



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"

Programa Interunidades



Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

GUILHERME BRAVO BRAUS

**ATUALIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA
ENSAIOS *DOWN-HOLE* EM CONJUNTO COM PIEZOCONE**

Bauru
2024

GUILHERME BRAVO BRAUS

**ATUALIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA
ENSAIOS *DOWN-HOLE* EM CONJUNTO COM PIEZOCONE**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Área de Concentração Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti

Bauru
2024



Braus, Guilherme Bravo.

Atualização e desenvolvimento de um sistema para
ensaios *down-hole* em conjunto com piezocone /

Guilherme Bravo Braus. - Bauru, 2024.

105 f. : il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista (Unesp). Faculdade de Engenharia, Bauru, 2024
Orientador: Heraldo Luiz Giacheti

1. Investigação do subsolo. 2. Ensaio de campo. 3.
Ensaio sísmico. 4. Down-hole. 5. Ondas S. 6.
Ondas P. I. Universidade Estadual Paulista.
Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE GUILHERME BRAVO BRAUS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 28 dias do mês de março do ano de 2024, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de GUILHERME BRAVO BRAUS, intitulada **ATUALIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA ENSAIOS DOWN-HOLE EM CONJUNTO COM PIEZOCONE**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETI (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof.^a Dr.^a GIULLIANA MONDELLI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. OTÁVIO COARACY BRASIL GANDOLFO (Participação Virtual) do(a) Seção de Investigações, Riscos e Gerenciamento Ambiental (SIRGA) / Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETI

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois sem ele nada é possível.

Aos meus pais, Elizabeth e Luís Roberto e minha irmã Diullia, que sempre me apoiaram e incentivaram muito, além de serem exemplos de caráter, dedicação e honestidade.

Ao Professor Doutor Heraldo Giacheti, pela orientação, paciência, confiança e empenho para a realização deste trabalho.

Aos Técnicos do Laboratório de Mecânica dos Solos da UNESP de Bauru, Sérgio e Gustavo, pela amizade e toda ajuda na realização dos ensaios de campo e esclarecimento de dúvidas sobre a operação dos equipamentos.

Aos Professores e Funcionários da FEB-UNESP e da Seção de Pós-graduação.

Aos meus colegas de Mestrado e Doutorado, por todo suporte e excelente convivência.

Aos colegas de Iniciação Científica, Arthur e Mizael, pela ajuda com a atualização do *software*.

À CAPES pela bolsa de mestrado concedida.

RESUMO

Na investigação do subsolo deve-se definir o perfil estratigráfico e estimar os parâmetros geotécnicos necessários para cada obra. Para isso, ensaios híbridos são alternativas interessantes aos tradicionais, pois permitem a obtenção de dados complementares aos normalmente obtidos por meio de ensaios de campo como o SPT, CPT e DMT. O objetivo desta pesquisa foi atualizar um sistema composto por uma ponteira sísmica e um programa para aquisição e tratamento de dados, para determinar o tempo de chegada de ondas de compressão (P) e cisalhantes (S) pela técnica do *down-hole*. Assim, é possível calcular a velocidade de propagação dessas ondas (V_P e V_S) e procurar identificar a posição do nível d'água. Ensaios de laboratório possibilitaram adequar todo o sistema, verificar a estanqueidade da ponteira e atualizar o programa computacional. Ensaios sísmicos *down-hole* realizados nos campos experimentais da USP de São Carlos e da Unesp de Bauru foram comparados com valores de V_S e V_P de referência, determinados em ensaios sísmicos *cross-hole* e *down-hole*. Os ensaios realizados na USP de São Carlos e no Jardim Botânico Municipal de Bauru foram utilizados para procurar identificar a posição do nível de água. Nos dois campos experimentais investigados, as diferenças médias entre valores de V_S determinados foram adequadas, entre 6% e 8,6%, quando comparados com valores de ensaios de referência. No entanto, os perfis de V_P só foram possíveis de serem determinados pelo pseudo intervalo de tempo empregando um programa comercial e resultou em valores de V_P muito superiores aos de referência, com diferenças médias de 29,1% e 35,9%, respectivamente nos campos experimentais da USP e da Unesp. Constatou-se também que os perfis de V_P em áreas com presença de nível de água saltaram para valores superiores a 1500 m/s próximo ao nível de água. No entanto, isso não ocorreu onde o nível de água se encontrava, mas a 1,5 m abaixo dele para um campo experimental e cerca de 2,0 m abaixo para o outro. Assim, considera-se que o sistema desenvolvido é eficiente para determinação de perfis de V_S da forma que foi empregado e ainda não é confiável para determinação de perfis de V_P . É necessário realizar mais estudos para melhor compreender a propagação de ondas P e propor um sistema e uma forma de interpretação de resultados que possibilite perfis de V_P equivalente aqueles que se obtém para as ondas S.

Palavras-chave: Investigação do subsolo, Ensaios de campo, Ensaios sísmicos, Down-hole, Ondas S, Ondas P.

ABSTRACT

It is necessary to define the stratigraphic profile and estimate the geotechnical parameters required for each project during the site investigation. Hybrid tests are an interesting alternative to traditional tests to do this, as they allow complementary data to be obtained to those normally obtained by in situ tests such as SPT, CPT and DMT. The aim of this research was to update a system consisting of a seismic probe and a software for data acquisition and processing to determine the arrival time of compression waves (P) and shear waves (S) waves using the down-hole technique. In this way, it is possible to calculate the propagation velocity of these waves (V_P and V_S), as well as trying to identify the position of the water level. Laboratory tests made it possible to adapt the entire system, check the water tightness of the probe and update the computer software. Down-hole seismic tests carried out in the experimental sites at USP São Carlos and Unesp Bauru were compared with reference V_S and V_P values determined by cross-hole and down-hole seismic tests. The tests carried out at USP São Carlos and the Municipal Botanical Garden of Bauru were used to identify the position of the water level. In the two experimental fields investigated, the average differences between the V_S values determined were adequate, between 6% and 8.6%, when compared to reference test values. However, the V_P profiles could only be determined for the pseudo time interval using a commercial software and ended up with V_P values much higher than the reference values, with an average relative difference of 29.1% and 35.9%, respectively in the Experimental Site at USP and Unesp Experimental Site. It was also found that the V_P profiles in areas with a water level jumped to values above 1500 m/s near the water level. However, it did not occur where the water level was, but 1.5 m below it for one experimental site and around 2.0 m below it for the other. The system developed is therefore considered to be efficient for determining V_S profiles in the way it was used and is not yet reliable for determining V_P profiles. It is necessary to carry out further studies in order to better understand the propagation of P waves and to propose a system and a method of interpreting the results that will enable V_P profiles equivalent to those obtained for S waves.

Keywords: Site investigation, In situ tests, Seismic tests, Down-hole, S waves, P waves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Registro típico de um ensaio <i>cross-hole</i> .	6
Figura 2: Ondas sísmicas: (a) onda P, (b) onda S.	7
Figura 3: Ensaios <i>up-hole</i> , <i>cross-hole</i> e <i>down-hole</i> .	8
Figura 4: Representação de ondas refratadas e refletidas através da Lei de Snell.	10
Figura 5: Representação do método do pseudo intervalo de tempo.	12
Figura 6: Representação do método do intervalo verdadeiro de tempo.	13
Figura 7: Variação de V_s em alguns materiais.	13
Figura 8: Variação de V_P em alguns materiais.	14
Figura 9: Representação esquemática de: (a) Fonte sísmica de madeira para geração preferencial de ondas S, (b) Placa circular de aço para geração preferencial de ondas P.	15
Figura 10: Piezocone.	17
Figura 11: Ponteira sísmica destacando os pontos onde foram instalados os geofones (compartimentos 1, 2 e 3) e o conector do cabo para transmissão de dados sísmicos.	18
Figura 12: Tubo de PVC (a) e atuador de pressão (b) para o teste de estanqueidade da ponteira sísmica.	19
Figura 13: Geofones utilizados na ponteira, modelo: (a) GS-14-L3, (b) GS-14-L9.	20
Figura 14: Geofones posicionados no interior da ponteira com o devido isolamento elétrico, antes do primeiro teste de estanqueidade.	21
Figura 15: Geofones dentro de um dos compartimentos da ponteira: (a) sem isopor, (b) com isopor.	21
Figura 16: Sistema para cravação de multifunção utilizado.	22
Figura 17: Fontes sísmicas de aço distantes do eixo da ponteira de: (a) 1,5m; (b) 2,5m; (c) 0,33m.	23
Figura 18: Fontes sísmicas de madeira e aço posicionadas: (a) na frente, (b) trás.	23
Figura 19: Fonte sísmica fixa ao solo com o uso de ganchos.	24
Figura 20: <i>Trigger</i> de contato.	25
Figura 21: Haste de aterramento: (a) vista lateral, (b) cravada no solo.	25
Figura 22: Medidor elétrico de nível de água.	26
Figura 23: Sistema de aquisição de dados: (a) fora da maleta; (b) no interior da maleta.	27

Figura 24: Sistema rotativo para abertura de pré-furo: (a) vista longitudinal; (b) acoplado a máquina de cravação; (c) com a haste de pré-furo orientada pelo alinhador.....	29
Figura 25: Marca de giz na haste de cravação.....	30
Figura 26: Alinhadores: (a) exemplos; (b) removido do eixo de cravação da máquina.....	31
Figura 27: Área estudada dentro do campo experimental da USP de São Carlos-SP.	32
Figura 28: Posição dos ensaios CPTu, <i>cross-hole</i> , <i>down-hole</i> e SDMT realizados no campo experimental da USP em São Carlos-SP.	33
Figura 29: Resultados de ensaios CPTu, <i>cross-hole</i> e SDMT realizados no campo experimental da USP em São Carlos-SP.	34
Figura 30: Locais investigados no campo experimental da UNESP de Bauru-SP ...	36
Figura 31: Posição dos ensaios CPT, CPTu, <i>cross-hole</i> , <i>down-hole</i> e SCPTu realizados no local 1 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.	37
Figura 32: Resultados de ensaios CPT, <i>cross-hole</i> , <i>down-hole</i> e SCPTu realizados no local 1 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.	38
Figura 33: Posição dos ensaios CPTu, <i>down-hole</i> e SDMT realizados no local 2 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.	39
Figura 34: Resultados de ensaios CPTu e SDMT realizados no local 2 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.	40
Figura 35: Área estudada no Parque das Camélias de Bauru-SP	42
Figura 36: Posição dos ensaios <i>cross-hole</i> e SPT realizados no Parque das Camélias de Bauru-SP.	43
Figura 37: Resultados de ensaios <i>cross-hole</i> e SPT realizados no Parque das Camélias de Bauru-SP.	44
Figura 38: Área estudada no Jardim Botânico Municipal de Bauru-SP.	45
Figura 39: Posição dos ensaios CPTu e <i>down-hole</i> realizados no Jardim Botânico Municipal de Bauru.	45
Figura 40: Registro da onda S pelo geofone localizado na profundidade de 5m no local 2 do campo experimental da UNESP de Bauru.	48
Figura 41: Registro da onda S registrada pelo mesmo geofone após a aplicação de golpes nas duas laterais da fonte sísmica.	48

Figura 42: Perfil com as velocidades das ondas S após a aplicação de golpes na lateral esquerda da fonte sísmica, que está localizada a 0,33m do eixo da haste de cravação da ponteira, realizados no ensaio <i>down-hole</i> 3 no local 2 do campo experimental da UNESP de Bauru. Nele se tem os valores da velocidade e as diferenças de tempo entre duas ondas subsequentes.	49
Figura 43: Perfil com as velocidades das ondas S após a aplicação de golpes na lateral direita da fonte sísmica, que está localizada a 0,33m do eixo da haste de cravação da ponteira, realizados no ensaio <i>down-hole</i> 3 no local 2 do campo experimental da UNESP de Bauru. Nele se tem os valores da velocidade e as diferenças de tempo entre duas ondas subsequentes.	49
Figura 44: Perfil de ondas S após a aplicação de golpes na fonte sísmica, que está localizada a 0,33m do eixo da haste de cravação da ponteira, do ensaio <i>down-hole</i> 3 realizado no local 2 do campo experimental da UNESP de Bauru.....	50
Figura 45: Perfil de ondas P para os golpes na fonte distante 2,5m do eixo central da ponteira, ensaio <i>down-hole</i> 3 realizado no local 2 do campo experimental da UNESP de Bauru. Nele se tem os valores da velocidade e os as diferenças de tempo entre duas ondas subsequentes.	51
Figura 46: Aplicação de filtro para uma onda sísmica típica: sinal original (a); seleção do domínio de frequência do sinal, onde os sinais com domínio de frequência abaixo de 40 Hz e acima de 400 Hz serão eliminados (b); onda sísmica após a aplicação do filtro (c).....	52
Figura 47: Comparação de um sinal recebido pelo transdutor localizado na profundidade de 5,5m com os demais sinais, onde os pares ordenados formam uma linha de tendência, indicando que todos estes sinais são de boa qualidade.	54
Figura 48: Comparação de um sinal recebido pelo transdutor localizado na profundidade de 5,5m com os demais sinais, onde o sinal destacado é um sinal de baixa qualidade e que está desalinhado dos demais pontos.	54
Figura 49: Tela do programa de aquisição de ondas sísmicas, onde se pode definir: distância entre os geofones (a); profundidade do geofone localizado no compartimento 1 da ponteira (b); distância horizontal entre o eixo de cravação da ponteira e a fonte sísmica (c); características do filtro aplicado (d).	55
Figura 50: Sinal obtido no ensaio DH 4, realizado no local 1 do campo experimental da UNESP – Bauru, a 20 metros de profundidade, com filtro passa baixa de 400 Hz (<i>Butterworth</i> de ordem 3) e sem filtro.	56

Figura 51: Registros típicos de um golpe para identificação do tempo de chegada das ondas S em 3 geofones posicionados na horizontal da ponteira sísmica.	57
Figura 52: Identificação da onda S registrada pelo geofone mais afastado da ponta cônica da ponteira.	58
Figura 53: Registros para a identificação dos tempos de chegada das ondas S, onde foi selecionado um período completo para os geofones: 3 (a), 2 (b) e 1(c).....	59
Figura 54: Tela do programa de aquisição de ondas sísmicas, onde se pode visualizar: a velocidade das ondas cisalhantes (a) e o registros das ondas sísmicas (b).....	60
Figura 55: Configurações da nova versão do programa de aquisição de ondas sísmicas.	60
Figura 56: Perfis de q_t , f_s , u e V_s determinados no campo experimental da USP em São Carlos-SP.....	65
Figura 57: Perfis de V_s determinados por diversos ensaios do tipo <i>down-hole</i> no campo experimental da USP em São Carlos-SP.	67
Figura 58: Perfil de ondas P para o ensaio DH 2 realizado no campo experimental da USP de São Carlos. Nele se têm os registros das ondas após a aplicação dos filtros. Têm-se também os valores da velocidade e as diferenças de tempo entre duas ondas subsequentes.	68
Figura 59: Perfis de q_t , f_s , u e V_P determinados no campo experimental da USP em São Carlos-SP.....	69
Figura 60: Perfis de q_t , f_s e V_s determinados no local 1 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.	71
Figura 61: Perfis de V_s determinados por diversos ensaios do tipo <i>down-hole</i> no local 1 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.	72
Figura 62: Perfis de q_t , f_s e V_P determinados no local 1 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.	73
Figura 63: Perfis de V_s determinados no local 2 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.....	75
Figura 64: Perfis de V_s determinados por diversos ensaios do tipo <i>down-hole</i> no local 2 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.	77
Figura 65: Perfis de V_P determinados no local 2 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.....	78

Figura 66: Perfis de q_t , f_s , u , V_s e V_p determinados no jardim botânico municipal de Bauru.....	79
---	----

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

SÍMBOLO DESCRIÇÃO

ASTM	- American Society for Testing and Materials
B	- Razão entre a pressão de água induzida nos poros e a tensão de confinamento aplicada no solo
CH	- Ensaio sísmico <i>cross-hole</i>
CPTu	- Ensaio de penetração de piezocone
D	- Razão de amortecimento interno
DH	- Ensaio sísmico <i>down-hole</i>
DMT	- Dilatômetro de Marchetti
E	- Módulo de elasticidade
f_s	- Atrito lateral
g	- Aceleração da gravidade
G_0	- Módulo de cisalhamento máximo
IPMeT	- Instituto de Pesquisas Meteorológicas
MASW	- Multichannel analysis of surface waves
N	- Número de golpes do SPT
NA	- Nível de água
N_{SPT}	- Resistência a penetração
q_c	- Resistência de ponta
q_t	- Resistência de ponta corrigida
SASW	- Spectral analysis of surface waves
SCPTu	- Ensaio de penetração de piezocone sísmico
SDMT	- Dilatômetro de Marchetti sísmico
SPT	- Sondagem de simples reconhecimento

SPT-T	- Sondagem de simples reconhecimento com medida de torque
S-SPT	- Sondagem de simples reconhecimento com sísmica <i>up-hole</i>
u	- Poro-pressão
UH	- Ensaio sísmico <i>up-hole</i>
V_P	- Velocidade de propagação da onda cisalhante
V_S	- Velocidade de propagação da onda de compressão
ΔL	- Comprimento de trajeto da onda sísmica
Δt	- Intervalo de tempo da propagação da onda sísmica
ρ	- Massa específica do material
σ	- Desvio padrão
σ_{ho}	- Tensão horizontal total in situ
ν	- Coeficiente de Poisson dinâmico
ν_b	- Coeficiente de Poisson efetivo do solo
γ	- Peso específico natural do solo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	3
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	4
3.1	Investigação do Subsolo	4
3.2	Geofísica na Investigação do Subsolo	5
3.3	Ensaio Sísmico	5
3.3.1	Parâmetros Dinâmicos dos Solos	5
3.3.2	Sísmica em Furos de Sondagem.....	8
3.3.3	Ensaio de Piezocone Sísmico (SCPTu)	9
3.3.4	Determinação de V_P e V_S	11
3.3.5	Fontes sísmicas	14
3.4	Aplicação de ensaios sísmicos.....	15
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
4.1	Materiais	17
4.1.1	Piezocone e Acessórios	17
4.1.2	Ponteira Sísmica	17
4.1.3	Teste de estanqueidade na ponteira	18
4.1.4	Geofones.....	20
4.1.5	Equipamento de cravação.....	22
4.1.6	Fontes sísmicas e trigger	22
4.1.7	Medidor de nível de água	25
4.1.8	Sistema de Aquisição de Dados	26
4.2	Ensaio realizado.....	27
4.2.1	Testes Preliminares na Ponteira.....	27
4.2.2	Considerações iniciais	28
4.2.3	Pré-furo e orientação dos geofones	28
4.2.4	Alinhador e intensidade dos golpes	30

4.3	Locais estudados.....	31
4.3.1	Campo experimental da USP – São Carlos	31
4.3.1.1	Caracterização da área experimental.....	32
4.3.1.2	Ensaio sísmico e CPTu.....	33
4.3.2	Campo experimental da UNESP – Bauru.....	35
4.3.2.1	Caracterização da área.....	36
4.3.2.2	Ensaio sísmico e CPTu do local 1	37
4.3.2.3	Ensaio sísmico e CPTu do local 2.....	39
4.3.3	Parque das Camélias	42
4.3.3.1	Caracterização da área.....	42
4.3.3.2	Ensaio SPT e sísmico do Parque das Camélias	42
4.3.4	Jardim Botânico Municipal de Bauru.....	44
4.3.4.1	Caracterização do local	45
4.3.4.2	Ensaio sísmico e CPTu.....	46
4.4	Programas empregados.....	47
4.4.1	SPAS.....	47
4.4.1.1	Filtros	51
4.4.1.2	Comparação dos tempos de chegada das ondas	52
4.4.2	Labview	54
4.4.2.1	Atualização do Software para Aquisição e Interpretação	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
5.1	Ensaio preliminar.....	62
5.2	Campo experimental da USP – São Carlos	64
5.2.1	Onda S	65
5.2.2	Onda P	67
5.3	Campo experimental da UNESP – Bauru.....	70
5.3.1	Local 1	70
5.3.1.1	Onda S.....	70

5.3.1.2	Onda P	72
5.3.2	Local 2	74
5.3.2.1	Onda S	74
5.3.2.2	Onda P	77
5.4	Jardim botânico municipal de Bauru	79
5.4.1	Ondas sísmicas	79
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE.....	81
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

1 INTRODUÇÃO

A investigação do subsolo é fundamental em projetos geotécnicos. Através dela é possível definir o perfil estratigráfico, a posição do lençol freático e estimar parâmetros do solo. Quanto mais dados forem fornecidos em um ensaio, melhor será a definição dos parâmetros e do perfil do subsolo.

O ensaio de penetração de piezocone (CPTu) pertence a uma outra família de ensaios de campo, cuja utilização vem sendo cada vez mais difundida a partir da década de setenta (ROBERTSON et al., 1986). Ele consiste na cravação quase estática de uma ponteira cônica registrando em um computador a resposta do solo a essa cravação, normalmente em intervalos de 20 mm. Os registros são: resistência de ponta (q_c), atrito lateral (f_s) e poro-pressão (u). Tais registros, após a devida interpretação, possibilitam identificar o comportamento do solo ao longo do perfil e estimar os parâmetros de projeto a partir de correlações.

A partir dos anos 80, foi incorporado ao piezocone um sistema para aquisição de ondas sísmicas, e ele passou a ser conhecido como piezocone sísmico (SCPTu). A velocidade de propagação das ondas cisalhantes S (V_s) e de compressão P (V_p) podem ser determinadas por meio desse sistema. Schnaid et al. (1998) sugerem a utilização de ensaios SCPTu para avaliação do tipo de solo, em especial quanto ao comportamento não convencional, distinto de areias e argilas. Esses autores destacam as limitações de uso de correlações clássicas para esses materiais, que pode ser identificada a partir da relação entre G_0/q_c . Segundo Schnaid et al. (1998), a utilização de um parâmetro de rigidez (G_0) relacionado a um parâmetro de resistência (q_c) é uma forma de identificar os solos não convencionais, contribuindo, assim, para um desenvolvimento mais racional da engenharia de fundações em solos tropicais.

É interessante destacar que o ensaio SCPTu apresenta as mesmas características do ensaio de piezocone, acrescido de um ou mais geofones ou um ou mais acelerômetros em seu interior. Vitali (2011) destaca que a grande vantagem deste tipo de ensaio é seu baixo custo, muito inferior aos ensaios realizados com técnica sísmica tradicional de *cross-hole* (CH), além da sua acurácia e rapidez. Vitali (2011) desenvolveu uma ponteira sísmica com três geofones espaçados de 0,5 m um do outro, possibilitando obter três registros para um mesmo golpe, aumentando as possibilidades de interpretação com um

menor tempo. Assim, é possível determinar as velocidades das ondas sísmicas para um mesmo golpe com uma fonte localizada na superfície do terreno.

Sobre a aplicação dos resultados de ensaios sísmicos, vale destacar a necessidade de monitorar e identificar maciços de terra com potencial de liquefação por meio de ensaios diretos e indiretos. Dentre os ensaios de caracterização indireta, destacam-se os geofísicos, pela sua característica não destrutiva, minimizando os potenciais problemas no corpo de um maciço de barragem, conforme destaca Freitas (2020).

O uso de ensaios sísmicos vem se tornando cada vez mais comum em obras de barragens de rejeito, tendo em vista que ensaios desta categoria permitem avaliar a rigidez do maciço para baixas amplitudes de deformação, por meio da análise das ondas cisalhantes; como também a identificação da posição do nível d'água baseado na velocidade de ondas de compressão. Schnaid e Yu (2007) mostraram que se pode derivar propriedades fundamentais do solo através da relação G_0/q_c , o que inclui a avaliação do potencial de liquefação estático dos materiais. Além disso, por meio de correlações empíricas disponíveis na literatura, pode-se avaliar o potencial de liquefação dinâmica desses materiais (LUNNE et al., 1997). O fenômeno da liquefação, tanto por solicitação estática como dinâmica, tem sido responsável por muitos desastres catastróficos em obras geotécnicas e de mineração.

É importante destacar que um sistema (*hardware* e *softwares*) moderno e atualizado possibilitará uma melhor definição do tempo de chegada de ondas sísmicas S e P e a estimativa da posição do nível de água. Essa última informação é importante, em especial em perfis de solos não saturados e em barragens de rejeito, onde conhecimento da posição do nível d'água e sua variação temporal é importante para a previsão do desempenho dessa obra.

2 OBJETIVOS

O principal objetivo desta pesquisa é atualizar um sistema já desenvolvido, composto por *hardware* e *software*, ou seja, a ponteira sísmica e o programa de aquisição e tratamento de dados, com a finalidade de determinar os perfis de velocidade de propagação ondas S e P, as quais possibilitarão o cálculo dos parâmetros de elasticidade dinâmica do solo.

Os objetivos específicos são:

- Confeccionar uma nova ponteira com geofones instalados em duas direções, vertical e horizontal, espaçados de 0,5 m;
- Atualizar os programas computacionais para a aquisição e tratamento de dados de modo que se tenha uma rotina automatizada que auxilie na aquisição e interpretação de dados;
- Procurar identificar a posição do nível d'água a partir dos registros das ondas P e sua interpretação ao longo da profundidade.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão sobre os principais conceitos abordados nesta pesquisa, tais como: investigação do subsolo, geofísica, parâmetros geotécnicos obtidos através de ensaios sísmicos, tipos de ensaios sísmicos, velocidade de propagação de ondas sísmicas, fontes sísmicas e liquefação do solo.

3.1 Investigação do Subsolo

Realiza-se a investigação do subsolo visando definir o perfil estratigráfico, possibilitando a identificação de suas camadas, espessuras e respectivos tipos de solos. A posição do nível d'água e parâmetros mecânicos e hidráulicos das camadas de interesse devem ser definidos e, para isso, faz-se o uso de ensaios de campo e laboratório. Uma campanha de investigação do subsolo eficiente deve permitir a visualização tridimensional do terreno para identificação da continuidade lateral das camadas. O conhecimento da história geológica dos terrenos é fundamental para interpretação adequada da geometria das camadas.

Mayne (2000) questiona a validade de se utilizar um único número, o N do SPT, para se obter tantos parâmetros geotécnicos. Nas últimas décadas, muitos ensaios têm sido desenvolvidos para avaliação da estratigrafia e propriedades geotécnicas dos solos. Podemos citar: sondagem a simples reconhecimento com medida de torque, o SPT-T (N_{SPT} e T); o ensaio de cone elétrico (q_c e f_s), piezocone (q_c , f_s e u); dilatômetro (p_0 e p_1); e pressiómetro (p_i , E , σ_{ho} , T_{max}), dentre outros.

Assim, Mayne (2000) e Amoroso et al. (2016) sugerem que quanto maior o número de medidas que um ensaio forneça melhor ele será na definição dos parâmetros de projeto. Logo, ensaios que forneçam medidas de cravação aliadas à medidas geofísicas, o piezocone sísmico (SCPT) e o dilatômetro sísmico (SDMT) e o SPT sísmico (S-SPT) são interessantes para a investigação do subsolo (PEDRINI, 2012; AMOROSO et al., 2016). Neste contexto, surgem os ensaios híbridos que segundo Giacheti et al. (2006) são ensaios desenvolvidos com a união de duas ou mais técnicas de ensaio, na qual, a geofísica pode ser aplicada, originando desse modo, ensaios como o SCPT, SDMT e o S-SPT.

3.2 Geofísica na Investigação do Subsolo

Segundo Greenhouse et al. (1995), a geofísica é a utilização das leis e princípios físicos no estudo da Terra. Os resultados obtidos a partir da geofísica proporcionam a distribuição no tempo ou no espaço de algumas propriedades físicas do meio em estudo, como a condutividade ou resistividade elétrica, velocidades sísmicas, entre outras.

Mondelli (2004) sugere que, entre as vantagens que destacam a aplicação das técnicas geofísicas dos métodos tradicionais de investigação de superfície, é a rapidez que a primeira fornece parâmetros para aplicação em grandes áreas e que muitas vezes se trata de métodos não invasivos. Além disso, Mondelli (2004) destaca que algumas técnicas geofísicas se apresentam com custo relativamente menor aos métodos tradicionais, propiciando a execução de perfis contínuos e conseqüentemente com maior detalhamento das variações laterais decorrentes das mudanças litológicas ou originadas por presença de contaminação no subsolo.

3.3 Ensaio Sísmicos

3.3.1 Parâmetros Dinâmicos dos Solos

Os principais parâmetros dos solos são a resistência ao cisalhamento, avaliada em termos dos efeitos da velocidade de deformação; os módulos dinâmicos: de Young ou de elasticidade, de cisalhamento, volumétrico e confinado; o coeficiente de Poisson (ν); os parâmetros de amortecimento e os parâmetros de liquefação (PEDRINI, 2012).

Dentre todos estes parâmetros citados, o módulo de cisalhamento máximo (G_0) e a razão de amortecimento interno (D) são os dois principais, necessários para os projetos de fundações sujeitas a vibrações e para avaliação de propagação de ondas nos solos, como citam Campanella e Stewart (1992).

Como parâmetros dinâmicos do solo dependem da amplitude de deformação, diversos equipamentos foram desenvolvidos, para uso em laboratório e em campo, cada um adequado a um certo nível de deformação, para determinação adequada dos parâmetros. A determinação desses parâmetros por meio de ensaios sísmicos é mais interessante para baixas amplitudes de deformação (KRAMER, 1996).

A interpretação dos dados sísmicos consiste na identificação precisa, nos registros de campo, do momento em que foi detectada a chegada das ondas de compressão (P) e cisalhantes (S) no transdutor sísmico. A chegada das ondas P corresponde sempre à primeira deflexão do sinal obtido. Em locais com muito ruído, a chegada pode ficar mascarada, dificultando a identificação do tempo de chegada das ondas. As ondas P e S podem ser obtidas, tanto em campo quanto em laboratório, através de ensaios de refração e reflexão, em furos de sondagem, ondas de superfície, em ensaios triaxiais com *bender elements*, entre outros (TSUKAMOTO et al., 2002; WIGHTMAN et al., 2003; PEREIRA, 2015; FERNANDES, 2022).

As ondas S caracterizam-se por um aumento na amplitude do sinal de baixa frequência e pela possibilidade de se polarizarem, invertendo o sinal quando se inverte o sentido do golpe no ensaio de campo. As ondas P também apresentam esse incremento de amplitude do sinal, porém, bem menor que o da onda S e os sinais dessas ondas não podem ser invertidos e polarizados devido ao sentido do golpe aplicado no ensaio de campo. Na Figura 1 tem-se o momento de chegada das ondas P e S, num registro típico de ensaio *cross-hole*.

