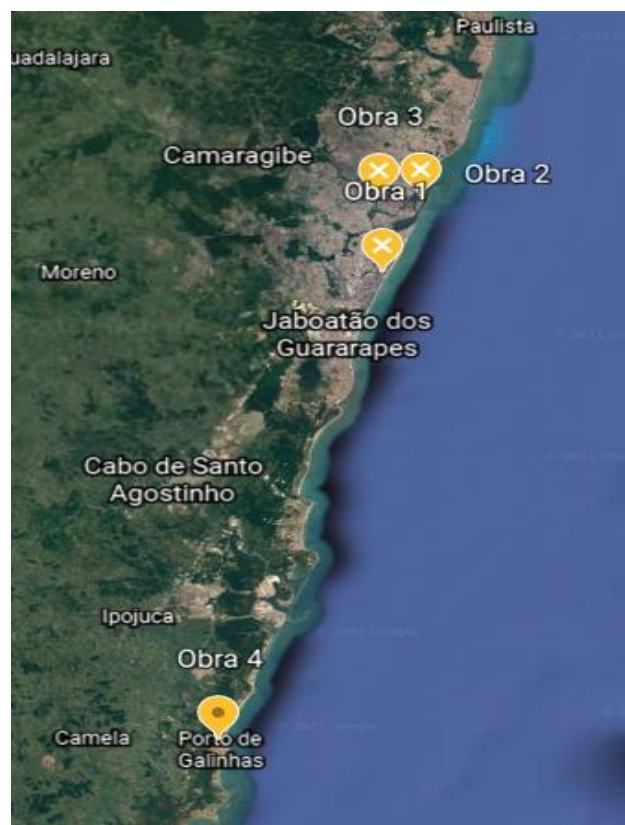
Fonte: Autor (2021)

3.4 ESTUDOS DE CASOS

Os estudos de caso a seguir foram realizados no período de dezembro de 2020 a agosto de 2021. Algumas obras do estudo de caso foram escolhidas devido às características marcantes do seu subsolo como por exemplo uma camada espessa de solo mole. Outras foram medidas por uma solicitação da construtora que visava obter resguardo em relação às construções vizinhas e outras foram escolhidas de acordo com a demanda do caso de obra e aumento de dados.

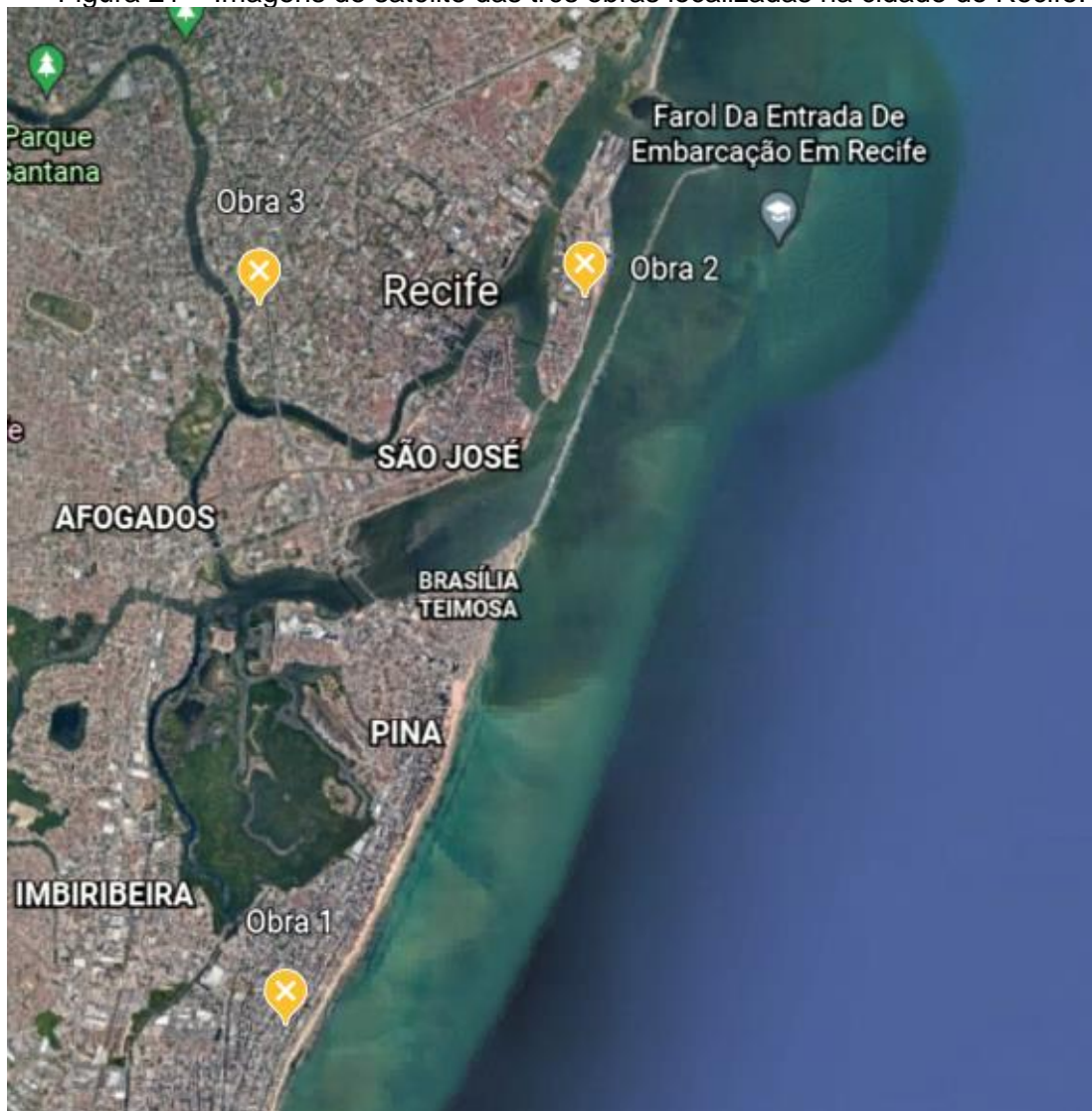
As distâncias utilizadas durante a medição variaram de acordo com as circunstâncias do local, contudo tentou-se manter as distâncias o mais constantes possível. As quatro obras nas quais foram realizadas as medições podem ser visualizadas na Figura 20, com ênfase nas três primeiras obras na cidade do Recife na Figura 21.

Figura 20 – Imagens de Satélite das quatro Obras para Análise de Velocidade de Pico de Partícula



Fonte: Google Earth (2021)

Figura 21 – Imagens de satélite das três obras localizadas na cidade do Recife.



Fonte: Google Earth (2021)

3.4.1 Estudo de Caso 01 - Boa Viagem

3.3.1.1 - Localização e Características do empreendimento

O empreendimento do primeiro estudo de caso se localiza na Cidade do Recife, mais precisamente no bairro de Boa Viagem, próximo à beira mar, caracterizando a edificação como de alto padrão. Antigamente o local sitiava uma galeria conhecida na vizinhança e agora estão sendo construídas duas torres, sendo a denominada Torre A e Torre B com 35 pavimentos tipo em cada torre.

O terreno destinado à construção possui cerca de 5.000 m², e pode ser visualizado em destaque na Figura 22 e apresenta um total de duas torres além de lojas de conveniência e toda uma estrutura de entretenimento aos moradores.

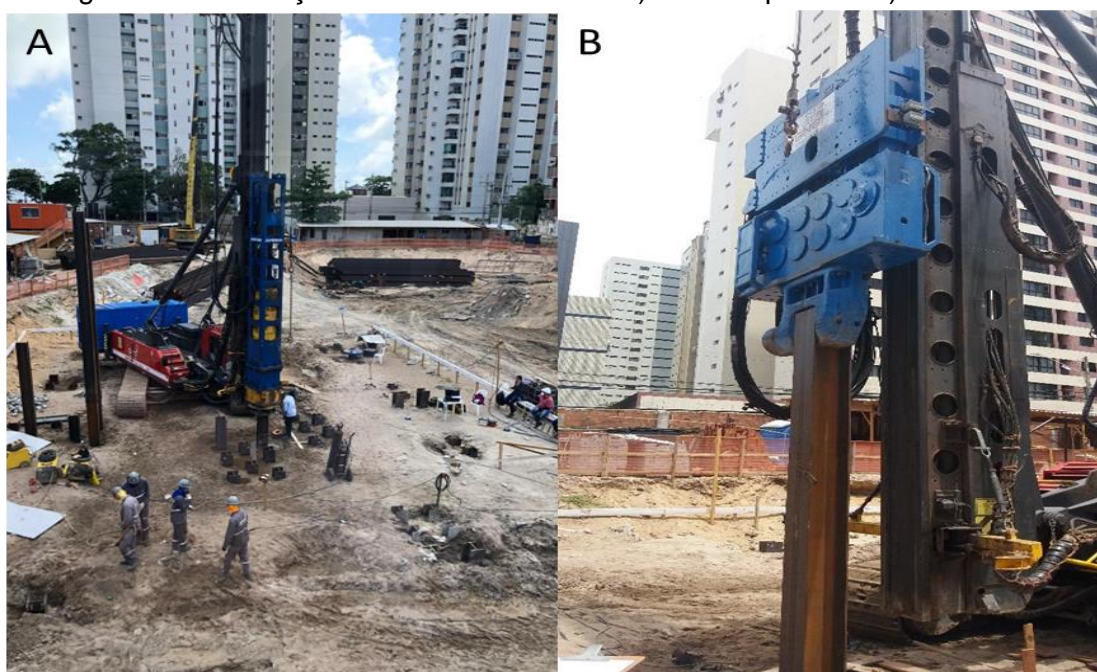
Figura 22 – Local do empreendimento no qual foi realizado o estudo de caso 1



Fonte: Google Maps (2021)

Na Figura 23, em vistas superior (Figura 23A) e frontal (Figura 23B). Faz-se possível observar na Figura 23A: a vista superior da obra com o bate estaca, cravando as estacas metálicas. Seguido pela Figura 23B: vista frontal do martelo vibratório.

Figura 23 – Execução de estacas em obra: a) Vista Superior e b) Vista Frontal

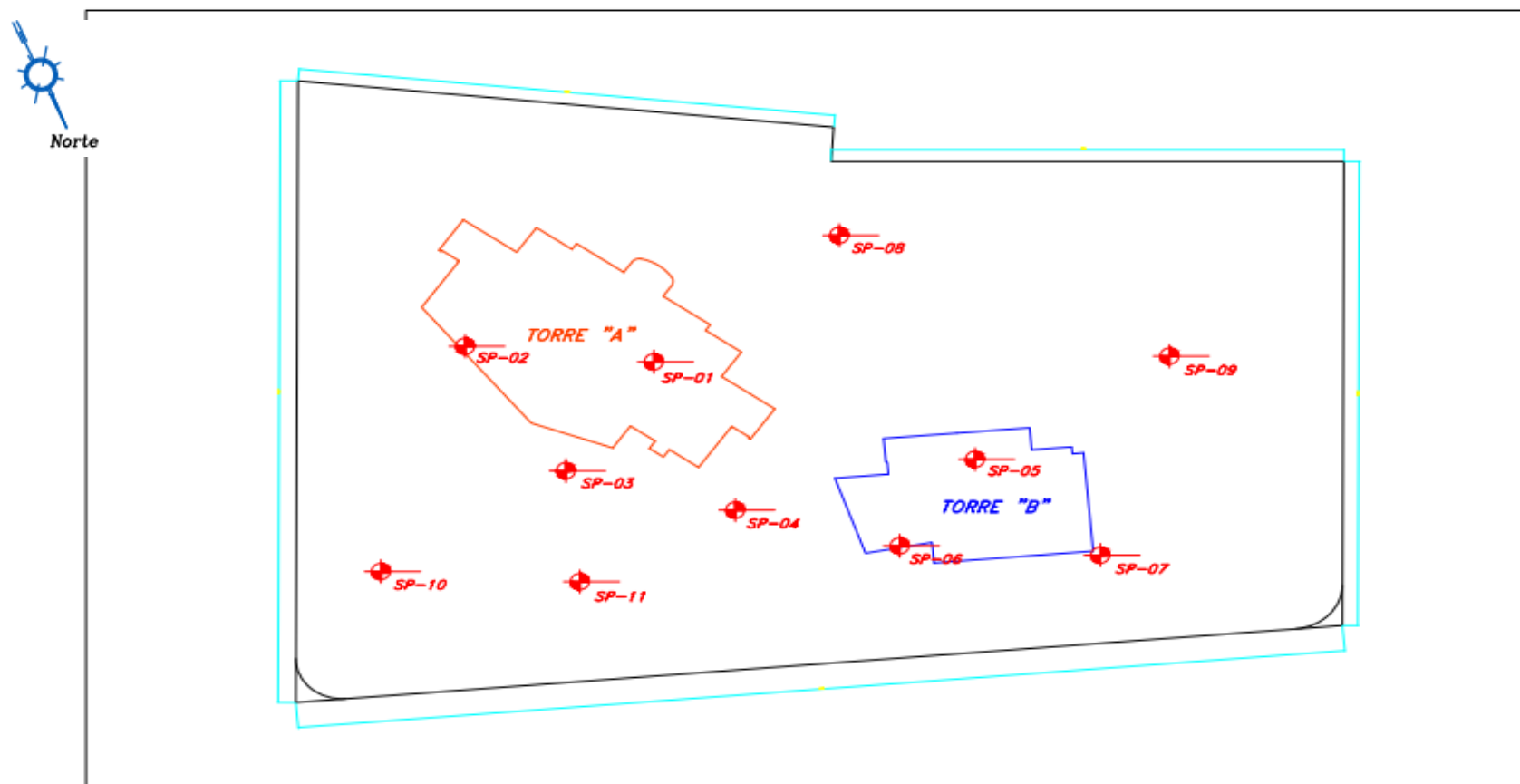


Fonte: Autor (2021)

3.4.1.2 – Características do subsolo

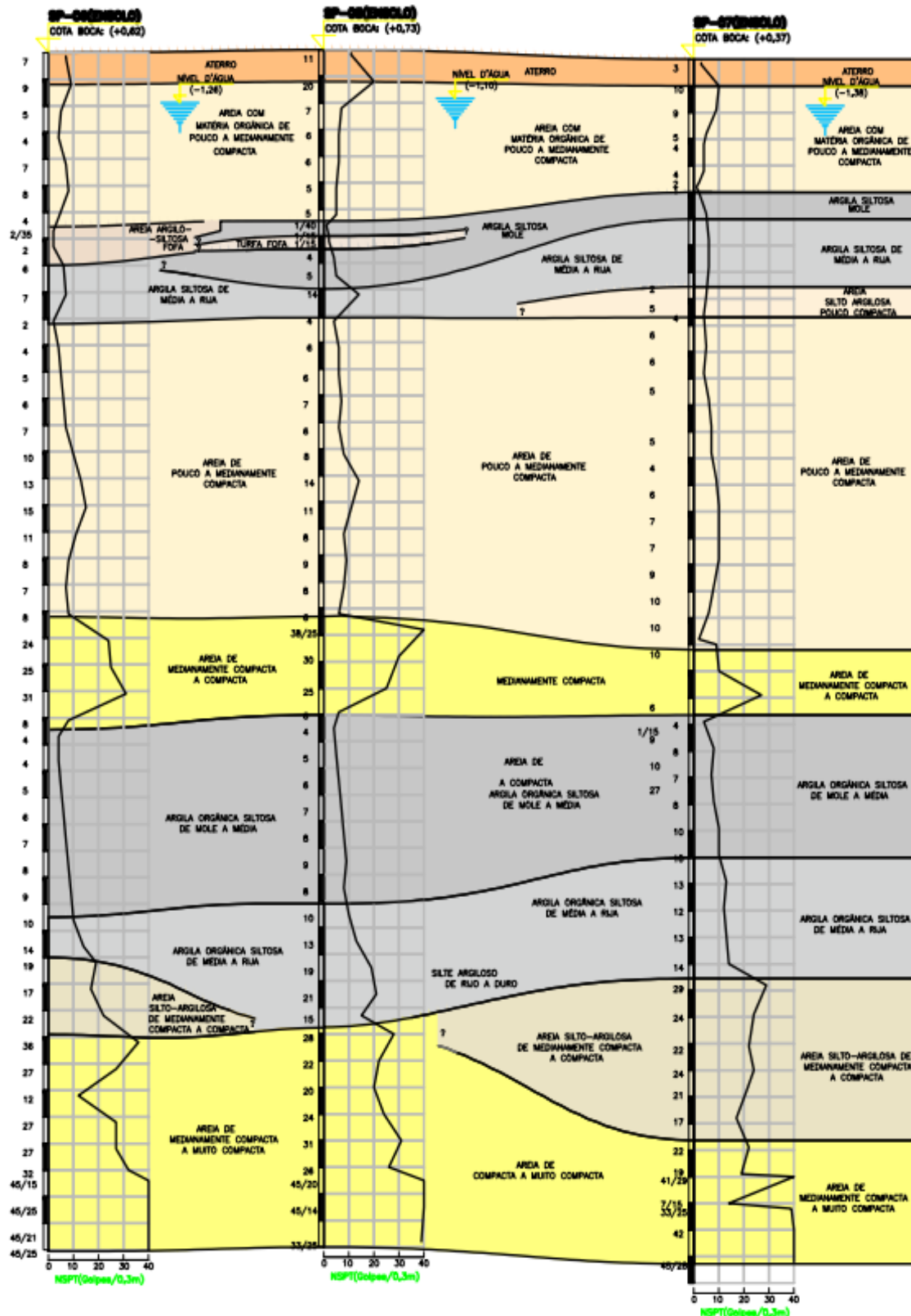
Para a caracterização do solo, primeiramente, foram realizadas sondagens do tipo a percussão realizada com auxílio de circulação de água. No total, foram realizados 11 furos de sondagem, e é possível visualizar na Figura 24 um desenho esquemático com os locais onde foram realizados os furos - locação de sondagem. Na Figura 25, observa-se o perfil de sondagem baseado nos furos próximos aos locais onde houve a cravação de estacas onde foi realizada a medição. As medições de vibração realizadas se dão próximo à torre B, dessa forma, o perfil geotécnico foi desenvolvido os furos localizados na região.

Figura 24 – Desenho esquemático apresentando locação das sondagens com cotas da boca de furo (mangueira de nível) de sondagem: SP-01: +1,36; SP-02: +1,47; SP-03: +1,20; SP-04: +0,76; SP-05: +0,73; SP-06: +0,62; SP-07: +0,37; SP-08: +0,44; SP-09: +0,42; SP-10: +1,13; SP-11: +1,14



Fonte: Autor (2022)

Figura 25 – Perfil do subsolo da região na qual foram realizadas as medições



Fonte: Autor (2022)

Com base nos resultados das sondagens fornecidas e considerando os Furos SP-06, SP-05 e SP-07 visto que foram os mais próximos do local onde foi realizada a medição com o geofone, foi gerado o perfil do subsolo. Esse perfil de sondagem se caracterizou majoritariamente por camadas intercaladas de areia e argila, sendo basicamente composto por uma camada de aterro, areia com matéria orgânica, areia argilo-siltosa, argila siltosa, areia compacta, argila orgânica e finalizando em areia compacta. A cota da boca de furo variou entre + 0,30 m e + 0,75 m e o nível de água a cerca de 3,0 m de profundidade. Devido a baixa resistência das camadas do subsolo, a solução foi a cravação de estacas a uma profundidade a cerca de 43,0 m, visto que as resistências foram de valores relativamente medianos a baixos, o pico de partícula deve se dar entre a transição de camadas de solos com resistências maiores.

3.4.1.3 - Projeto de Fundações

O projeto das duas torres é composto de estacas metálicas e de hélice contínua. As estacas metálicas utilizadas para a execução do projeto foram projetadas em três partes diferentes. Sendo classificadas em: “Tipo A”, “Tipo B” e “Tipo C”. As estacas metálicas do Tipo A são compostas por 4 elementos, sendo 3 elementos de 12 m de comprimento e o último elemento de 6 metros de comprimento. O perfil localizado da cota -42,70 a -30,70 é composto pelo perfil HP – 310 x 79 (mm x kg/m), seguido por um perfil do tipo HP – 310 x 93 (mm x kg/m) da cota -30,7 à cota -18,70 e dois perfis do tipo HP – 310 x 125 (mm x kg/m), localizados na cota -18,7 à cota 0,7. A estaca em questão, de acordo com os projetos fornecidos, possui uma carga admissível a compressão permanente de 2.200 kN, uma carga admissível a compressão total de 2.530 kN e uma carga admissível à tração total de 300 kN.