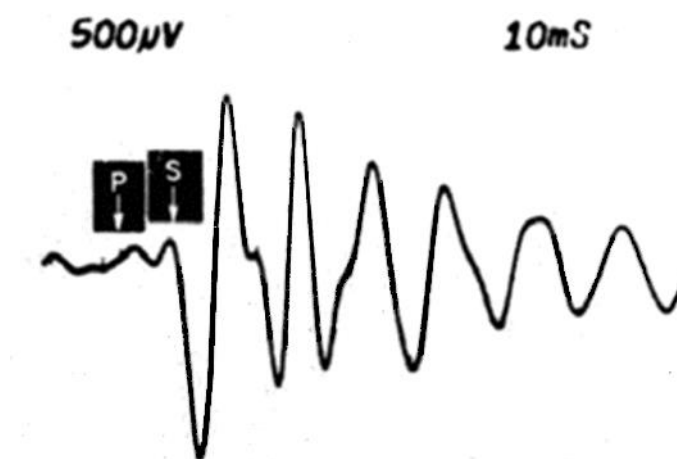


Figura 1: Registro típico de um ensaio *cross-hole*.

Fonte: Modificado de Dourado (1984).

As ondas S vibram perpendicularmente a direção de propagação da onda gerada, causando o efeito de cisalhamento nas partículas do solo, o que altera sua forma sem alterar o volume, enquanto as ondas P vibram paralelamente a direção da onda, produzindo compressão e distensão alternadamente, o que alterando seu volume sem alterar sua forma (VITALI, 2011). Na Figura 2 é

mostrado como uma partícula de solo se comporta durante a propagação de uma onda de compressão (a) e de uma onda cisalhante (b).

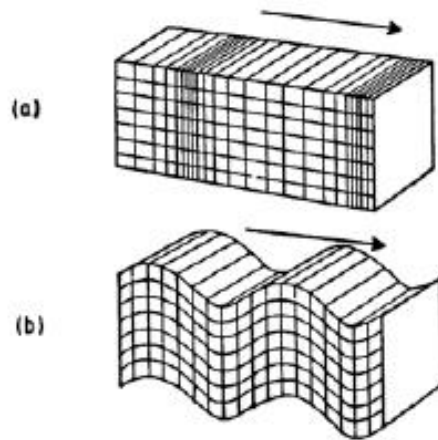


Figura 2: Ondas sísmicas: (a) onda P, (b) onda S.
Fonte: Robertson (1986).

A partir das velocidades de propagação das ondas e da massa específica do material (ρ), pode-se calcular os módulos de Young (E), de cisalhamento máximo (G_0) e coeficiente de Poisson dinâmico (ν), por meio de expressões advindas da teoria da elasticidade, como segue:

$$G_0 = \rho V_s^2 = \frac{\gamma}{g} V_s^2 \quad (1)$$

$$E = \rho V_p^2 = \frac{\gamma}{g} V_p^2 \quad (2)$$

$$\nu = \frac{E}{2 \cdot G_0} - 1 = \frac{V_p^2}{2 \cdot V_s^2} - 1 \quad (3)$$

onde γ é o peso específico natural do solo; g é a aceleração da gravidade; V_s é a velocidade de propagação da onda cisalhante S; e V_p é a velocidade de propagação da onda de compressão, P.

As ondas P conseguem se propagar tanto pelo solo quanto pela água. Se o solo estiver saturado, elas acabam se propagando mais pela água do que pelo arcabouço sólido do solo. Por isso, é preciso atenção ao determinar a velocidade das ondas de compressão e os parâmetros geotécnicos que se baseiam nesses valores, já que essa velocidade não reflete as reais propriedades elásticas do meio (BARROS, 1997). Por outro lado, as ondas cisalhantes se propagam apenas no arcabouço sólido, já que a resistência da água ao cisalhamento é nula

(VITALI, 2011), desse modo, um aumento da velocidade de propagação das ondas indica um aumento na rigidez do meio de propagação (KRAMER, 1996).

3.3.2 Sísmica em Furos de Sondagem

Os ensaios sísmicos em furos de sondagem possibilitam a determinação das velocidades das ondas P e S, bem como o cálculo de parâmetros dinâmicos do solo. Eles podem ser denominados como *cross-hole* (CH), *down-hole* (DH) e *up-hole* (UH) em função da posição da fonte sísmica e do geofone, conforme representado na Figura 3. São ensaios não destrutivos, de rápida execução e que abrangem grandes volumes de maciço, além de serem ensaios *in situ*, ou seja, ensaios que não dependem da coleta de amostras (PEREIRA, 2015).

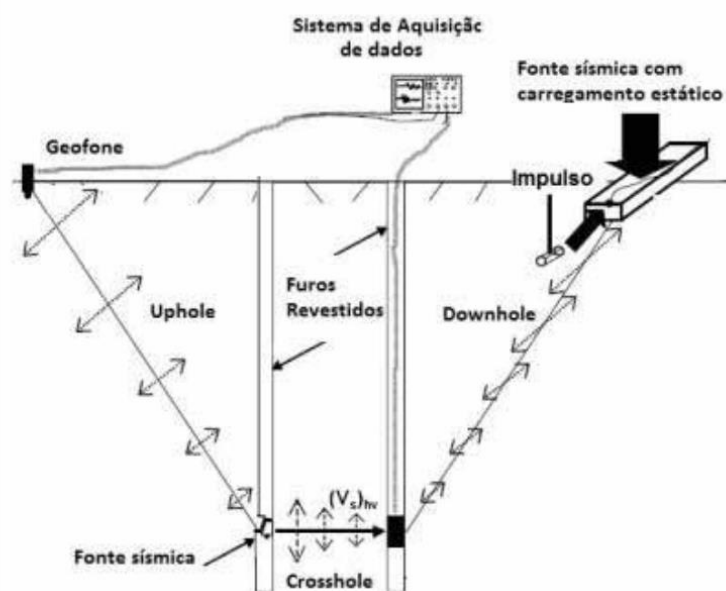


Figura 3: Ensaios *up-hole*, *cross-hole* e *down-hole*.

Fonte: Modificado de Schneider et al, 1999 apud Pedrini, (2012).

O ensaio *cross-hole*, considerado um dos mais eficazes na determinação de parâmetros dinâmicos do solo, se dá pela medição do tempo necessário para uma onda se propagar horizontalmente entre dois ou mais furos. O nome *cross-hole* descreve a trajetória da onda da fonte sísmica, dentro de um furo, até outros dois transdutores sísmicos, posicionados em outros dois furos na mesma cota da fonte sísmica.

Esse ensaio necessita de três furos já executados e tem dificuldade de ser adaptado para ser usado de maneira conjunta com outros ensaios. No entanto, é muito utilizado por promover uma trajetória horizontal da onda sísmica,

assegurando que a velocidade medida é aquela da camada onde o ensaio foi realizado, sem propagação de erros devido a uma possível heterogeneidade vertical do maciço. Assim, os resultados dos ensaios *cross-hole* são considerados como referência para as demais modalidades de ensaio.

Os ensaios *down-hole* são uma opção mais econômica do que os ensaios *cross-hole* (VITALI, 2011). Este ensaio consiste na determinação do tempo de propagação das ondas sísmicas geradas na superfície e captadas por transdutores sísmicos posicionados em diferentes profundidades. Ele pode ser realizado em um furo revestido ou cravando uma ponteira sísmica no subsolo, como o ensaio SCPTu, ou ainda utilizando a cravação de uma lâmina, como é feito no ensaio SDMT, por exemplo.

Robertson et al. (1986) mostra que os resultados obtidos no ensaio *down-hole* são muito semelhantes àqueles obtidos por meio do ensaio *cross-hole*, diferença essa que aumenta com uma maior variabilidade vertical do terreno.

3.3.3 Ensaios de Piezocone Sísmico (SCPTu)

A partir de meados dos anos 80, incorporou-se ao ensaio de cone um sistema para aquisição de ondas sísmicas, que passou a ser conhecido como cone sísmico. O ensaio de piezocone sísmico incorpora o ensaio sísmico ao ensaio de cone elétrico ou piezocone por meio da técnica *down-hole*. O ensaio *down-hole* se dá pela medição do tempo necessário para uma onda se propagar da superfície do terreno até a cota de execução do ensaio.

O ensaio *down-hole* admite uma trajetória linear entre a fonte sísmica e o receptor, condição que nem sempre condiz com a realidade, mas que pode ser contornada a partir da aplicação da Lei de Snell, esta lei explica que raios de luz ao passarem de um meio com um determinado índice de refração (V_1) para outro meio com um índice de refração diferente do anterior (V_2) sofrem um desvio angular. Na Figura 4 tem-se a representação das ondas sofrendo refração e reflexão.

Apesar da Lei de Snell ter sido desenvolvida para a física óptica, ela pode ser aplicada para mapear as trajetórias das ondas sísmicas refratadas e refletidas (LOUREIRO, 2013). Ensaios como o *spectral analysis of surface waves* (SASW), *multichannel analysis of surface waves* (MASW), *sonic echo*,

ultraseismic, geo-radar, entre outros, são exemplos de ensaios que utilizam a refração e reflexão das ondas sísmicas (WIGHTMAN et al., 2003).

Rocha e Giacheti (2016) verificaram que apesar da refração da trajetória das ondas sísmicas em ensaios *down-hole* a trajetória destas ondas pode ser interpretada como linear para transdutores sísmicos próximos.

O ensaio também é mais afetado por ruídos aleatórios provenientes da superfície do terreno, algo que pode ser contornado com o emprego e metodologias rigorosas de ensaio e análise sem comprometer os dados. Apesar disso, Butcher et al. (2005) recomenda que esse ensaio seja realizado em profundidades superiores a 3m em razão da grande interferência que as ondas sísmicas, geradas no ensaio, possuem em profundidades mais rasas.

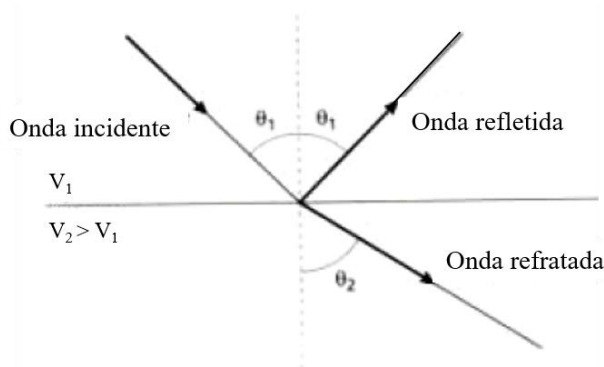


Figura 4: Representação de ondas refratadas e refletidas através da Lei de Snell.

Fonte: Kearey (2009).

A combinação do ensaio de cone com o ensaio sísmico *down-hole* se dá pela instalação de um ou mais transdutores sísmicos na ponteira do cone a ser cravado no terreno, que pode ser um ou mais geofones ou acelerômetros localizados no seu interior, capaz de medir o tempo de chegada da onda sísmica, como descrito por Campanella e Stewart (1992). Quando a ponteira é cravada até a profundidade onde será realizado o ensaio *down-hole*, a cravação é interrompida e uma onda é gerada através de uma fonte sísmica posicionada na superfície do terreno, e então, o tempo necessário para a onda percorrer essa trajetória é medido.

3.3.4 Determinação de V_P e V_S

O ensaio *down-hole* possibilita a determinação do tempo necessário para que a onda gerada na superfície do terreno caminhe até os transdutores sísmicos localizado no interior do maciço. Para determinação da velocidade de propagação das ondas é utilizada a equação a seguir, caracterizada pela relação entre o comprimento de trajeto da onda (ΔL) e o tempo de propagação (Δt) da mesma, sendo as distâncias determinadas pelas posições dos furos (ROCHA, 2013).

$$V = \frac{L_{n+1} - L_n}{t_{n+1} - t_n} = \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (4)$$

onde V é a velocidade de propagação da onda; L_n é a distância linear entre a fonte e o transdutor sísmico n ; e t_n é o tempo necessário para a onda viajar da superfície até o transdutor sísmico n .

Os tempos são obtidos durante o ensaio e as distâncias refletem as características físicas da ponteira onde estão instalados os transdutores sísmicos. A ponteira do cone possui uma sequência de geofones idênticos espalhados entre si a uma distância conhecida. Quando a onda é gerada ela será captada por esses pares de geofones os tempos de chegada t_n e t_{n+1} , para uma profundidade do ensaio e a distância entre os geofones conhecida (L_n e L_{n+1}), possibilitando o cálculo das velocidades das ondas sísmicas.

A técnica onde um ou mais pares de geofones idênticos são instalados em uma mesma ponteira a uma distância conhecida é chamada de Intervalo Verdadeiro e elimina possíveis erros provenientes da variação das ondas geradas na superfície em métodos onde se conta com apenas um transdutor sísmico instalado na ponteira do cone (pseudo intervalo), já que todos os geofones receberão sinais de uma mesma onda (GIACHETI et al., 2012). Na Figura 5 e na Figura 6 têm-se as representações dos esquemas para determinação de velocidade sísmica pelos métodos do pseudo intervalo e intervalo verdadeiro de tempo, respectivamente.

Geofones instalados na horizontal captam sinais de ondas cisalhantes (S) e geofones instalados na vertical captam sinais de ondas de compressão (P).

De acordo com McDowell et al. (2002), a velocidade das ondas S em areias e argilas varia de 100 a 500 m/s, enquanto para as ondas P, essa

velocidade varia de 300 a 1900 m/s, na Figura 7 tem-se a representação esquemática da variação de V_s e na Figura 8 de V_p em diversos materiais.

Em solos saturados, a velocidade das ondas de compressão apresenta valor superior ao dobro das ondas cisalhantes, facilitando a distinção entre elas, uma vez que a água não apresenta resistência ao cisalhamento (VITALI, 2011). No entanto, acima do lençol freático, essa diferença de velocidade pode não ser tão nítida (WIGHTMAN et al., 2003).

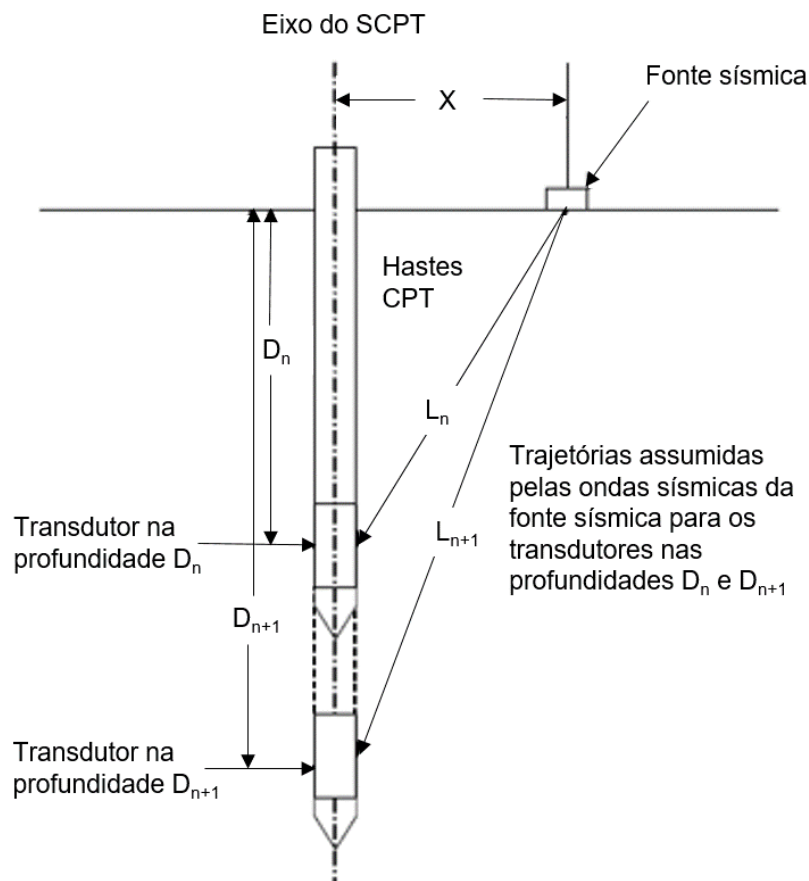


Figura 5: Representação do método do pseudo intervalo de tempo.

Fonte: Adaptado de Butcher et al. (2005).

De acordo com Wightman et al. (2003), em ensaios de refração e reflexão de ondas sísmicas os valores de V_p abaixo do nível de água variam de 1400 m/s a 1700 m/s dependendo das condições ambientais. Para solos de granulação fina estes ensaios podem não ser eficazes para visualizar o contraste de V_p devido à dificuldade causada pela zona capilar. Por isso, Butcher et al. (2005) recomenda a utilização de programas e filtros para diferenciá-las.

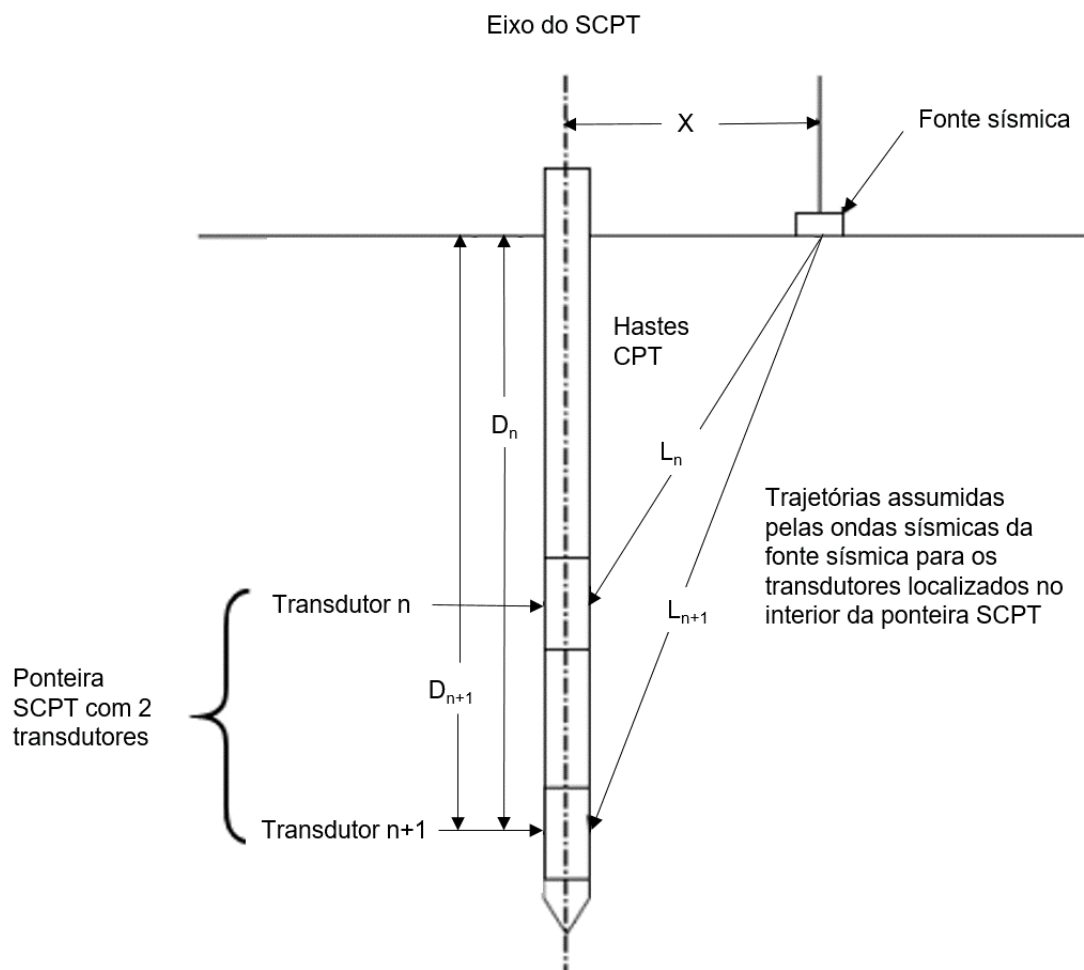


Figura 6: Representação do método do intervalo verdadeiro de tempo
Fonte: Adaptado de Butcher et al. (2005).

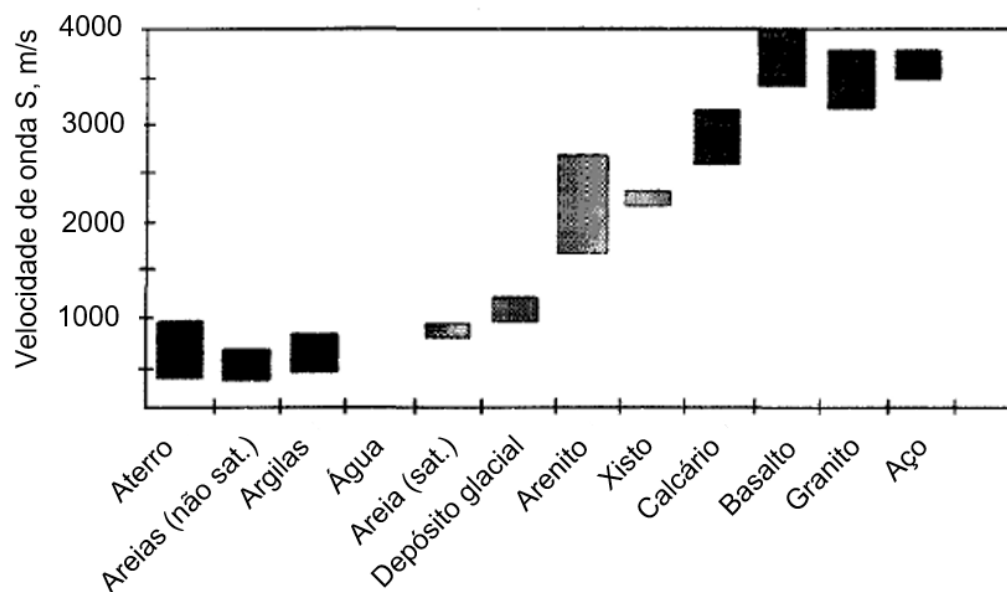


Figura 7: Variação de V_s em alguns materiais.
Fonte: Adaptado de Wightman et al. (2003).

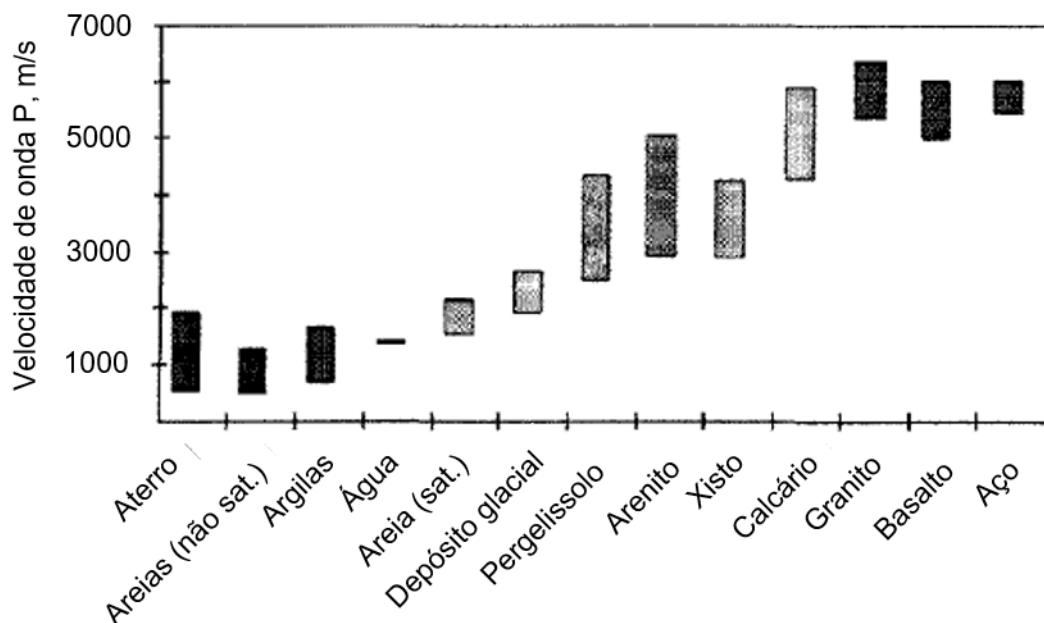


Figura 8: Variação de V_P em alguns materiais.
Fonte: Adaptado de Wightman et al. (2003).

Segundo Butcher et al. (2005), se as velocidades das ondas P forem muito elevadas, isso pode significar que as ondas de compressão estão sendo propagadas através das hastes de acionamento do cone ao invés de serem propagadas pelo solo e esses autores explicam que isso pode ser um problema relacionado ao *trigger*.

3.3.5 Fontes sísmicas

A fonte sísmica é o dispositivo que possibilita gerar a onda sísmica que será captada pelo transdutor. Em ensaios *down-hole* normalmente são utilizadas fontes mecânicas que são de fácil operação, fácil fabricação, geram poucas ondas P e as ondas S são bem definidas. Existe também as fontes explosivas, que ao contrário das mecânicas, geram ondas P com muita energia e ondas S de difícil interpretação (FERREIRA, 2003)

Uma fonte sísmica mecânica consiste em uma barra ou viga de madeira, metálica ou concreto, denominada viga de cisalhamento, apoiada no solo natural e que é golpeada com um martelo com massa entre 5 e 15 kg. Na Figura 9 tem-se a representação esquemática de duas fontes sísmicas, uma viga de madeira utilizada para geração de ondas S (Figura 9a) e uma placa circular de aço utilizada para geração de ondas P (Figura 9b). Se o golpe atingir a lateral da viga

de madeira (Figura 9a) serão produzidas predominantemente ondas S e se o golpe atingir a parte superior da placa circular de aço (Figura 9b) serão geradas predominantemente ondas P (BUTCHER et al., 2005). Em uma mesma campanha pode ser utilizada mais de uma fonte sísmica para alterar o trajeto da onda percorrida ao longo do perfil (AMOROSO et al., 2016).

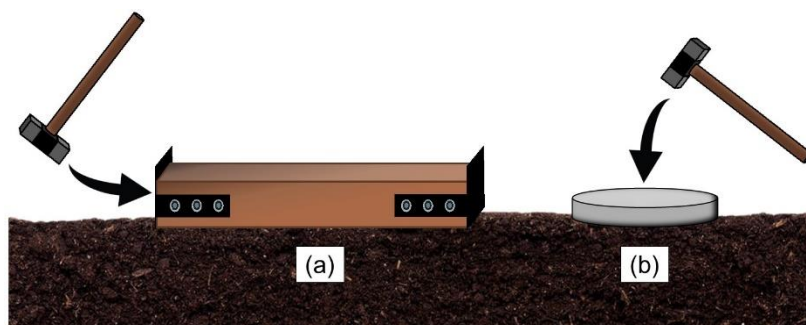


Figura 9: Representação esquemática de: (a) Fonte sísmica de madeira para geração preferencial de ondas S, (b) Placa circular de aço para geração preferencial de ondas P.
Fonte: Autoria própria.

3.4 Aplicação de ensaios sísmicos

Os ensaios sísmicos podem ser usados para determinação de parâmetros dinâmicos do solo, caracterização geoambiental do subsolo, detecção de pluma de contaminantes inorgânicos, potencial de liquefação de materiais, etc (LUNNE et al., 1997; GIACHETI, 2001; MONDELLI, 2004).

O fenômeno denominado liquefação de solo pode ser descrito como uma ação capaz de levar uma substância do estado sólido ao estado liquefeito, cujo comportamento é de um fluido (PEREIRA, 2005). Segundo Castro (1969) a liquefação em areias saturadas ocorre porque a areia experimenta uma redução significativa da resistência ao cisalhamento, produzindo uma condição em que o fluxo de massa de solo causado por tensões cisalhantes precisa ser compensado pela própria resistência ao cisalhamento do solo que foi reduzida, ou seja, é como se a tensão efetiva do solo ficasse próxima de zero e a única tensão atuante passa a ser a pressão neutra.

Solos uniformemente graduados e areias finas são mais suscetíveis à liquefação do que solos pedregulhosos, areias grossas, siltes e argilas (SEED; IDRIS, 1971). Quando um solo não saturado sofre uma diminuição de volume devido a um carregamento ou a um novo estado de tensões, ocorre uma

variação no seu volume de vazios e a parte líquida do solo induz uma nova pressão nos poros do solo. O parâmetro B é a razão entre esta pressão de água induzida nos poros e a tensão de confinamento aplicada no solo e este parâmetro juntamente com o grau de saturação influenciam na resistência à liquefação de areias quase saturadas, segundo Tsukamoto et al. (2002) a resistência à liquefação deste tipo de solo tende a aumentar quando o parâmetro B e, conseqüentemente, o grau de saturação diminuem.

De acordo com Tsukamoto et al. (2002) é possível determinar o parâmetro B através da equação 5, que correlaciona os valores de V_P e V_S e o coeficiente de Poisson efetivo do solo (v_b), por meio de expressões advindas da teoria da elasticidade, como se segue:

$$\frac{V_P^2}{V_S^2} = \frac{4}{3} + \frac{2 \cdot (1 - v_b)}{3 \cdot (1 - 2 \cdot v_b) \cdot (1 - B)} \quad (5)$$

A localização da posição do nível de água e a determinação do módulo G_0 obtidos através das velocidades de ondas P e S, respectivamente, podem ser utilizadas para definir o risco de liquefação e diminuir a quantidade de desastres ambientais associados a esse fenômeno (AMOROSO et al., 2016).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e os métodos utilizados para interpretação dos sinais sísmicos obtidos através dos ensaios sísmicos *down-hole* realizados em conjunto com o piezocone.

4.1 Materiais

4.1.1 Piezocone e Acessórios

Foi utilizado um piezocone padrão (CPTu), modelo MH-305, mostrado na Figura 10 e uma ponteira sísmica com seus acessórios e dispositivos que permitem a realização de ensaios de piezocone em conjunto com a sísmica *down-hole*. A ponteira sísmica disponível foi atualizada para uma nova versão aprimorada.



Figura 10: Piezocone.
Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Ponteira Sísmica

Uma ponteira sísmica foi desenvolvida com três pontos, espaçados de 0,5 m entre si onde, em cada um deles, têm-se dois geofones, ou seja, essa ponteira conta com um total de seis geofones no seu interior, diferente da ponteira de Amoroso et al. (2016) que possuía apenas quatro geofones. Além disso, essa ponteira possui o comprimento de 1,176 m e o diâmetro de 44 mm que se mantém constante ao longo do seu comprimento, diferente da ponteira desenvolvida por Vitali (2011) que na região da ponteira onde os geofones eram posicionados possuía um maior diâmetro. Os geofones espaçados em 0,5 m, permitem determinar os valores de V_s através do método do intervalo verdadeiro de tempo e os valores de V_P e V_s através do pseudo intervalo de tempo. Na Figura 11 tem-se uma foto da ponteira sísmica atualizada.

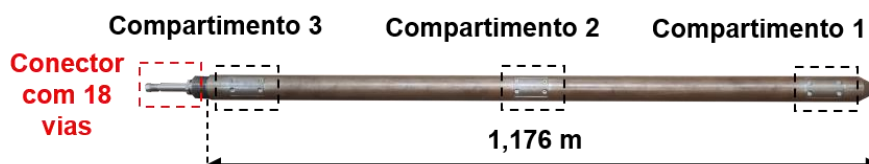


Figura 11: Ponteira sísmica destacando os pontos onde foram instalados os geofones (compartimentos 1, 2 e 3) e o conector do cabo para transmissão de dados sísmicos.

Fonte: Autoria própria.

4.1.3 Teste de estanqueidade na ponteira

Para a vedação da ponteira, inicialmente foi aplicado silicone líquido nas partes internas das tampas dos compartimentos 1, 2 e 3 e na ligação com a haste de cravação. Em seguida foram utilizados parafusos para fixar estas tampas enquanto o silicone secava por pelo menos 24 horas. Após isso a ponteira foi inserida num tubo de PVC que foi quase todo preenchido com água. Fechou-se o tubo e com um atuador foi aplicado pressões de 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa, e cada uma dessas pressões foi aplicada por 90 minutos. Tem-se na Figura 12 o tubo de PVC onde a ponteira foi inserida e o atuador utilizado no teste de estanqueidade da ponteira.

Para 100 e 200 kPa de pressão observou-se que não houve decréscimo de pressão aplicada, entretanto para 300 kPa, houve uma diminuição de pressão aplicada e o atuador apontou uma diferença de volume no interior do tubo, o que indica a entrada de água no interior da ponteira. Neste momento o teste de estanqueidade foi encerrado e a pressão de dentro do tubo foi liberada para verificar se havia vazado água para dentro da ponteira, na qual foi constatada a presença de água no interior dela.

As três tampas da ponteira e o silicone foram retirados, a água do interior da ponteira foi removida e ela foi seca ao ar por 24 horas. A ponteira sísmica foi retificada nas posições onde os geofones eram instalados e novas tampas foram confeccionadas. Após isso foi realizada a vedação dos compartimentos aplicando cola de junta de motores entre as novas tampas e os respectivos compartimentos e um novo teste de estanqueidade foi realizado. Neste teste o mesmo procedimento descrito nos parágrafos anteriores foi seguido, e o atuador apontou uma diferença de volume aplicado no interior do tubo, indicando que novamente houve entrada de água no interior da ponteira. Assim, o teste de

estanqueidade foi interrompido e após abrir o tubo de PVC foi detectado a presença de água no interior da ponteira.

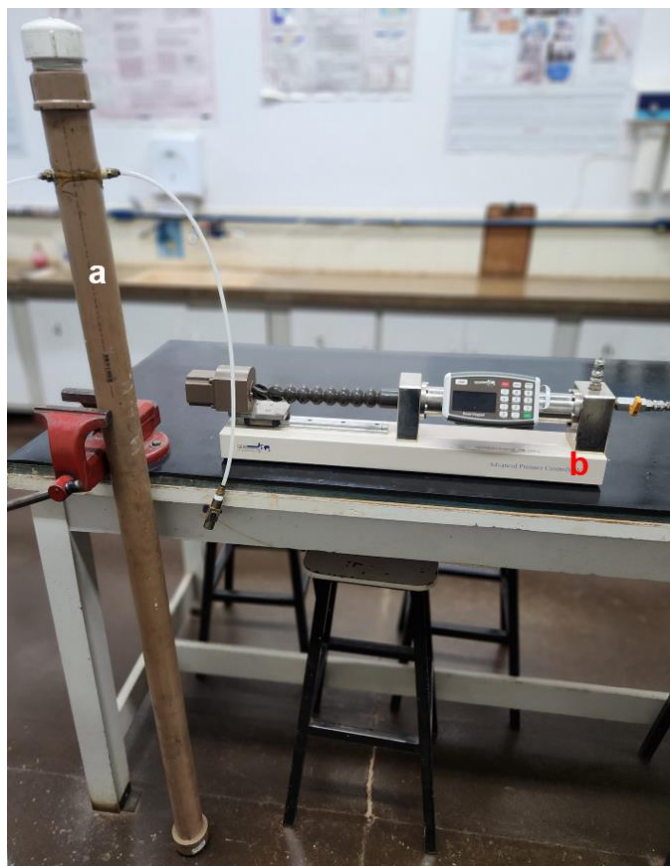


Figura 12: Tubo de PVC (a) e atuador de pressão (b) para o teste de estanqueidade da ponteira sísmica.

Fonte: Autoria própria.

Para solucionar esse problema da infiltração de água na ponteira foi inserido um anel de vedação (*O-ring*) em cada uma das posições onde os geofones ficariam posicionados. Além disso foram confeccionadas novas tampas para melhorar a vedação dos compartimentos. Após isso, estes compartimentos da ponteira foram fechados com as novas tampas, os parafusos e os anéis de vedação. No conector com 18 vias, durante os testes de estanqueidade, foi utilizada uma rolha e fita veda rosca ao invés da aplicação de silicone líquido.

Um novo ensaio de estanqueidade foi realizado seguindo o mesmo procedimento descrito nos parágrafos anteriores, porém neste caso, o atuador aplicou pressões de 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa e 350 kPa. Constatou-se que para cada uma destas pressões aplicadas por cerca de 120 minutos não houve nem diminuição dessa pressão, nem vazamento do líquido no interior do tubo de

PVC. O teste de estanqueidade foi interrompido, os parafusos e as tampas dos compartimentos foram removidos e confirmou-se que não havia água no interior da ponteira. Assim, pode-se garantir que esta ponteira está em condições de ser utilizada até, pelo menos 35 m abaixo do nível de água.

Os ensaios *down-hole* feitos no campo experimental da USP de São Carlos e no local 1 do campo experimental da UNESP de Bauru foram realizados antes da instalação dos *O-rings* na ponteira sísmica desenvolvida. Após essa nova versão da ponteira, com anéis de vedação, foram realizados ensaio *down-hole* no local 2 do campo experimental da UNESP e no jardim botânico municipal, ambos situados em Bauru.

4.1.4 Geofones

Os geofones utilizados foram fabricados pela *Geospace*, modelo OMNI tipo GS-14. Três deles foram instalados paralelos a ponteira (GS-14-L3) e três deles perpendiculares a ponteira (GS-14-L9), sendo esses modelos de geofones mostrados nas Figura 13a e 13b, respectivamente.

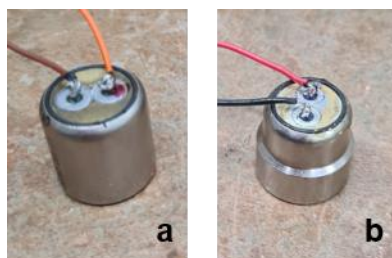


Figura 13: Geofones utilizados na ponteira, modelo: (a) GS-14-L3, (b) GS-14-L9.

Fonte: Autoria própria.

Os dois tipos de geofones utilizados possuem frequência natural de 28 Hz, o que é aquela recomendada por Butcher et al. (2005). Os geofones utilizados para determinar de V_P e de V_S possuem sensibilidade de 11,42 V/m/s e 23,62 V/m/s, respectivamente.

Os geofones instalados no interior da ponteira, em ambas as posições, foram posicionados e envolvidos com fita isolante. Acima deles foi adicionada uma lâmina de isopor para impedir que a carcaça metálica do geofone entrasse em contato com o aço da ponteira e prejudicasse a resposta dos transdutores. Na Figura 14 ilustra-se como os geofones ficaram dentro da ponteira com o

devido isolamento elétrico, antes do primeiro teste de estanqueidade ser realizado.

O interior da ponteira foi preparado de modo que os geofones ficassem o mais estáveis possíveis e não se deslocassem durante sua cravação. Além disso, foram utilizadas finas lâminas de isopor entre os geofones para impedir que um geofone entrasse em contato com o outro. Na Figura 15 é mostrado os geofones dentro da ponteira (a) e com uma lâmina de isopor em cima (b), respectivamente.

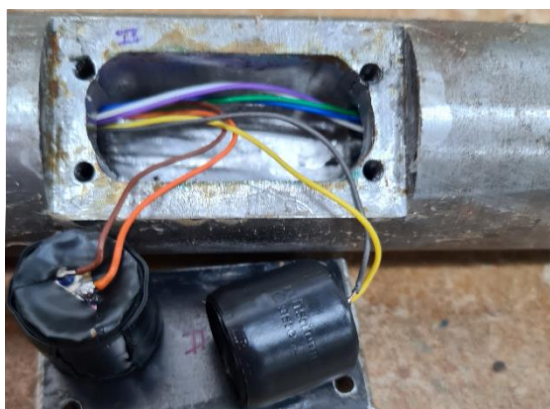


Figura 14: Geofones posicionados no interior da ponteira com o devido isolamento elétrico, antes do primeiro teste de estanqueidade.

Fonte: Autoria própria.

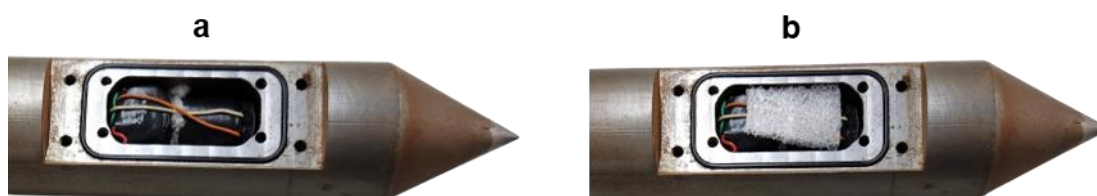


Figura 15: Geofones dentro de um dos compartimentos da ponteira: (a) sem isopor, (b) com isopor.

Fonte: Autoria própria.

Na extremidade oposta à ponteira, foi utilizado um conector com 18 vias e um cabo composto por 9 pares traçados de fios (1 polo positivo e 1 polo negativo por par). Para cada geofone foi utilizado um desses pares traçados de fios. Além disso, foi utilizado anel de vedação nesse conector, a fim de possibilitar o uso dessa ponteira abaixo do nível de água, sem prejudicar os geofones. O aterramento da malha desse cabo foi feito conectando uma ponta

de um fio na malha interna do cabo e a outra ponta no canal analógico *AI/ GROUND* do sistema de aquisição de dados.

4.1.5 Equipamento de cravação

Para a cravação da ponteira sísmica no solo foi utilizado um equipamento de cravação multifunção Pagani, modelo TG 63 – 150 DP, que possui capacidade de cravação de 150 kN. Esse equipamento possui duas hastes de nivelamento na parte frontal e uma na parte traseira, além de dois helicoides que permitem a ancoragem do equipamento, garantindo assim, uma maior estabilidade para a realização do ensaio. Na Figura 16 observa-se o equipamento de cravação empregado.



Figura 16: Sistema para cravação de multifunção utilizado.
Fonte: Autoria própria.

4.1.6 Fontes sísmicas e trigger

As fontes sísmicas inicialmente empregadas foram barras de aço com dimensão de 0,30 x 0,10 m, e foram utilizadas para gerar tanto ondas P quanto ondas S (Figura 17).

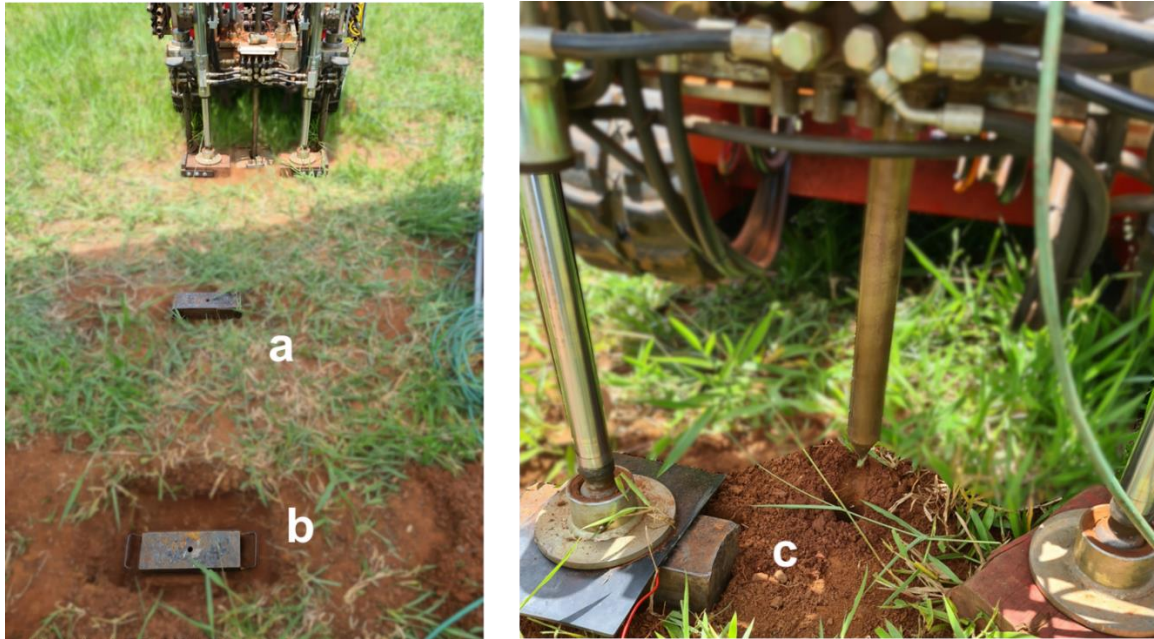


Figura 17: Fontes sísmicas de aço distantes do eixo da ponteira de: (a) 1,5m; (b) 2,5m; (c) 0,33m.

Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, foram desenvolvidas e testadas duas fontes idênticas para determinar V_s . Essas novas fontes são de madeira com revestimento de 25mm de aço em somente uma das laterais, cuja dimensão total de cada uma é de 0,30 x 0,19 m. Além dessas, também foi testada uma fonte de madeira com revestimento de aço nas duas laterais. Esta fonte tem 0,60 x 0,20m e foi utilizada para gerar ondas S. Na Figura 18 têm-se essas fontes sendo utilizadas durante testes realizados.



Figura 18: Fontes sísmicas de madeira e aço posicionadas: (a) na frente, (b) trás.

Fonte: Autoria própria.

Para gerar ondas S de boa qualidade, a fonte precisa ser carregada contra o solo de modo que ela não deslize ao receber um golpe lateral. Por isso,

carregar a fonte contra o solo utilizando as bases de nivelamento do equipamento de cravação é uma opção interessante e viável (VITALI, 2011). A fonte foi posicionada e testada em uma das hastes de nivelamento da frente. Posteriormente, ela foi testada posicionada na haste de nivelamento de trás do equipamento.

Na geração de ondas P, a fonte também precisa estar com bom contato com a superfície do terreno. Uma forma de melhorar o contato com o solo é utilizar uma fonte que possua ranhuras na parte inferior. Caso isso não seja possível, pode-se aplicar pelo menos 20 golpes na parte superior da fonte e/ou utilizar um pouco de areia ou água para melhorar a adesão da fonte ao solo (LEGION DRILLING & NUMAC, 2022). Outra maneira de fixar a fonte sísmica é através do uso de ganchos que podem ser cravados no solo com o uso de um martelo.

Para a fixação da fonte sísmica geradora de ondas P foram testados o uso dos ganchos e a aplicação de golpes verticais antes da realização do ensaio. Assim, foi definido que estes métodos combinados melhoram a fixação da fonte sísmica. Na Figura 19 é mostrado o uso de ganchos para a fixação da fonte.



Figura 19: Fonte sísmica fixa ao solo com o uso de ganchos.
Fonte: Autoria própria.

O *trigger* escolhido é digital de contato acoplado a um martelo de cabeça de aço, de aproximadamente 2 kg, seguindo as recomendações de Pedrini (2012). Esse *trigger*, apresentado na Figura 20, é composto por 2 fios entrelaçados, na qual o primeiro fio é conectado a cabeça do martelo e ao canal digital *PFI 0/PI.0* (canal 73) do sistema de aquisição, enquanto o segundo fio é

conectado à fonte sísmica e ao canal digital +5 V (canal 96), resultando em um circuito elétrico aberto. Quando a cabeça do martelo atinge a fonte sísmica, o circuito elétrico se fecha e as ondas sísmicas são registradas pelo sistema de aquisição. Depois da aplicação do golpe, o circuito elétrico volta a ficar aberto, permitindo que um novo golpe seja realizado.

Uma haste de aço de 1,3 m de comprimento foi utilizada para o aterramento, a fim de reduzir os ruídos e obter sinais com menor interferência (PEDRINI, 2012). Essa barra é cravada na superfície do terreno onde o ensaio é realizado, o que é apresentado pela Figura 21. O aterramento é feito com a utilização de um jacaré conectado à haste de aterramento e a ponta do cabo desse jacaré é conectada ao sistema de aquisição de dados no canal analógico *AI GROUND*.



Figura 20: *Trigger* de contato.
Fonte: Autoria própria.

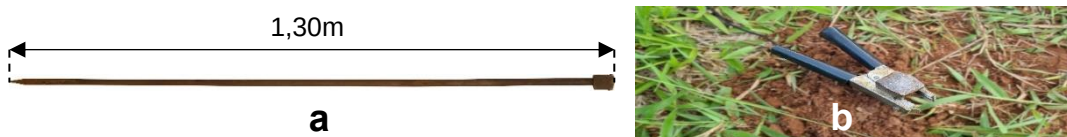


Figura 21: Haste de aterramento: (a) vista lateral, (b) cravada no solo.
Fonte: Autoria própria.

4.1.7 Medidor de nível de água

Pode-se estimar a posição do nível de água nos locais estudados por meio da leitura de poro-pressão dos ensaios CPTu. Outra maneira de se estimar o nível de água é empregando um medidor elétrico de nível de água, também

conhecido como “pio”. Este dispositivo consiste em um sensor elétrico ligado a um cabo que é enrolado num carretel. Este cabo pode ter de 30 a 300 m de comprimento, dependendo do modelo e tem sua indicação feita em milímetros.

Esse medidor elétrico é inserido em um furo de sondagem ou em um poço e irá emitir um sinal sonoro enquanto não estiver em contato com a água. Quando este sensor estiver em contato com a água, ele irá parar de emitir um sinal sonoro. Então, é feita a leitura no cabo milimetrado para determinar a posição do nível de água naquele local. Através dessas leituras nos locais onde havia a presença de água no maciço até a profundidade ensaiada, foi possível comparar a posição do nível de água medido desta forma, com aquele interpretado por meio dos registros de V_P e da poro-pressão do piezocone. Na Figura 22 é mostrado esse medidor elétrico de nível de água utilizado na pesquisa.



Figura 22: Medidor elétrico de nível de água.
Fonte: Autoria própria.

4.1.8 Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição utilizado é o modelo NI USB-6352 da *National Instruments*. Este sistema possui 16 canais de entrada analógica em *single-ended channel* e 8 canais em *differential channel*, com resolução de 16 bits e taxa de aquisição de 1,25 ms/s e para saída analógica 2 canais com resolução de 16 bits e taxa de aquisição máxima de 2,86 ms/s. Além disso, permite o uso do *trigger* analógico ou digital com resolução de 16 bits. Devido aos 16 canais em *single-ended channel* (8 canais para polos positivos e 8 canais para polos negativos) é possível instalar até 8 geofones. Nesta pesquisa foram utilizados 6 geofones na ponteira desenvolvida. Tem-se na Figura 23a uma imagem do

sistema de aquisição com os cabos que estão conectados aos geofones e ao aterramento da malha, já instalados.

Uma maleta com uma chapa de acrílico foi utilizada para armazenar o sistema de aquisição de dados e facilitar a instalação da parte elétrica do ensaio *down-hole*, e esse sistema ficou embaixo da chapa de acrílico. Na Figura 23b tem-se essa maleta com os conectores. Na chapa de acrílico foram feitos furos para instalar os conectores que ligam o sistema à fonte de energia (item1), ao *notebook* (item 2), à haste de aterramento (item 3), à ponteira (item 4) e ao martelo de cabeça de aço (item 5). Além disso, foram instalados uma ventoinha (item 6), para não superaquecer o sistema de aquisição, e 2 conectores extras (item 7) que podem ser utilizadas com outros equipamentos.

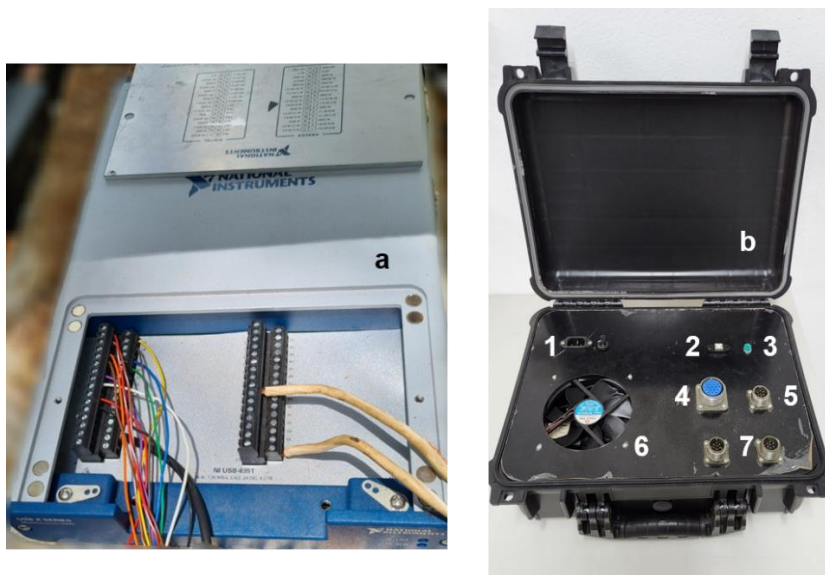


Figura 23: Sistema de aquisição de dados: (a) fora da maleta; (b) no interior da maleta.

Fonte: Autoria própria.

4.2 Ensaios realizados

4.2.1 Testes Preliminares na Ponteira

Foram realizados testes com multímetro nas vias conectadas aos geofones para verificar se os geofones próximos interferiam uns nos outros e foi confirmado que isso não ocorreu.

O *trigger* e a haste de aterramento foram testados no campo a fim de verificar se o *trigger* respondia corretamente durante a execução dos golpes, uma vez que o desempenho desses instrumentos é fundamental para interpretação por meio do intervalo verdadeiro de tempo. O funcionamento correto do *trigger* foi confirmado por meio dos testes realizados.

O cabo para a aquisição de dados também foi testado e verificou-se que a resistência dos pares de fios traçados não alterava quando ele estava esticado ou enrolado. Desse modo, esse cabo pode ser passado dentro das hastes de cravação e o restante pode ficar ao lado do equipamento.

4.2.2 Considerações iniciais

Inicialmente foram feitos testes e calibrações em laboratório, tanto para desenvolvimento da ponteira como do sistema de aquisição de dados (*hardware e software*). Em seguida, foram realizados ensaios CPTu em conjunto com sísmica *down-hole* acima do nível da água nos locais 1 e 2 do campo experimental da UNESP de Bauru. A partir dos ensaios, foi possível determinar a velocidade das ondas S e P.

No campo experimental da USP de São Carlos-SP e no jardim botânico municipal de Bauru, onde o nível d'água foi atingido, procurou-se fazer também uma avaliação mais detalhada entre as diferenças nos perfis de ondas P para solos saturados e não saturados. O objetivo foi avaliar como essa informação pode ser utilizada na definição da posição do nível d'água.

Além disso, os perfis de q_c e G_0 permitem calcular a relação G_0/q_c ao longo do perfil do subsolo e utilizá-la como recurso adicional para a caracterização de solos não convencionais, como os tropicais não saturados.

4.2.3 Pré-furo e orientação dos geofones

Para todos os ensaios foi realizada a limpeza do terreno, onde as ancoragens e a ponteira seriam cravadas, bem como onde as fontes sísmicas seriam posicionadas. Depois disso, foi realizada a ancoragem e o nivelamento do equipamento de cravação, na qual, as hastes de nivelamento foram apoiadas nas fontes sísmicas, conforme mostrado na Figura 18. Após isso, foi utilizado um sistema rotativo para fazer um pré-furo para facilitar a cravação do piezocone e da ponteira sísmica no terreno e mantê-los com uma orientação perpendicular em relação ao local do ensaio. Na Figura 24a tem-se o sistema rotativo; na Figura 24b é mostrado este sistema acoplado ao sistema de cravação e na Figura 24c tem-se um alinhador de haste de pré-furo.

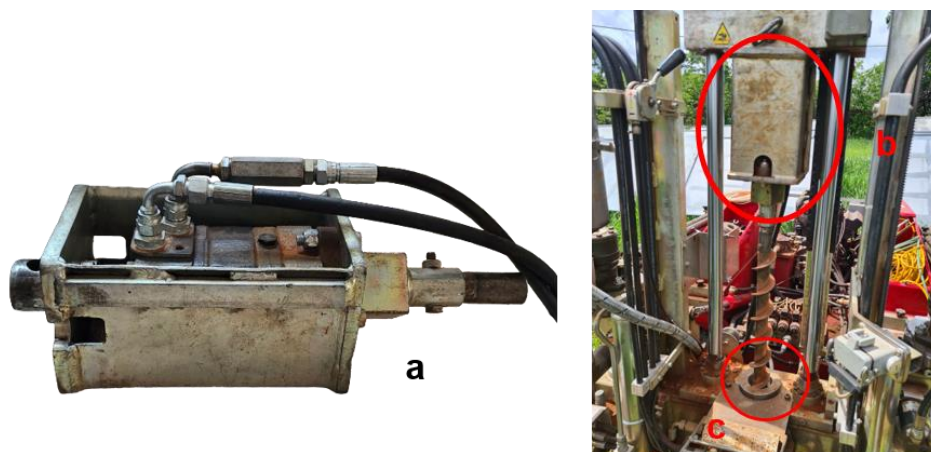


Figura 24: Sistema rotativo para abertura de pré-furo: (a) vista longitudinal; (b) acoplado a máquina de cravação; (c) com a haste de pré-furo orientada pelo alinhador.
Fonte: Autoria própria.

A ponteira do CPT foi calibrada em laboratório, e o recurso do filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva foi utilizado nos registros de poro-pressões. Na outra extremidade da ponteira foi conectado um cabo para a transmissão dos dados de q_c , f_s , u e inclinação gerados durante a execução do ensaio, que eram registados por um microcomputador portátil. Este cabo foi passado internamente a um conjunto de hastes de cravação e os dados foram registrados a cada intervalo de 10 mm de profundidade.

Os ensaios CPTu foram realizados antes dos ensaios *down-hole*, permitindo assim que a ponteira do CPT tivesse um contato excelente com as paredes do pré-furo. Para a cravação da ponteira do CPT foi utilizado o sistema de cravação multifunção (Figura 16) e foi acoplada a ela uma haste de 1 m de comprimento. Em seguida foi iniciada a cravação da ponteira a uma velocidade constante de 20 mm/s, seguindo a ASTM D5778 (1995). A cravação da ponteira era interrompida em intervalos de 1 m para que uma nova haste fosse acoplada. O ensaio foi finalizado quando se atingiu a profundidade desejada ou quando os valores de q_c e/ou f_s se aproximassem de 50 MPa e 1 MPa, respectivamente, limite da ponteira utilizada.

Após a execução do ensaio CPTu, o cone e as hastes de cravação eram removidos para a realização do ensaio *down-hole* no mesmo furo onde foi feito o ensaio CPTu, seguindo as recomendações de Rocha (2018). Antes da ponteira sísmica ser cravada verificou-se a orientação dos geofones em relação ao eixo

de vibração das ondas S. Isto é feito, pois se os geofones estiverem com uma inclinação superior a 15° , os resultados podem perder qualidade. Vitali (2011) recomenda que esses geofones fiquem paralelos a direção dos golpes laterais aplicados.

Depois dessa verificação, foi acoplada à ponteira sísmica uma haste de 1 m de comprimento e foi medido 1 m desde o meio do geofone mais afastado da ponta cônica. Essa medida foi marcada na haste para servir de referência para cada metro de avanço na profundidade, sendo essa marca mostrada na Figura 25. A ponteira foi cravada até que essa marca se alinhasse à superfície do terreno. Então, a cravação foi interrompida e o ensaio *down-hole* foi iniciado, seguindo o procedimento descrito na ASTM D7400-14 (2014). Este ensaio foi repetido para cada novo metro que a ponteira conseguia avançar ao longo da profundidade da área investigada, até atingir a profundidade desejada.



Figura 25: Marca de giz na haste de cravação.
Fonte: Autoria própria.

4.2.4 Alinhador e intensidade dos golpes

O alinhador é uma peça que permite que a ponteira cravada siga a mesma orientação durante a cravação, e na Figura 26a tem-se exemplos de alinhadores. Durante a execução dos golpes o alinhador foi removido do equipamento de cravação para que ele não vibrasse e assim não interferisse nos registros sísmicos. Na Figura 26b tem-se o alinhador removido do eixo de cravação. Os golpes aplicados nas fontes sísmicas foram de baixa intensidade, seguindo as recomendações de Vitali (2011). Este autor destaca que golpes de grande intensidade geram sinais com maior amplitude e qualidade inferior quando

comparados aos golpes com menor intensidade. Vitali (2011) também recomenda que os golpes sejam semelhantes para que seja possível uma melhor comparação entre os resultados dos registros gerados.

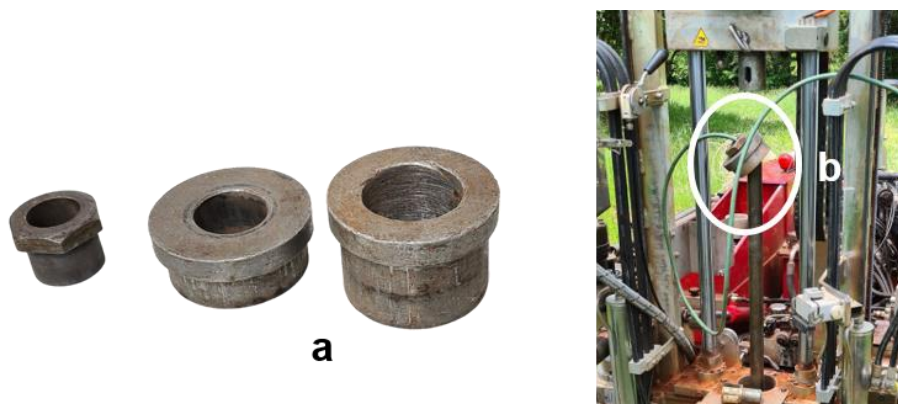


Figura 26: Alinhadores: (a) exemplos; (b) removido do eixo de cravação da máquina.
Fonte: Autoria própria.

Os sinais obtidos através dos golpes foram registrados por meio do programa de aquisição desenvolvido por Pedrini et al. (2010), que permitiu a visualização dos mesmos durante a execução do ensaio, possibilitando a avaliação da qualidade do sinal antes de gravá-lo, para posterior tratamento e interpretação. Para melhorar a qualidade dos sinais sísmicos são aplicados dois filtros por meio desse programa de aquisição: um filtro passa-alta de 40 Hz e um filtro passa-baixa de 400 Hz. Ambos os filtros possuem ordem de grandeza igual a 3, ou seja, os sinais que possuem domínio da frequência inferior a 40 Hz e superior a 400 Hz serão eliminados. A ordem de grandeza do filtro determina a intensidade que o filtro aplica no sinal, afetando a amplitude da onda. Logo, quanto maior a ordem de grandeza do filtro, mais filtrado será o sinal, portanto é preciso tomar cuidado com o uso de filtros para que eles não prejudiquem a identificação do tempo de chegada das ondas.