As estacas do Tipo B, são compostas por 4 perfis, sendo 3 perfis de 12 metros de comprimento e 1 perfil com 6 m de comprimento. O primeiro perfil localiza-se na cota de ponta -42,70 e finaliza na cota -30,70 com o perfil metálico do tipo HP – 30 x 79 (mm x kg/m), seguido por um perfil do tipo HP 310 x 93 (mm x kg/m) da cota -30,70 a cota -18,70 e, os dois últimos perfis são do tipo HP – 310 x 110 (mm x kg/m), localizando-se da cota -18,70 a cota 00,70.

As estacas do Tipo C também possuem 4 perfis, contudo 3 perfis possuem 12 m de comprimento e o último perfil apresenta apenas 4 m de comprimento, totalizando 40 m de comprimento de estaca. Seus dois primeiros perfis são do tipo HP – 310 x 79 (mm x kg/m) iniciando na cota -40,70 e finalizando na cota -16,70. Seguido de dois perfis do tipo HP – 310 x 93 (mm x kg/m), iniciando na cota -16,70 e finalizando na cota do terreno: -0,7 m.

No Quadro 2, apresentado é possível observar um breve resumo de todas as estacas metálicas contempladas nas torres A e B.

Quadro 2 – Quantitativos Totais das Torres "A" e "B"

Perfil Laminado Açominas	Número de Estacas	Cota de Ponta (m)	Comprimento (m)	Comprimento Total (m)
Tipo A	156	-42,70	42,00	6552
Tipo B	47	42,70	42,00	1974
Tipo C	13	-40,70	40,00	520

Fonte: Autor (2022)

Totalizando 216 estacas, um comprimento total de 9.046,00 e um total de aço de 907.044,00 kg. Vale ressaltar que a cota de cravação é – 0,70 m.

A torre A é composta de estacas do tipo hélice contínua e estacas metálicas. Para a construção desse empreendimento foram utilizadas 102 estacas metálicas do Tipo A, 17 estacas metálicas do Tipo B e 13 estacas metálicas do Tipo C. A torre B utiliza apenas estacas metálicas do Tipo A e Tipo B. Sendo 54 estacas metálicas do Tipo A e 30 estacas metálicas do Tipo B.

3.4.2 – ESTUDO DE CASO 02 – Recife Antigo – Estaca Hélice e Estaca Raiz

3.3.2.1 - Localização e Características do empreendimento

O empreendimento em questão localiza-se na área central da cidade do Recife, popularmente conhecida como “Recife Antigo”. Trata-se dos antigos silos do moinho de trigo que existem desde 1914. No projeto, tem-se a construção de um edifício garagem de 8 pavimentos, a transformação dos silos em edifícios residenciais e espaços corporativos empresariais, centro comercial e hotel. Nesse caso, as medições foram referentes à construção do edifício garagem e

o reforço de fundação no empreendimento existente – que passou pelo processo denominado de “retrofit” e será utilizado como hotel.

Como existem dois métodos de execução e tipos de estacas diferentes, entende-se que será obtido apenas como 1 caso de obra, porém, com dois tipos de execução e estacas diferentes.

Na Figura 26A, é possível observar a imagem vista de cima da Obra 2. Sendo o prédio circulado em amarelo foi necessária a sua demolição para a construção do edifício garagem em estacas do tipo hélice contínua e na Figura 26B observa-se as imagens de satélite onde houve a demolição de parte do edifício para a passagem das máquinas roto-percussoras para o reforço de fundação com estacas do tipo raiz.

Figura 26 – Imagens de Satélite dos Antigos Silos do Moinho de Trigo no Recife Antigo com círculo em Vermelho Determinando a Zona de Obra, com círculo e seta amarelos sob Vistas: A) Superior e B) Frontal



Fonte: Google Maps e Google Earth (2021)

A seta superior em verde, indica o edifício no qual houve o reforço de fundação. Para essa medida, foi adotada a utilização da estaca do tipo raiz. No caso do galpão indicado pela seta em amarelo, o mesmo foi demolido para a construção de um edifício garagem. Para a construção deste anexo, foi adotada a estaca do tipo hélice contínua.

3.4.2.2 – Características do subsolo

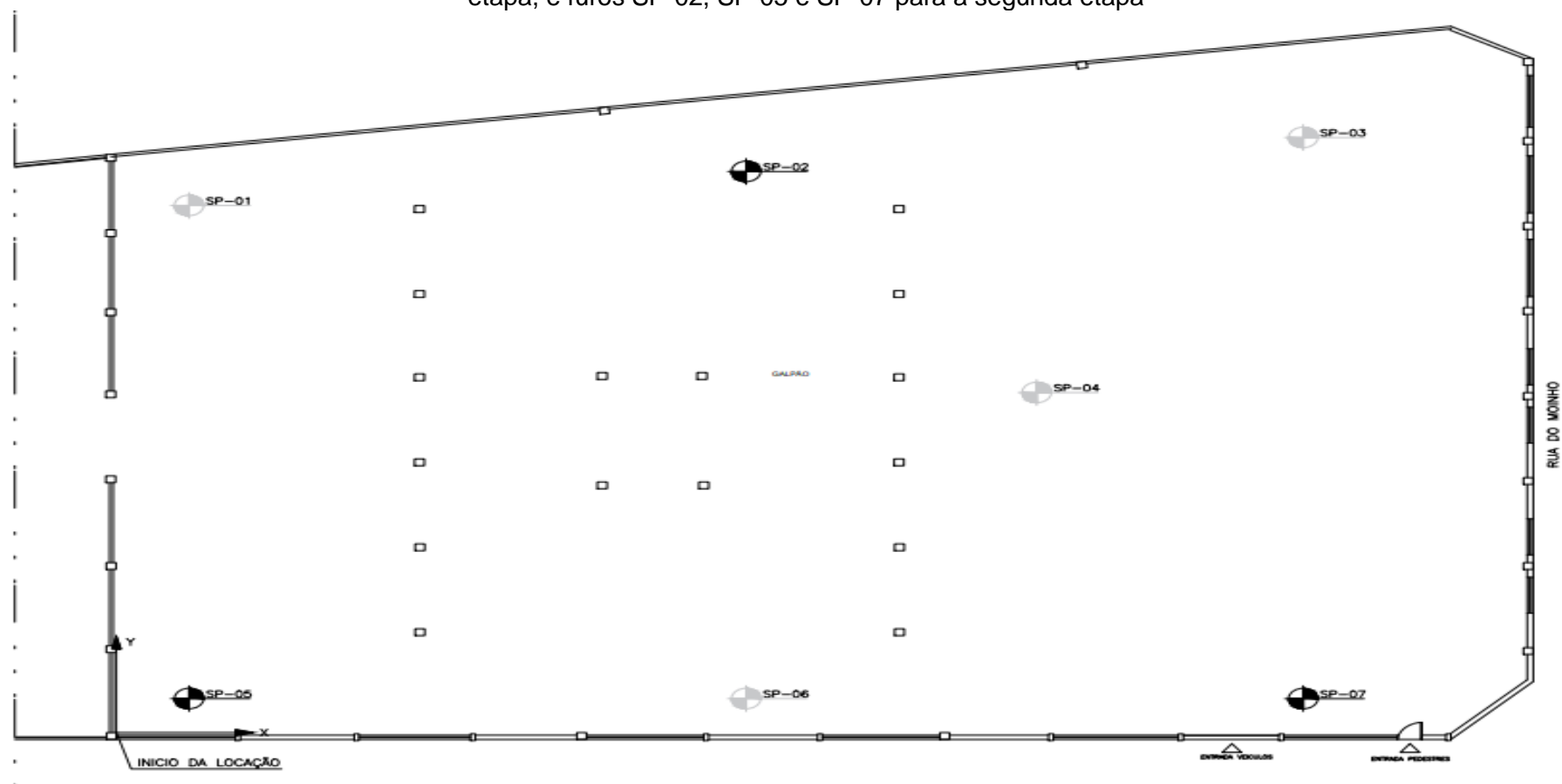
No caso das estacas do tipo raiz, o ocorrido foi que a vibração gerada pela cravação da estaca não chegou a apresentar valores significativos. O que chegou a realmente causar incômodo foi o fato de que a máquina emitia som de intensidade relativamente alta.

A Figura 27 apresenta os pontos de realização de sondagem para a projeção e execução do edifício garagem em estaca do tipo hélice. Para esse local, foram realizados 7 (sete) furos de sondagem em duas etapas distintas divididas em Fase 01 e Fase 02 (com cerca de 1 mês de diferença). Os Furos de sondagem da primeira etapa se encontram com os símbolos transparentes e contemplam os furos SP-01, SP-03, SP-04 e SP-06. Os furos de sondagem realizados na segunda etapa, são os furos SP-02, SP-05 e SP-07.

Logo em seguida, em anexo, na Figura 28 observa-se a locação de sondagem do local onde foi realizada a cravação das estacas do tipo raiz seguido pelo perfil de sondagem da área (visto na Figura 29). Foram realizados 9 (nove) furos de sondagem sendo apenas os furos SP - 06, SP - 03, SP - 04 e SP - 05 respectivamente utilizados para a confecção do perfil.

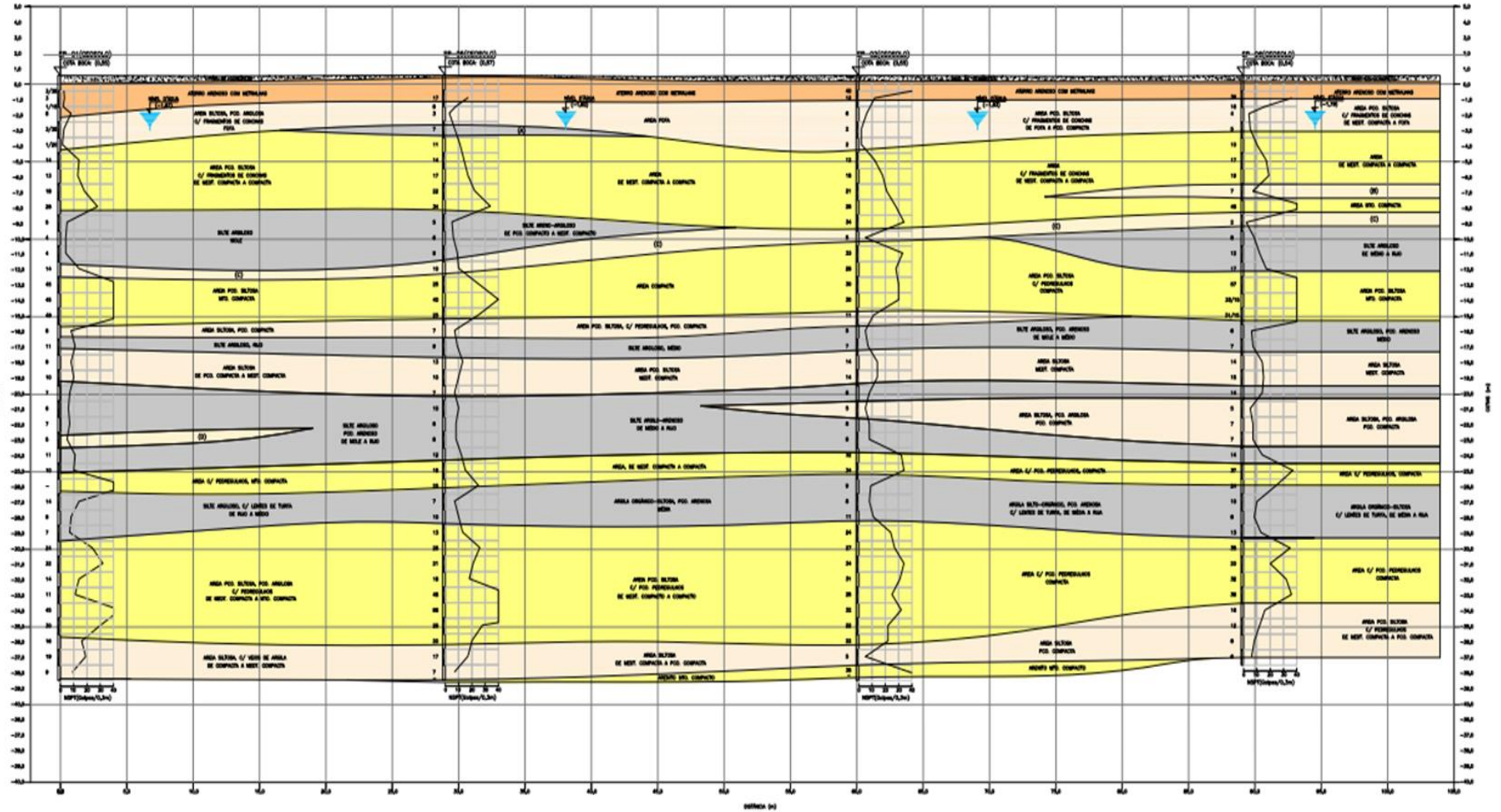
Apesar da locação de sondagem mostrar 7 furos de sondagem, no perfil em anexo acima, possui apenas 4 furos de sondagem. Os furos escolhidos para a reprodução do perfil foram selecionados pois se situavam no local onde houve as medições com o geofone. Os furos selecionados para a confecção do perfil geotécnico foram os furos SP – 01, SP – 05, SP – 02 e SP – 06 respectivamente. A cota da boca de furo variou entre +0,54 m e +0,55 m e o nível de água entre -1,79 m e -1,87 m. O perfil se caracteriza por camadas sucessivas de areia siltosa, silte argiloso mole, areia pouco siltosa, e é possível notar que, essas alternâncias de camadas com resistências de diferenças discrepantes, vão interferir diretamente nas medições das cravações das estacas.

Figura 27 - Localização de sondagem em edifício garagem - estaca tipo hélice contínua com Furos SP-01, SP-03, SP-04, SP-06, para a primeira etapa, e furos SP-02, SP-05 e SP-07 para a segunda etapa



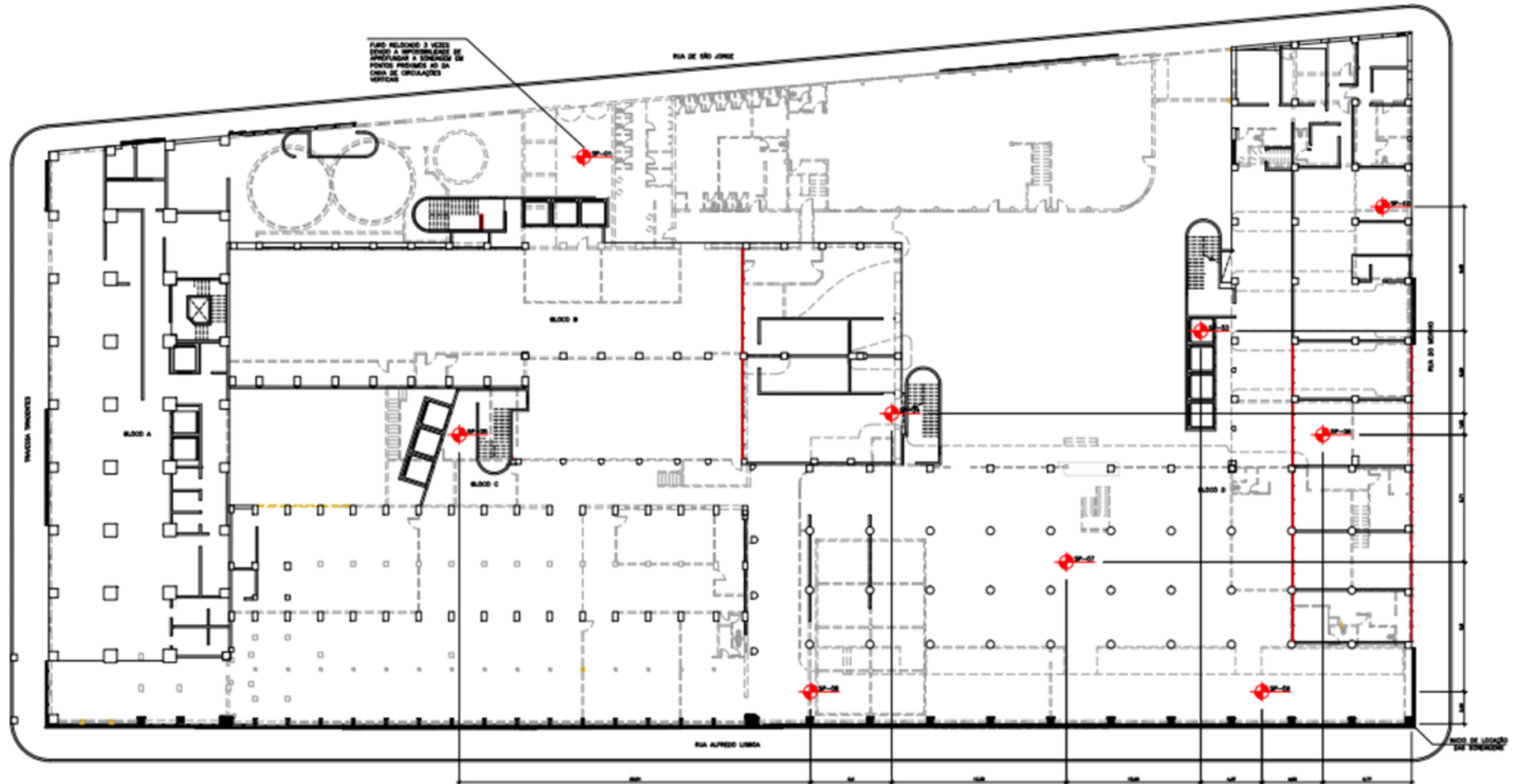
Fonte: Autor (2022).

Figura 28 - Perfil de Sondagem de área com cravação de estaca hélice contínua



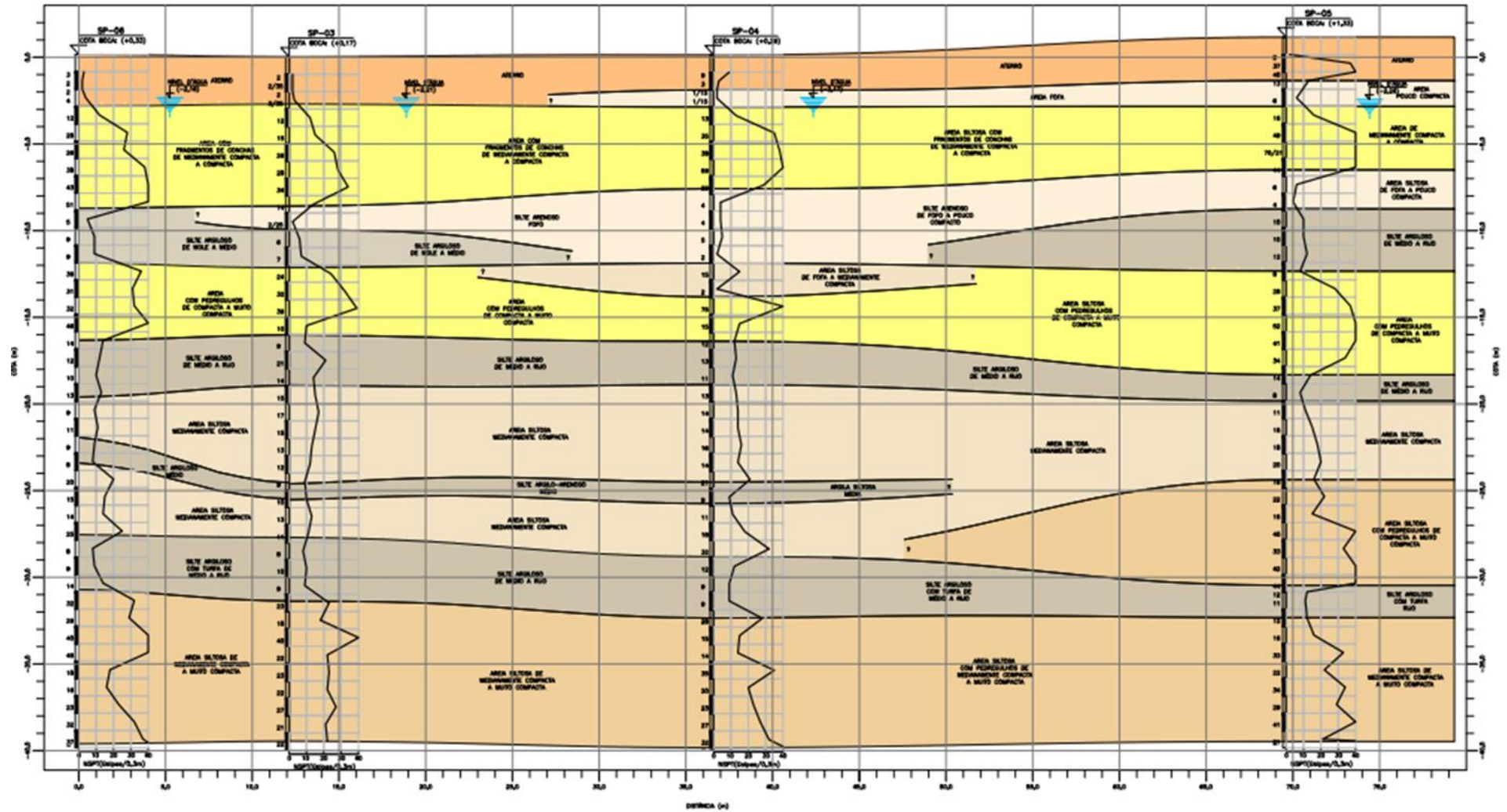
Fonte: Autor (2022)

Figura 29 - Locação de sondagem da região com cravação de estaca raiz



Fonte: Autor (2022)

Figura 30 - Perfil de sondagem de região com cravação de estaca raiz



Fonte: Autor (2022).