4.3 Locais estudados

4.3.1 Campo experimental da USP – São Carlos

O campo experimental da USP de São Carlos foi escolhido devido ao grande número de ensaios sísmicos e ensaios CPTu disponíveis. A área

estudada, situada aproximadamente 50m da creche da USP, é representada na Figura 27.



Figura 27: Área estudada dentro do campo experimental da USP de São Carlos-SP.

Fonte: Modificado do Google Earth (2024).

4.3.1.1 Caracterização da área experimental

O campo experimental da USP de São Carlos está assentado sobre rochas do Grupo São Bento, compostas por arenitos da Formação Botucatu e magmatitos básicos da Formação Serra Geral (GIACHETI, 2001). Acima dessa formação geológica existem arenitos e conglomerados do Grupo Bauru e, aparecem Sedimentos Cenozóicos na parte superior.

Estes Sedimentos surgiram a partir do retrabalhamento dos materiais do Grupo Bauru e das Formações Serra Geral e Botucatu devido ao transporte em meio aquoso. Além disso, eles sofreram ações intempéricas típicas de região tropical, com altas temperaturas, elevada pluviosidade e boa drenagem. Devido a essas ações de intemperismo estes sedimentos passaram por laterização, que consiste na formação e concentração de óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro, tornando-os pouco compactos, colapsíveis e muito porosos (GIACHETI, 2001).

O solo deste campo experimental contém uma primeira camada, até cerca de 7m de profundidade, composta por areia fina a média argilosa, colapsível e porosa. Posteriormente, ocorre uma linha de seixos de quartzo e limonita e, em seguida, tem-se uma camada composta por solo residual de granulação média a conglomeráticos, composta por cerca de 45% de areia e 35% de argila (GIACHETI, 2001).

4.3.1.2 Ensaios sísmicos e CPTu

Neste campo experimental foram realizados diversos ensaios como CPTu, DMT, SPT, SPT-T, ensaios de sísmica *cross-hole* (CH), *down-hole* (DH) e *up-hole* (UH), entre outros (GIACHETI, 2001; ROCHA, 2013; ROCHA, 2018). Na Figura 28 tem-se a posição de 2 ensaios *cross-hole* realizados por Giacheti (1991) e Giacheti (2001), 8 ensaios SDMT e 12 ensaios CPTu realizados por Rocha (2018), além de 2 ensaios *down-hole* feitos com a ponteira desenvolvida e 1 ensaio CPTu, estes 3 últimos ensaios feitos nesta pesquisa. Os resultados dos ensaios *cross-hole*, realizados por Giacheti (1991) e Giacheti (2001) e ensaios CPTu e SDMT, realizados por Rocha (2018) são considerados ensaios de referência e são apresentados na Figura 29.

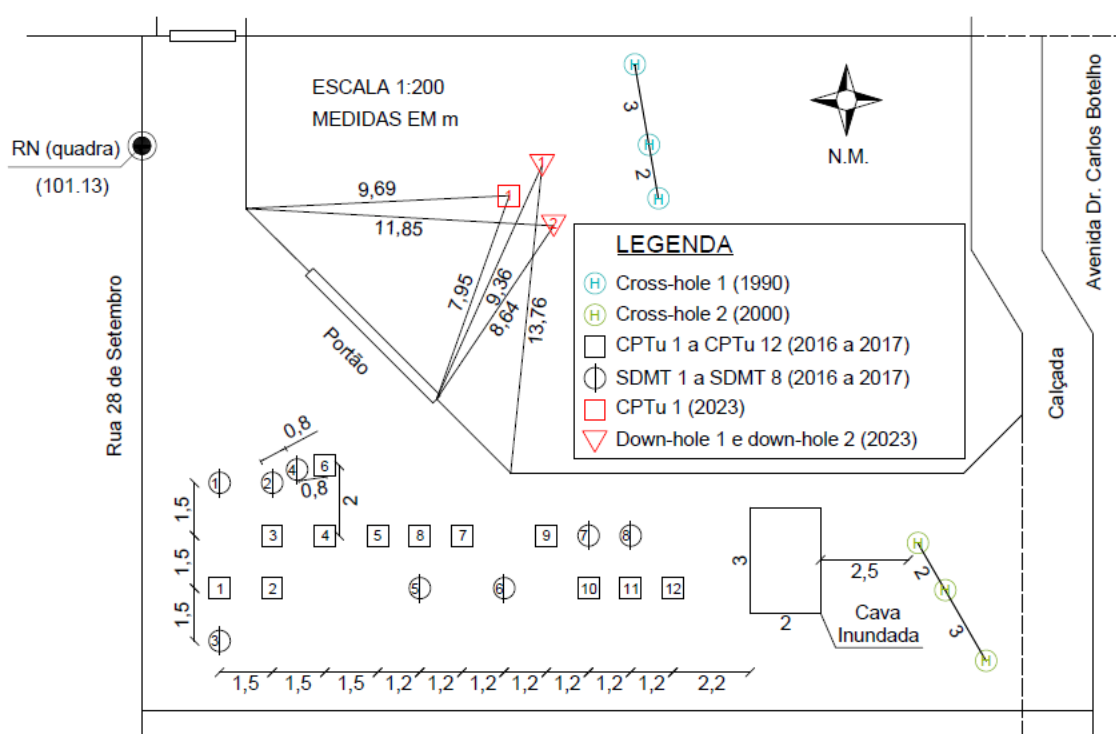


Figura 28: Posição dos ensaios CPTu, *cross-hole*, *down-hole* e SDMT realizados no campo experimental da USP em São Carlos-SP.

Fonte: Autoria própria.

Os ensaios *cross-hole* realizados por Giacheti (1991) e Giacheti (2001) foram realizados até as profundidades de 8,5m e 8,2m, respectivamente, sendo os dados de V_s e V_p registrados a intervalos de profundidade de 1 m para o primeiro ensaio e intervalos de 0,5 m para o segundo. Estes dois ensaios possuíam um arranjo de 3 furos alinhados e espaçados de 2 e 3 m.

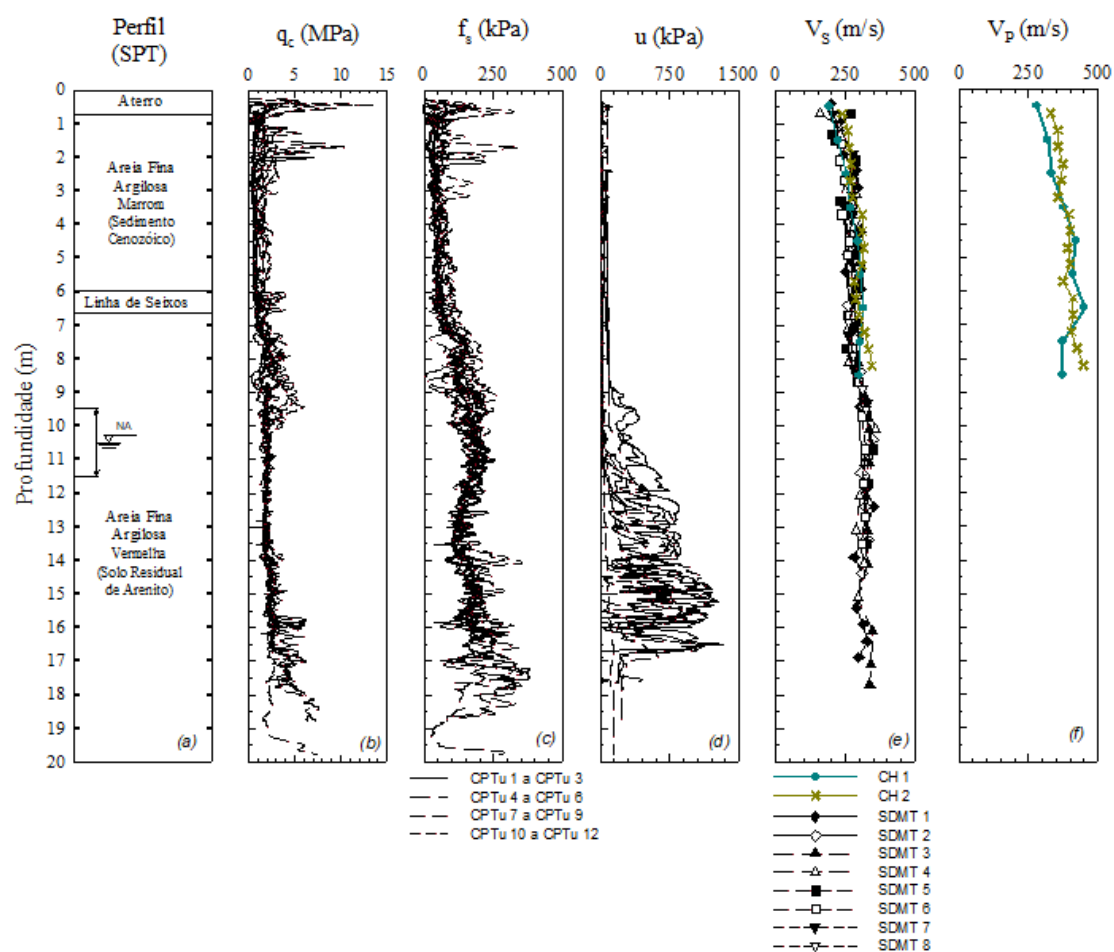


Figura 29: Resultados de ensaios CPTu, *cross-hole* e SDMT realizados no campo experimental da USP em São Carlos-SP.

Fonte: Modificado de Giacheti (1991), Giacheti (2001) e Rocha (2018).

Os ensaios SDMT realizados por Rocha (2018) de março de 2016 (SDMT 1 e SDMT2), outubro de 2016 (SDMT 3 e SDMT4), abril de 2017 (SDMT 5 e SDMT 6) e outubro de 2017 (SDMT 7 e SDMT 8) foram realizados até as profundidades de, respectivamente, 16,9m, 17,7m, 13,5m e 9,5m, sendo o registro dos dados de V_s realizado a intervalos de 0,5m e 1m de profundidade para a campanha de ensaios de março de 2016 e demais ensaios, respectivamente.

Os ensaios CPTu realizados nas mesmas campanhas de ensaios de 2016 a 2017 atingiram as profundidades de, respectivamente, 17,87m, 19,75m, 17,8m e 11,8m.

No ensaio CPTu 1, realizado neste campo experimental, em março de 2023, a ponteira do CPT foi cravada até a profundidade de 19,80m.

Nos ensaios DH 1 e DH 2, realizados em março de 2023, foram utilizadas duas fontes de madeira e aço que foram apoiadas na superfície do terreno pelas hastes de nivelamento frontal do sistema de cravação para a geração de ondas S e estas fontes foram carregadas contra o terreno pelas hastes de nivelamento frontal do equipamento de cravação (Figura 18a).

Nestes 2 ensaios *down-hole*, uma fonte de aço (0,30 x 0,10 m), fixada ao terreno com o uso de ganchos (Figura 19), foi utilizada para a geração de ondas P. Antes do início do ensaio, foram aplicados cerca de 50 golpes em cada uma destas fontes para melhorar seu contato com o terreno de modo que elas não deslizassem horizontalmente devido à vibração provocada pelos golpes verticais aplicados (LEGION DRILLING & NUMAC, 2022). Os ensaios DH 1 e DH 2 foram executados até a profundidade de, respectivamente, 17,5m e 20m e foram aplicados 3 golpes em cada lateral metálica das fontes geradoras de onda S e 3 golpes verticais na fonte para produzir ondas P. Os golpes eram executados a cada intervalo de profundidade de 1 m.

4.3.2 Campo experimental da UNESP – Bauru

O campo experimental da UNESP de Bauru foi escolhido devido ao grande número de ensaios sísmicos e ensaios CPTu disponíveis. Neste campo experimental existem dois locais que possuem características geotécnicas semelhantes. O local 1 fica localizado próximo ao Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMeT) de Bauru e o local 2 se encontra atrás das Salas do Programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia de Bauru da Unesp, cerca de 700m do local 1. Tem-se na Figura 30 a representação dos locais 1 e 2 do campo experimental da UNESP de Bauru.



Figura 30: Locais investigados no campo experimental da UNESP de Bauru-SP

Fonte: Modificado do Google Earth (2024).

4.3.2.1 Caracterização da área

De acordo com Giacheti (2001), a região de Bauru é composta principalmente por sedimentos do Grupo Bauru, como as Formações Marília e Adamantina e estes sedimentos recobrem as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, sendo que a geologia do campo experimental predomina em toda a cidade de Bauru. Um poço tubular foi aberto a 100 m do local e foi constatada uma primeira camada de 52 m da Formação Marília, seguida de uma camada de cerca de 98 metros da Formação Adamantina, e abaixo desta segunda camada tem-se a Formação Serra Geral.

A Formação Marília é composta por conglomerados, arenitos e lamitos intercalados entre si enquanto a Formação Adamantina é constituída por siltitos arenosos, micáceos, argilitos, arenitos de granulação média a fina, arenitos micáceis e arenitos conglomeráticos (GIACHETI, 2001).

O solo do campo experimental de UNESP - Bauru é composto por uma camada de areia fina pouco argilosa, colapsível, porosa que se estende até aproximadamente 17 m de profundidade, seguida de uma camada de argila siltosa que vai até 19 m de profundidade e após esta profundidade a camada de areia fina pouco argilosa reaparece (CAVALCANTE et al., 2007).

A densidade do solo dessa camada mais superficial aumenta com a profundidade e ela possui comportamento laterítico até aproximadamente 13 m de profundidade e comportamento não laterítico a partir daí (GIACHETI, 2001).

4.3.2.2 Ensaios sísmicos e CPTu do local 1

Neste campo experimental foram realizados anteriormente diversos ensaios como CPTu, DMT, SPT, SPT-T, ensaios sísmicos *cross-hole*, *down-hole*, entre outros (GIACHETI, 2001; VITALI, 2011; SALLES, 2013). Na Figura 31 tem-se o local 1 e a posição de um ensaio *cross-hole* e dois ensaios SCPTu realizados por Giacheti (2001), dois ensaios *down-hole* realizados por Vitali (2011) e dois ensaios CPT realizados por Salles (2013), além de três ensaios CPTu e três ensaios *down-hole* feitos com a ponteira desenvolvida, estes 6 últimos ensaios feitos nesta pesquisa. Os resultados dos ensaios *cross-hole*, *down-hole*, CPT e SCPTu anteriormente realizados são considerados ensaios de referência e são apresentados na Figura 32.

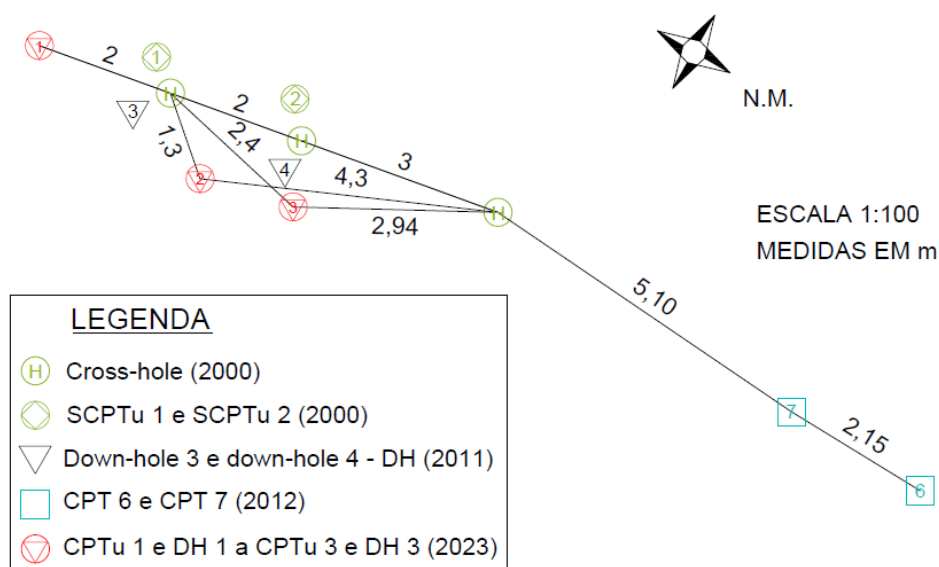


Figura 31: Posição dos ensaios CPT, CPTu, *cross-hole*, *down-hole* e SCPTu realizados no local 1 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.

Fonte: Autoria própria.

O ensaio *cross-hole* realizado por Giacheti (2001) foi realizado até a profundidade de 14,65m sendo os dados de V_s e V_p registrados a intervalos de 0,5m de profundidade para o *cross-hole*. Esse ensaio possuía um arranjo de 3 furos alinhados e espaçados de 2 e 3 m.

Os ensaios SCPTu 1 e SCPTu 2 foram realizados até as profundidades de respectivamente, 16,34m e 19,40m, sendo o registro dos dados de V_s realizado a intervalos de um metro de profundidade (GIACHETI, 2001). Os

ensaios sísmicos *down-hole* DH 3 e DH 4 realizados por Vitali (2011) atingiram a profundidade de 19,75m, sendo que os dados de V_s foram registrados a cada, respectivamente, 1m e 0,5m de profundidade. Os ensaios CPT 6 e CPT 7 apresentados por Salles (2013) foram feitos até as profundidades de, respectivamente, 15 m e 16 m.

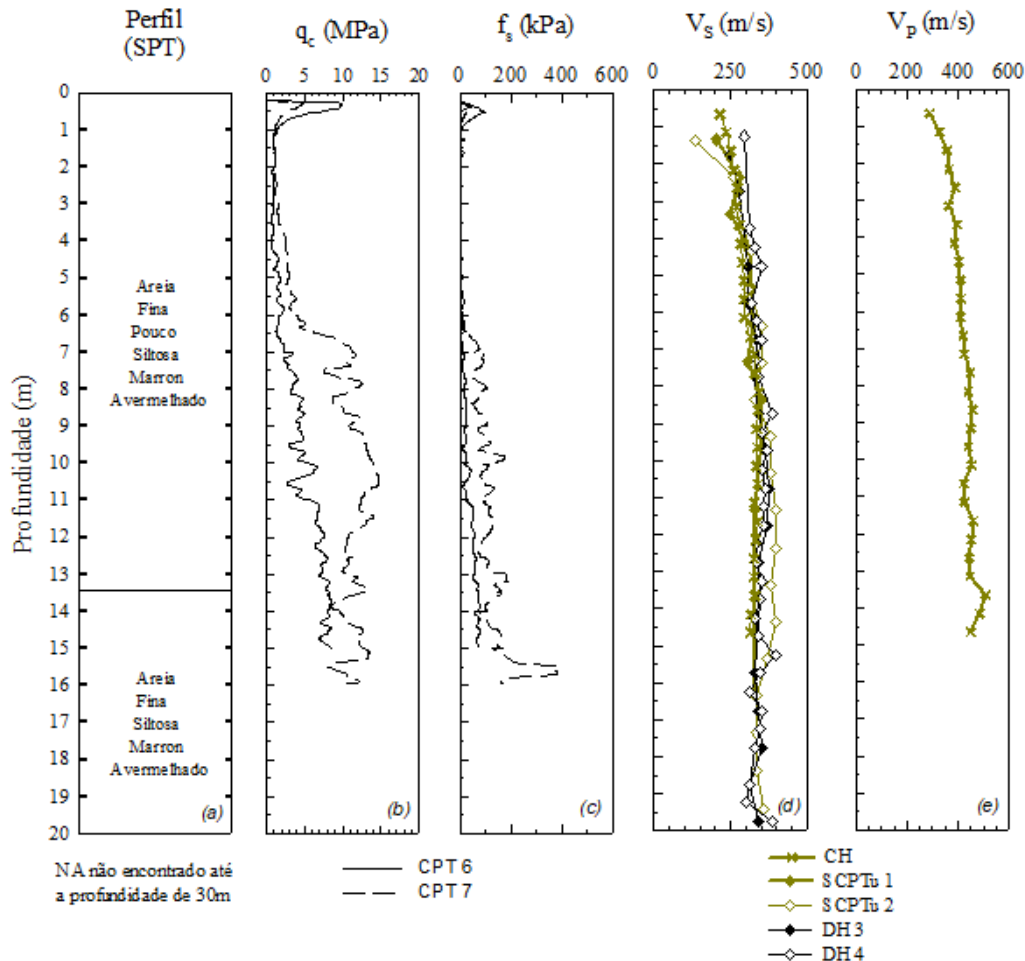


Figura 32: Resultados de ensaios CPT, *cross-hole*, *down-hole* e SCPTu realizados no local 1 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.

Fonte: Modificado de Giacheti (2001), Vitali (2011) e Salles (2013).

Nos ensaios CPTu 1, CPTu 2, CPTu 3, DH 1, DH 2 e DH 3, realizados em 2023, a ponteira CPT e a ponteira sísmica foram cravadas no campo experimental até a profundidade de 15 m. Nestes ensaios DH 1, DH 2 e DH 3 foram utilizadas duas fontes de madeira e aço pequenas, para a geração de ondas S e estas fontes foram carregadas contra o terreno pelas hastes de nivelamento frontal do equipamento de cravação (Figura 18a). Uma fonte de aço

foi fixada ao terreno com o uso de ganchos (Figura 19) e foi utilizada para a geração de ondas P nos 3 ensaios realizados.

Durante a realização destes 3 ensaios com a ponteira sísmica também foram aplicados 3 golpes em cada lado das fontes (golpe a esquerda e golpe a direita) para gerar ondas S e 3 golpes verticais na fonte para produzir ondas P, sendo os golpes aplicados a cada novo metro que a ponteira avançava no perfil do terreno.

4.3.2.3 Ensaios sísmicos e CPTu do local 2

Neste campo experimental foram previamente realizados diversos ensaios como CPTu, DMT, SDMT, SPT, SPT-T, ensaios sísmicos *down-hole* e *up-hole*, entre outros (ROCHA, 2013; ROCHA, 2018). Na Figura 33 tem-se o local 2 e a posição de 10 ensaios SDMT e 15 ensaios CPTu realizados por Rocha (2018) e 4 ensaios *down-hole* feitos com a ponteira desenvolvida, estes 4 últimos ensaios feitos nesta pesquisa. Os resultados dos ensaios SDMT e CPTu, realizados por Rocha (2018), são considerados ensaios de referência e são apresentados na Figura 34.

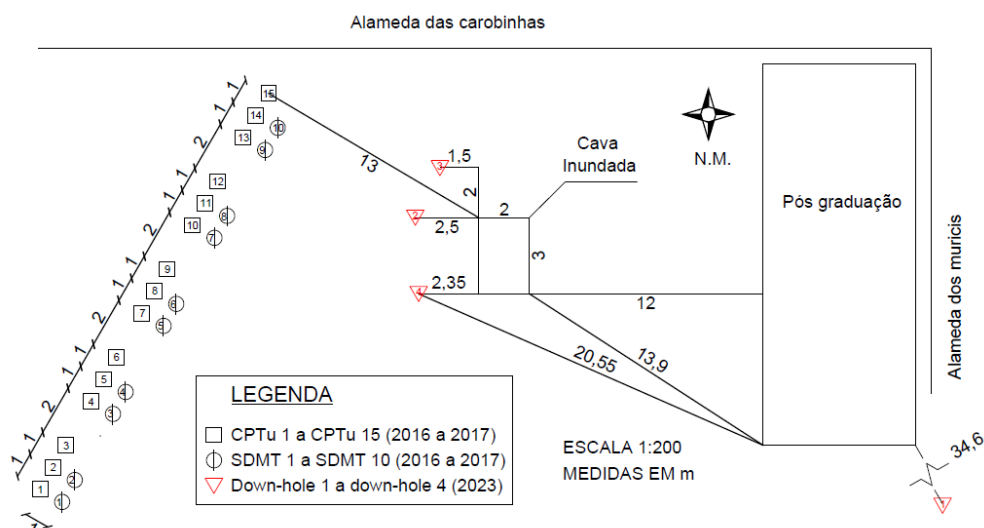


Figura 33: Posição dos ensaios CPTu, *down-hole* e SDMT realizados no local 2 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.

Fonte: Autoria própria.

Os ensaios sísmicos *down-hole* realizados por Rocha (2018) de abril de 2016 (SDMT 1 e SDMT 2), novembro de 2016 (SDMT 3 e SDMT 4), fevereiro de

2017 (SDMT 5 e SDMT 6), abril de 2017 (SDMT 7 e SDMT 8) e setembro de 2017 (SDMT 9 e SDMT 10) foram realizados até as profundidades de, respectivamente, 18 m, 18 m, 15 m, 15 m e 11,5 m, sendo o registro dos dados de V_s realizado a intervalos de 0,5 m de profundidade enquanto que os ensaios CPTu realizados nas mesmas campanhas de ensaios de 2016 a 2017 atingiram as profundidades de, respectivamente, 8 m, 18 m, 15,5 m, 16 m e 12 m.

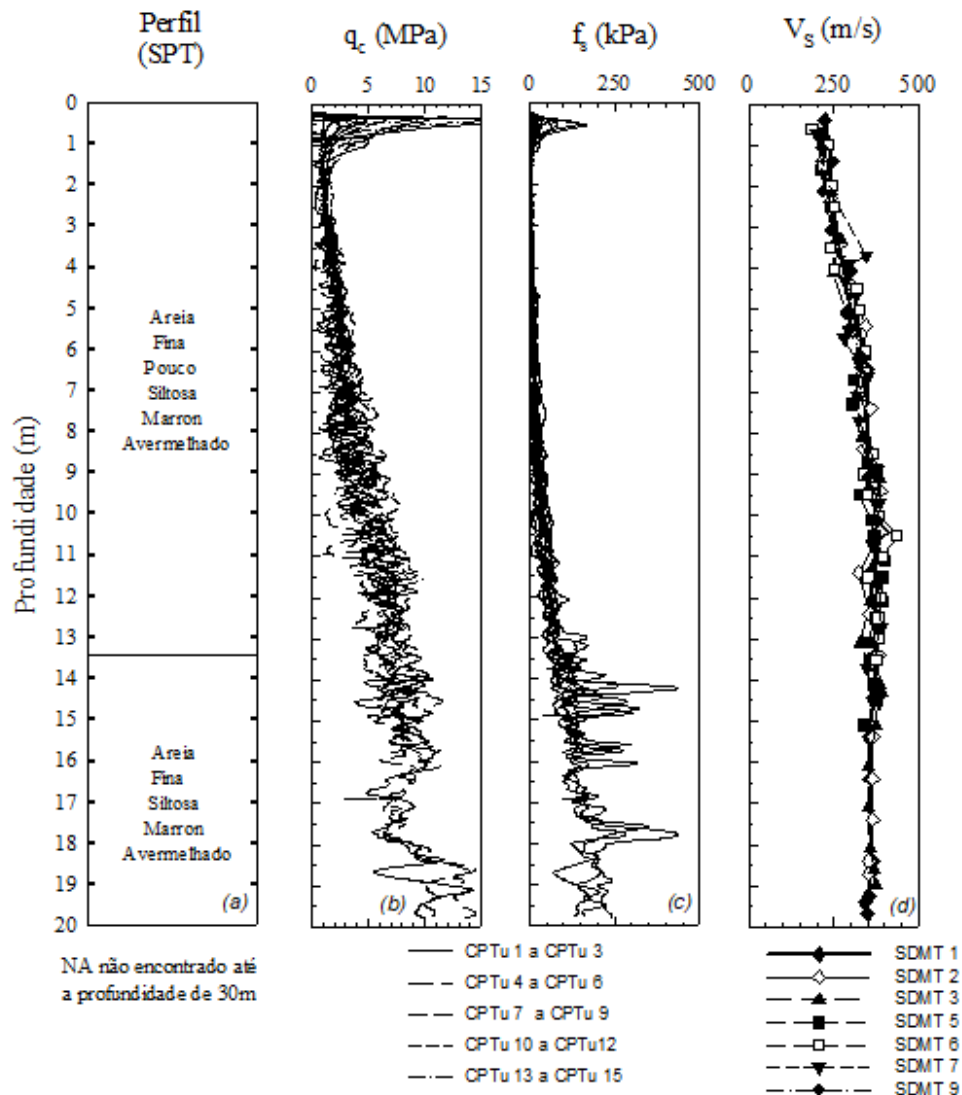


Figura 34: Resultados de ensaios CPTu e SDMT realizados no local 2 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.

Fonte: Modificado de Rocha (2018).

Nos ensaios *down-hole* 1 e 2 foram utilizadas uma fonte de aço (0,30 x 0,10 m) a fim de se obter as ondas S de melhor qualidade. Essa fonte foi apoiada na superfície do terreno por meio de uma das hastes de nivelamento frontal do

equipamento de cravação, e a distância dessa fonte em relação ao centro da haste de cravação da ponteira foi de $X=0,33\text{m}$ (Figura 6).

Para a determinação do tempo de chegada das ondas P nos ensaios DH 1 e DH 2 foram usadas, respectivamente, uma e duas fontes de aço com as mesmas dimensões ($0,30 \times 0,10 \text{ m}$), que foram bem fixadas na superfície do terreno. No ensaio 1, a fonte ficou distante $0,5 \text{ m}$ do eixo da haste de cravação da ponteira e no ensaio 2, as fontes ficaram a $1,5 \text{ m}$ e $2,5 \text{ m}$ do eixo da haste de cravação. A representação esquemática da posição destas fontes no terreno para o ensaio 2 está na Figura 17.

No ensaio DH 3 foram utilizadas três fontes sísmicas de madeira e aço para a geração de ondas S. As duas fontes menores ($0,30 \times 0,19 \text{ m}$) foram apoiadas na superfície do terreno pelas hastes de nivelamento frontal (Figura 18a) e a fonte maior ($0,60 \times 0,20 \text{ m}$) foi apoiada no terreno pela haste de nivelamento traseira (Figura 18b). As distâncias das fontes localizadas na frente e atrás do equipamento de cravação em relação ao centro da haste de cravação da ponteira foram respectivamente de $0,33 \text{ m}$ e $1,85 \text{ m}$.

Para a geração de ondas P no ensaio DH 3 foram utilizadas as mesmas fontes de aço dos ensaios DH 1 e DH 2 e as distâncias destas fontes em relação ao eixo de cravação da ponteira foram as mesmas daquelas empregadas no ensaio DH 2.

No ensaio DH 4 foram utilizadas, para a geração de ondas S, as duas fontes sísmicas de madeira e aço pequenas usadas no ensaio DH 3 e elas foram apoiadas na superfície do terreno de maneira semelhante à descrita no ensaio DH 3. Para a geração de ondas P foram utilizadas as 2 fontes sísmicas de aço usadas no ensaio DH 1 e DH 2, entretanto, uma destas 2 fontes foi fixada à superfície do terreno com o uso de ganchos (Figura 19) enquanto a outra não teve nenhum tipo de fixação.