O perfil geotécnico anexado acima (Figura 30), é composto de quatro furos: SP – 06, SP – 03, SP – 04 e SP – 05. A cota de boca de furo varia entre +,017 m e +1,33 m e o nível de água entre – 2,16 m e -2,26 m de profundidade. De forma geral, o perfil de sondagem é composto por camadas de aterro, areia com fragmentos de conchas, silte argiloso de consistência de mole a média, areia com pedregulhos, silte argiloso e finalizando com areia siltosa medianamente compacta.

3.4.2.3 - Projeto de Fundações

Como neste estudo de caso possui dois tipos de execução de fundação, conseqüentemente, existem dois projetos de fundações diferentes. A seguir, será descrito o projeto elaborado para a execução das estacas do tipo hélice e posteriormente, das estacas do tipo raiz.

No caso do projeto de fundação das estacas do tipo hélice contínua, foi indicado em projeto estacas de 400 e 500 mm de diâmetro, sendo 55 estacas de 400 mm, com 6 barras de 16 mm de CA-50, estribos de 8,0 mm a cada 20 cm de CA-50 e comprimento de 24,5 m e 172 estacas de 500 mm com 6 barras de 20 mm de CA-50, estribos de 8,0 mm a cada 20 cm de CA-50 e comprimento de 24,5 m, ambas com -24,4 m de cota de ponta.

Para as estacas de 400 mm, o valor da compressão permanente se deu em 800 kN e 1.040 kN de compressão total. Enquanto as estacas de 500 mm devem apresentar uma compressão permanente de 1.300 kN e compressão total de 1.690 kN.

No Quadro 3 e no Quadro 4 abaixo, é possível observar um resumo das informações sobre o projeto supracitado.

Quadro 3 – Resumo das características dos quantitativos das estacas do tipo hélice contínua

\varnothing (mm)	Número de Estacas	Cota de Ponta (m)	Comprimento (m)	Comprimento Total (m)
400	55	-24,4	24,5	1.347,5
500	172	-24,4	24,5	4.214,0

Fonte: Autor (2022).

Quadro 4 – Resumo das características das estacas do tipo hélice contínua

\varnothing (mm)	Ferragem Longitudinal	Comp. armação longitudinal (m)	Ferragem transversal
400	6 \varnothing 16.0mm - CA 50	6,0 e 8,0	\varnothing 8,0-c.20-CA 50
500	6 \varnothing 20.0mm - CA 50	6,0	\varnothing 8,0-c.20-CA 50

Fonte: Autor (2022).

O projeto de fundação das estacas do tipo raiz indica estacas de 250 mm de diâmetro, com 6 barras de 20 mm de CA-50, estribos de 6,3 mm a cada 20 cm de CA-50 e comprimento de 17,0 m. No total, são 45 estacas para a área vista na Figura 29 com a locação de sondagem.

As estacas em questão, de acordo com os projetos fornecidos, possuem uma carga admissível à compressão permanente de 550 kN e uma carga admissível a compressão total de 633 kN.

As informações descritas acima, foram resumidas e organizadas no Quadro 5 e no Quadro 6 abaixo.

Quadro 5 – Resumo das características dos quantitativos das estacas do tipo raiz

\varnothing (mm)	Número de Estacas	Cota de Ponta (m)	Comprimento (m)	Comprimento Total (m)
250	45	-16,50	17,00	765

Fonte: Autor (2022)

Quadro 6 – Resumo das características das estacas do tipo raiz

\varnothing (mm)	Ferragem Longitudinal	Comp. armação longitudinal (m)	Ferragem transversal
250	6 \varnothing 20.0mm - CA50	17,0	\varnothing 6,3-c.20-CA 50

Fonte: Autor (2022)

3.4.3 – ESTUDO DE CASO 03 - Derby

3.3.3.1 - Localização e Características do empreendimento

Para a construção do ambiente que contempla o estudo de caso 3, se fez necessário a utilização de estacas do tipo pré-moldadas de concreto visto que

havia uma camada considerável de solo mole no subsolo. Por isso, o grande diferencial da obra.

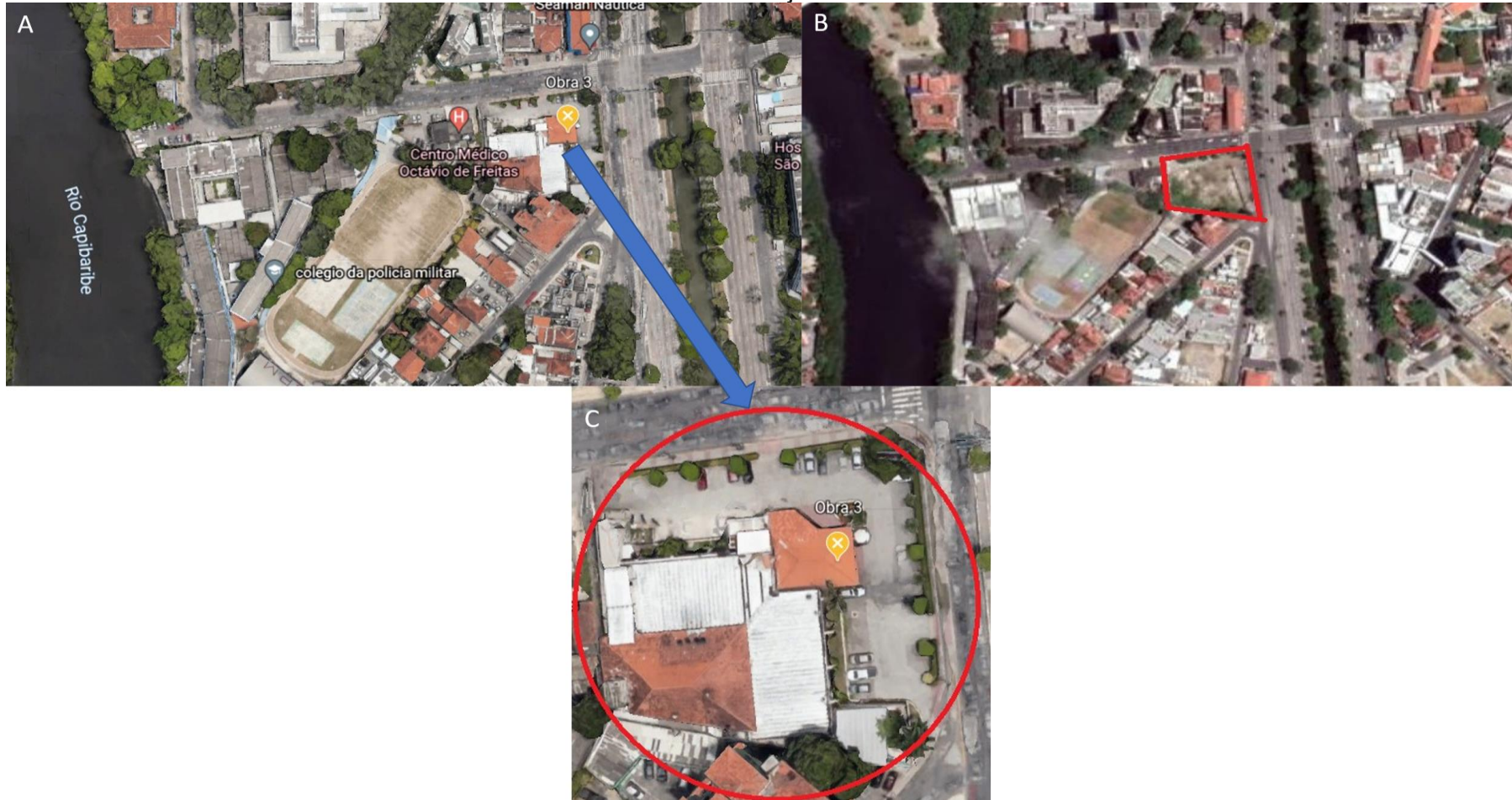
O caso de Obra 3 foi selecionado para serem feitas as medições devido a uma série de fatores. Primeiramente, o subsolo do local conta com uma camada de solo mole de aproximadamente 30 m de profundidade – fato esse que agrega de forma positiva e estatística o banco de dados existente a respeito do comportamento do solo-estrutura. Segundamente, esse empreendimento foi construído em uma região na cidade do Recife conhecida como “Polo médico” recifense – em outras palavras, é uma área cercada de hospitais, clínicas médicas, consultórios – conseqüentemente, a cravação de estacas pré-moldadas em concreto pelo martelo hidráulico poderia causar incômodos à vizinhança.

Na Figura 31 se faz possível observar imagens vistas de satélite da obra antes da demolição do terreno para a construção do novo empreendimento, seguido da imagem de satélite do terreno pronto para o início do processo de estaqueamento.

3.3.3.2 – Características do subsolo

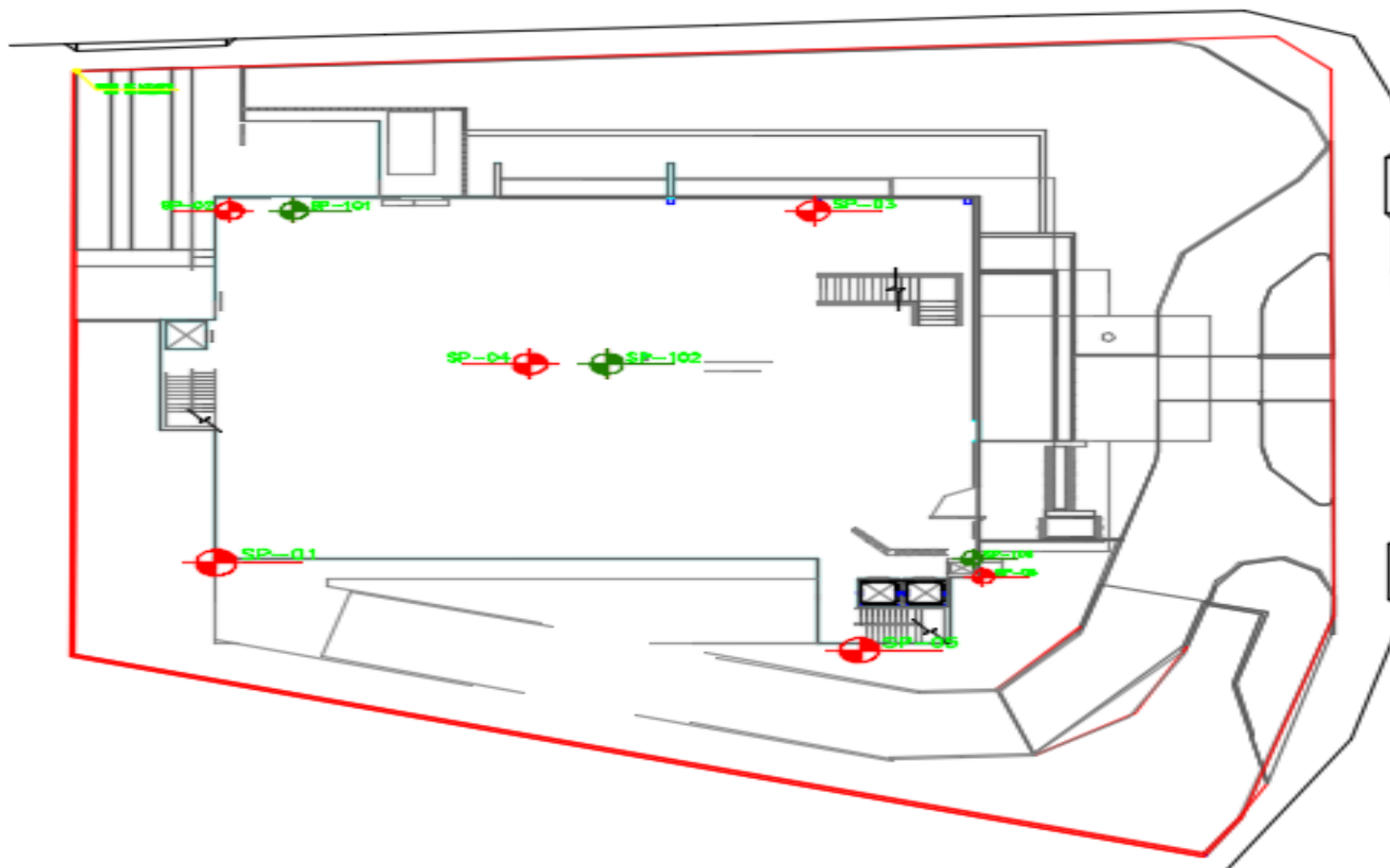
Na Figura 32, encontram-se as locações dos furos de sondagem realizados in loco sendo os furos demarcados em vermelho: as sondagens realizadas inicialmente e os furos demarcados em verde foram provenientes de uma segunda sondagem realizada para melhor estudo do terreno e tomada de decisão de escolha de tipo de fundação a ser executada.

Figura 31 – Imagens de Satélite da Obra 3: a) Antiga Construção no Local, b) Terreno com Antiga Construção Demolidida e c) Zoom da Antiga Construção



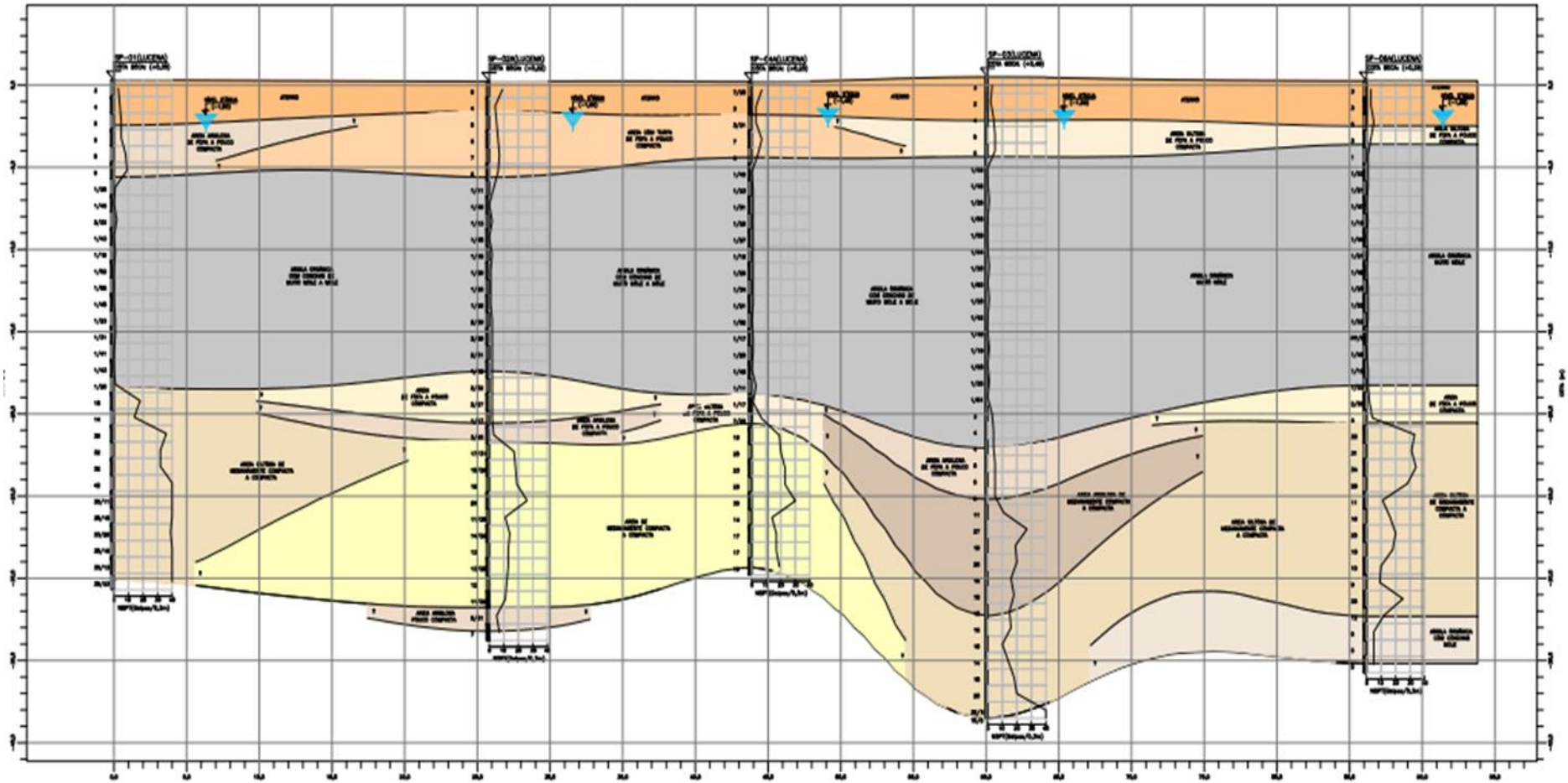
Fonte: Google Mapas e Google Earth

Figura 32 - Locação de sondagem na Obra 3.



Fonte: Autor (2022).

Figura 33 - Perfil de sondagem do caso de Obra 3.



Fonte: Autor (2022).

O perfil representado acima, é composto por 5 furos de sondagem (SP – 1, SP – 02A, SP – 04A, SP – 03 e SP – 06A), sendo o nível de água em aproximadamente 3,0 m de profundidade para todos os furos e uma cota de boca de furo que varia entre +0,2 e +0,45. De forma geral, o perfil pode ser visualizado em anexo. Mas, vale ressaltar, a averiguação da camada que varia de 12,0 m a 17,5 m de espessura, de argila orgânica com conchas de consistência de muito mole a mole. Essa camada, vai contribuir de forma significativa na medição realizada através do geofone devido a sua baixa resistência. Logo após, foi verificada uma camada de areia (fofa ou argilosa), material mais resistente onde houve uma resistência a penetração maior e conseqüentemente influencia nos dados das medições do estudo de caso em questão.

3.4.3.3 - Projeto de Fundações

Para o projeto de fundações elaborado, uma série de diretrizes foram tomadas. O tipo de estaca adotada, foi estaca pré-moldada em concreto em dois tipos: Estacas pré-moldadas em concreto armado com 350 e 400 mm de diâmetro, sendo 71 estacas de 350 mm com 23,0 m de comprimento e 80 estacas de 400 mm com o comprimento de 23,0 m.

Em relação às características das cargas de trabalho, temos as estacas de 350 mm de diâmetro com 600 kN de compressão permanente e 690 kN de compressão total. Para as estacas de 400 mm de diâmetro, foi prevista uma carga de compressão permanente de 700 kN e 805 kN de compressão total. As informações descritas encontram-se resumidas no Quadro 7 e no Quadro 8.

Quadro 7 – Resumo das características dos quantitativos das estacas do tipo pré-moldadas em concreto.

\varnothing (mm)	Número de Estacas	Cota de Ponta (m)	Comprimento (m)	Comprimento Total (m)
350	71	-22,5	23,0	1.633,0
400	80	-22,5	23,0	1840,0

Fonte: Autor (2022).

Quadro 8 – Resumo das características das cargas de trabalho permanente e total das estacas do tipo pré-moldadas em concreto.

\varnothing (mm)	Cota de Ponta	Compressão Permanente (kN)	Compressão Total (kN)
350	-22,5	600	690
400	-22,5	700	805

Fonte: Autor (2022).