Durante a realização destes quatro ensaios, a cada novo metro de profundidade, foram aplicados 3 golpes em cada lado das fontes (golpe a esquerda e golpe a direita) para gerar preferencialmente ondas S e 3 golpes verticais nas fontes para gerar preferencialmente ondas P. Os ensaios sísmicos

down-hole 1, 2 e 3 foram realizados até a profundidade de 9,5m e o ensaio DH 4 foi feito até a profundidade de 19,5m.

4.3.3 Parque das Camélias

O Parque das Camélias, localizado em Bauru-SP, foi escolhido devido a um ensaio *cross-hole* disponível. A área estudada se localiza dentro do conjunto habitacional “Parque das Camélias I”, cerca de 100 m da portaria 9. Tem-se na Figura 35 a representação deste local.



Figura 35: Área estudada no Parque das Camélias de Bauru-SP
Fonte: Modificado do Google Earth (2024).

4.3.3.1 Caracterização da área

Segundo Giacheti (2001) este local possui a mesma formação geológica e as características geotécnicas semelhantes a dos solos que ocorrem no campo experimental da UNESP de Bauru, que foi descrita em 4.3.2.1.

4.3.3.2 Ensaio SPT e sísmico do Parque das Camélias

Neste local foi realizado um ensaio *cross-hole* e três ensaios SPT. Na Figura 36 tem-se a posição destes ensaios realizados por Giacheti (1991). Os resultados do ensaio *cross-hole* e SPT são apresentados na Figura 37.

O ensaio *cross-hole* foi realizado até a profundidade de 8,9 m, sendo os dados de V_S e V_P registrados a intervalos 1 m de profundidade. Este ensaio possuía um arranjo de 3 furos alinhados e espaçados de 2,98 m e 3 m e foi considerado um ensaio de referência.

Os ensaios SPT 25, SPT 35 e SPT 36 foram realizados até as profundidades de 20 m, 21 m e 20 m, respectivamente e o nível de água não foi encontrado em nenhum destes ensaios.

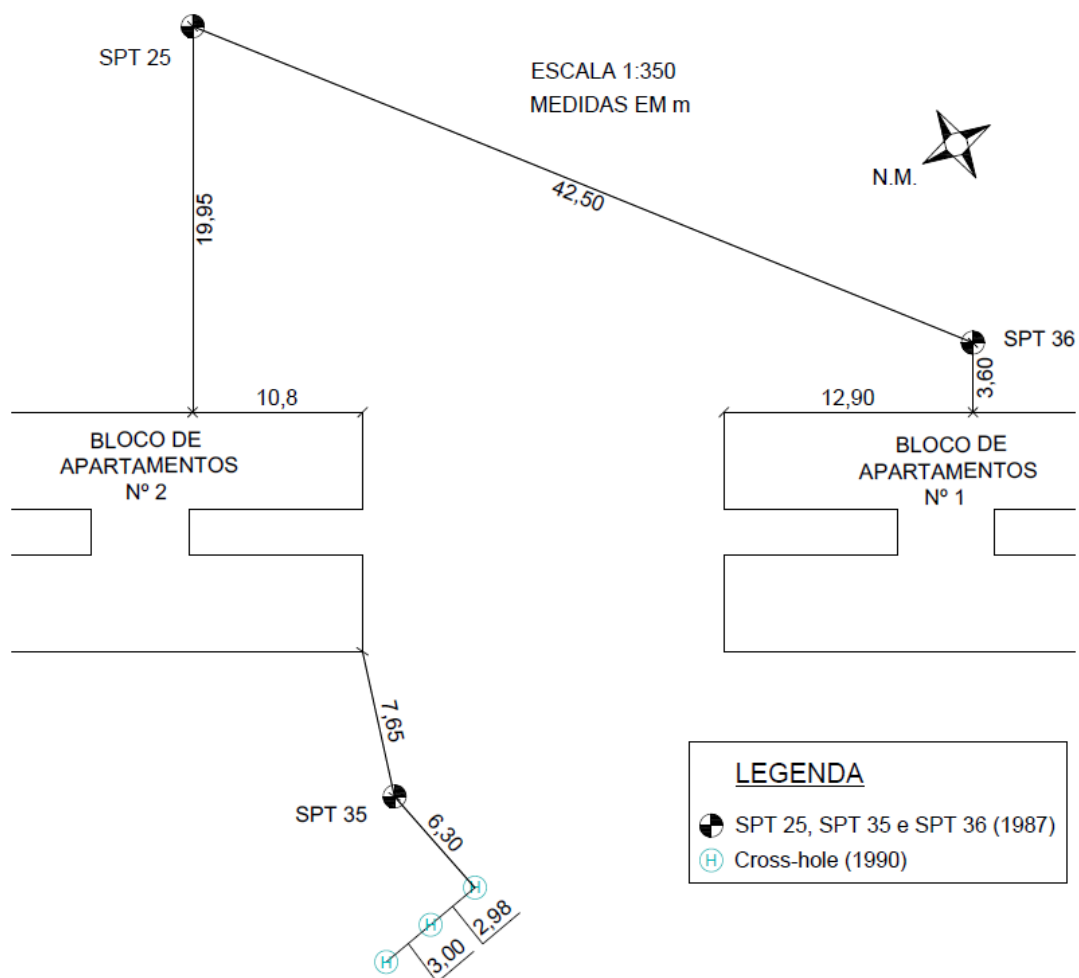


Figura 36: Posição dos ensaios *cross-hole* e SPT realizados no Parque das Camélias de Bauru-SP.

Fonte: Modificado de Giacheti (1991).

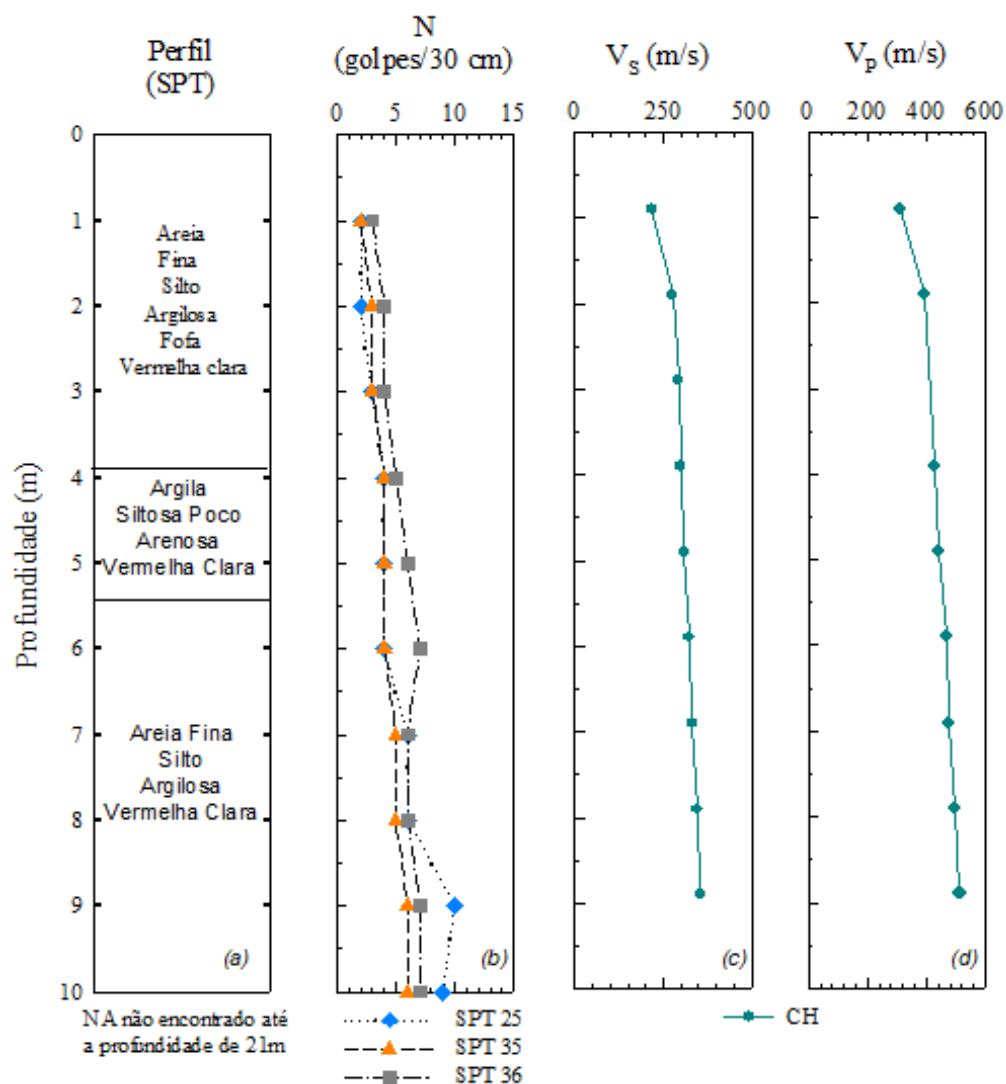


Figura 37: Resultados de ensaios *cross-hole* e SPT realizados no Parque das Camélias de Bauru-SP.

Fonte: Modificado de Giacheti (1991).

4.3.4 Jardim Botânico Municipal de Bauru

O Jardim botânico municipal de Bauru foi escolhido devido a presença de nível de água raso, cerca de 3 m de profundidade. Tem-se na Figura 38 a representação da área investigada dentro do Jardim Botânico.



Figura 38: Área estudada no Jardim Botânico Municipal de Bauru-SP.
Fonte: Modificado do Google Earth (2024).

4.3.4.1 Caracterização do local

Nenhum ensaio SPT, *cross-hole* e SDMT foi realizado neste local até o presente momento. Nesta pesquisa foram realizados 3 ensaios CPTu e 5 ensaios sísmicos *down-hole* com a ponteira desenvolvida. Na Figura 39 tem-se a posição dos ensaios CPTu e *down-hole* realizados. O resultado dos ensaios CPTu foram interpretados utilizando o programa comercial CPeT-IT. A partir da interpretação destes ensaios foi possível definir o perfil estratigráfico deste local.

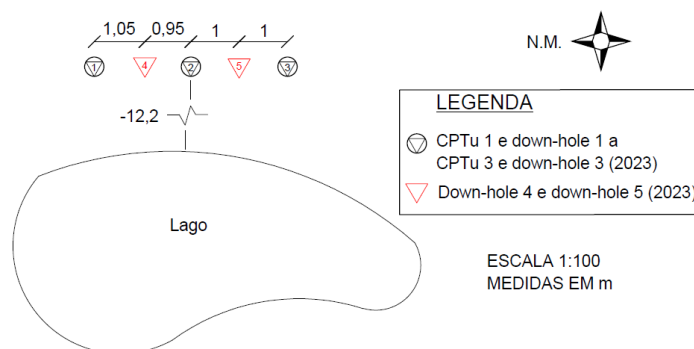


Figura 39: Posição dos ensaios CPTu e *down-hole* realizados no Jardim Botânico Municipal de Bauru.
Fonte: Autoria própria.

O perfil deste local, baseado nos ensaios de CPTu, indicou uma camada de areia limpa a areia siltosa até aproximadamente 1,4 m de profundidade, seguida de uma camada de misturas de silte (silte argiloso a argila siltosa) que

vai até 3,1 m de profundidade. Posteriormente, ocorre uma camada composta por misturas de areia (areia siltosa a silte arenoso) que se estende até 5,2 m de profundidade e, logo após, tem-se uma camada de areia até o final do ensaio, aproximadamente 6 m de profundidade.

4.3.4.2 Ensaios sísmicos e CPTu

Nos ensaios CPTu 1, CPTu 2 e CPTu 3, realizados em novembro de 2023, a ponteira do CPT foi cravada na área em estudo até as profundidades de, respectivamente, 6m, 5,40m e 5,80m, pois nestas profundidades atingiu-se o impenetrável.

Nos ensaios DH 1 a DH 3 e ensaios DH 4 a DH 5, realizados em, respectivamente, novembro e dezembro de 2023, as fontes sísmicas utilizadas para a geração de ondas S e P e os meios para fixá-las ao terreno foram as mesmas descritas no item 4.3.2.2. Houve a aplicação de 3 golpes em cada lado das fontes (golpe a esquerda e golpe a direita) para gerar ondas S e 3 golpes verticais para produzir ondas P nos ensaios DH 1, DH 2 e DH 3. Estes golpes foram aplicados a intervalos de 1 m de profundidade. Os ensaios DH 1, DH 2 e DH 3 foram executados até as profundidades de, respectivamente, 5,90m, 5m e 5m. Destaca-se o fato que a ponteira sísmica chegou ao impenetrável no ensaio DH 1 e houve dificuldade para removê-la do terreno. Por isso, os ensaios DH 2 e DH 3 foram interrompidos um pouco antes do impenetrável para evitar problemas.

Nos ensaios DH 4 e DH 5 foram aplicados golpes a intervalos de 1 m de avanço da ponteira, sendo aplicados 3 golpes na lateral esquerda e lateral direita das fontes sísmicas de madeira e aço e 3 golpes verticais na fonte sísmica de aço quando o geofone mais próximo da ponta cônica estava localizado nas profundidades de 2,5m e 3,5m. No ensaio DH 4 foram executados 21 golpes em cada lateral das fontes geradoras de ondas S e 30 golpes verticais na fonte de aço quando o geofone mais próximo da ponta cônica estava na profundidade de 4,5m para avaliar a repetibilidade dos registros sísmicos.

No ensaio DH 5 também foram aplicados 21 golpes laterais (golpe a esquerda e golpe a direita) e 30 golpes verticais nas fontes geradoras de ondas,

respectivamente, cisalhantes e de compressão, quando o geofone mais próximo da ponta cônica atingiu as profundidades de 4,5m e 5,5m, com o mesmo objetivo.

Os ensaios DH 4 e DH 5 atingiram o impenetrável em, respectivamente, 4,84m e 5,50m. O medidor elétrico de nível de água foi utilizado nestes dois ensaios *down-hole* e os níveis de água foram determinados nas profundidades de, respectivamente, 2,93m e 2,54m.

4.4 Programas empregados

4.4.1 SPAS

O programa SPAS (2019) versão 4.0.3.1 permite fazer o tratamento e a análise das ondas sísmicas de cisalhamento e de compressão, e calcular V_s , V_p e os parâmetros elásticos dos solos como Módulo de Cisalhamento Máximo (G_0) e Módulo de Elasticidade (E).

Os registros dos ensaios de campo obtidos por meio do programa desenvolvido por Pedrini et al. (2010) podem ser utilizados no SPAS após aplicar um conversor na plataforma *Labview*. Esse conversor separa os sinais do arquivo .txt em outros 3 arquivos do mesmo formato. Em cada um desses novos arquivos tem-se a onda sísmica registrada por apenas um geofone. Deste modo, é possível realizar a análise das ondas isoladas por geofone, de forma equivalente àquela utilizada no método do pseudo intervalo de tempo. Além disso, é possível adicionar os resultados de mais de uma campanha de ensaios em um mesmo arquivo gerado pelo programa SPAS, facilitando o trabalho de interpretação.

A seleção do intervalo de tempo de chegada das ondas pode ser feita de maneira semelhante àquela quando se utiliza o programa de Pedrini et al. (2010). Além disso, é possível selecionar com maior acurácia, o tempo de chegada das ondas, devido a possibilidade de digitar quando o início do intervalo de tempo selecionado ocorrerá. Outro aspecto importante é que os filtros digitais presentes no SPAS podem ser utilizados para se obter resultados mais confiáveis. Na Figura 40 tem-se um registro do geofone 1 na profundidade de 5 m após um golpe ser aplicado na lateral esquerda da fonte, distante 0,33m da ponteira para

identificação do tempo de chegada da onda S do ensaio sísmico *down-hole* 2, realizado no local 2 do campo experimental da UNESP em Bauru.

O programa SPAS permite utilizar diferentes cores para os golpes aplicados nas laterais esquerda e direita das fontes, e assim diferenciar as ondas entre si, facilitando a verificação visual por meio do método *cross-over*. Na Figura 41 têm-se duas ondas registradas pelo mesmo geofone, após a aplicação de golpes nas laterais esquerda e direita de uma fonte sísmica, na profundidade de 7m.

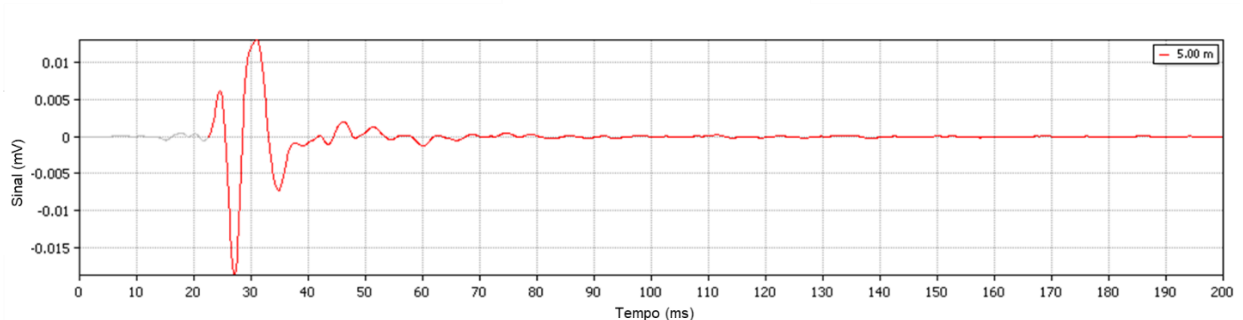


Figura 40: Registro da onda S pelo geofone localizado na profundidade de 5m no local 2 do campo experimental da UNESP de Bauru.

Fonte: Autoria própria.

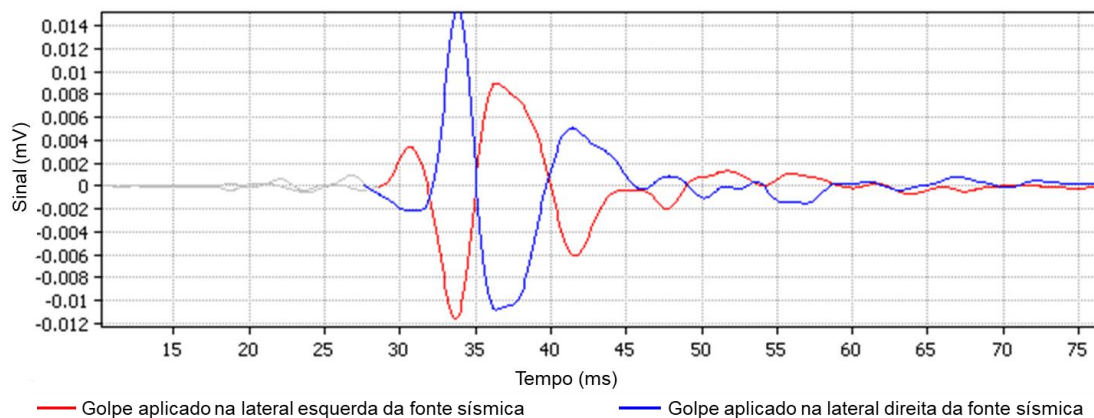


Figura 41: Registro da onda S registrada pelo mesmo geofone após a aplicação de golpes nas duas laterais da fonte sísmica.

Fonte: Autoria própria.

Neste programa é possível visualizar o perfil com todas as ondas sísmicas geradas por uma mesma fonte sísmica, o que possibilita uma análise por meio dos métodos *cross-over* e *cross-correlation*. Na Figura 42 e Figura 43 tem-se a representação desses perfis para identificação do tempo de chegada das ondas

S para golpes aplicados nas laterais esquerda e direita da fonte, respectivamente.

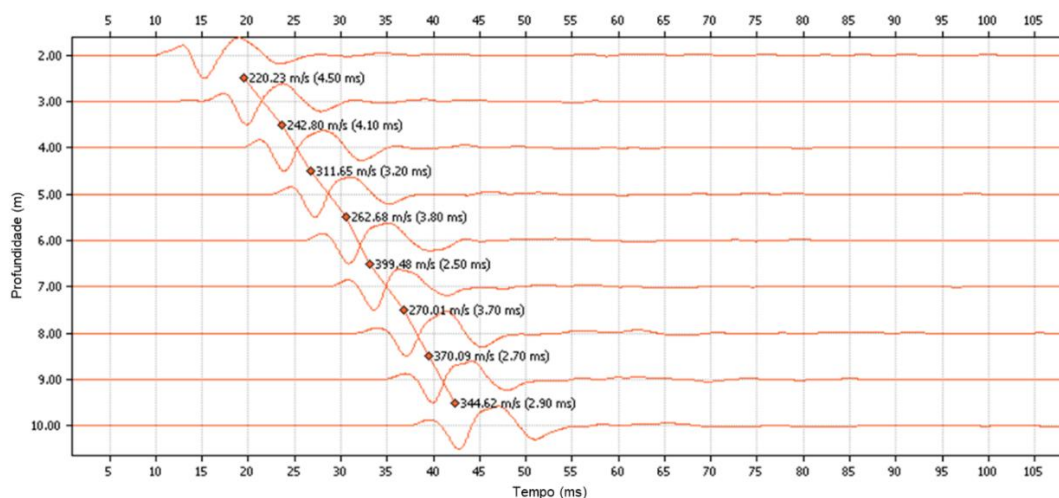


Figura 42: Perfil com as velocidades das ondas S após a aplicação de golpes na lateral esquerda da fonte sísmica, que está localizada a 0,33m do eixo da haste de cravação da ponteira, realizados no ensaio *down-hole* 3 no local 2 do campo experimental da UNESP de Bauru. Nele se tem os valores da velocidade e as diferenças de tempo entre duas ondas subsequentes.

Fonte: Autoria própria.

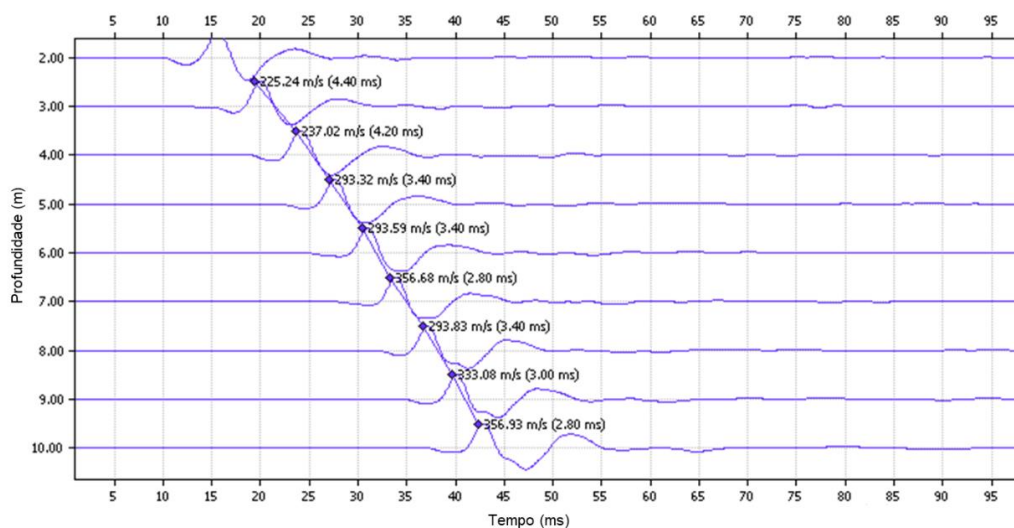


Figura 43: Perfil com as velocidades das ondas S após a aplicação de golpes na lateral direita da fonte sísmica, que está localizada a 0,33m do eixo da haste de cravação da ponteira, realizados no ensaio *down-hole* 3 no local 2 do campo experimental da UNESP de Bauru. Nele se tem os valores da velocidade e as diferenças de tempo entre duas ondas subsequentes.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 44 tem-se o perfil com as ondas geradas durante o ensaio DH 3 no local 2 do campo experimental da UNESP de Bauru, onde os golpes laterais

foram aplicados nas fontes que estavam a 0,33m do centro da haste de cravação da ponteira. É possível observar pela Figura 44 a qualidade dos sinais com destaque para o método *cross-over*, uma vez que as ondas representadas em vermelho e em azul são praticamente um espelho da outra.

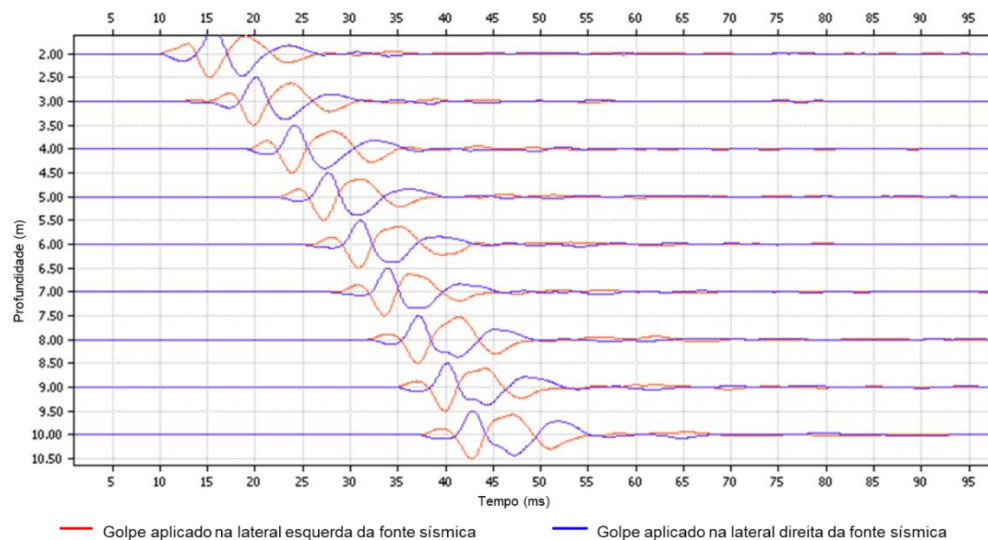


Figura 44: Perfil de ondas S após a aplicação de golpes na fonte sísmica, que está localizada a 0,33m do eixo da haste de cravação da ponteira, do ensaio *down-hole* 3 realizado no local 2 do campo experimental da UNESP de Bauru.

Fonte: Autoria própria.

Destaca-se que o perfil de ondas é feito automaticamente pelo programa utilizado, após a seleção daquelas ondas que tem boa qualidade. Esse programa possibilita o cálculo das velocidades através dos picos positivos ou negativos, empilhando os sinais e, conseqüentemente, reduzindo a maior parte do ruído aleatório (BUTCHER et al., 2005). Como isso é feito automaticamente, alguns erros podem ocorrer. Portanto, é necessário verificar se o programa selecionou os mesmos pontos em comum para cada profundidade.

Para o perfil representado na Figura 44, onde se tem a representação de golpes aplicados em ambas as laterais da fonte, os pontos utilizados para comparar as velocidades são o primeiro cruzamento observado pelo método *cross-over*. Quando o programa não selecionar o mesmo ponto em comum pelo método *cross-correlation*, é necessário selecionar esse ponto por meio de uma ferramenta do próprio programa. No entanto, ao utilizar essa ferramenta, a visualização em espelho pelo método *cross-over* não será visualizada para aquela onda que se fez essa alteração.

Outra maneira de comparar as velocidades entre as ondas é através de uma outra opção disponibilizada pelo próprio programa, que permite selecionar pontos em comum entre duas ondas para calcular a velocidade entre duas profundidades. Esses valores não são salvos automaticamente, e essa é uma alternativa confiável para verificar se o cálculo da velocidade entre duas ondas subsequentes, feita automaticamente pelo programa, selecionou os mesmos pontos em comum das duas ondas.

O perfil das ondas P ao longo da profundidade também pode ser visualizado por meio desse programa, porém apenas o método *cross-correlation* pode ser empregado. Na Figura 45 tem-se o perfil de ondas P para golpes aplicados na fonte distante 2,5m do eixo central da haste de cravação da ponteira do local 2 do campo experimental da UNESP de Bauru.

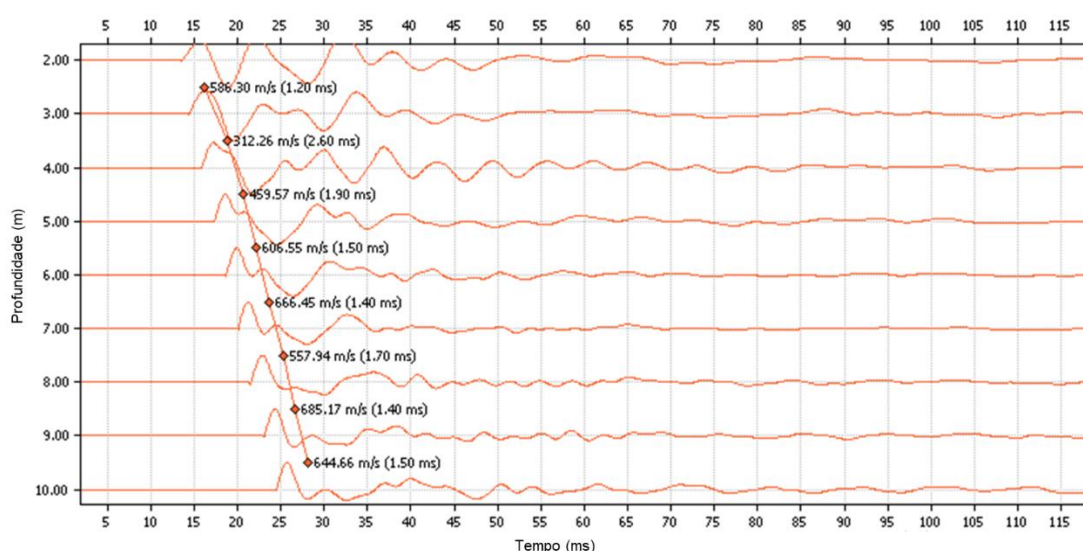


Figura 45: Perfil de ondas P para os golpes na fonte distante 2,5m do eixo central da ponteira, ensaio *down-hole* 3 realizado no local 2 do campo experimental da UNESP de Bauru. Nele se tem os valores da velocidade e os as diferenças de tempo entre duas ondas subsequentes.

Fonte: Autoria própria.

4.4.1.1 Filtros

Filtros podem ser utilizados para melhorar a qualidade do sinal pois, devido a ruídos externos, as ondas sísmicas podem perder qualidade dificultando a identificação do tempo de chegada dessas ondas. Filtros digitais são uma opção viável de serem aplicados, já que eles não provocam um atraso no tempo de chegada do sinal (CAMPANELLA; STEWART, 1992).