3.4.4 – Estudo de Caso 04 – Porto de Galinhas

3.4.4.1 - Localização e Características do empreendimento

O estudo de caso da Obra 4 se passa no litoral de Pernambuco, mais precisamente no distrito de Porto de Galinhas, localizado no município de Ipojuca. O local é um dos destinos mais procurados em Pernambuco por turistas nacionais e internacionais durante todo o ano. Por esse motivo, Porto de Galinhas teve que passar por mudanças espaciais, de infraestrutura, econômicas, entre outras, justamente para atender a necessidade local e, conseqüentemente, pelo grande desenvolvimento do turismo na região.

O terreno onde foram realizadas as medições é situado em uma região onde existem várias pousadas e edificações que foram construídas na década de 70 e 80 – que substituíram residências e casas de veraneios por meios de hospedagem (BARROS JÚNIOR, 2002). Para a execução do empreendimento era necessária a medição de vibração e análise do impacto dessas vibrações devido ao fato das construções vizinhas serem datadas de 40-50 anos atrás e havia algumas reclamações a respeito dos possíveis impactos gerados.

Em relação ao empreendimento, o projeto temo como o objetivo de construir um condomínio com vários flats (quartos do tipo “estúdio” que variam de 23 a 65 m²). A construção possui 5 andares (térreo + 4) e uma ampla área de lazer e estrutura para atender os residentes do empreendimento (deck, piscina privativa, área de lazer, restaurante, spa, academia, coworking etc.).

Na Figura 34, se faz possível a observação das imagens via satélite do empreendimento em questão.

Figura 34 – Imagens de Satélite da Obra 4 com Vistas: a) Superior Frontal e b) Superior Lateral



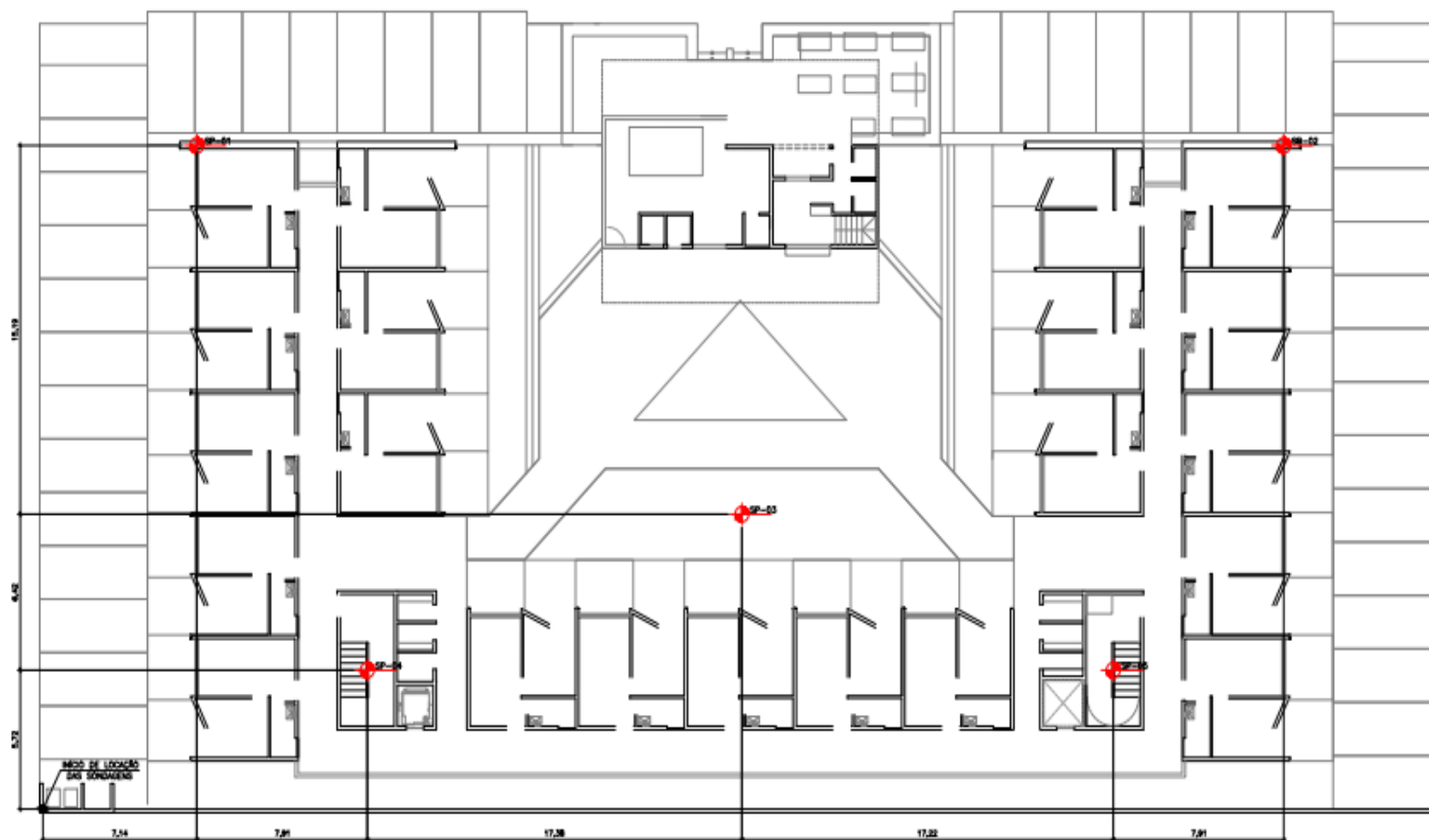
Fonte: Google Earth (2022).

Quanto à solução de fundação, foi preferido a utilização de estacas de compactação visando o melhoramento de solo. Em relação ao subsolo encontrado, pode ser verificado no item 3.3.4.2. Características do Solo”.

3.4.4.2 – Características do subsolo

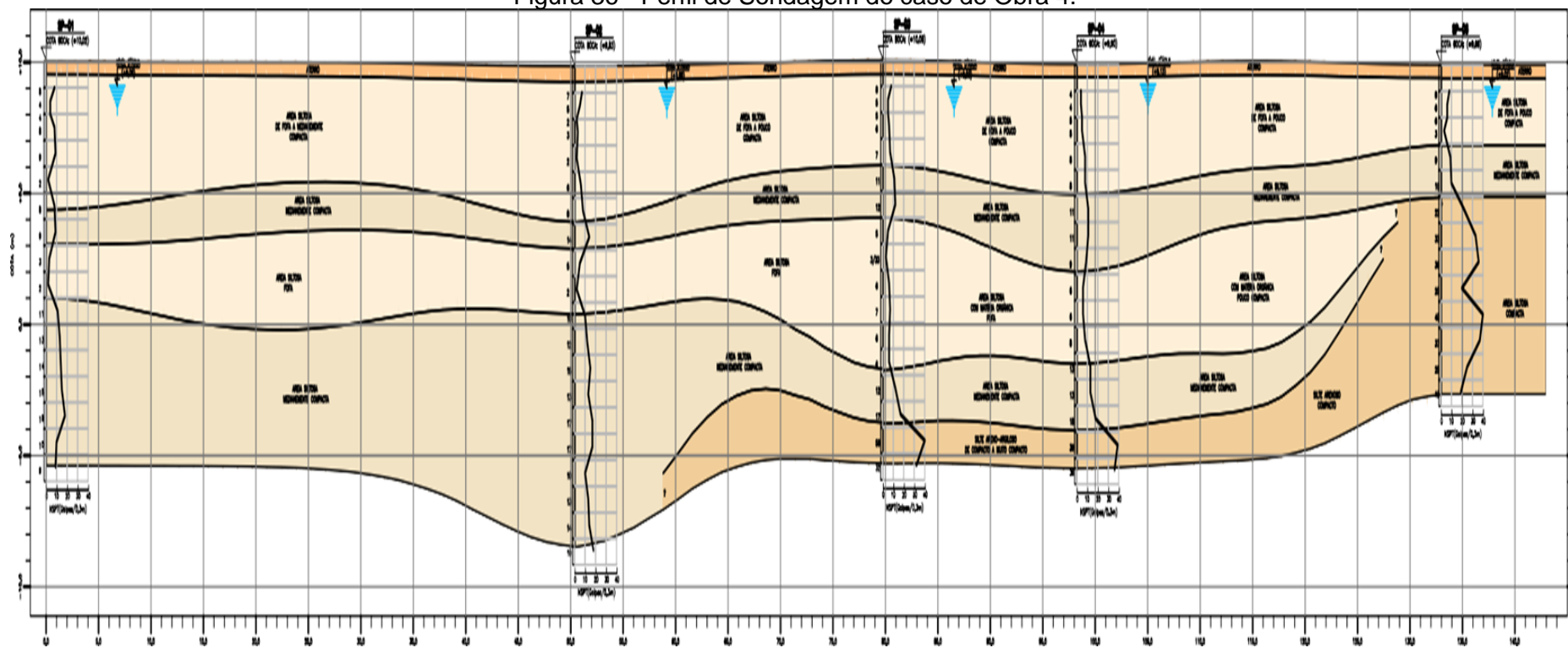
Para a realização da sondagem do terreno, foram realizados furos de sondagem, sua locação pode ser verificada na Figura 35. O perfil gerado a partir dos furos de sondagem distribuídos no terreno pode ser visualizado na Figura 36.

Figura 35 - Locação dos furos de sondagem da Obra 4 com furos SP 01, SP 02, SP 03, SP 04 e SP 05.



Fonte: Autor (2022).

Figura 36 - Perfil de Sondagem do caso de Obra 4.



Fonte: Autor (2022).

O perfil de sondagem representado acima, é composto por 5 furos de sondagem (SP – 01, SP – 02, SP – 03, SP – 04 e SP – 05). As cotas de boca de furo, variam entre +9,0 m e 10,0 m. De forma genérica, o perfil de sondagem é composto por camadas de areia siltosa fofa, areia siltosa de consistência medianamente compacta, seguido por outra camada de areia siltosa de consistência fofa e finalizando em areia siltosa de consistência medianamente compacta.

Para esse caso de obra em específico, as medições diferiram das restantes: os dois sensores foram dispostos em distâncias que variaram entre 3 e 20 m de distância das estacas. Cada sensor registrou um evento de cravação ao longo da perfuração do solo e da retirada do tubo. O sensor 01 foi colocado diretamente no terreno, para medir a propagação das ondas de vibração no solo e o sensor 02 foi fixado na parede da divisa do terreno, em uma altura de aproximadamente 1,50 m, para verificar a propagação da vibração na estrutura (Figura 36). A decisão da utilização do sensor na horizontal se deu após solicitação do cliente e visando averiguar de que forma essas vibrações estariam impactando a estrutura e possivelmente as estruturas vizinhas.

A preparação da superfície para apoiar os sensores foi feita na camada mais superficial do aterro, apenas regularizando o trecho de solo para que o sensor ficasse alinhado com o terreno. Foram selecionadas estacas cravadas nas proximidades do muro de divisa com a edificação vizinha (conforme a Figura 36). Os outros três limites do terreno são voltados para a rua, como pode ser visto da Figura 37.

Figura 37 – Sensor fixado de forma horizontal em muro de divisão entre terrenos



Fonte: Autor (2021)

Figura 38 – Posicionamento do equipamento para medição na sapata P57



Fonte: Acervo (2021)

3.4.4.3 – Projeto de Fundação

O projeto de fundações prevê uma solução em fundação superficial tipo sapatas, associada a uma compactação superficial com estacas de argamassa.

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. A técnica consiste na execução de uma malha de estacas de argamassa sob cada pilar, sobre a qual se apoia a sapata. A ponta das estacas de argamassa executadas varia entre as cotas -3,00 e -5,00, a depender do trecho do terreno.

A execução das estacas é através de um equipamento que fixa um tubo metálico vazado, e o crava no solo utilizando uma vibração gerada por êmbolos. À medida que o tubo é pressionado contra o solo, a vibração auxilia a desagregação dos grãos e facilita a perfuração. A Figura 37 mostra o equipamento usado na obra.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização de todos os ensaios e da análise dos resultados, foi possível analisar os dados obtidos através das medições e comparados com normas vigentes.

4.1. OBRA 1

Na obra 1, foi possível analisar os resultados que estão dispostos abaixo. Na Tabela 4, encontra-se organizado o pilar e estaca no qual foi realizado a medição de acordo com o projeto executivo, o número do perfil (elemento) correspondente de cada estaca, a profundidade inicial de cada elemento, o tipo de estaca utilizada para a cravação, o tipo de cravação, o tipo do perfil da estaca e às distâncias: a 1 e 2 se referem a distância dos sensores do aparelho geofone da estaca e os valores referentes a PPV 1 e PPV 2 refere-se aos valores de pico de partícula medidos durante a cravação das estacas.

Na Figura 39, foi obtido o Gráfico PPV x Distância proveniente dos dados obtidos através das medições, que podem ser visualizados na tabela supracitada. Também, é possível visualizar a comparação realizada entre os valores máximos permitidos em normas, são elas:

- Norma Suíça SN640312 = Limite de 17,78 mm/s;
- Norma Britânica BS 7385-2 = Limite de 15 mm/s;
- Norma Europeia Eurocode 3 = Limite de 20 mm/s.

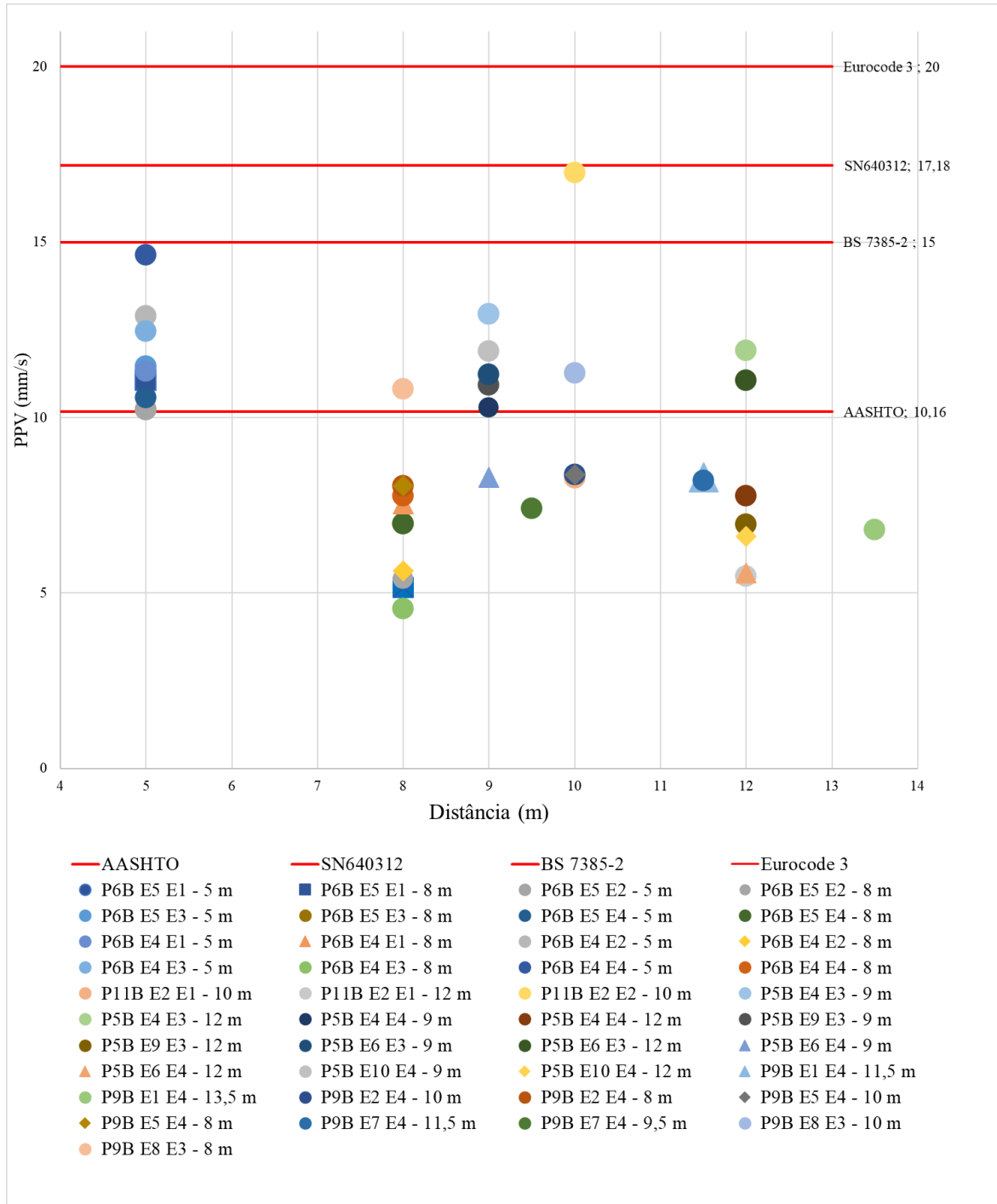
Esses valores e tabelas também se aplicam para os outros estudos de caso visando uma maior compreensão e visualização dos resultados e gráficos.

Tabela 4 – Resumo das medições do Caso de Obra 1 - PPV

Pilar/Estaca	Perfil	Prof. Inicial (m)	Tipo da estaca	Tipo de cravação	Estaca	Dist. 1 (m)	PPV 1 (mm/s)	Dist. 2 (m)	PPV 2 (mm/s)
P6B E5	1	-42,7	Metálica	Vibratória	HP 310 x 79	5,0	11,04	8,0	5,15
	2	-30,7	Metálica	Vibratória	HP 310 x 93	5,0	10,21	8,0	5,40
	3	-18,7	Metálica	Vibratória	HP 310 x 110	5,0	11,44	8,0	7,02
	4	-6,7	Metálica	Vibratória	HP 310 x 110	5,0	10,57	8,0	6,97
P6B E4	1	-42,7	Metálica	Vibratória	HP 310 x 79	5,0	11,33	8,0	7,53
	2	-30,7	Metálica	Vibratória	HP 310 x 93	5,0	12,90	8,0	5,63
	3	-18,7	Metálica	Vibratória	HP 310 x 110	5,0	12,46	8,0	4,55
	4	-6,7	Metálica	Vibratória	HP 310 x 110	5,0	14,63	8,0	7,77
P12B E5	4	-6,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310 x 110	18,0	4,82	21,0	3,97
PB12 E1	3	-6,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310 x 110	18,0	5,97	21,0	3,54
P11B E2	1	-42,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310 x 79	10,0	8,28	12,0	5,47
	2	-30,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310 x 93	10,0	16,97	12,0	4,72
P5B E4	3	-18,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310 x 110	9,0	12,94	12,0	11,91
	4	-6,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310 x 110	9,0	10,28	12,0	7,77
P5B E9	3	-18,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310 x 110	9,0	10,93	12,0	6,95
P5B E6	3	-18,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310 x 110	9,0	11,23	12,0	11,06
	4	-6,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310 x 110	9,0	8,30	12,0	5,57
P5B E10	4	-6,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310 x 110	9,0	11,89	12,0	6,62
P9B E1	4	-6,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310 x 110	11,5	8,30	13,5	6,80
P9B E2	4	-6,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310 x 110	10,0	8,38	8,0	8,04
P9B E5	4	-6,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310 x 110	10,0	8,38	8,0	8,04
P9B E7	4	-6,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310 x 110	11,5	8,20	9,5	7,41
P9B E8	3	-18,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310 x 110	10,0	11,26	8,0	10,81

Fonte: Autor (2022).

Figura 39 - Gráfico PPV x Distância proveniente de dados do Caso de Obra 1.



Fonte: Autor (2022).

A partir dos dados gerados na Figura 39, foi possível observar que todas as estacas medidas, estavam dentro dos valores máximos estabelecidos pelas normas europeias e suíças. Entretanto, alguns elementos de estaca medidos (12 elementos) não se enquadraram nos valores máximos permitidos pela norma britânica nem a americana. Na Tabela 5, encontram-se os dados similares aos presentes na Tabela 4, o que difere, são as medições das frequências (em Hz). A Figura 40, observa-se o gráfico da Velocidade de Partícula x Frequência medidos em Obra 1 e obtidos através dos dados fornecidos na Tabela 5.

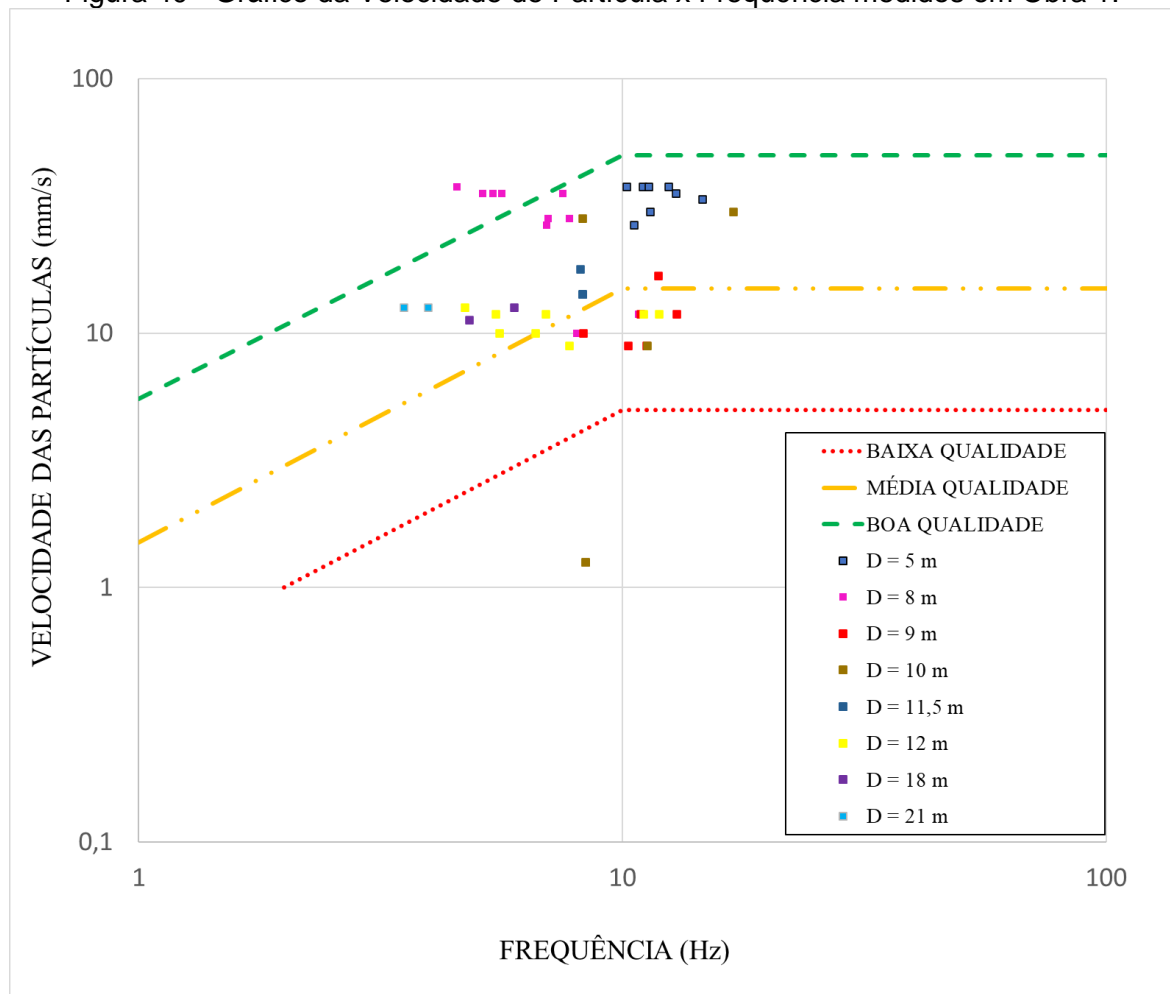
Tabela 5 – Resumo Medições de Frequência - Obra 1

Pilar/Estaca	Perfil	Prof. Inicial (m)	Tipo da estaca	Tipo de cravação	Estaca	Dist. 1 (m)	Freq. 1 (Hz)	Dist. 2 (m)	Freq. 2 (Hz)
P6B E5	1	-42,7	Metálica	Vibratória	HP 310x79	5,0	37,58	8,0	35,48
	2	-30,7	Metálica	Vibratória	HP 310x93	5,0	37,58	8,0	35,48
	3	-18,7	Metálica	Vibratória	HP 310x110	5,0	29,85	8,0	28,18
	4	-6,7	Metálica	Vibratória	HP 310x110	5,0	26,61	8,0	26,61
P6B E4	1	-42,7	Metálica	Vibratória	HP 310x79	5,0	37,58	8,0	35,48
	2	-30,7	Metálica	Vibratória	HP 310x93	5,0	35,48	8,0	35,48
	3	-18,7	Metálica	Vibratória	HP 310x110	5,0	37,58	8,0	37,58
	4	-6,7	Metálica	Vibratória	HP 310x110	5,0	33,50	8,0	28,18
P12B E5	4	-6,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310x110	18	11,22	21	12,59
P11B E2	1	-42,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310x79	10	28,18	12	11,89
	2	-30,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310x93	10	29,85	12	12,59
P5B E4	3	-18,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310x110	9	11,89	12	11,89
	4	-6,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310x110	9	8,91	12	8,91
P5B E9	3	-18,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310x110	9	11,89	12	11,89
P5B E6	3	-18,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310x110	9	8,91	12	11,89
	4	-6,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310x110	9	10,00	12	10,00
P5B E10	4	-6,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310x110	9	16,79	12	10,00
P9B E1	4	-6,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310x110	11,5	14,13	13,5	10,00
P9B E2	4	-6,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310x110	10	1,26	8	10,00
P9B E5	4	-6,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310x110	10	1,26	8	10,00
P9B E7	4	-6,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310x110	11,5	17,78	9,5	21,13
P9B E8	3	-18,7	Metálica	M. Hidráulico	HP 310x110	10	8,91	8	11,89

Fonte: Autor (2022).

No gráfico (Figura 40), notou-se que grande maioria dos valores de velocidade de pico de partícula vs frequência concentra-se acima do limite para edifícios de baixa qualidade, contudo, abaixo dos pontos de edifícios de boa qualidade – o que seria o caso da pesquisa. Alguns pontos apresentam uma frequência um pouco elevada (acima de 10 Hz) do que o esperado, mas esse resultado não influenciou na tendência de danos gerados por tal evento.

Figura 40 - Gráfico da Velocidade de Partícula x Frequência medidos em Obra 1.



Fonte: Autor (2022).

4.2 OBRA 2

A seguir, são representados os resultados das medições realizadas no estudo de caso da obra 2. Vale ressaltar que nesse estudo de caso foram medidas as execuções de estaca do tipo raiz e hélice contínua. As tabelas resumem os elementos, estacas, tipo de estaca, tipo de escavação, a distância dos sensores do equipamento de cravação, os valores de velocidade de pico de partícula e as frequências obtidas durante a medição. As tabelas 6, 7, 8, 9 e 10 representam os dados obtidos pelas medições

realizadas por estacas do tipo raiz e a tabela 11 pela estaca do tipo hélice contínua. A Figura 41 e a Figura 42 são relativas aos gráficos gerados pelas tabelas supracitadas.

Tabela 6 – Resumo das medições do Caso de Obra 1 – PPV e Frequências – Pilar 1, Estaca 1

Pilar/ Estaca	Perfil	Prof. Inicial (m)	Tipo da estaca	Tipo de cravação	Estaca	Dist. 1 (m)	PPV 1 (mm/s)	FREQ. 1 (Hz) - RSA	Dist. 2 (m)	PPV 2 (mm/s)	FREQ. 2 (Hz) - RSA
P1 E1	1		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	8,6	8,41	1,3	10,4	5,3
	2		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	4,7	1,26	1,3	7,8	94,4
	3		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	4,96	94,41	1,3	8,3	11,9
	4		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	5,6	94,41	1,3	9,4	70,8
	5		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	4,15	2,51	1,3	4,8	8,9
	6		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	4,19	94,41	1,3	5,7	10,6
	7		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	9,1	2,82	1,3	7,4	94,4
	8		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	6,1	89,13	1,3	7,6	10,6
	9		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	5,7	94,41	1,3	7,9	84,1
	10		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	4,8	94,41	1,3	8,4	94,4
	11		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	3,9	94,41	1,3	7,6	94,4
	12		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	6,3	94,41	1,3	8,0	94,4
	13		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	5,4	94,41	1,3	8,8	42,2
	14		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	0,4	74,99	1,3	5,6	17,8

Fonte: Autor (2022).

Tabela 7 – Resumo das medições do Caso de Obra 1 – PPV e Frequências – Pilar 2, Estaca 2

Pilar/ Estaca	Perfil	Prof. Inicial (m)	Tipo da estaca	Tipo de cravação	Estaca	Dist. 1 (m)	PPV 1 (mm/s)	FREQ. 1 (Hz) - RSA	Dist. 2 (m)	PPV 2 (mm/s)	FREQ. 2 (Hz) - RSA
P2 E2	1		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	8,0	31,62	1,3	8,5	39,8
	2		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	1,2	39,81	1,3	0,4	26,6
	3		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	0,5322	39,81	1,3	0,6	37,6
	4		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	0,6	66,83	1,3	0,6	63,1
	5		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	0,381	35,48	1,3	0,5	42,2
	6		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	0,464	59,57	1,3	0,8	35,5
	7		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	0,7	56,23	1,3	0,6	59,6
	8		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	0,7	35,48	1,3	0,6	56,2
	9		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	0,5	39,81	1,3	0,7	63,1
	10		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	0,8	39,81	1,3	0,5	26,6
	11		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	0,7	0,01,	1,3	0,9	39,8
	12		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	0,1	29,85	1,3	0,9	0,0
	13		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	0,1	31,62	1,3	0,8	28,2
	14		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	1,0	0,5	31,62	1,3	0,5	31,6

Fonte: Autor (2022).

Tabela 8 – Resumo das medições do Caso de Obra 1 – PPV e Frequências – Pilar 3, Estaca 1

Pilar/ Estaca	Perfil	Prof. Inicial (m)	Tipo da estaca	Tipo de cravação	Estaca	Dist. 1 (m)	PPV 1 (mm/s)	FREQ. 1 (Hz) - RSA	Dist. 2 (m)	PPV 2 (mm/s)	FREQ. 2 (Hz) - RSA
P3 E1	1		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	3,0	3,3	56,23	5,0	2,6	7,94
	2		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	3,0	0,7	56,23	5,0	0,5	59,6
	3		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	3,0	0,2197	74,99	5,0	0,4	42,2
	4		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	3,0	0,3	47,32	5,0	0,1	29,9
	5		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	3,0	0,640	66,83	5,0	0,3	39,8
	6		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	3,0	0,112	14,96	5,0	0,4	37,6
	7		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	3,0	0,1	42,17	5,0	0,1	14,1
	8		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	3,0	0,3	50,12	5,0	0,7	63,1
	9		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	3,0	0,5	63,10	5,0	0,2	47,3
	10		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	3,0	0,8	53,03	5,0	0,1	20,0
	11		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	3,0	0,9	44,67	5,0	0,3	31,6
	12		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	3,0	0,4	44,67	5,0	0,5	50,1
	13		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	3,0	0,4	44,67	5,0	0,1	56,2
	14		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	3,0	0,8	42,17	5,0	0,7	56,2

Fonte: Autor (2022).

Tabela 9 – Resumo das medições do Caso de Obra 1 – PPV e Frequências – Pilar 4, Estaca 1

Pilar/ Estaca	Perfil	Prof. Inicial (m)	Tipo da estaca	Tipo de cravação	Estaca	Dist. 1 (m)	PPV 1 (mm/s)	FREQ. 1 (Hz) - RSA	Dist. 2 (m)	PPV 2 (mm/s)	FREQ. 2 (Hz) - RSA
P4 E1	1		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	2,0	0,3	21,13	3,5	0,5	59,57
	2		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	2,0	1,0	47,32	3,5	0,7	50,1
	3		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	2,0	0,6689	47,32	3,5	2,5	53,1
	4		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	2,0	2,1	53,09	3,5	0,7	53,1
	5		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	2,0	9,962	0,40	3,5	0,7	53,1
	6		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	2,0	2,080	70,79	3,5	0,5	53,1
	7		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	2,0	0,6	35,48	3,5	0,6	53,1
	8		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	2,0	0,5	50,12	3,5	0,8	53,1
	9		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	2,0	0,7	53,09	3,5	0,5	42,2
	10		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	2,0	1,0	63,10	3,5	0,5	0,0
	11		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	2,0	1,5	37,58	3,5	0,4	56,2
	12		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	2,0	0,7	47,32	3,5	17,7	7,1

Fonte: Autor (2022).

Tabela 10 – Resumo das medições do Caso de Obra 1 – PPV e Frequências – Pilar 5, Estaca 1

Pilar/ Estaca	Perfil	Prof. Inicial (m)	Tipo da estaca	Tipo de cravação	Estaca	Dist. 1 (m)	PPV 1 (mm/s)	FREQ. 1 (Hz) - RSA	Dist. 2 (m)	PPV 2 (mm/s)	FREQ. 2 (Hz) - RSA
P5 E1	1		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	4,0	0,3271	47,32	2,5	0,4	29,85
	2		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	4,0	0,6	47,32	2,5	0,5	47,3
	3		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	4,0	0,376	42,17	2,5	0,2	28,2
	4		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	4,0	0,4	47,32	2,5	0,7	59,6
	5		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	4,0	0,181	37,58	2,5	0,6	47,3
	6		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	4,0	0,523	37,58	2,5	0,7	39,8
	7		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	4,0	0,6	47,32	2,5	0,5	35,5
	8		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	4,0	0,4	39,81	2,5	0,5	63,1
	9		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	4,0	0,4	63,10	2,5	0,4	35,5
	10		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	4,0	0,6	56,23	2,5	1,2	0,0
	11		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	4,0	0,7	37,58	2,5	0,1	42,2
	12		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	4,0	0,1	47,32	2,5	0,6	37,6
	13		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	4,0	0,6	47,32	2,5	0,5	47,3
	14		Concreto moldado in loco	Rotação	250 mm	4,0	0,4	0,01	2,5	0,5	0,0

Fonte: Autor (2022).

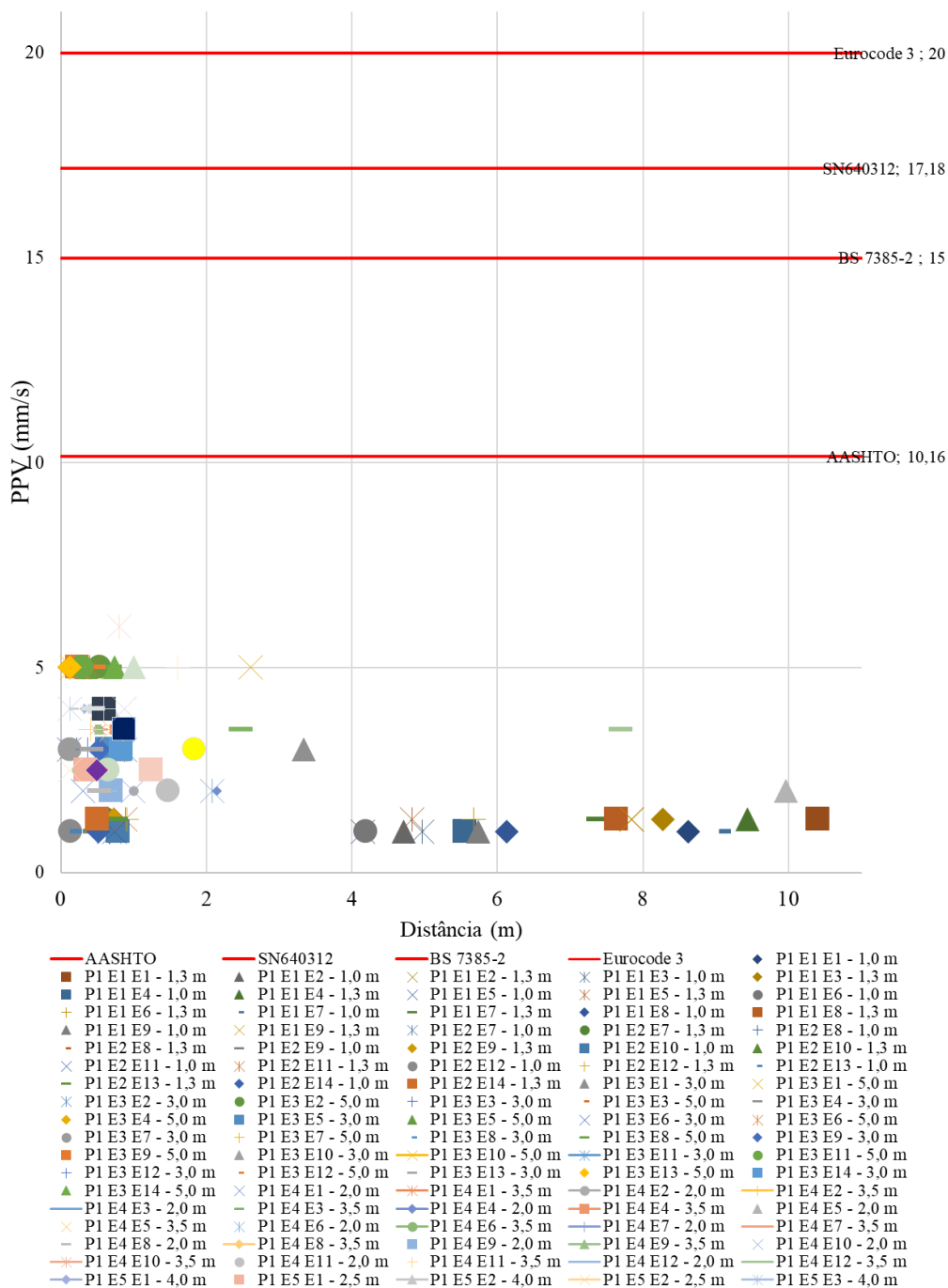
Tabela 11 – Resumo das medições do Caso de Obra 1 – PPV e Frequências - Estacas em hélice contínua

Pilar/ Estaca	Perfil	Prof. Inicial (m)	Tipo da estaca	Tipo de cravação	Estaca	Dist. 1 (m)	PPV 1 (mm/s)	FREQ. 1 (Hz) - RSA	Dist. 2 (m)	PPV 2 (mm/s)	FREQ. 2 (Hz) - RSA
P8 E1	1		Concreto moldado in loco	Hélice contínua	400 mm	3,5	0,87	21,13	5,0	1,0	18,8
P10 E1	1		Concreto moldado in loco	Hélice contínua	400 mm	4,0	0,87	14,96	6,0	0,8	7,8
P15 E1	1		Concreto moldado in loco	Hélice contínua	400 mm	3,0	1,84	74,99	5,0	1,6	75,0

Fonte: Autor (2022).

A partir do Gráfico observado na Figura 41, foi possível constatar que os valores de PPV máximos medidos para os tipos de estacas estavam dentro dos valores estabelecidos pelas normas europeia, suíça, britânica e americana. Esses resultados de valores se dão pelo método de execução das estacas (rotação e hélice) que são de baixo impacto. Vale ressaltar que, acreditava-se que não havia vibração proveniente desses métodos de execução, contudo, é possível afirmar que não só existe vibração como também uma frequência para a execução dessas estacas com valores considerados significativos para os métodos.

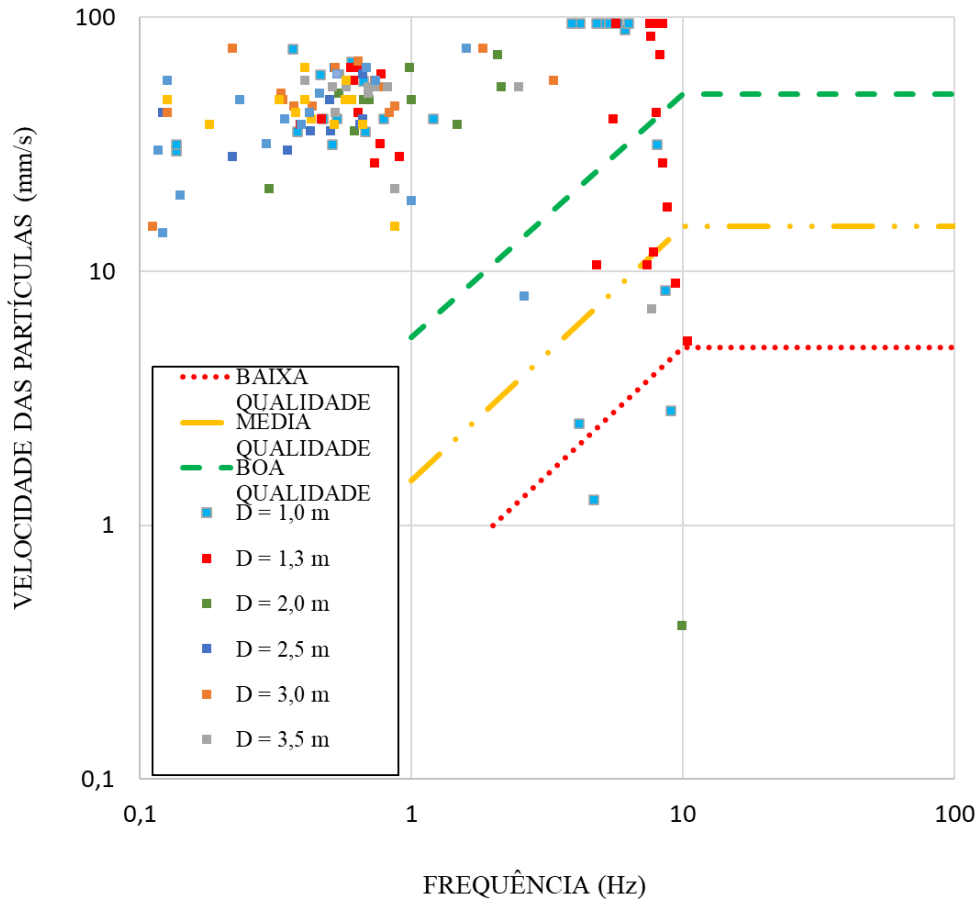
Figura 41 - Gráfico PPV x Distância proveniente de dados do Caso de Obra 2.