O programa SPAS possibilita a visualização das ondas antes que o filtro seja aplicado, permitindo a eliminação dos sinais de determinadas faixas de frequência. O sinal filtrado não poderá retornar ao seu estado original portanto, é necessária muita atenção ao utilizar esse recurso. Na Figura 46 tem-se como o filtro pode ser aplicado no SPAS. Observa-se no gráfico da Figura 46a o sinal em que o filtro será aplicado, e no gráfico da Figura 46b tem-se o domínio da frequência desse sinal. Todos os sinais que estiverem fora desse intervalo de domínio de frequência serão eliminados. Na Figura 46c tem-se como a onda sísmica ficará depois da aplicação do filtro.

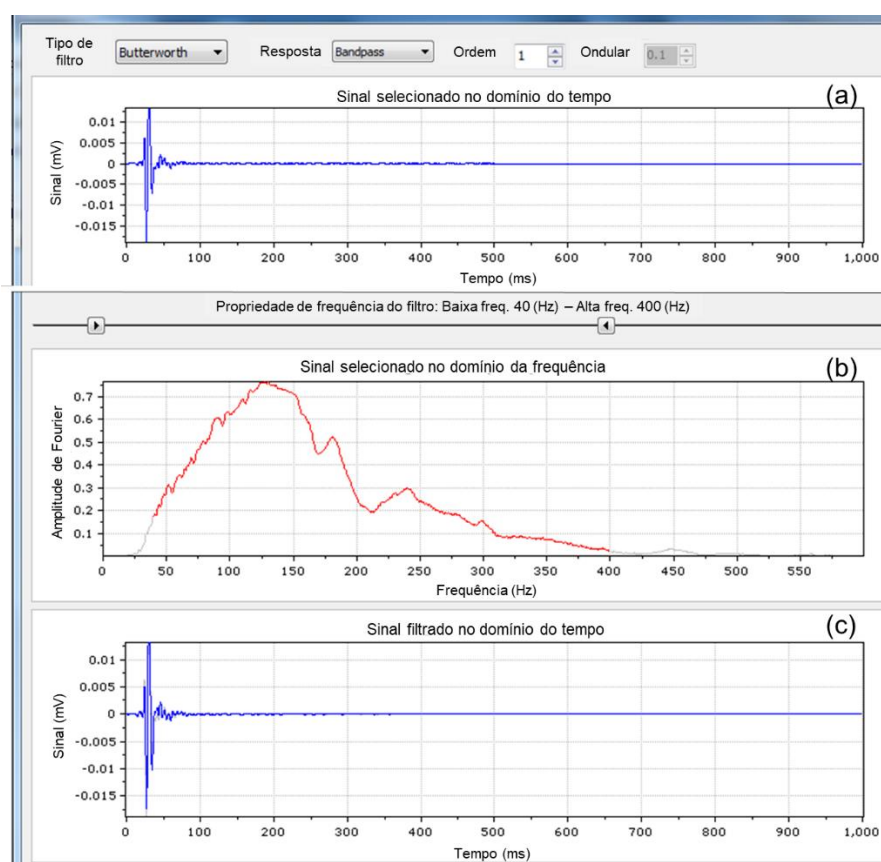


Figura 46: Aplicação de filtro para uma onda sísmica típica: sinal original (a); seleção do domínio de frequência do sinal, onde os sinais com domínio de frequência abaixo de 40 Hz e acima de 400 Hz serão eliminados (b); onda sísmica após a aplicação do filtro (c).

Fonte: Autoria própria.

4.4.1.2 Comparação dos tempos de chegada das ondas

Com o avanço da cravação do geofone da ponteira no local estudado, o tempo de viagem que a onda sísmica leva para ir da fonte até o geofone também aumenta, ou seja, quanto maior a distância que a onda sísmica precisa percorrer,

maior será o tempo necessário para ela chegar até o transdutor, representado pela Equação 4.

No programa SPAS é possível realizar a comparação de todos os sinais recebidos por um mesmo transdutor, comparando-os entre si, sendo esta comparação feita através do tempo de chegada das ondas, que foram previamente selecionadas, como indicado na Figura 40.

Esta forma de interpretação dos registros sísmicos gera gráficos de profundidade em função do tempo de viagem da onda e, para cada sinal, é gerado um desses gráficos, na qual, os pontos desses gráficos representam a comparação do tempo de chegada de um sinal, dito como referência, com todos os outros tempos de chegada dos sinais ao mesmo transdutor.

Se o transdutor permanece em uma certa profundidade do terreno e golpes, com a mesma intensidade, são gerados na fonte sísmica, então os tempos de viagem dessas ondas da fonte até o transdutor têm que ser semelhantes, garantindo a repetibilidade dos dados. Essa comparação, por meio desse programa, permite verificar essa repetibilidade através da análise da variação do tempo de viagem das ondas.

Sinais com boa qualidade quando comparados com outros sinais do mesmo transdutor formam um gráfico cujos pontos estão razoavelmente alinhados, formando uma linha de tendência, como mostrado na Figura 47.

Os pontos dos gráficos que ficarem distantes desta linha de tendência são geralmente sinais de baixa qualidade, como indicado na Figura 48. Ao clicar em um destes pontos, o SPAS mostra qual foi o sinal que foi comparado com o sinal de referência e é possível excluí-lo. O sinal excluído não entrará mais no cálculo das velocidades das ondas ao longo do perfil.

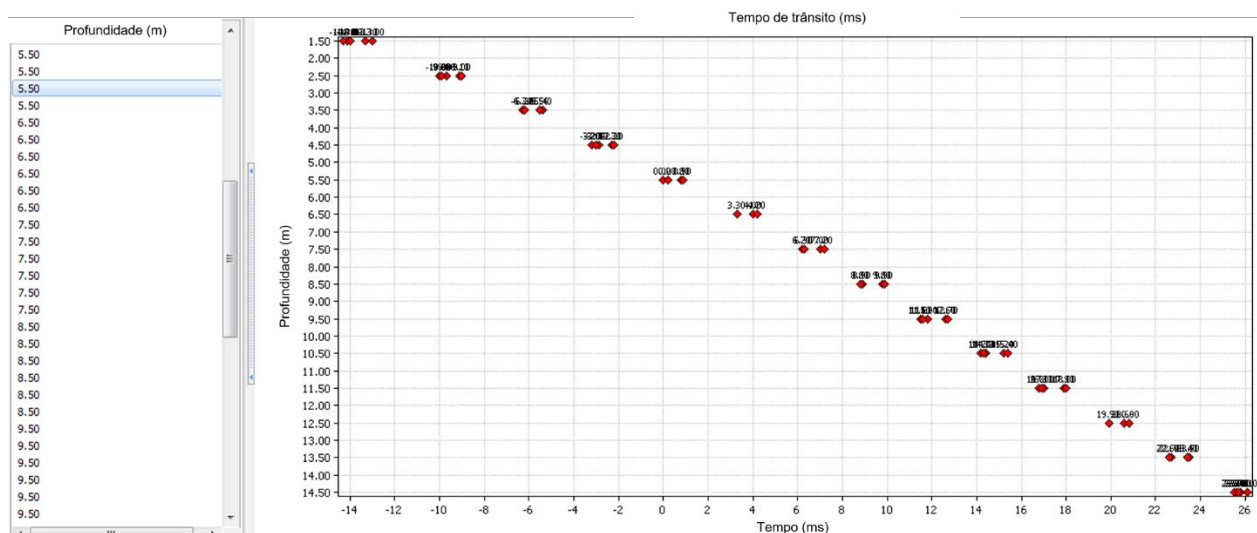


Figura 47: Comparação de um sinal recebido pelo transdutor localizado na profundidade de 5,5m com os demais sinais, onde os pares ordenados formam uma linha de tendência, indicando que todos estes sinais são de boa qualidade.

Fonte: Autoria própria.

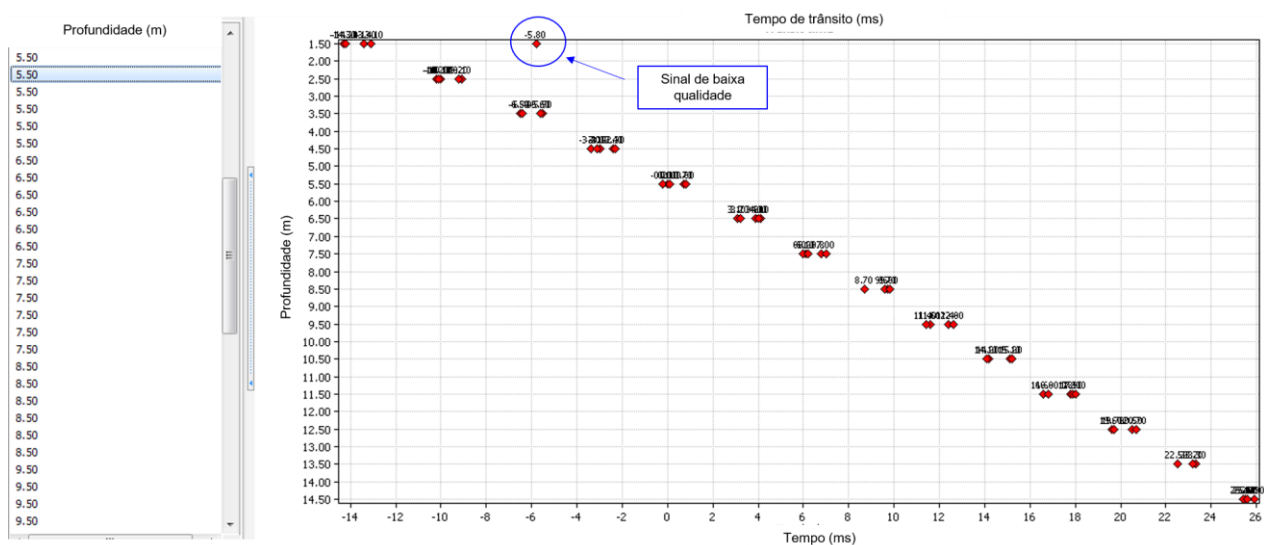


Figura 48: Comparação de um sinal recebido pelo transdutor localizado na profundidade de 5,5m com os demais sinais, onde o sinal destacado é um sinal de baixa qualidade e que está desalinhado dos demais pontos.

Fonte: Autoria própria.

4.4.2 Labview

Pedri et al. (2010) desenvolveram dois programas em *Labview*, sendo um para a aquisição de dados e outro para posterior interpretação das ondas sísmicas.

O programa de aquisição permite visualizar, após a aplicação do golpe, todas as ondas sísmicas que chegam aos geofones selecionados, e possibilita verificar se as ondas foram muito afetadas por ruídos externos ou se o tempo de chegada dos sinais nos geofones é muito diferente entre si. Tem-se na Figura 49 a tela do programa de aquisição de ondas sísmicas.

Nesse programa é possível inserir as distâncias entre os geofones (Figura 49a) e a profundidade do sensor mais próximo da ponta cônica em relação à superfície do terreno (Figura 49b), além da distância horizontal entre o eixo de cravação da ponteira e a fonte sísmica (Figura 49c). Para cada golpe aplicado na fonte sísmica um arquivo .txt é gerado e gravado no computador de campo, de modo que os tempos de chegada de três geofones selecionados (geofones instalados na posição horizontal ou na posição vertical) são gravados em um mesmo arquivo.

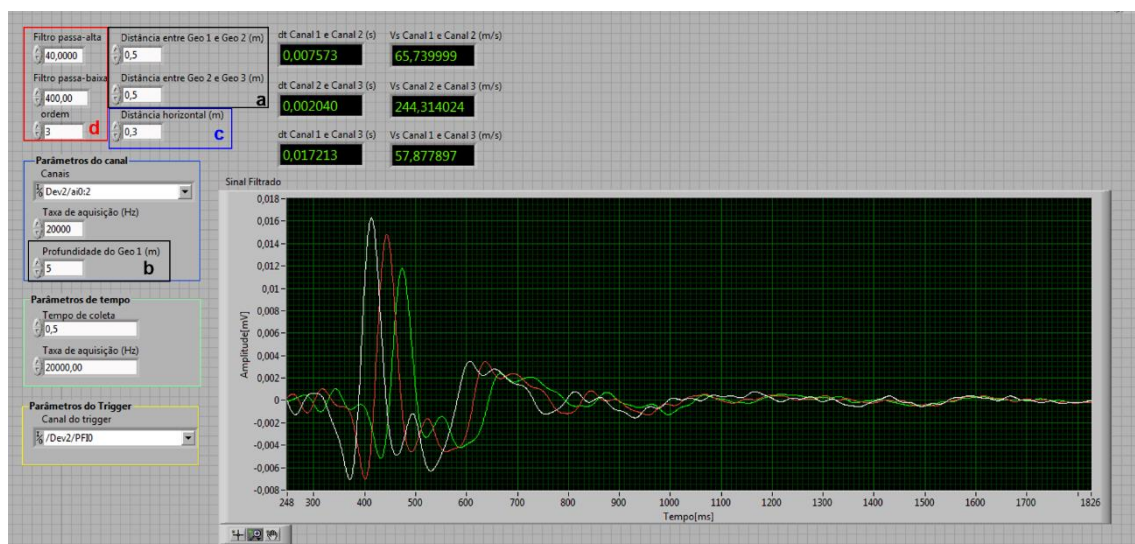


Figura 49: Tela do programa de aquisição de ondas sísmicas, onde se pode definir: distância entre os geofones (a); profundidade do geofone localizado no compartimento 1 da ponteira (b); distância horizontal entre o eixo de cravação da ponteira e a fonte sísmica (c); características do filtro aplicado (d).

Fonte: Autoria própria.

Além disso, este programa aplica um filtro *Butterworth* passa cima de 40 Hz e um filtro passa baixa de 400 Hz, ambos de ordem 3 (Figura 49d), recomendado por Campanella e Stewart (1992) e Vitali (2011). Estes dois filtros removem os ruídos dos sinais, que possuem frequência abaixo de 40 Hz e acima

de 400 Hz. Na Figura 50 tem-se uma imagem de um sinal sem e com a aplicação do filtro passa baixa de 400 Hz.

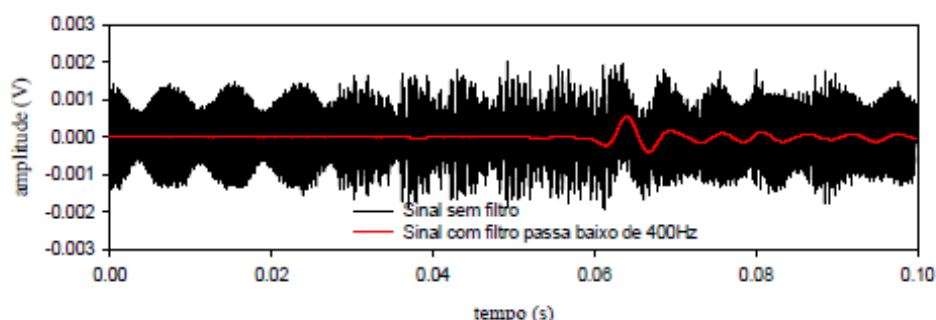


Figura 50: Sinal obtido no ensaio DH 4, realizado no local 1 do campo experimental da UNESP – Bauru, a 20 metros de profundidade, com filtro passa baixa de 400 Hz (*Butterworth* de ordem 3) e sem filtro.

Fonte: Vitali (2011).

Na Figura 51 tem-se um registro típico de um golpe a fim de identificar o tempo de chegada das ondas S em 3 geofones posicionados na horizontal da ponteira sísmica. Neste caso, o golpe foi aplicado na lateral esquerda da fonte de madeira revestida com aço (0,30 x 0,19 m), distante 0,33 m do eixo da haste de cravação da ponteira, e o geofone mais próximo da ponta estava localizado a 7 m de profundidade. Este golpe foi aplicado durante o ensaio DH 3 no local 2 do campo experimental da UNESP de Bauru. No eixo das abcissas desse gráfico tem-se o tempo de viagem das ondas em milissegundos (ms) e no eixo das ordenadas a amplitude do sinal em milivolts (mV).

Os registros apresentados na Figura 51 mostram que as 3 ondas obtidas por cada um dos geofones para um mesmo golpe possuem amplitudes e tempo de chegada distintos, indicando que quanto menor a distância que a onda precisa percorrer da fonte até esse transdutor, menor será o tempo de chegada da onda e maior será amplitude do sinal.

A análise das ondas sísmicas é realizada através de um outro programa elaborado em *Labview*. Essa análise é feita selecionando um intervalo de tempo diferente para cada onda recebida em cada um dos geofones, a fim de comparar a velocidade das ondas cisalhantes e ondas de compressão entre diferentes geofones, ou seja, permitindo que o método do intervalo verdadeiro de tempo seja aplicado.

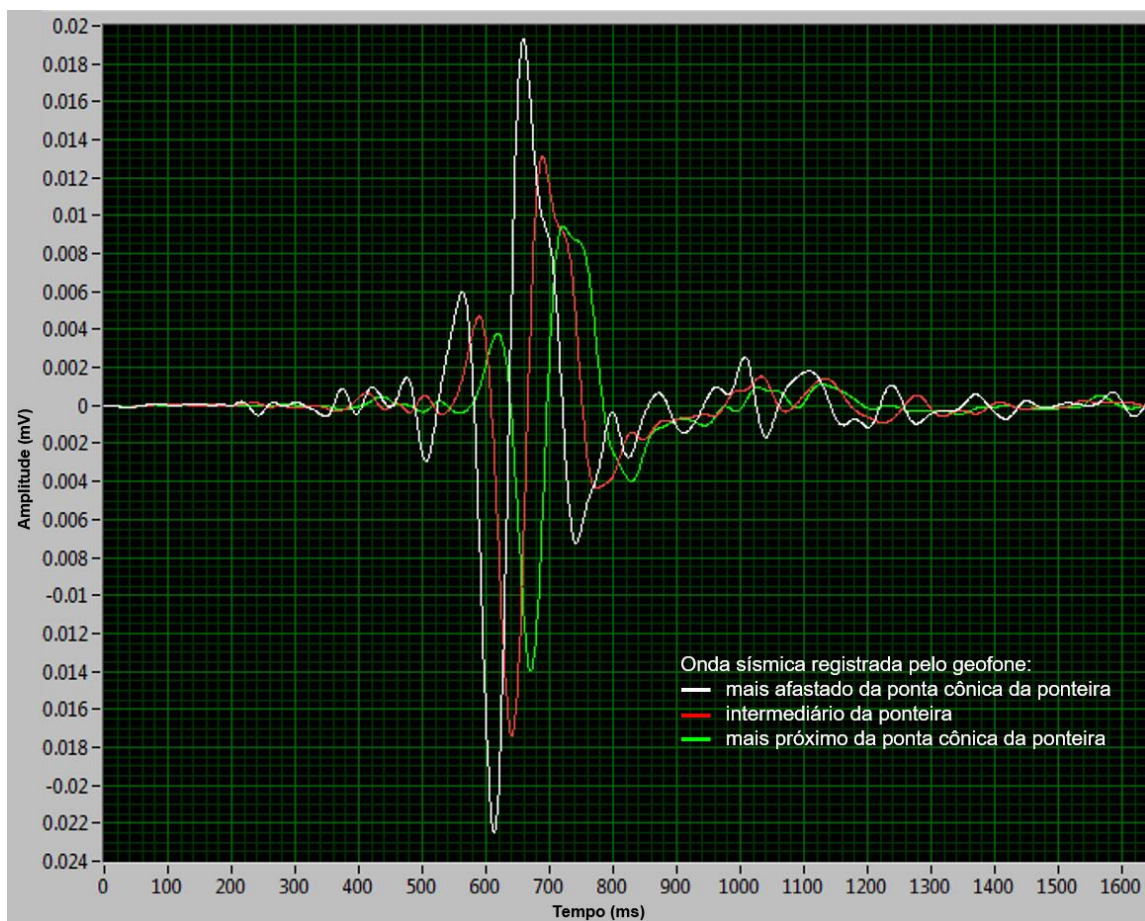


Figura 51: Registros típicos de um golpe para identificação do tempo de chegada das ondas S em 3 geofones posicionados na horizontal da ponte sísmica.

Fonte: Autoria própria.

Recomenda-se que o intervalo de tempo de cada onda selecionado abranja um período completo da onda, de modo que, o pico mais elevado e/ou o mais abaixo estejam dentro dessa região selecionada. Além disso, é preferível que, para cada golpe aplicado, o tempo de chegada das ondas nos diferentes geofones sejam próximos entre si e a onda selecionada tenha o formato o mais próximo possível das outras ondas recebidas pelos geofones (BUTCHER E POWELL, 1996). Na Figura 52 tem-se o tempo de chegada, sem seleção, do sinal gravado pelo geofone localizado no compartimento 3 da ponte desenvolvida. Já, na Figura 53 têm-se as ondas capturadas pelos três geofones para um mesmo golpe, e as linhas verticais amarela e vermelha indicam o intervalo de tempo selecionado.

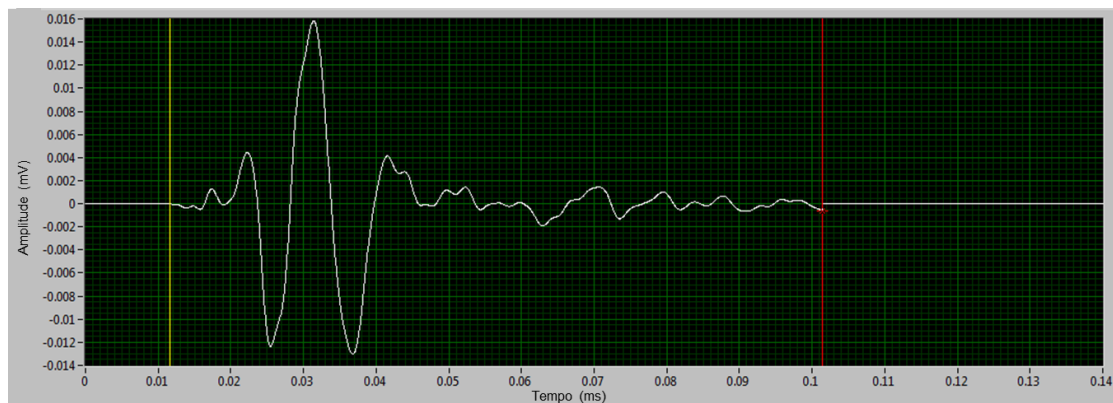


Figura 52: Identificação da onda S registrada pelo geofone mais afastado da ponta cônica da ponteira.

Fonte: Autoria própria.

Após a seleção do intervalo de tempo das três ondas, é possível calcular as velocidades de propagação de ondas S por meio do método do intervalo verdadeiro de tempo utilizando esse programa de computador. Essas velocidades são gravadas em um arquivo .txt para possibilitar a comparação entre resultados e a elaboração de gráficos utilizando outros programas ou aplicativos computacionais.

O programa em *Labview* de Pedrini et al. (2010) para interpretação dos registros das ondas cisalhantes e das ondas de compressão foi utilizado e constatou-se que os valores de V_S foram bons e não foi possível determinar valores de V_P . Os valores das velocidades das ondas de compressão pelo método do intervalo verdadeiro foram superiores a 10.000 m/s, que segundo Wightman et al. (2003) não condizem com as propriedades físicas do solo, isto pode ter ocorrido porque estas ondas sísmicas podem ter se propagado pelas hastes de cravação em vez de se propagarem pelo solo. Amoroso et al. (2016) também teve dificuldade em determinar o tempo de chegada das ondas P para o método do intervalo verdadeiro, devido à resolução e à grande variabilidade da velocidade das ondas de compressão.

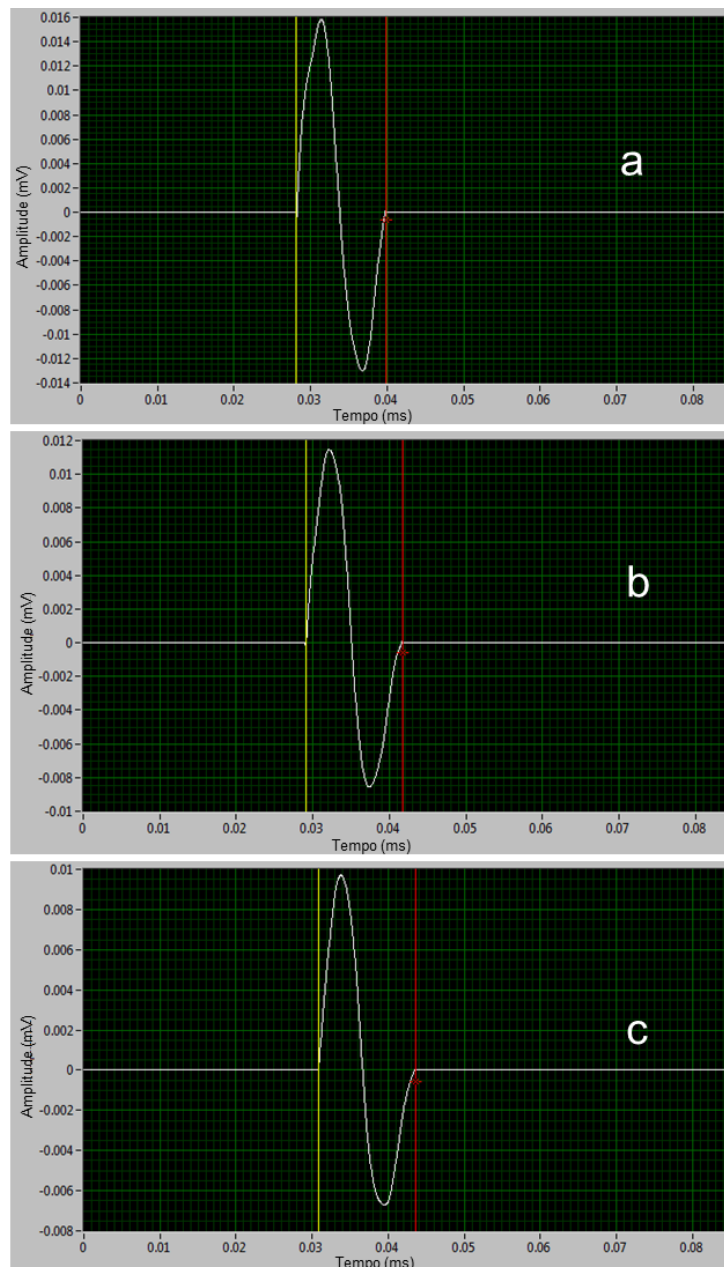


Figura 53: Registros para a identificação dos tempos de chegada das ondas S, onde foi selecionado um período completo para os geofones: 3 (a), 2 (b) e 1(c).

Fonte: Autoria própria.

4.4.2.1 Atualização do Software para Aquisição e Interpretação

O software de aquisição não calcula a velocidade das ondas durante a execução do ensaio, pois não é possível selecionar um intervalo de tempo que abranja um período completo da onda, como indicado na Figura 53. Apesar do software de interpretação permitir a seleção, de maneira rápida, do intervalo de tempo, torna-se inviável usar ambos os programas durante a execução do ensaio, visto que isso aumentaria consideravelmente o tempo de execução do

mesmo. Assim, um programa que consiga realizar a aquisição e interpretar as ondas sísmicas durante o ensaio permite reconhecer melhor a área estudada e otimiza o tempo de execução e interpretação dos ensaios.

O programa de aquisição em *Labview* desenvolvido por Pedrini et al. (2010) foi atualizado para uma versão que permite calcular a velocidade de propagação das ondas sísmicas pelo intervalo verdadeiro de tempo. Esta nova versão não seleciona um período completo da onda sísmica, mas utiliza o registro inteiro da onda para o cálculo de velocidade pelo método do intervalo verdadeiro de tempo. Na Figura 54 tem-se a tela do programa atualizado de aquisição e na Figura 55, as configurações de aquisição deste programa, semelhantes àsquelas mostradas na Figura 49.

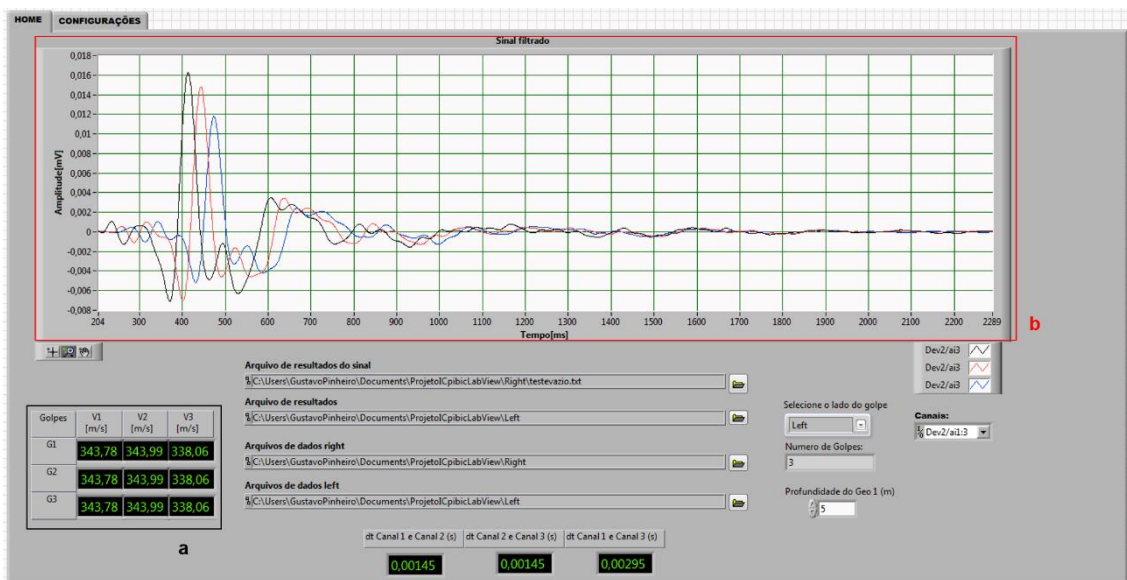


Figura 54: Tela do programa de aquisição de ondas sísmicas, onde se pode visualizar: a velocidade das ondas cisalhantes (a) e o registros das ondas sísmicas (b).

Fonte: Autoria própria.

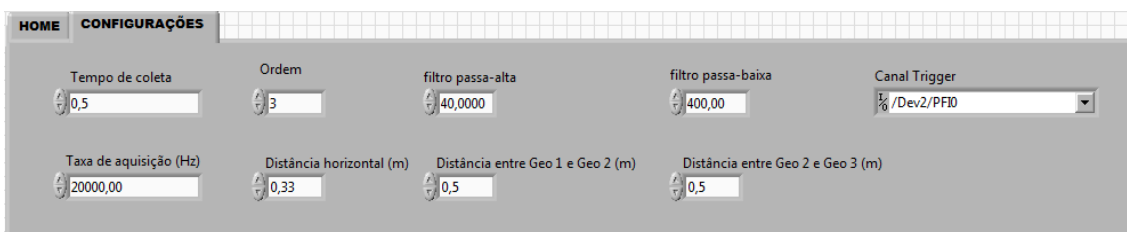


Figura 55: Configurações da nova versão do programa de aquisição de ondas sísmicas.