Fonte: Autor (2022).

No caso dos resultados apresentados na Figura 42, a grande maioria dos pontos apresentou uma velocidade de pico de partícula relativamente elevada, considerando também os parâmetros das edificações (de boa qualidade). Também, foi verificado que a maioria dos elementos ensaiados estavam dentro dos padrões de frequência esperados para as estacas em questão (abaixo de 10 Hz).

Figura 42 - Gráfico da Velocidade de Partícula x Frequência medidos em Obra 2.



Fonte: Autor (2022).

4.3. OBRA 3

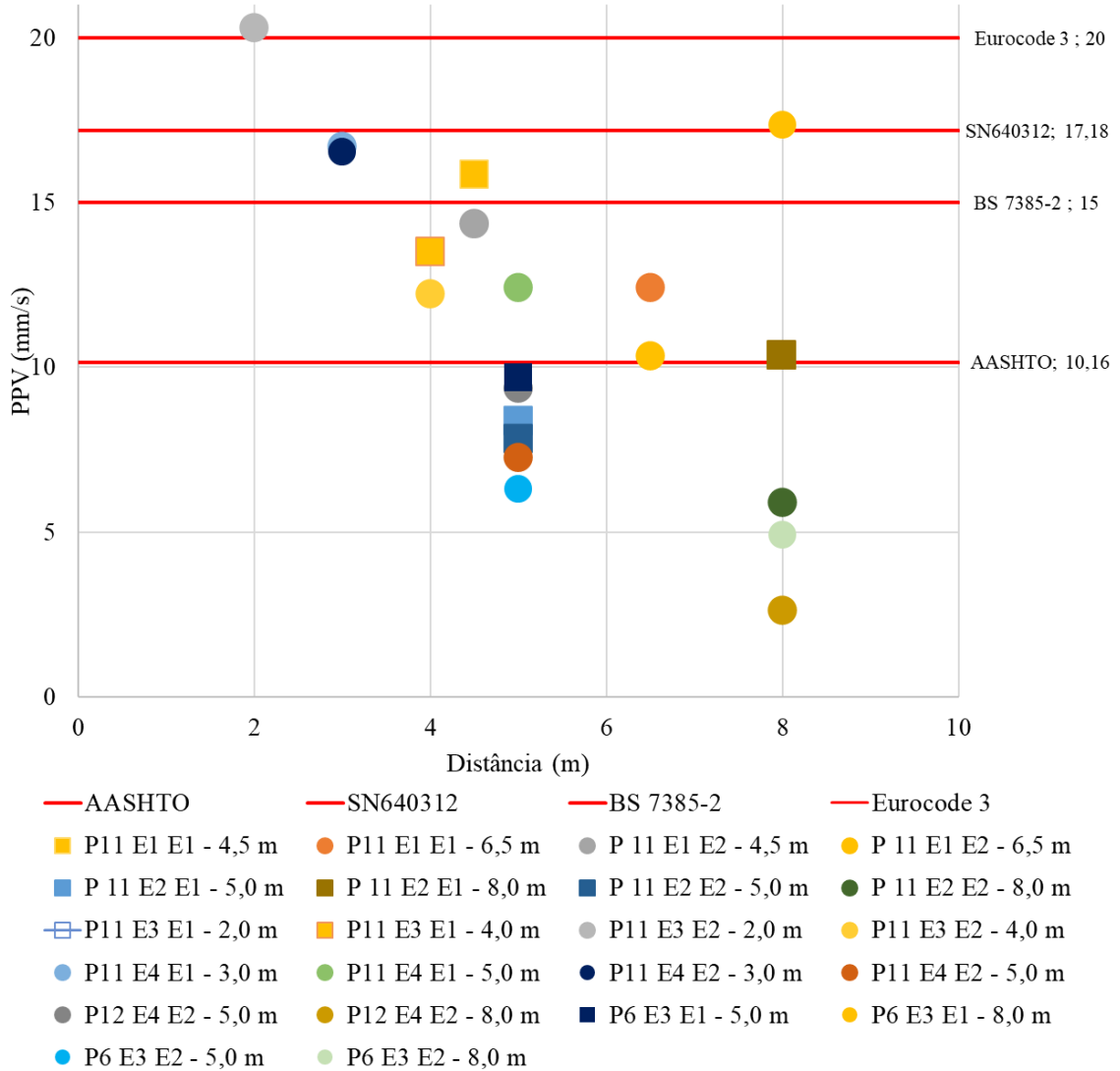
Na Tabela 11, pode-se observar as estacas selecionadas para a medição, seguido pelo número do elemento da estaca no qual foi cravado e sua profundidade inicial. Em seguida, encontra-se o tipo de estaca, que no caso, a utilizada foi a estaca pré-moldada em concreto, o tipo de cravação: martelo hidráulico e a geometria de estaca utilizado em cada cravação. Além disso, também se encontram as distâncias entre os dois sensores do geofone - que variaram entre 2,0 e 8,0 m e os valores de velocidade de pico de partícula medidos durante o processo de cravação. Figura 43, mostra os resultados obtidos através dos dados fornecidos na tabela supracitada e comparando os resultados com as normas vigentes. Em seguida, na Tabela 13, os valores medidos das mesmas estacas diferindo apenas que ao invés de velocidade de pico de partícula, foi informado os valores de frequência, seguidos pela Figura 44, onde se faz possível a visualização do gráfico da velocidade de pico de partícula x a frequência, aplicadas aos parâmetros de qualidade.

Tabela 12 - Resumo das medições do Caso de Obra 3 - PPV

Pilar/Estaca	Perfil	Prof. Inicial (m)	Tipo da estaca	Tipo de cravação	Estaca	Dist. 1 (m)	PPV 1 (mm/s)	Dist. 2 (m)	PPV 2 (mm/s)
P11 E1	1	-46,0	Pré Moldada	M. Hidráulico	EC x 400	4,5	15,86	6,5	12,41
	2	-23,0	Pré Moldada	M. Hidráulico	EC x 400	4,5	14,33	6,5	10,34
P11 E2	1	-46	Pré Moldada	M. Hidráulico	EC x 400	5,0	8,379	8,0	10,34
	2	-23	Pré Moldada	M. Hidráulico	EC x 400	5,0	7,82	8,0	5,09
P11 E3	1	-46	Pré Moldada	M. Hidráulico	EC x 400	2,0	25,24	4,0	13,49
	2	-23	Pré Moldada	M. Hidráulico	EC x 400	2,0	20,30	4,0	12,22
P11 E4	1	-46	Pré Moldada	M. Hidráulico	EC x 400	3,0	16,69	5,0	12,42
	2	-23	Pré Moldada	M. Hidráulico	EC x 400	3,0	16,54	5,0	7,261
P12 E4	2	-23	Pré Moldada	M. Hidráulico	EC x 400	5,0	9,365	8,0	2,61
P6 E3	1	-46	Pré Moldada	M. Hidráulico	EC x 350	5,0	9,692	8,0	17,36
	2	-23	Pré Moldada	M. Hidráulico	EC x 350	5,0	6,309	8,0	4,94

Fonte: Autor (2022).

Figura 43 - Gráfico PPV x Distância proveniente de dados do Caso de Obra 3



Fonte: Autor (2022).

Na Figura 43, é possível visualizar que a grande maioria dos elementos medidos nesse caso de obra, não foram aprovados nas normas europeia, suíça, britânica e americana. Os resultados obtidos demonstraram um valor de velocidade de pico de partícula elevado e poderiam ter causado incômodos e patologias nas estruturas vizinhas (visto que, por exemplo, a 8 metros de distância da cravação da estaca pré-moldada, os níveis de velocidade de pico de partícula ainda se encontram elevados e muitos ainda não estão de acordo com os valores estabelecidos em norma). Contudo,

por ser um local sem edificações de grande porte ou por ser uma área comercial, não houve desentendimentos ou queixas provenientes de edificações vizinhas.

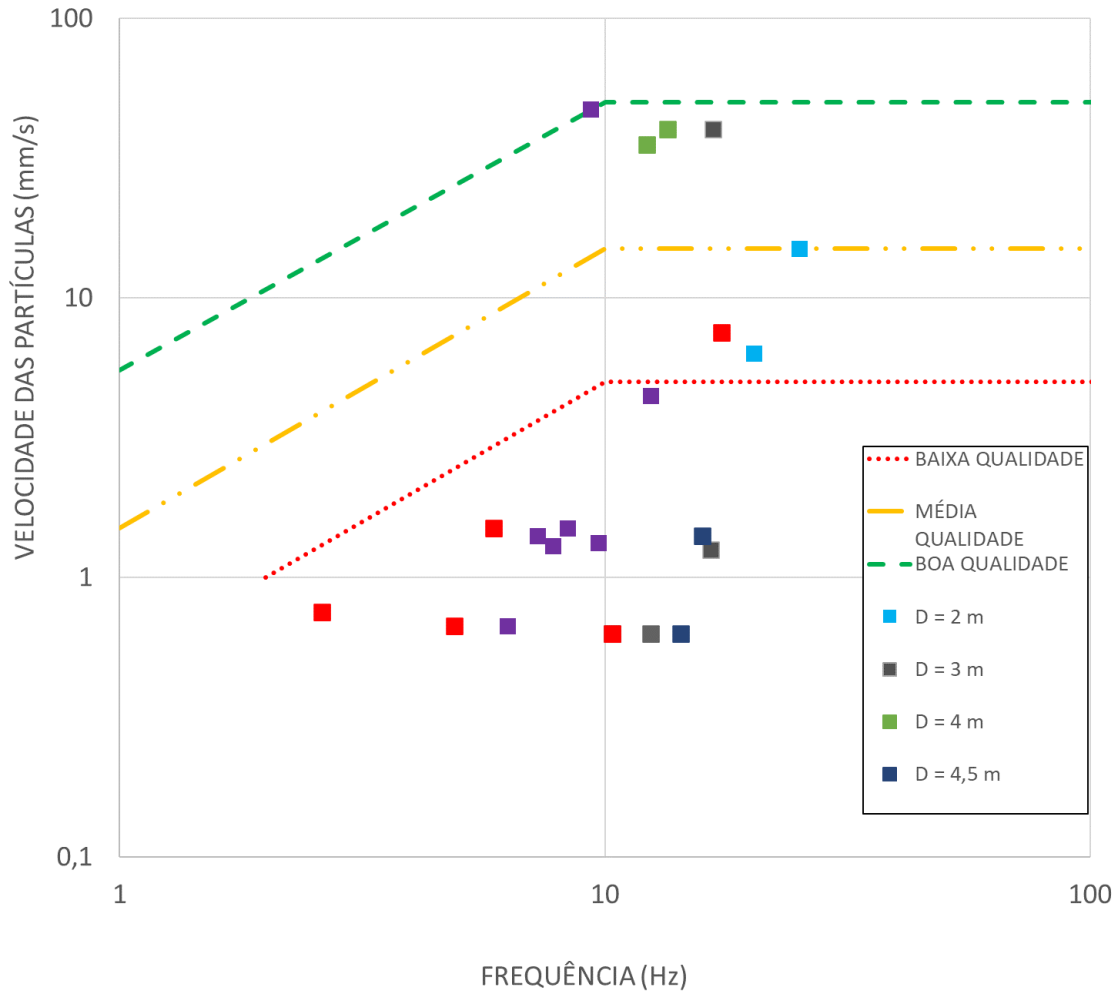
Tabela 13 - Resumo Medições de Frequência - Obra 3.

Pilar/Estaca	Perfil	Prof. Inicial (m)	Tipo da estaca	Tipo de cravação	Estaca	Dist. 1 (m)	FREQ. 1 (Hz) -RSA	Dist. 2 (m)	FREQ. 2 (Hz) - RSA
P11 E1	1	-46,0	Pré-Moldada	M. Hidráulico	EC x 400	4,5	1,41	6,5	0,63
	2	-23,0	Pré-Moldada	M. Hidráulico	EC x 400	4,5	0,63	6,5	0,63
P11 E2	1	-46	Pré-Moldada	M. Hidráulico	EC x 400	5,0	1,50	8,0	0,63
	2	-23	Pré-Moldada	M. Hidráulico	EC x 400	5,0	1,30	8,0	1,50
P11 E3	1	-46	Pré-Moldada	M. Hidráulico	EC x 400	2,0	14,96	4,0	40,10
	2	-23	Pré-Moldada	M. Hidráulico	EC x 400	2,0	6,31	4,0	35,48
P11 E4	1	-46	Pré-Moldada	M. Hidráulico	EC x 400	3,0	40,10	5,0	4,47
	2	-23	Pré-Moldada	M. Hidráulico	EC x 400	3,0	1,26	5,0	1,41
P12 E4	2	-23	Pré Moldada	M. Hidráulico	EC x 400	5,0	47,32	8,0	0,75
P6 E3	1	-46	Pré Moldada	M. Hidráulico	EC x 350	5,0	1,33	8,0	7,50
	2	-23	Pré Moldada	M. Hidráulico	EC x 350	5,0	0,67	8,0	0,67

Fonte: Autor (2022).

Na Figura 44 tem-se o gráfico da velocidade de pico de partícula x frequência medidos no caso de Obra 3. Todos os valores de PPV foram abaixo dos valores permitidos para edificações de boa qualidade e dentro dos padrões normativos, contudo, cerca da maioria dos elementos das estacas apresentaram frequências acima de 10 Hz, valores considerados elevados.

Figura 44 - Gráfico da Velocidade de Partícula x Frequência medidos em Obra 3.



Fonte: Autor (2022).

4.4. OBRA 4

Em relação aos resultados do Caso de Obra 4, pode-se afirmar que foram registrados 38 eventos, sendo medidos os PPV's em 21 pontos no solo e 17 pontos na parede. A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos no solo e a Tabela 15 na Parede. A Figura 45 apresenta os valores medidos do PPV em mm/s vs a distância em metros, e faz uma comparação dos resultados obtidos com as normas internacionais. A legenda indica a nomenclatura de onde foi realizada a medição, com as linhas horizontais representando os limites.

Tabela 14 - Resultados das medições da vibração no solo

Medição no Solo	
Distância (m)	PPV (mm/s)
3,0	17,46
3,5	14,39
4,0	12,69
4,0	15,21
4,5	11,68
5,5	11,22
6,0	8,945
6,0	6,094
7,0	11,6
7,0	11,27
9,0	3,506
9,0	6,226
9,0	6,094
9,0	4,077
9,0	6,309
10,0	5,522
12,0	5,693
13,0	2,725
20,0	2,319
20,0	2,358
20,0	2,393

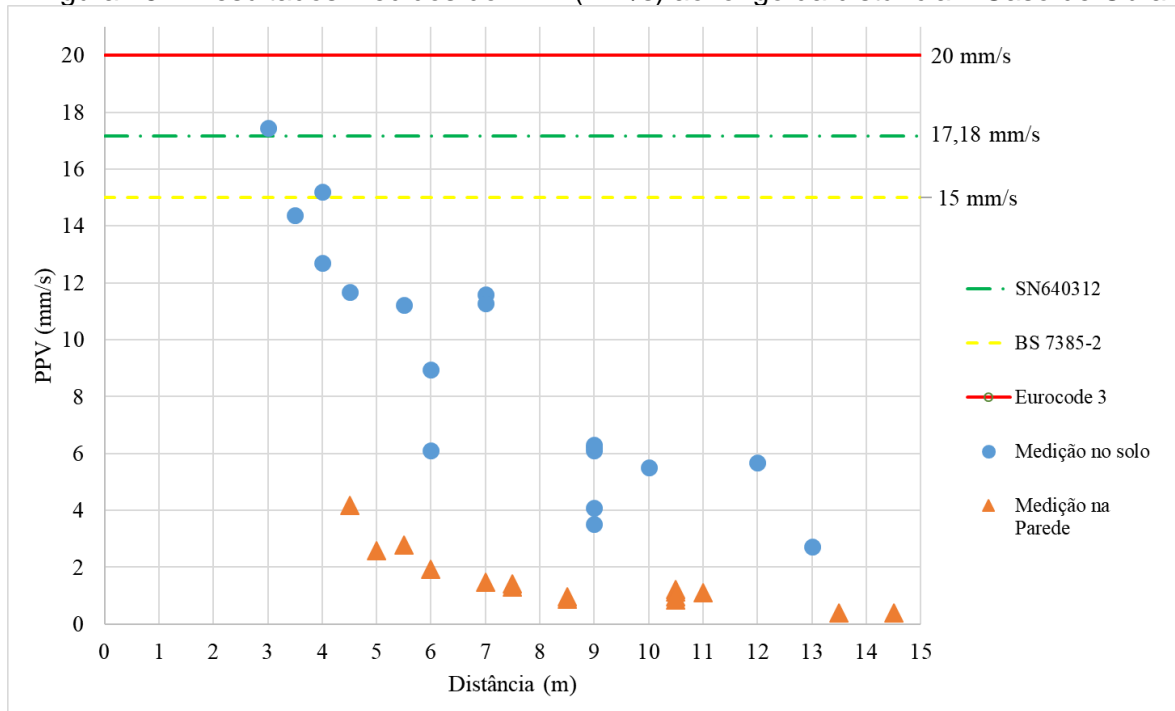
Fonte: Autor (2022).

Tabela 15 – Resultados das medições da vibração na parede

Medição na Parede	
Distância (m)	PPV (mm/s)
4,5	4,16
5,0	2,573
5,5	2,769
6,0	1,938
7,0	1,46
7,5	1,411
7,5	1,294
8,5	0,8838
8,5	0,957
10,5	0,835
10,5	1,226
10,5	1,133
10,5	0,957
11,0	1,108
13,5	0,3857
14,5	0,4053
21,5	0,5371

Fonte: Autor (2022).

Figura 45 – Resultados medidos do PPV (mm/s) ao longo da distância – Caso de Obra 4



Fonte: Autor (2022).

Com base nos dados das medições, conclui-se, que o processo de execução das estacas de compactação do empreendimento não apresentou níveis de vibrações que pudessem afetar a estabilidade estrutural das residências vizinhas, visto que os valores medidos ficaram aquém dos limites de tolerância sugeridos pelas normas de referência.