Fonte: Autoria própria.

Além disso, mesmo com o cálculo das velocidades ao longo do ensaio, estes dados ainda podem ser interpretados no software de interpretação para determinar os perfis de velocidade de maneira mais precisa, visto que essa nova versão registra ambos os dados sísmicos com e sem o cálculo da velocidade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.

5.1 Ensaios preliminares

Os primeiros testes e análises foram feitos empregando a ponteira desenvolvida a partir dos registros das ondas sísmicas realizadas em laboratório e em campo utilizando o programa de interpretação desenvolvido por Pedrini et al. (2010) e o programa comercial SPAS.

Os primeiros resultados de ensaios de campo realizados confirmaram o que já havia sido estudado por Vitali (2011) durante o desenvolvimento da primeira versão dessa ponteira, ou seja, que o tempo de chegada das ondas nos geofones é influenciado pela distância entre a fonte e o centro da haste de cravação da ponteira sísmica, bem como pela profundidade onde os geofones se localizam durante a aplicação dos golpes, em especial mais próximo à superfície do terreno. Isso ocorre, pois, as ondas sísmicas podem assumir uma trajetória horizontal ao se propagarem pelo solo, ou vertical propagando-se pelas hastes de cravação (BUTCHER E POWELL, 1996). Neste sentido, autores como Butcher e Powell (1996), Vitali (2011), Rocha (2013) e Amoroso et al. (2016) realizaram ensaios sísmicos com diferentes distâncias entre a fonte e o eixo da haste de cravação da ponteira sísmica, variando entre 0,3m e 1,8m. Butcher e Powell (1996) destacam que, para uma fonte localizada a cerca de 1,8m de distância, os resultados de V_s eram mais confiáveis para profundidades a partir de 3 m. Por isso, os dados de V_s dos primeiros 3m devem ser avaliados com cuidado.

Em testes de campo realizados durante esta pesquisa constatou-se que os valores de V_s determinados com fontes sísmicas apoiadas por meio das hastes frontais de nivelamento do sistema de cravação, ou seja, a 0,33 m de distância do centro das hastes de cravação, são mais consistentes em especial nos primeiros metros do perfil, do que quando a fonte está apoiada na haste traseira de nivelamento, a 1,85 m de distância do centro das hastes de cravação. Por exemplo, para o ensaio DH 3 realizado no local 2 do campo experimental da UNESP de Bauru os registros de V_s foram mais consistentes quando a fonte estava mais próxima do centro das hastes de cravação (0,33m de distância), já que quando se comparou os valores de V_s do ensaio *cross-hole*, realizados nesse mesmo campo experimental, essas diferenças médias de V_s para fontes

apoiadas nas hastes de nivelamento frontais e traseira foram de, respectivamente, 12,1% e 20,5%. Assim, o uso de duas fontes sísmicas apoiadas uma em cada haste de nivelamento frontal do sistema de cravação é recomendado e foi utilizado para gerar ondas S polarizadas.

A maior parte dos testes foram feitos para avaliar os registros de onda P, uma vez que os resultados de ensaios para determinação da velocidade de ondas S foram consistentes e de acordo com a experiência prévia de Vitali (2011) para desenvolvimento da primeira versão desta ponteira. Assim, no primeiro ensaio *down-hole*, realizado no local 2 do campo experimental da UNESP de Bauru, os valores de V_P interpretados pelo pseudo intervalo de tempo foram extremamente elevados (superiores a 12.000 m/s), e não condizem com a velocidade de propagação de ondas de compressão em solos não saturados, conforme apresentado e discutido por Wightman et al. (2003). Mesmo quando se interpretou os registros de ondas P para a fonte a 0,5m de distância do centro das hastes de cravação, os resultados de V_P continuaram inconsistentes. Isso pode ter ocorrido devido à curta distância entre a fonte e o eixo central das hastes de cravação da ponteira e propagação pelas hastes. Desse modo, os valores de V_P deste ensaio 1 não serão apresentados e discutidos.

Por esse motivo foram feitos testes com a fonte sísmica mais distante do eixo das hastes de cravação, ou seja, a 1,5 m e 2,5 m. Assim, os valores de V_P obtidos com fontes sísmicas nessas duas distâncias para os ensaios DH 2 e DH 3 do local 2 do campo experimental da UNESP de Bauru foram comparadas com os valores de V_P do ensaio *cross-hole* do mesmo campo experimental e foram, respectivamente, 34,7% e 31,2%.

Nos dois casos essas diferenças foram elevadas, no entanto quando a fonte sísmica está distante a 2,5 m do eixo de cravação da ponteira sísmica têm-se melhores registros e menor coeficiente de variação entre os valores medidos de V_P . Deste modo, esta foi a distância utilizada entre a fonte e a haste de cravação para a determinação dos perfis de V_P pelo pseudo intervalo de tempo, já que valores de V_P para intervalo verdadeiro (três geofones espaçados 0,5 m entre eles na mesma ponteira) continuaram levando a valores inconsistentes.

Outros testes que foram feitos para a geração de registros de ondas P de qualidade visaram melhorar o contato da fonte com o solo. Assim, avaliaram-se resultados de alguns ensaios de campo com a fonte apoiada no solo e com ela fixada por ganchos. Nestes testes constatou-se que a diferença média dos valores de V_P com a fonte fixada por ganchos foi de 21,4%, enquanto a diferença média dos valores de V_P com a fonte sem fixação foi de 32,4% quando comparados com os valores de V_P determinados por ensaios *cross-hole* de referência de Giacheti (2001). Optou-se, portanto, pelo uso de fontes sísmicas com ganchos, pois este recurso levou a melhores resultados nos testes realizados para as ondas P.

5.2 Campo experimental da USP – São Carlos

Um ensaio CPTu foi realizado neste local durante esta pesquisa. Na Figura 56a tem-se o perfil típico desse local e na Figura 56b, Figura 56c e Figura 56d têm-se, respectivamente, os perfis de resistência de ponta corrigida (q_t), atrito lateral (f_s) e poro-pressão (u) medida com o recurso de filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva.

Neste local a posição do nível de água varia sazonalmente entre 9,5 e 11,5 m de profundidade (ROCHA, 2013). Neste local existe um poço de monitoramento que permite monitorar a variação deste nível de água (Rocha, 2018) e no momento da realização da campanha de ensaios CPTu e sísmica *down-hole* com a ponteira desenvolvida, em março/2023, a profundidade desse nível de água era de 10,45 m. A partir dos resultados do ensaio CPTu 1 (2023) realizado na área (Figura 28) foram detectados acréscimos de poro-pressão a partir de 9,66 m de profundidade, o que pode ser um indicativo da aproximação do nível de água, ou seja, a zona capilar (Figura 56a).

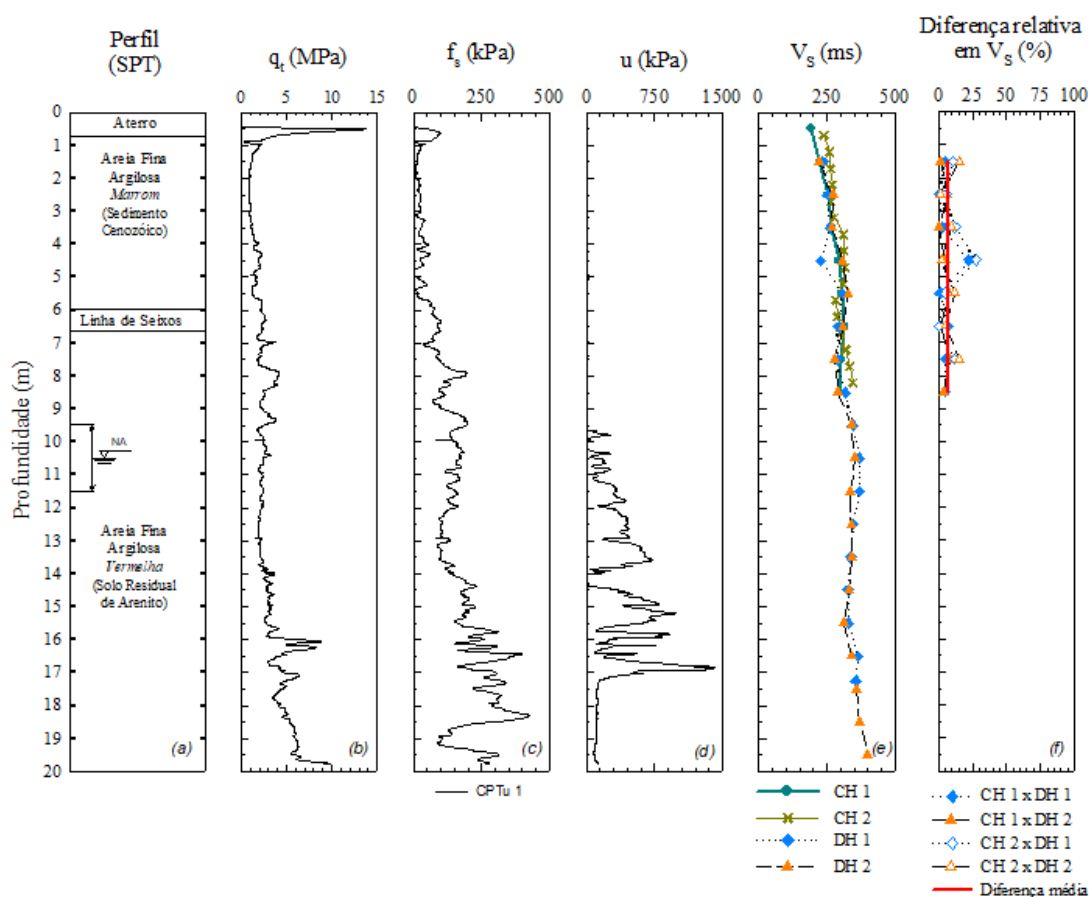


Figura 56: Perfis de q_t , f_s , u e V_s determinados no campo experimental da USP em São Carlos-SP.

Fonte: Autoria própria.

5.2.1 Onda S

Na Figura 56e têm-se os perfis de V_s determinados por meio dos ensaios *down-hole* 1 e 2 realizados durante esta pesquisa em conjunto com dois perfis de V_s determinados por meio de ensaio *cross-hole* realizados neste mesmo local por Giacheti (1991) – CH 1 e Giacheti (2001) – CH 2. Os ensaios *cross-hole* foram realizados até próximo ao nível de água, por isso os resultados estão limitados a cerca de 9 m de profundidade.

Na Figura 56f tem-se a diferença relativa dos valores de V_s determinados com os ensaios *down-hole* e *cross-hole*. Neste caso, essa comparação só pode ser feita até cerca de 9 m de profundidade, pois só existem resultados de *cross-hole* até esta profundidade. A diferença relativa entre os valores de V_s determinados por meio dos ensaios *down-hole* e *cross-hole* variou entre 0,2% e 27,8%, com uma diferença relativa média de 7,3% neste local.

Oito ensaios sísmicos *down-hole* integrados ao dilatômetro plano (SDMT) foram realizados neste campo experimental por Rocha (2018). Os perfis de V_s determinados por meio desses ensaios são apresentados na Figura 57b. Nesta figura, o perfil de V_s médio é mostrado em verde e consiste na média interpolada dos valores de V_s ao longo do perfil.

Para verificar se os valores de V_s determinados utilizando a ponteira desenvolvida foram equivalentes àqueles determinados empregando o SDMT foi calculado o desvio padrão dos valores de V_s interpolados dos ensaios sísmicos *down-hole* de referência mostrados na Figura 57b (SDMT 1 a SDMT8) e adotou-se como limites superior e inferior os valores de V_s médio mais e menos o desvio padrão.

Na Figura 57c são apresentados os valores de V_s médio e os limites inferior e superior dos ensaios SDMT em conjunto com os valores de V_s determinados por meio dos ensaios DH 1 e DH 2 realizados com a ponteira desenvolvida. Nota-se que a maioria dos valores de V_s obtidos pela nova ponteira estão dentro deste intervalo. Apenas 7 determinações foram superiores a essa faixa de valores, mesmo assim muito próximos ao seu limite superior.

Na Figura 57d têm-se os perfis de diferença relativa entre as determinações de V_s empregando o SDMT e a ponteira desenvolvida, bem como o valor médio dessas diferenças. Observa-se nesta figura que essas diferenças relativas variaram entre 0,9% e 19,5%, com uma diferença relativa média de 6,7%. Estes valores são muito próximos daqueles que se obteve quando essa comparação foi feita usando os resultados de ensaios *cross-hole* (CH 1 e CH 2) de referência para esse mesmo local (Figura 57d).

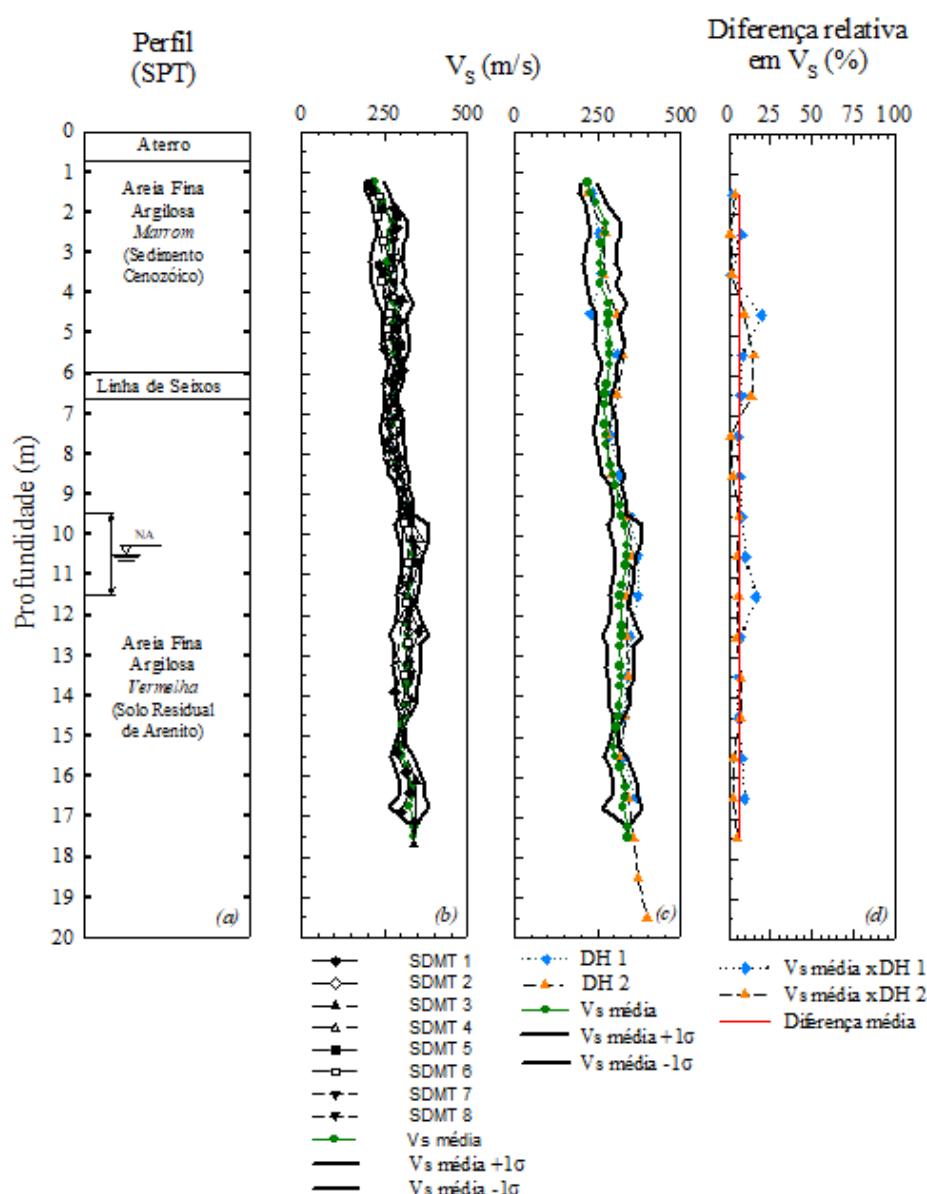


Figura 57: Perfis de V_s determinados por diversos ensaios do tipo *down-hole* no campo experimental da USP em São Carlos-SP.

Fonte: Autoria própria.

5.2.2 Onda P

A determinação dos perfis de velocidades de ondas P pela técnica *down-hole* utilizando a ponteira desenvolvida (DH 1 e DH 2) foi feita de metro em metro, pela técnica do pseudo intervalo de tempo e interpretada utilizando o programa SPAS, conforme descrito no item 4.4.1 deste trabalho. Na Figura 58 têm-se o perfil de ondas P para golpes aplicados na fonte distante 2,5m do eixo central da haste de cravação da ponteira, após a aplicação dos filtros.

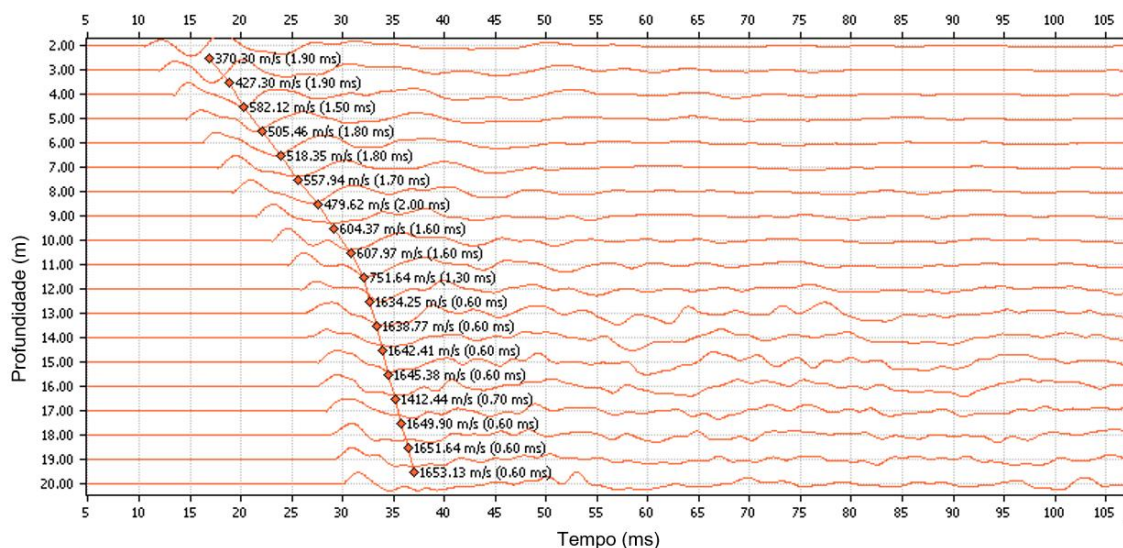


Figura 58: Perfil de ondas P para o ensaio DH 2 realizado no campo experimental da USP de São Carlos. Nele se têm os registros das ondas após a aplicação dos filtros. Têm-se também os valores da velocidade e as diferenças de tempo entre duas ondas subsequentes.

Fonte: Autoria própria.

A partir dos perfis com os registros de ondas P, como aquele apresentado na Figura 58 para o ensaio DH 2 é possível determinar os valores de V_P para cada profundidade. Nesta figura observa-se ainda que a cerca de 12 m de profundidade tem-se um aumento de V_P . Na Figura 59 têm-se os perfis de V_P determinados por meio dos ensaios *down-hole* com a ponteira desenvolvida (DH 1 e DH 2) e os perfis de V_P determinados por meio de duas campanhas de ensaio *cross-hole* um realizado por Giacheti (1991) – CH 1 e outra realizada por Giacheti (2001) – CH 2 neste mesmo local. Destaca-se que os ensaios *cross-hole* estão limitados a cerca de 9 m de profundidade devido a presença de nível de água.

O perfil típico do local estudado, baseado em resultados de ensaios SPT realizados previamente nessa área, é mostrado na Figura 59a. Além disso têm-se na Figura 59b, Figura 59c e Figura 59d, respectivamente os perfis q_t , f_s e u de CPTu. Os perfis de V_P determinados por meio de ensaios *down-hole* com a ponteira desenvolvida são apresentados na Figura 59e na Figura 59f tem-se a diferença relativa dos valores de V_P determinados com os ensaios *down-hole* e *cross-hole*. A diferença relativa entre os valores de V_P determinados por meio dos ensaios *down-hole* e *cross-hole* foi elevada e variou entre 0,6% e 75,3%, com uma diferença relativa média de 29,1% neste local. Apesar disso, os valores de V_P , determinados com a nova ponteira, ficaram dentro da faixa de valores

para areias não saturadas, isto é, entre 300 e 1900 m/s (MCDOWELL et al., 2002; WIGHTMAN et al., 2003).

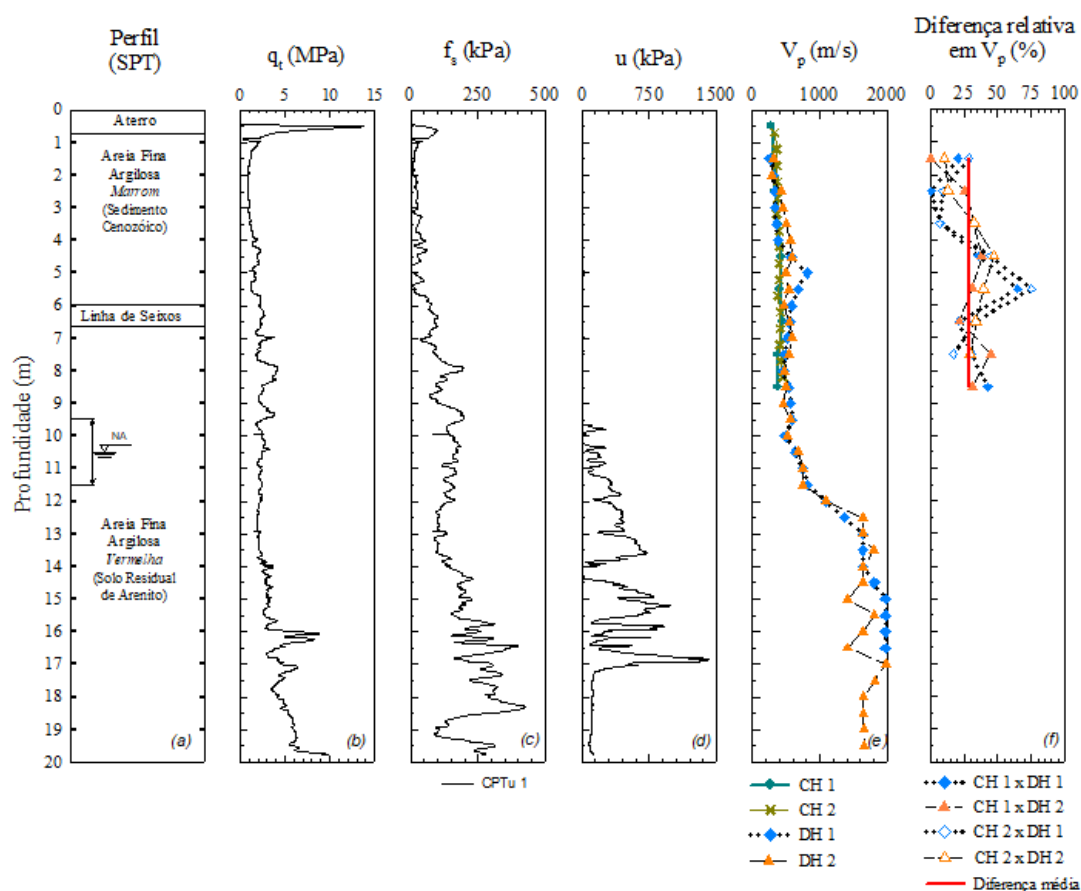


Figura 59: Perfis de q_t , f_s , u e V_p determinados no campo experimental da USP em São Carlos-SP.

Fonte: Autoria própria.

Interessante observar nos perfis de V_p determinados nesse local para os 2 ensaios *down-hole* realizados (Figura 59e) o contraste de valores de velocidade. Ou seja, como os valores de V_p crescem suavemente de um valor de 254,5 m/s a 1,5 m de profundidade até 751,6 m/s a 11,5 m de profundidade. A partir daí, esse valor cresce para 1087,7 m/s a 12 m de profundidade e passa para algo em torno de 1630 m/s a partir de 12,5 m de profundidade. A partir daí, essa velocidade variou entre 1409,1 m/s e 1976,0 m/s.

Esta elevação da velocidade das ondas P está associada a presença de água nesse local pois, de acordo com Wightman et al. (2003), os valores de V_p em solos saturados são da ordem de 1500 m/s. Observa-se que valores de V_p dessa ordem de grandeza, ou superiores a esse valor foram obtidos quase que

2 m abaixo de onde determinou-se a posição do nível de água por meio de um poço de monitoramento no dia em que os ensaios foram realizados, ou seja, NA a 10,45 m de profundidade.

5.3 Campo experimental da UNESP – Bauru

5.3.1 Local 1

Três ensaios CPTu foram realizados neste local durante esta pesquisa, na Figura 60a é mostrado o perfil típico do local estudado e na Figura 60b e Figura 60c são mostrados os perfis de resistência de ponta corrigida e de do atrito lateral, respectivamente. O nível de água deste campo experimental não foi encontrado até a profundidade de 30m, por isso os perfis de poro-pressão não foram determinados nos CPTu.

5.3.1.1 Onda S

Na Figura 60d têm-se os resultados de V_s obtidos por meio de ensaios *down-hole* realizados nesta pesquisa (DH 1, DH 2 e DH 3) e dois perfis de V_s obtidos por meio de ensaios *cross-hole*, um realizado por Giacheti (2001) neste mesmo local (CH 2) e outro realizado por Giacheti (1991) no Parque das Camélias (CH 1), distante 3,7 km deste local, numa formação geológica com as mesmas características deste local. Na Figura 60e tem-se a diferença relativa dos valores de V_s entre os ensaios *down-hole* e *cross-hole*.

A diferença relativa média do ensaio *cross-hole* CH 1 e CH 2 em relação aos ensaios *down-hole* DH 1, DH 2 e DH 3 deste local variou entre 0,2% e 20,2%, com um valor médio de 8,5% e estes valores são equivalentes àqueles observados nos ensaios equivalentes realizados no campo experimental da USP de São Carlos.

Diversos ensaios sísmicos *down-hole* foram realizados neste local. Quatro perfis de V_s determinados por meio desses ensaios *down-hole* são mostrados na Figura 61b. O perfil denominado V_s médio representado em verde nessa mesma figura é a média interpolada dos valores de V_s ao longo do perfil obtidos por Giacheti (2001) e Vitali (2011).

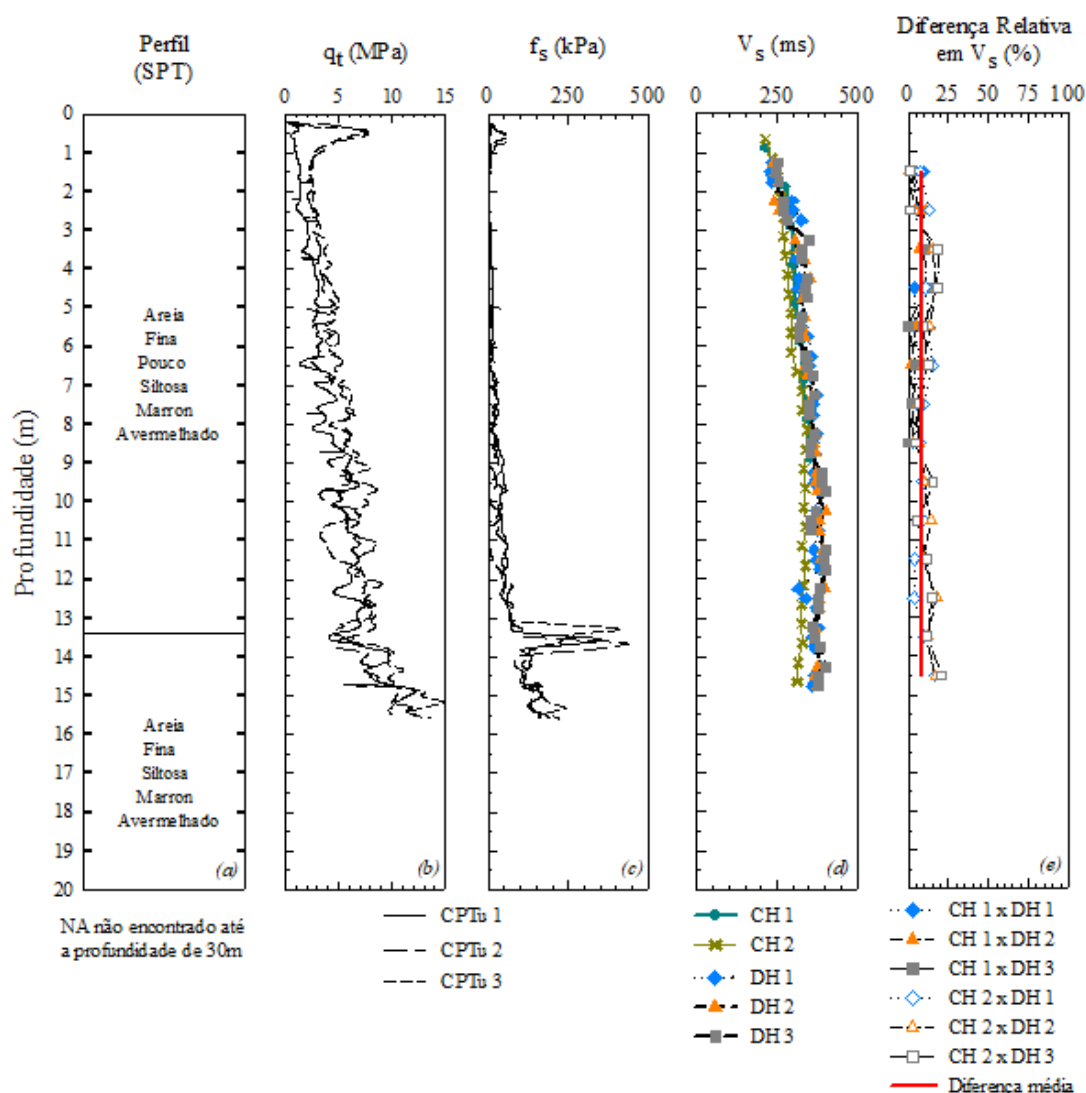


Figura 60: Perfis de q_t , f_s e V_s determinados no local 1 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.

Fonte: Autoria própria.

Para verificar se os valores de V_s obtidos pela ponteira desenvolvida eram equivalentes aos previamente realizados neste local, foi calculado o desvio padrão dos valores de V_s interpolados dos ensaios sísmicos *down-hole* de referência (SCPTu 1, SCPTu 2, DH 3 e DH 4), mostrado na Figura 61b e adotou-se como limites inferior e superior os valores de V_s médio, respectivamente, menos e mais o desvio padrão.