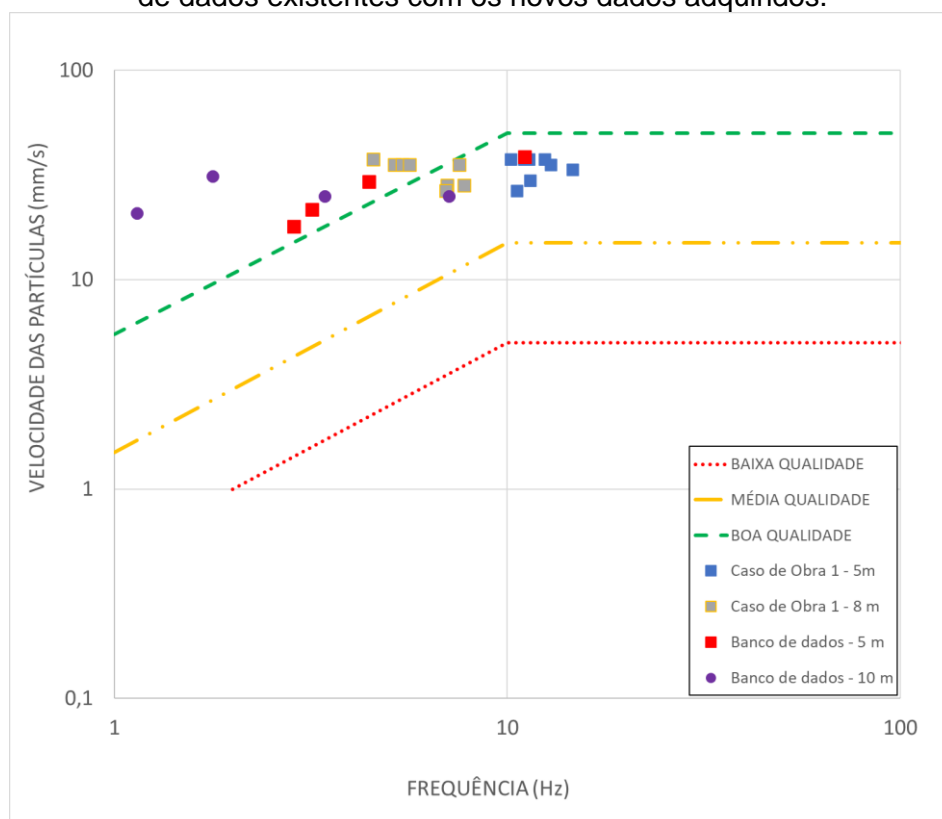
Observa-se, a vibração gerada no processo de cravação em um ponto de medição no solo desenvolveu um valor de PPV igual a 17,46 mm/s, pouco acima dos limites das normas sueca e britânica. Além dessa medição, um ponto a 4 m de distância no solo ficou com PPV igual a 15,21 mm/s, acima apenas da norma britânica. É perceptível que existe um ponto a 3,50 m de distância em que o valor do PPV ficou em 14,39 mm/s, menor do que o valor do ponto medida a 4 m. Todos os outros valores para 3 m ficaram abaixo dos valores estipulados nas normas. Avaliando o resultado do PPV na estrutura, os valores ficaram muito abaixo do que foi medido no solo, onde o ponto mais próximo medido a 4,50 m ficou com o PPV em 4,16 mm/s.

4.5. COMPARAÇÃO DOS DADOS DE PESQUISA COM O BANCO DE DADOS EXISTENTE

Após a obtenção dos dados por essa pesquisa bem como uma das finalidades dessa dissertação se dá pelo aumento do banco de dados previamente existente, essa seção de resultados tem como objetivo comparar os dados existentes com os novos dados medidos utilizando os mesmos métodos de cravação e distâncias iguais ou similares. As informações utilizadas do banco de dados foram extraídas de Burgos (2020).

Na Figura 46, é observado o gráfico de velocidade de partícula x Frequências dos dados existentes com os dados medidos, por estacas metálicas cravadas pelo martelo vibratório. As distâncias selecionadas para sua comparação foram de 5 m, 8 m e 10 m. A partir dos resultados vistos no gráfico, foi possível verificar que os valores das velocidades de pico de partícula foram consideravelmente elevados como também suas frequências, tanto do banco de dados existente como nas medições realizadas no caso de obra.

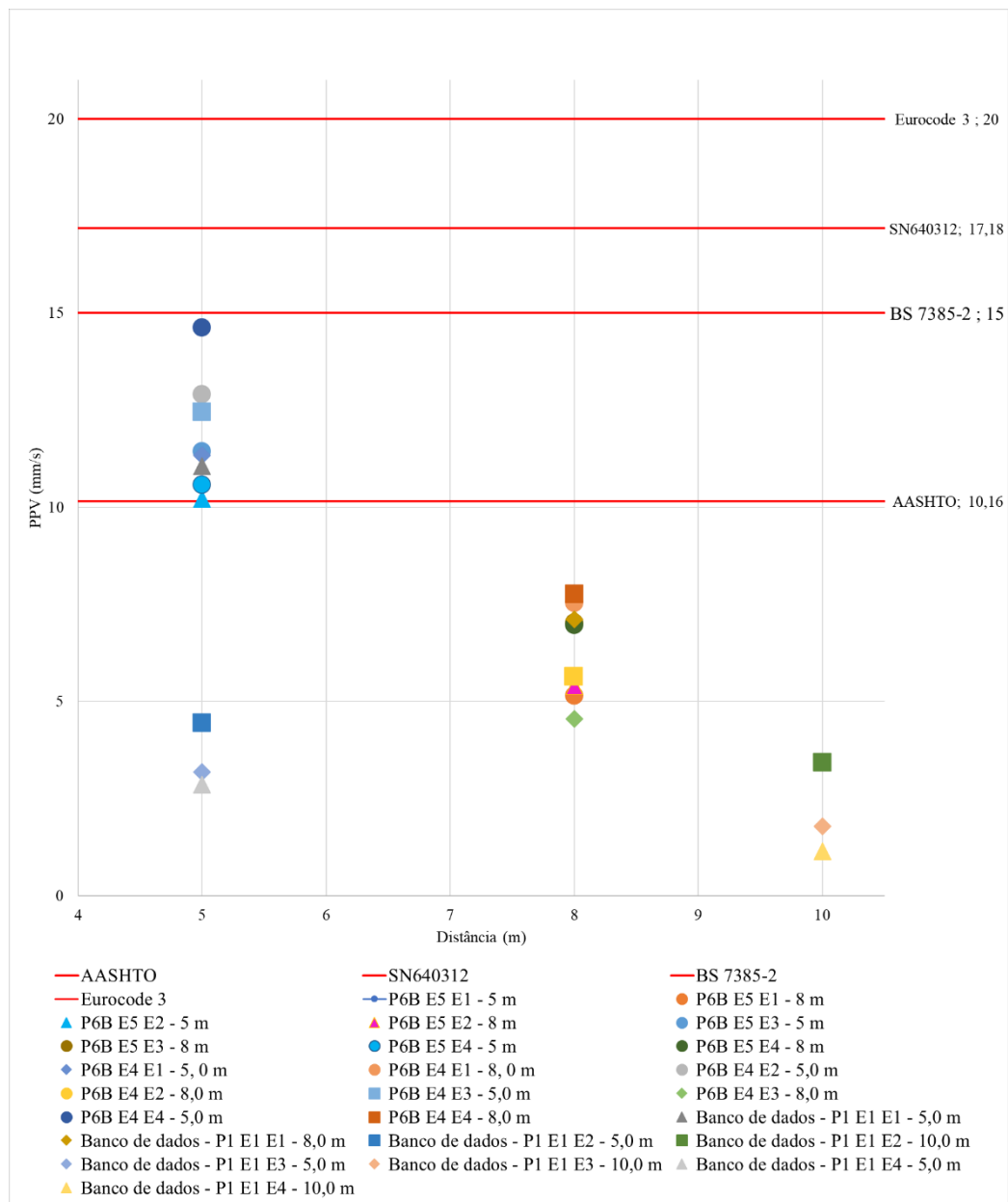
Figura 46 – Gráfico da Velocidade de Partícula x Frequência comparados entre os bancos de dados existentes com os novos dados adquiridos.



Fonte: Autor (2022).

Na Figura 47, também foi realizada a comparação dos valores de velocidade de pico de partícula com a frequência. Apesar do método de cravação e as distâncias serem as mesmas, ocorreu uma diferença mais significativa dos resultados. O fato que pode justificar essa diferença entre os valores de velocidade de pico de partícula e frequência mesmo sendo pelo mesmo método e distâncias similares pode ser o tipo do subsolo. Onde no caso de obra desta pesquisa foi caracterizado por um subsolo de camadas de argila e areia enquanto o subsolo no qual foi realizada as medições, era composto basicamente de areia.

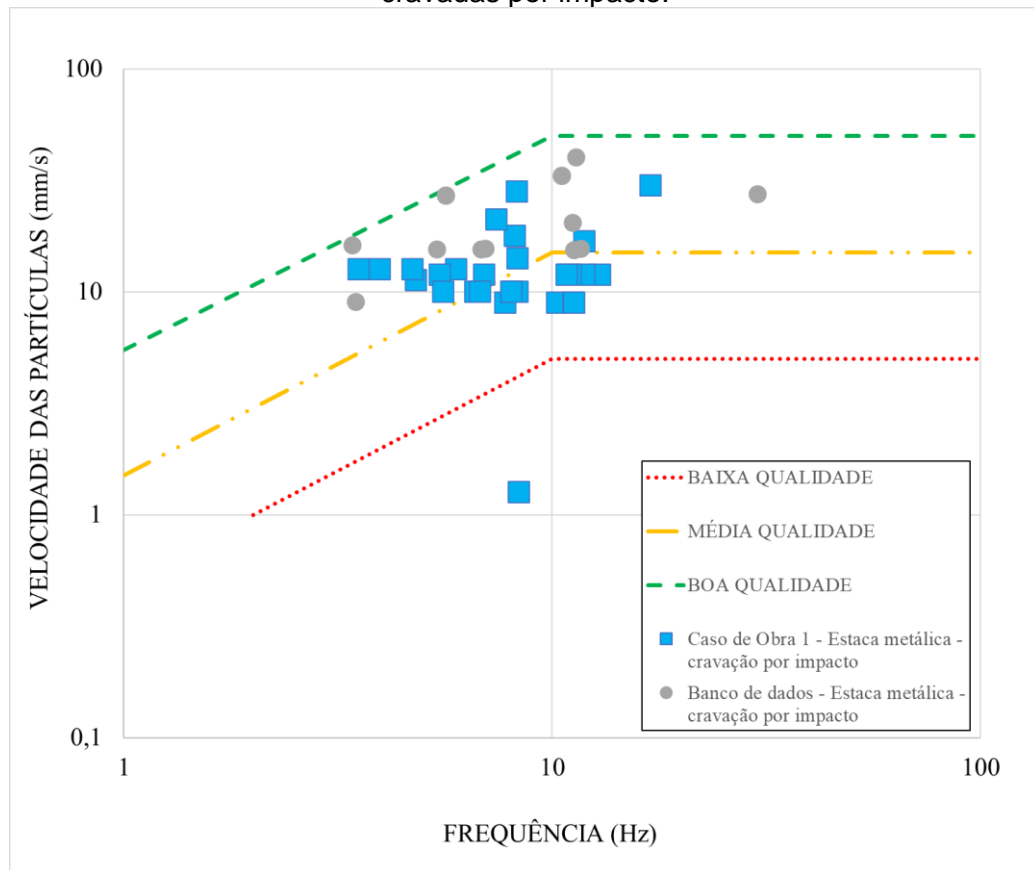
Figura 47 – Gráfico PPV x Distância proveniente de dados existentes x dados medidos.



Fonte: Autor (2022).

Para as estacas do tipo metálicas que foram cravadas por impacto, foi também realizada uma comparação com o banco de dados existente. Os valores das frequências x distância podem ser verificados na Figura 48. Neste caso, foram apenas distinguidas as frequências do banco de dados existente x as coletadas no caso de obra 1. Observou-se, então, que a maioria dos valores de PPV x Frequência se concentra entre obras de boa e média qualidade e os valores se concentram nessa área, validando, assim, os valores medidos e complementando o banco de dados. Vale ressaltar para os valores de frequência, onde grande maioria se apresenta próxima ao limite dos 10 Hz.

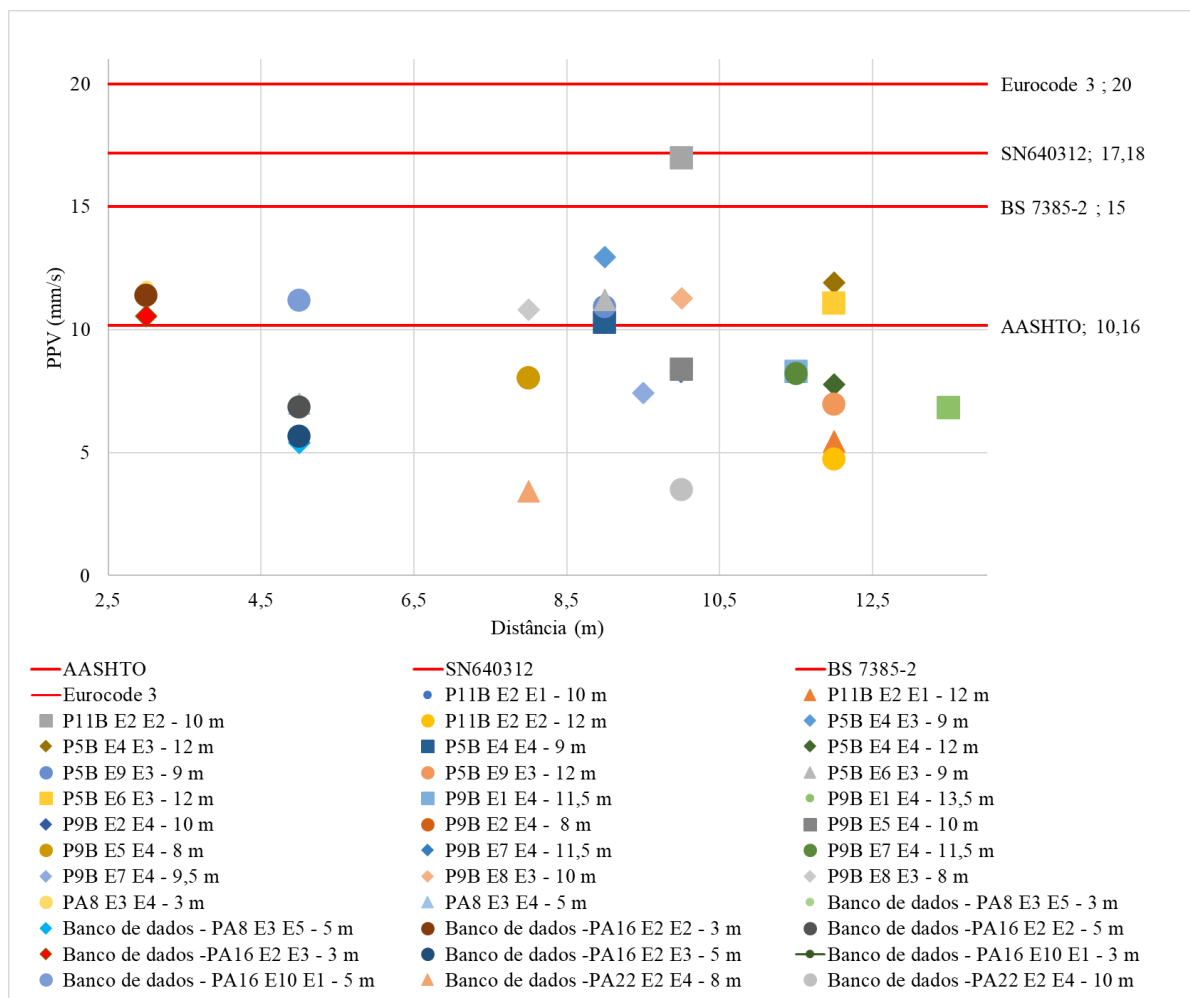
Figura 48 – Gráfico da Velocidade de Partícula x Frequência comparados entre os bancos de dados existentes com os novos dados adquiridos de medições de estacas metálicas cravadas por impacto.



Fonte: Autor (2022).

Seguindo com as comparações, a Figura 49, onde é possível visualizar o gráfico de velocidade de pico de partícula vs. distância. Como o banco de dados existente não havia dados coletados com as mesmas distâncias que os dados medidos nos casos de obra deste trabalho, foi utilizado distâncias próximas e, dessa forma, foi constatado que os valores de velocidade de partícula são semelhantes para o mesmo método de cravação – visto que no gráfico, os valores de PPV são na mesma faixa, variando apenas a distância.

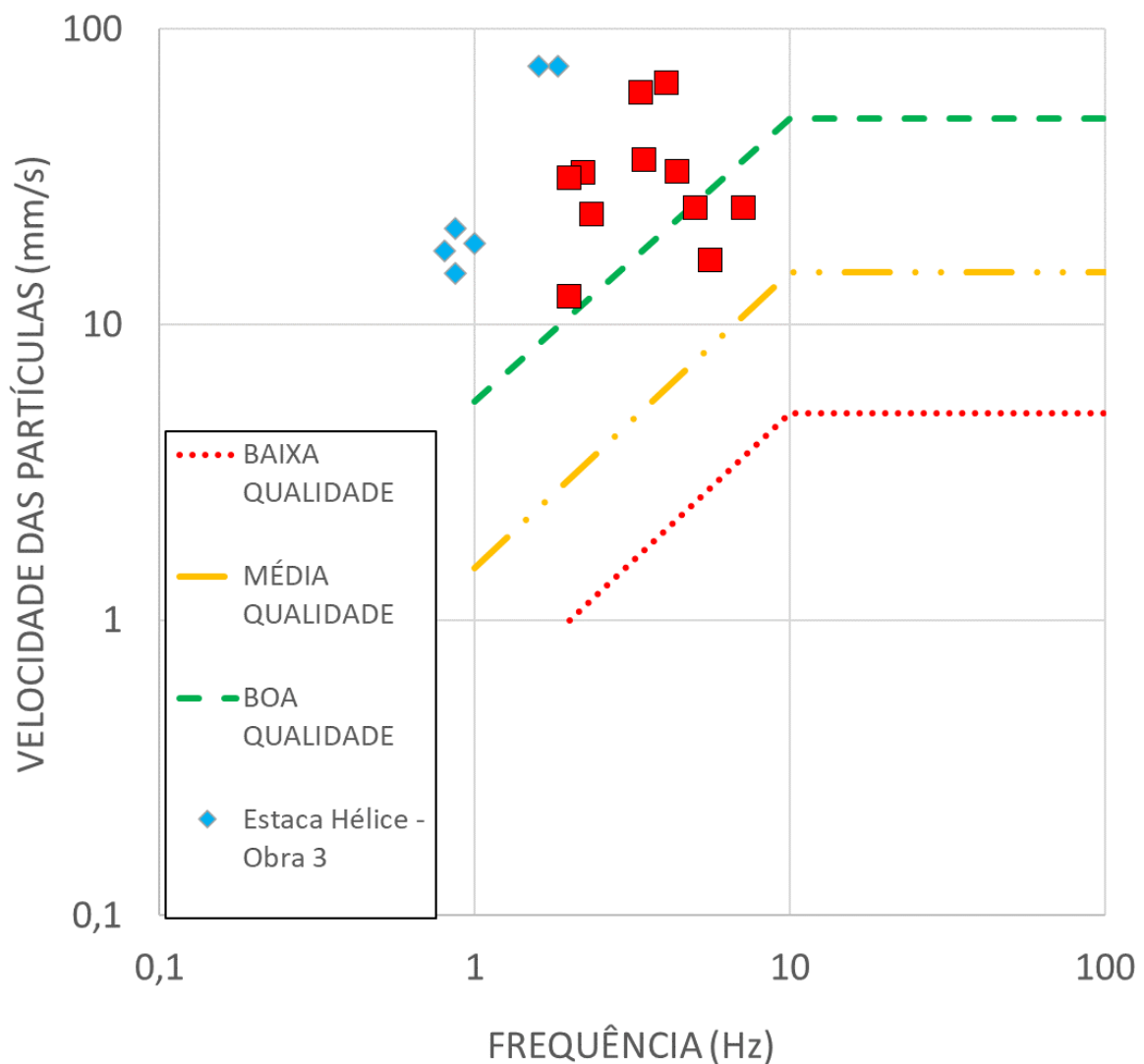
Figura 49 – Gráfico PPV x Distância proveniente de dados existentes x dados medidos de estacas metálicas com cravação por impacto.



Fonte: Autor (2022).

No caso da Figura 50, tem-se a comparação das estacas em hélice contínua – ambas com 400 mm de diâmetro, variando apenas o tipo de solo. A partir da Figura, é possível notar que os valores de velocidade de pico de partícula vs frequência foram relativamente similares, podendo, dessa forma, validar as informações coletadas em ambas as medições. Os valores de PPV são considerados elevados, mas a frequência se encontra dentro dos limites dos padrões normativos estabelecidos.

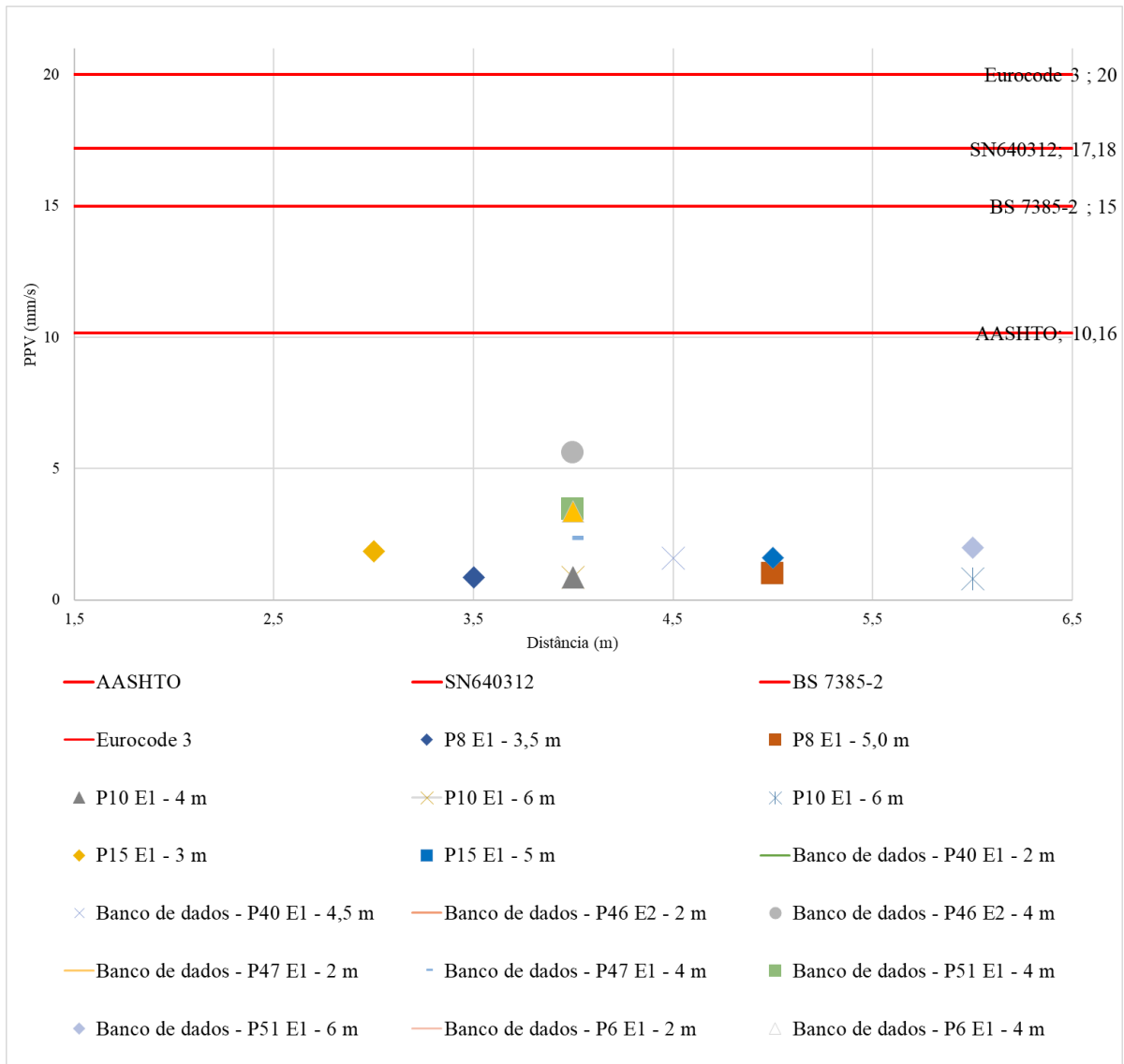
Figura 50 – Gráfico da Velocidade de Partícula x Frequência comparados entre os bancos de dados existentes com os novos dados adquiridos de medições de estacas tipo hélice contínua.



Fonte: Autor (2022).

Com os dados obtidos na Figura 51, têm-se os valores de velocidade de pico de partícula x a distância entre os dados coletados no caso de obra 2 e no banco de dados existente. Os valores de velocidade de pico de partícula ficaram dentro do esperado e com valores similares aos do banco de dados existente.

Figura 51 – Gráfico PPV x Distância proveniente de dados existentes x dados medidos de estacas hélice contínua.



Fonte: Autor (2022).

4.6. RESUMO GERAL

Após a realização de todas as análises e comparação dos resultados, foi criada uma tabela comparando os resultados com as normas vigentes. Em outras palavras, foram realizadas as médias das distâncias, velocidades de pico de partícula e frequência e

esses valores foram comparados de acordo com as normas vigentes. Essa tabela, se faz possível visualizar na Figura 52.

Figura 52 – Resumo das medições realizadas e aprovação nas normas.

Caso de Obra	Tipo de Estaca	Tipo de execução/cravação	Estaca (mm)	Distância méd. (m)	PPV méd.	Frequência méd. (Hz)	Eurocode	Norma Suíça	Norma Britânica	Norma American
1	Metálica	Vibratória	HP 310 x 93	5,0	11,82	34,74	✓	✓	✓	X
	Metálica	Vibratória	HP 310 x 93	8,0	6,252	32,808	✓	✓	✓	✓
	Metálica	Martelo hidráulico	HP 310 x 110	10,86	9,742	12,927	✓	✓	✓	✓
	Metálica	Martelo hidráulico	HP 310 x 110	12,333	7,245	11,76	✓	✓	✓	✓
2	Raiz	Concreto moldado in loco	250 mm	2,2	1,9	49,22	✓	✓	✓	✓
	Raiz	Concreto moldado in loco	250 mm	2,7	2,4	42,5	✓	✓	✓	✓
	Hélice contínua	Concreto moldado in loco	400 mm	3,5	1,19	37,02	✓	✓	✓	✓
	Hélice contínua	Concreto moldado in loco	400 mm	5,3	1,1	33,9	✓	✓	✓	✓
3	Pré-moldada concreto	Martelo hidráulico	400 mm	4	13,68	10,61	✓	✓	✓	X
	Pré-moldada concreto	Martelo hidráulico	400 mm	6,45	9,86	8,52	✓	✓	✓	✓
4	Argamassa	Compactação	280 mm	9,07	7,98	-	✓	✓	✓	✓
	Argamassa	Compactação	280 mm	9,55	1,41	-	✓	✓	✓	✓

Fonte: Autor (2023).

A partir dos dados apresentados acima, entende-se que todos os tipos de estaca utilizados nesta pesquisa (estaca metálica, raiz, hélice contínua, pré-moldada em concreto e em argamassa) estão com os valores médios de acordo com as normas: Européia Eurocode 3 (ENV 1993 - 5), Suíça SN 640312 (SNV 1992) e Britânica BS 7385-2 (BSI 1993). Contudo, a estaca do tipo metálica com a cravação vibratória e a estaca pré-moldada em concreto cravada com martelo hidráulico apresentaram valores acima do permitido pela norma A Norma americana AASHTO de (1990), fato esse que deve ser levado em consideração na escolha do método de cravação e tipo de fundação.

Através da Figura 52, foi possível, da mesma forma, identificar algumas considerações como: as frequências mais altas se deram pelas estacas do tipo raiz moldadas in loco. Em contrapartida, as estacas do tipo pré-moldadas em concreto (cravadas com martelo hidráulico) foram os tipos de estacas que apresentaram o maior valor de velocidade de pico de partícula. Valendo ressaltar que as estacas do tipo metálica (com o método de cravação tanto pelo martelo hidráulico quanto de forma vibratória) também apresentaram valores relevantes de velocidade de pico de partícula. E, também, visualiza-se, que o método de cravação utilizando o martelo hidráulico é o método que acarreta as maiores velocidades de pico de partícula.

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUAÇÃO DA PESQUISA

Após as análises de frequências e picos de partículas realizadas - incluindo as comparações com o banco de dados existentes e normas vigentes, além das experiências adquiridas durante as medições realizadas nesta pesquisa, foi possível obter as seguintes conclusões:

- Alguns métodos de execução de fundação, apesar de possuírem uma maior produtividade, deveriam ser repensados visando principalmente a qualidade de vida dos moradores vizinhos, principalmente durante o período de pandemia com o vírus COVID-19, onde muitas pessoas foram obrigadas a trabalharem em regime de home office e até o período atual, ainda existe o trabalho do tipo híbrido o que acarreta o incômodo dos vizinhos;
- A partir dos ensaios realizados foi possível verificar que os resultados gerados trouxeram uma contribuição para o conhecimento e aprofundamento nos conhecimentos geotécnicos em específico em relação a utilização do geofone visando a influência nas regiões adjacentes visto que é um assunto pouco estudado no meio da engenharia geotécnica e pouco utilizado nas construções de edifícios.
- Conforme a distância aumenta, a velocidade da vibração diminui significativamente. Isso se deve ao efeito de atenuação. Esta é a atenuação da vibração com a distância. A decadência é causada pela dissipação de energia como matéria amortecimento e amortecimento geométrico, ou seja, o espalhamento da frente de onda na área de crescimento. Em outras palavras, como a energia é absorvida pelo solo durante a propagação, há também uma perda energética com o aumento da distância. No entanto, esse estudo não considera o solo, pois as medições foram realizadas no mesmo dia e no mesmo local. Portanto, outros fatores imprevisíveis podem ser excluídos, como o clima que pode afetar as condições do solo.
- Nas medições das estacas cravadas, os maiores níveis de velocidade de pico de partícula foram registrados na cravação dos primeiros elementos das estacas e durante as primeiras cravações – contato da estaca com o solo;

- Os resultados obtidos a partir da obtenção dos dados com o geofone se mostraram satisfatoriamente conclusivos e de acordo com os métodos de previsão de vibração esperados e conforme especificados nas conclusões;
- Conforme era esperado, à medida em que a distância entre a estaca e o ponto medido decrescem, também há uma redução de velocidade;

5.1. OBRA 1

Apesar da cravação de estacas do tipo metálicas serem consideradas de alto impacto, principalmente aos moradores próximos ao empreendimento, através dos resultados, foi possível notar que tanto os valores de velocidade de pico de partícula como os valores de frequência, permanecem dentro dos padrões estabelecidos pelas normas internacionais.

5.2. OBRA 2

No caso de obra 2, foi possível concluir que as estacas de baixo impacto, realmente desempenharam com um baixo valor de velocidade de pico de partícula, contudo deve-se se atentar aos valores de frequência, que possuem tanta importância quanto os valores de velocidade de pico de partícula. Nesse caso, o ruído proveniente da poluição sonora causado na execução das estacas foi o item que se provou mais incômodo (ao invés das vibrações).

5.3. OBRA 3

Os valores tanto de frequência como principalmente de velocidade de pico de partícula obtidos foram considerados elevados para os padrões normativos vigentes. Contudo, devido ao local não apresentar edifícios altos em sua vizinhança, não houve nenhum registro de impacto em sua vizinhança nem conflitos com os mesmos. Caso a vizinhança fosse diferente, existem fortes evidências que haveria conflitos e maiores dados nas edificações.

5.4. OBRA 4

No Caso de Obra 4 – Em relação ao subsolo, existe uma maior intensidade na propagação da vibração, onde apenas um ponto atingiu níveis que ultrapassam dois

dos três valores limites das normas de referência. Porém, na avaliação da propagação das ondas na estrutura, não foram verificados níveis elevados de vibrações em PPV, e todos os valores medidos ficaram abaixo dos níveis limites de vibrações das normas de referência.

5.5. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se:

- Aumento na quantidade de ensaios com diversos tipos de cravação de estacas em outros tipos de solo visando o aumento do banco de dados em relação ao assunto;
- Consideração dos valores obtidos nas cravações para a avaliação e elaboração de uma norma brasileira;
- Considerar um estudo relacionando a influência do tipo de solo na propagação das vibrações e frequências geradas pela cravação de estacas;
- Comparar resultados de PPV medidos durante os ensaios realizados com os resultados obtidos através da elaboração de uma modelagem numérica, pelo método dos elementos finitos;
- Relacionar os níveis de vibração gerados ao longo da profundidade da estaca com os diagramas de cravação;

REFERÊNCIAS

- AASHTO. **Standard recommended practice for evaluation of transportation-related earthborne vibrations**. Washington DC. 1990.
- ABEF, **Manual de execução de fundações e geotecnia: práticas recomendadas**. 1 ed., São Paulo, Pini.2012.
- ACHMUS, M., WEHR, W. e SPANNHOFF, T., **Building vibrations due to deep vibro processes**. 7th Conference on Ground Improvement Techniques, Seoul, South Korea, 2010.
- 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.
- ALBUQUERQUE, P. J. R. de e GARCIA, J. R., **Engenharia de Fundações**. 1ª Edição, Rio de Janeiro, LTC, 2020.
- ALMEIDA NETO, J. A. de. **Análise do desempenho de estacas hélice contínua e ômega – Aspectos executivos**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002.
- ALVES COSTA, P. M. B., **Vibrações do sistema via-macício induzidas por tráfego ferroviário: modelação numérica e validação experimental**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal, (2012).
- AMANN, K.A.P. e MASSAD, F. (2002) **Avaliação da "Hierarquia dos Solos" e Generalização dos Métodos Semi Empíricos de Estimativa da Carga de Ruptura de Estacas**, XII Congresso Brasileiro de mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica-COBRAMSEG XII, São Paulo, SP, Vol.3, pp. 1321 -1332.
- AMORIM, M. D. P. de, **“Proposta de Modelo de Transferência de carga de fundação superficial em terreno melhorado com estacas de compactação”**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, 2019.
- ANTCZAK, J. e HORZELA, I. **Home office as new approach to smart city idea in pandemic time**. 25th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems, 2021.
- ANTUNES, W. R.; TAROZZO, H. (1996) **Estacas tipo hélice contínua**. In: **HACHICH, W. et al. Fundações: teoria e prática**. São Paulo: Editora PINI. Capítulo 9, p. 345 – 348.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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.

ATTEWELL, P. B.; SELBY, A. R.; UROMEIHY, A. **Appraisal of Ground Vibration Form Civil Engineering Construction.** International Journal of Mining and Geological Engineering, v. 7, p. 183-208, 1989.

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.

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.

BARROS JÚNIOR, Francisco de. **Dinâmica Espacial e a Reorganização Territorial do Litoral de Ipojuca: Porto de Galinhas – A Emergência de um Espaço Turístico.** Dissertação (Mestrado). Departamento de Ciências Geográficas. Universidade Federal de Pernambuco, 2002.

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

BURGOS, R.D.F. **Análise das vibrações geradas na cravação e execução de estacas: estudo de casos com diferentes tipos de fundações.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). UPE – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, 2020.

CÂNDIDO, C. R., DOMINGOS, R. M. A. **Análise da influência da urbanização na qualidade de vida dos moradores de Sinop – MT.** ENGEVISTA, V. 19, n.4, p. 1046-1064, outubro 2017.

CARVALHO, R. P. **Tipos de estacas especiais.** Monografia (Curso de Engenharia Civil). Centro Universitário de João Pessoa – UNIPÊ, 2018.

CASTANHEIRA, P. A., **Análise de Vibrações Induzidas por Tráfego Ferroviário. Estudo de Sensibilidade para Perfis Transversais em Trincheira.** Departamento

de Engenharia Civil, Universidade do Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.

CEN (European Committee for Standardization). (1993). “**Design of steel structures: Part 5: Piling.**” Eurocode 3, ENV 1993-5, Brussels Belgium.

CHIK, T. N. T., ROU, C. S., KAMARUDIN, A. F., HAKIM, S. J. S. e YUSOFF, N. A. (2021). **Vibration Criteria Assessment due to Piling works.** International Journal of Integrated Engineering VOL. 13 NO. 3 (2021) 46-56. DOI: <https://doi.org/10.30880/ijie.2021.13.03.006>.

COSTA, P.M.B.A. “**Vibrações do sistema via-macizo induzidas por tráfego ferroviário: modelação numérica e validação experimental**”. Departamento de Engenharia Civil. 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.

D'AGRELLA FILHO, M. S., **Sismologia: Ondas sísmicas e o interior da terra.** Notas de aula, Licenciatura em geociências, USP - Universidade de São Paulo, 2009.

DANTAS, R. A, MAGALHÃES A. M e VERGOLINO, J. R. O. (2007) **Avaliação de imóveis: a importância dos vizinhos no caso de Recife.** Economia Aplicada V. 11(N. 2): 231–251. Disponível em: [Avaliação de imóveis: a importância dos vizinhos no caso de Recife](#). (Acesso em: 04/05/2021).

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

DIAS, J. M. A. **Ondas Sísmicas (I. seismic wave).** Glossário da Revista de Gestão Costeira Integrada. Faculdade de Ciências do Mar e do Ambiente, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, Faro, Portugal, 2008. Disponível em: <https://www.aprh.pt/rgci/glossario/ondasismica.html#:~:text=H%C3%A1%20dois%20tipos%20de%20ondas,propagam%C3%A0%20superf%C3%ADcie%20da%20Terra>). Acesso em: 23/03/2022.

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

FERREIRA, J. M. C. **Vibrações induzidas pela cravação de estacas. Análise e modelação numérica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Geotecnia). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.

FERREIRA, M. A. **Estudo Numérico de vibrações induzidas pela cravação de estacas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Geotecnia). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2020.

- GERDAU, 2015, **Estacas metálicas Gerdau**. 8 ed., Porto Alegre, Gerdau S.A.
- 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.
- JURAN, I., & CHALHOUB, M. S. (2017). **Sand-bentonite mixtures in the construction of sand piles and sand compaction piles**. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 12(1), 1-10.
- LACERDA, A. B. M. de et al. **Ambiente urbano e percepção da poluição sonora. Ambiente & Sociedade**. 2005, v. 8, n. 2, pp. 85-98. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1414-753X2005000200005>>. Epub 12 Abr 2006. ISSN 1809-4422. <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2005000200005>.
- 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.
- LÚCIO, W.F. **“Análise de Vibrações Devido a Cravação de Estacas por Percussão.”** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE, 2010.
- MAGAROTTO, M., COSTA, M. F., TENEDÓRIO, J.A., e SILVA, C. P. **Mapeamento da cidade do Recife: Estado da arte e perspectivas futuras**. VIII Congresso sobre planejamento e gestão das zonas costeiras dos países de expressão portuguesa. Aveiro, Portugal (2015).
- MASOUMI, H.R., **Numerical Modeling of Free Field Vibrations due to Pile Driving**. Departement Burgerlijke Bouwkunde. 2008, Katholieke Universiteit Leuven: Lovaina, Belgica.
- 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
- MORATO, A. de S. **A Importância da Vistoria Cautelar na Construção Civil**. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais), 2015.
- NATANSON, A. **Monitoramento de níveis de vibração e ruído em obras”** ALEC.(2015). Disponível em: <http://alec.org.br/novo/en/rental/monitoramento-dos-niveis-de-vibracao-e-ruído-em-obras>>; Acesso em: 10/04/2020.

- NORDAL, S. **PhD Course of Geodynamics**. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2009.
- NORÉN-COSGRIFF, K. M., RAMSTAD, N., NEBY, A., MADSHUS, C., **Building damage due to vibration from rock blasting**, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 138, 2020.
- PACHECO, J. L. **Estudo de Técnicas de Melhoramento de Terrenos Superficiais Arenosos em Recife**. Dissertação (mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, 2002.
- RAO, Singiresu. **Vibrações Mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2009. 448 p.
- SILVA, L. H. da. **A Verticalização do espaço urbano: o caso do bairro do Prado Recife/PE**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. CFCH. Geografia, 2008.
- SNV (Swiss Association for Standardization). **Vibrations — Vibration effects in buildings**. SN640312, Winterthur, Switzerland. 1992.
- SOARES, S.M.d.C., **“Vibrações induzidas em edifícios sensíveis devidas ao tráfego rodoviário”**. Departamento de Engenharia Civil. 2013, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
- SOARES, W. C. **“Estacas de Compactação para Melhoria de Solo”**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.
- SOARES, W. C. **“Análise de Recalques de Edifícios em Solos Melhorados com Estacas de Compactação”**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.
- 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.
- TODESCO, B., LUCAS BOGONI, L., **Análise da utilização de indicadores de desempenho na gestão de obras de construtoras da Região Metropolitana de Curitiba**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Produção Civil. UTFPR - UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2011.
- VARELA, W. D. **Modelo teórico-experimental para análise de vibrações induzidas por pessoas caminhando sobre lajes de edifícios**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

VARELLA, C. B. N. **Desenvolvimento e Construção de um sismógrafo para Monitoramento de Vibrações e Pressão Acústica.** Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

WENG, L. K., YOHANNES, M. M. e CHONG, W. (2020). **Data analysis and prediction of ground vibrations due to deep vibro-techniques.** Geotechnical Research 7(4): 244–257, <https://doi.org/10.1680/jgere.20.00016>

ZANNIN, P.H.T., CALIXTO, A., e FERREIRA, J.R. (2016). **Noise measurements of foundation drilling activities.** Journal of Environmental and Analytical Toxicology, 6(1), 347. doi: 10.4172/2161-0525.1000347