Na Figura 61c são apresentados os valores de V_s médio interpolado, V_s dos ensaios DH 1, DH 2, DH 3 e os limites inferior e superior. Na Figura 61d têm-se os perfis de diferença relativa entre as determinações de V_s de ensaios *down-hole* e a ponteira desenvolvida, bem como o valor médio dessas diferenças.

Observa-se que a maioria dos valores de V_s obtidos por meio da nova ponteira estão dentro deste intervalo, exceto para 4 pontos (3 deles do ensaio *down-hole* 1, primeiro ensaio dessa campanha) entre 2 e 3 m de profundidade, onde os valores de V_s determinados por meio dos ensaios *down-hole* com a nova ponteira foram pouco superior ao limite superior dos ensaios prévios realizados na área, com uma diferença relativa média de 6%.

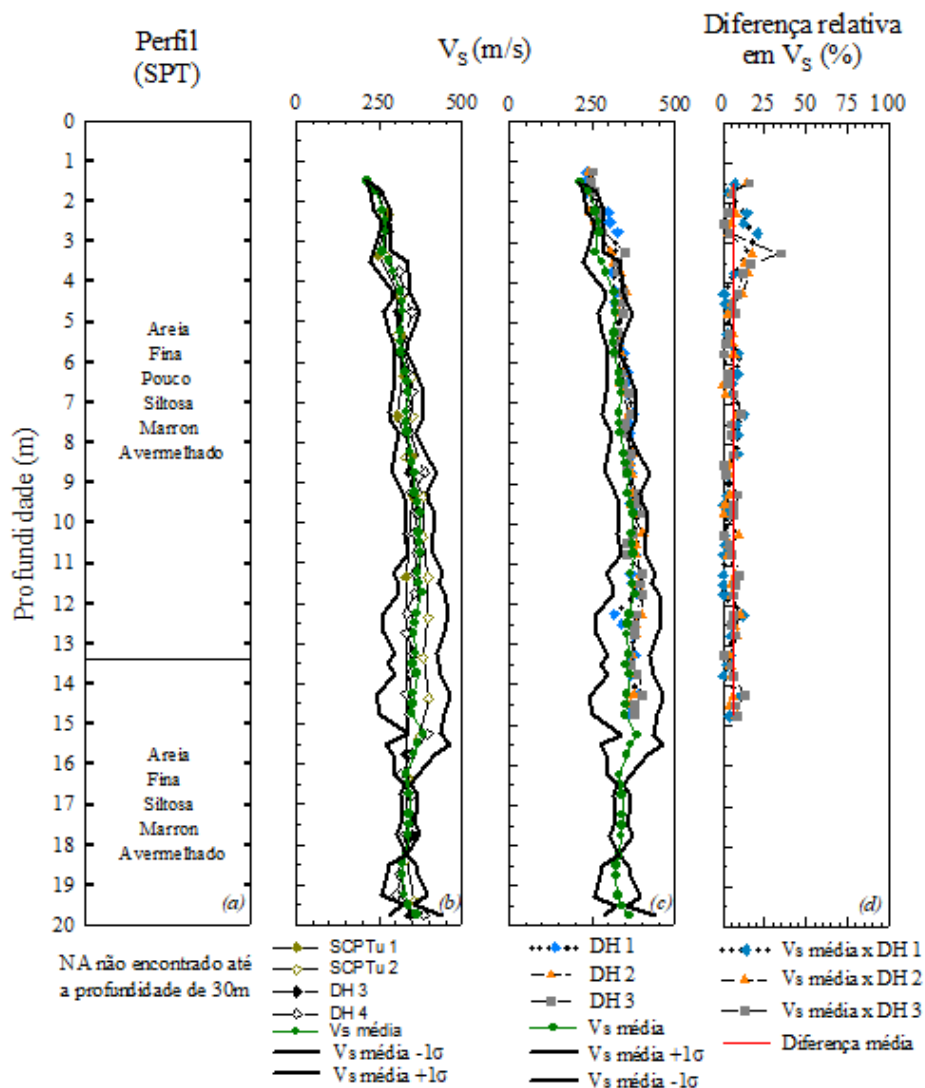


Figura 61: Perfis de V_s determinados por diversos ensaios do tipo *down-hole* no local 1 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.

Fonte: Autoria própria.

5.3.1.2 Onda P

Na Figura 62 têm-se os resultados de V_P obtidos por meio dos ensaios *down-hole* (DH 1, DH 2 e DH 3) e os valores de V_P obtidos por meio dos ensaios

cross-hole realizados neste local (CH 2) por Giacheti (2001) e outro realizado por Giacheti (1991) no Parque das Camélias (CH 1), distante 3,7 km deste local, numa formação geológica com as mesmas características deste local.

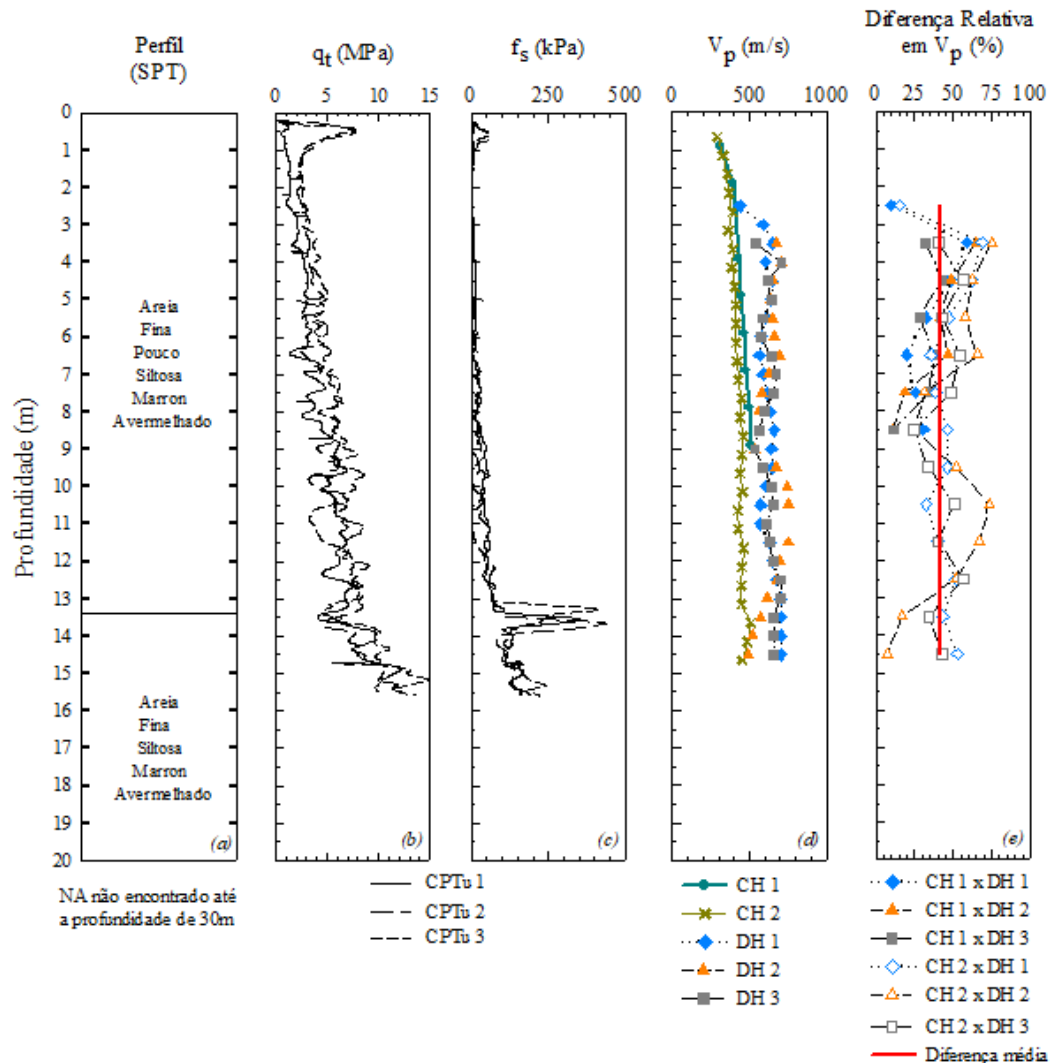


Figura 62: Perfis de q_t , f_s e V_p determinados no local 1 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.

Fonte: Autoria própria.

Os perfis de V_p obtidos em ensaios com a ponteira desenvolvida são apresentados na Figura 62d; e na Figura 62e têm-se a diferença relativa dos valores de V_p entre os ensaios *down-hole* e *cross-hole*.

A diferença relativa média dos valores de V_p do ensaio *cross-hole* CH 1 em relação aos valores de V_p dos ensaios *down-hole* DH 1, DH 2 e DH 3 é de 33,9%. Da mesma forma, a diferença relativa média dos valores de V_p do ensaio *cross-hole* CH 2 em relação aos valores de V_p dos ensaios *down-hole* DH 1, DH

2 e DH 3 é de 45,7%. Também para o local 2 do campo experimental da UNESP-Bauru, as diferenças entre os valores de V_P dos ensaios *cross-hole* e *down-hole* foram elevadas (uma diferença relativa média de 35,9%), o que indica que ainda não se desenvolveu uma técnica eficiente para registros de V_P nos ensaios *down-hole* realizados com a nova ponteira. Mais estudos são necessários para compreender o que ocorreu e o que precisa ser feito para melhorar essa determinação.

5.3.2 Local 2

5.3.2.1 Onda S

Na Figura 63 têm-se os resultados de V_S obtidos nos ensaios *down-hole* realizados com a ponteira desenvolvida (DH 2, DH 3 e DH 4) no local 2 do campo experimental da UNESP de Bauru e o perfil de V_S obtido pelo ensaio *cross-hole* CH 2 realizado por Giacheti (2001) no local 2 do mesmo campo experimental. O nível de água deste campo experimental não foi encontrado até a profundidade de 30m. Além disso, são apresentados o perfil de V_S obtido pelo ensaio *cross-hole* CH 1 realizado por Giacheti (1991) no Parque das Camélias, distante 3,7 km deste local, numa formação geológica com as mesmas características deste local.

Os valores de V_S do ensaio DH 1 não serão apresentados e discutidos, pois houve dificuldade na interpretação das ondas S devido à não inversão de polos de um dos geofones, por isso os valores de V_S deste ensaio não serão considerados.

O perfil típico do local estudado, baseado em resultados de ensaios SPT, é mostrado na Figura 63a. Os perfis de V_S obtidos em ensaios com a ponteira desenvolvida são apresentados na Figura 63b e na Figura 63c têm-se a diferença relativa dos valores de V_S entre os ensaios *down-hole* e *cross-hole*. Dois ensaios *down-hole* foram realizados até cerca de 10 m de profundidade, quando ainda estavam sendo feitos ajustes no procedimento de ensaio e na ponteira. Neste local, um dos ensaios *down-hole* foi realizado até cerca de 20 m de profundidade.

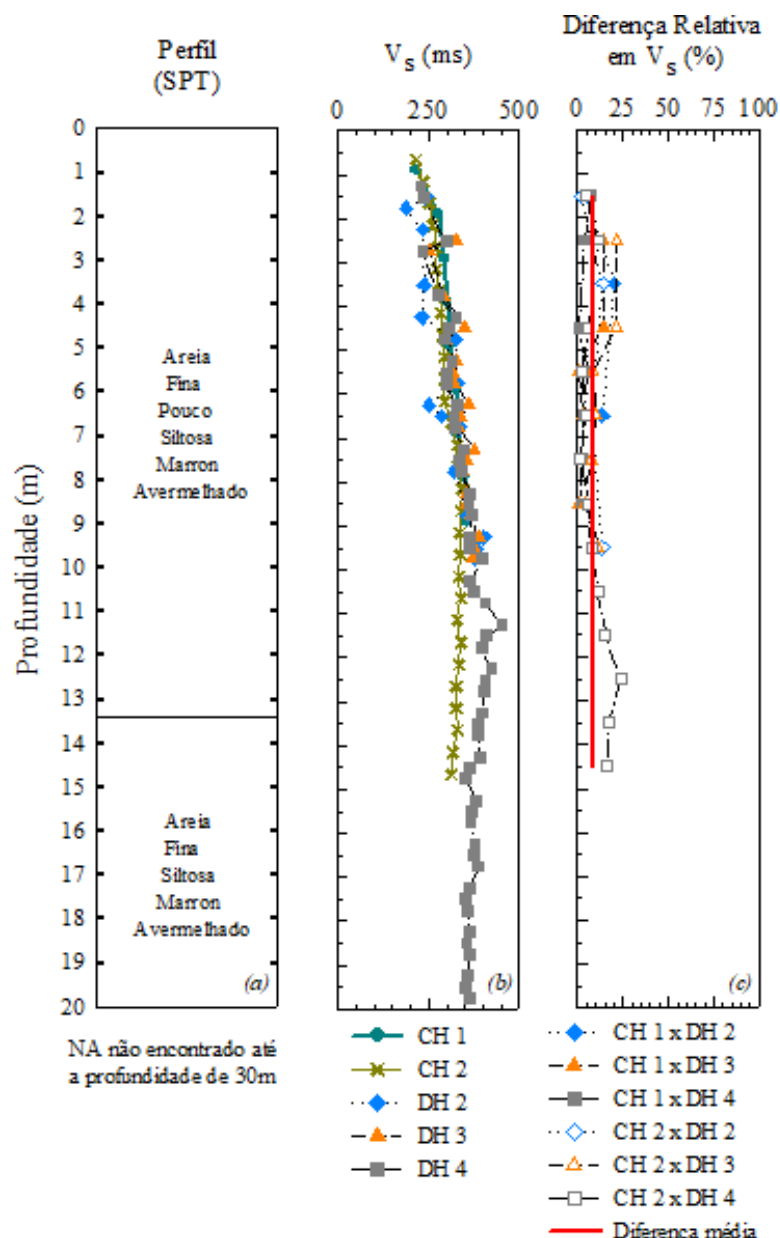


Figura 63: Perfis de V_s determinados no local 2 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.

Fonte: Autoria própria

Observa-se na Figura 63b que os perfis de V_s determinados pelos três ensaios *down-hole* realizados com a ponteira desenvolvida estão mais próximos dos perfis de V_s determinados pelos ensaios *cross-hole* (CH 1 e CH 2) até cerca de 10 m de profundidade.

Os perfis de diferença relativa entre as velocidades de onda S determinados nos ensaios *cross-hole* e nos ensaios *down-hole* (Figura 63c) vão desde praticamente 0% até quase 23,7%, com um valor médio de 8,6%. Nota-se que existe uma maior diferença relativa nos primeiros 3 m de profundidade

para um dos ensaios *down-hole* (DH 2), e a partir de 10 m para o ensaio DH 4. No ensaio DH 2 os procedimentos de ensaios ainda estavam sendo ajustados, que poderia explicar as diferenças nos primeiros metros. Já, as diferenças observadas no DH 4 a partir de 10 m de profundidade podem estar associadas à variabilidade local, uma vez que os ensaios *down-hole* foram feitos no local 2 deste campo experimental e os *cross-hole* foram feitos no local 1 desse mesmo campo experimental e no Parque das Camélias.

Diversos ensaios sísmicos pela técnica *down-hole* empregando um DMT sísmico foram realizados no local 2 do campo experimental da UNESP de Bauru por Rocha (2018). Sete perfis de V_s determinados por essa técnica (SDMT 1 a SDMT 3, SDMT 5 a SDMT 7 e SDMT 9) são apresentados na Figura 64b. O perfil denominado V_s médio mostrado em verde na mesma figura consiste na média interpolada desses valores de V_s ao longo do perfil. Para verificar se os valores de V_s obtidos pela ponteira desenvolvida eram equivalentes, foi calculado o desvio padrão dos valores de V_s interpolados dos ensaios sísmicos *down-hole* de referência realizados por Rocha (2018). Assim, adotou-se como limites inferior e superior os valores de V_s médio, respectivamente, menos e mais o desvio padrão.

Na Figura 64c são apresentados os valores de V_s médio interpolado e seus limites inferior e superior de V_s , em conjunto com os valores de V_s determinados com a nova ponteira nos ensaios *down-hole* DH 2, DH 3 e DH 4. Na Figura 64d têm-se os perfis de diferença relativa entre as determinações de V_s empregando o SDMT e a ponteira desenvolvida, bem como o valor médio dessas diferenças. Nota-se que a grande maioria dos valores de V_s obtidos com a nova ponteira estão dentro deste intervalo, mesmo abaixo dos 10 m de profundidade, onde a diferença com os resultados do ensaio *cross-hole* realizado no local 1 deste campo experimental foi maior.

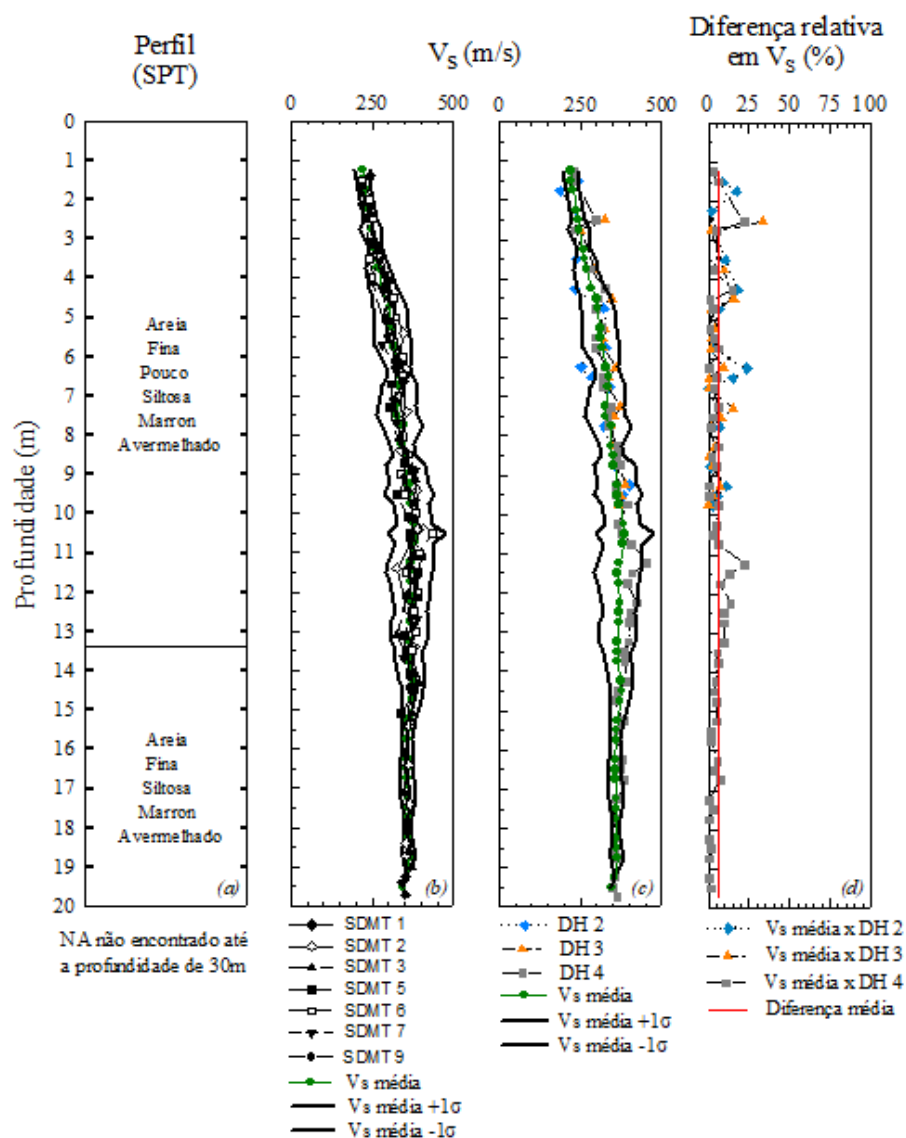


Figura 64: Perfis de V_s determinados por diversos ensaios do tipo *down-hole* no local 2 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.

Fonte: Autoria própria.

5.3.2.2 Onda P

Na Figura 65 têm-se os perfis de V_P obtidos nos ensaios DH 2, DH 3 e DH 4 realizados com a ponteira desenvolvida no local 2 do campo experimental da UNESP de Bauru e os valores de V_P obtidos no *cross-hole* CH 2 realizado por Giacheti (2001) no local 2 do mesmo campo experimental e do ensaio *cross-hole* CH 1 realizado por Giacheti (1991) no Parque das Camélias, distante 3,7 km deste local, numa formação geológica com as mesmas características deste local. Os perfis de V_P obtidos em ensaios com a ponteira desenvolvida são apresentados nas Figura 65b e na Figura 65c têm-se a diferença relativa dos valores de V_P determinados com os ensaios *down-hole* e *cross-hole*. A diferença

relativa média dos valores de V_P dos ensaios *cross-hole* CH 1 e CH 2 em relação aos valores de V_P dos ensaios *down-hole* DH 2, DH 3 e DH 4 foram de 26,1%, o que indica que ainda não se desenvolveu uma técnica eficiente para registros de V_P nos ensaios *down-hole* realizados. Mais estudos são necessários para compreender o que ocorreu e o que deve ser feito para melhorar.

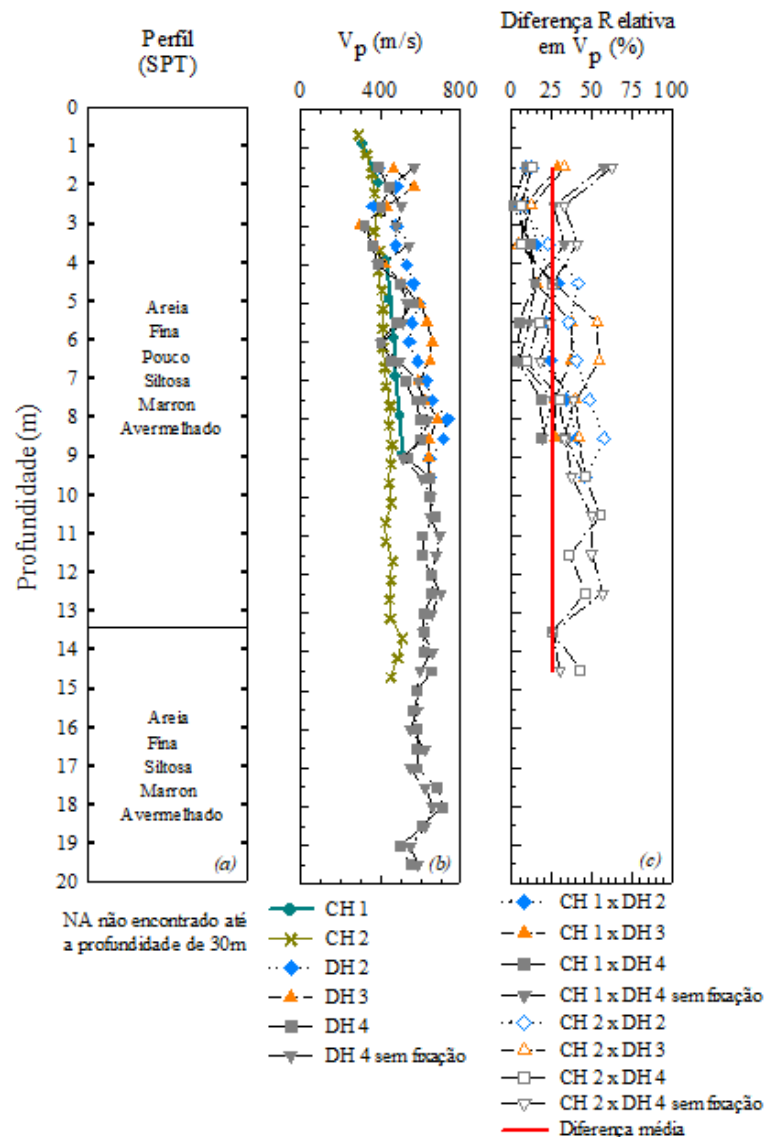


Figura 65: Perfis de V_P determinados no local 2 do campo experimental da UNESP em Bauru-SP.

Fonte: Autoria própria.

A diferença relativa média dos valores de V_P dos ensaios *cross-hole* CH 1 e CH 2 em relação aos valores de V_P dos ensaios *down-hole* DH 2, DH 3 e DH 4 com a fonte fixa pelo gancho é de 26,1% e de 30,4%, quando são considerados

os valores de V_P obtidos pela fonte sem nenhum tipo de fixação, o que indica que o uso de ganchos para fixar a fonte reduz a diferença relativa média.

5.4 Jardim botânico municipal de Bauru

Três ensaios CPTu foram realizados neste local, e na Figura 66a, tem-se o perfil do local definido com base nos ensaios CPTu. Na Figura 66b, Figura 66c e Figura 66d têm-se, respectivamente, os perfis de resistência de ponta corrigida, atrito lateral e poro-pressão medida com o recurso de filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva. Nota-se que nos ensaios CPTu foram detectados acréscimos de poro-pressão entre cerca de 2 e 3 m de profundidade o que pode ser um indicativo de uma possível presença do nível de água. A partir de cerca de 5,4 m de profundidade observa-se que houve um aumento na resistência de ponta e do atrito lateral nos 3 ensaios realizados.

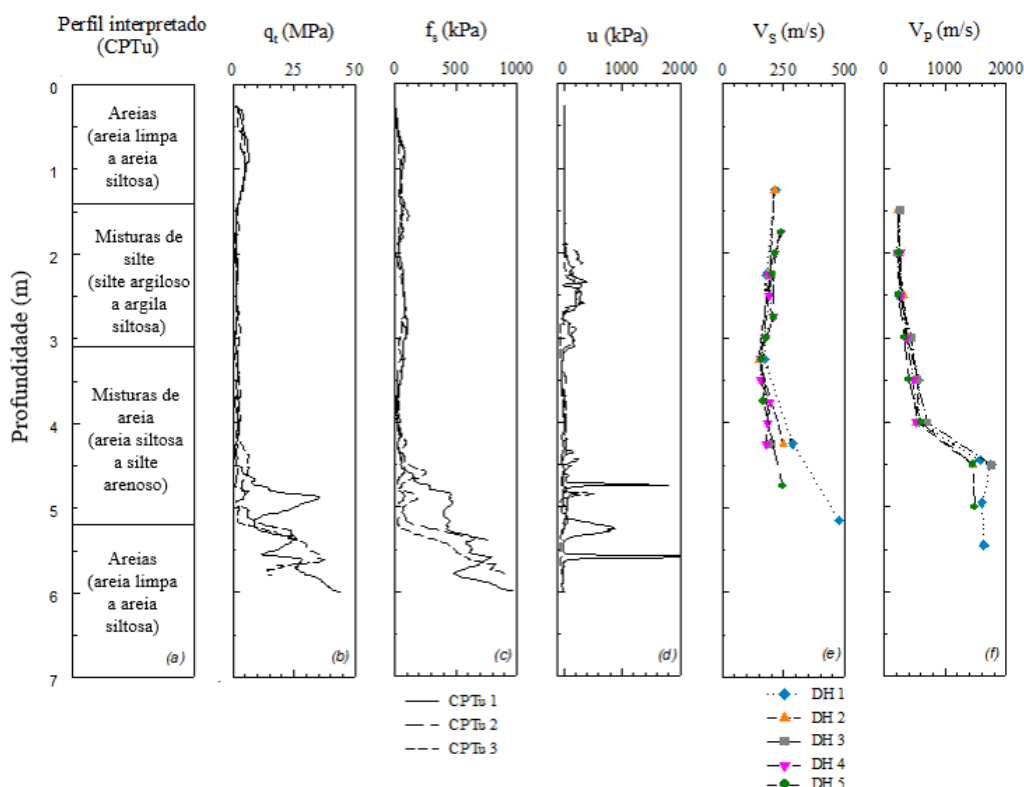


Figura 66: Perfis de q_t , f_s , u , V_s e V_P determinados no jardim botânico municipal de Bauru.

Fonte: Autoria própria.

5.4.1 Ondas sísmicas

Nas Figura 66e e Figura 66f têm-se, respectivamente, os perfis de V_s e V_P obtidos em 5 ensaios *down-hole* realizados no Jardim botânico municipal de

Bauru com a nova ponteira. Neste local não existem resultados de ensaios *cross-hole* e *down-hole* de referência, mas foi escolhido pelo fato de ter a presença de nível d'água relativamente raso, possivelmente entre 2 e 3 m de profundidade a partir dos resultados de CPTu e do uso de medidor elétrico de nível de água dentro do próprio furo desses ensaios.

Neste local o impenetrável nos ensaios CPTu foi atingido entre 5,4 m e 6,0 m de profundidade e entre cerca de 4,8 m e 5,7 m de profundidade com a ponteira sísmica utilizada. Observa-se na Figura 66e que se tem boa repetibilidade entre os perfis de V_s para os 5 ensaios *down-hole* realizados, com uma maior diferença entre ensaios para as determinações feitas a partir dos 4,3 m de profundidade. Uma repetibilidade equivalente a essa também pode se observar nos perfis de V_P dos 5 ensaios *down-hole* realizados, também com uma ligeira maior diferença a partir dos 4,3 m de profundidade.

Interessante observar nesses resultados que os perfis de V_P determinados nesse local para todos os 5 ensaios *down-hole* realizados mostram um contraste de valores de velocidade, ou seja, valores de V_P saltando bruscamente para valores elevados, aproximadamente 1550 m/s a partir do 4,5 m de profundidade, indicando que o nível de água neste local deve estar próximo desta profundidade (WIGHTMAN et al., 2003). No entanto, a partir dos registros de poro-pressão dos ensaios CPTu, acredita-se que o nível de água deste local esteja a aproximadamente 2,5 m de profundidade, ou seja, cerca de 1,5 m acima do nível de água interpretado a partir das velocidades das ondas de compressão. Esse mesmo padrão foi observado nos perfis de V_P determinados no campo experimental da USP – São Carlos.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE

Por meio desta pesquisa fez-se a atualização do sistema (*hardware* e *software*) para realização de ensaios sísmicos *down-hole* em conjunto com o piezocone. Os resultados dos ensaios realizados com esse novo sistema em laboratório e em áreas experimentais possibilitaram concluir o que será destacado a seguir.

- O *software* atualizado integra a aquisição de dados, permite a visualização dos registros das ondas e o cálculo dos valores da velocidade das ondas S (V_S) pelo método do intervalo verdadeiro durante a execução do ensaio no campo. Os resultados de ensaios *down-hole* interpretado com esse programa para determinação de V_S são equivalentes àqueles interpretados empregando um *software* comercial. Este programa também possibilita a aquisição e visualização dos registros das ondas P, mas não permite calcular os valores de V_P , visto que só foi possível determinar valores da V_P pelo método do pseudo intervalo de tempo após aquisição de todos os registros utilizando um *software* comercial.
- A ponteira sísmica atualizada pode ser utilizada em solos saturados e não saturados em conjunto com o piezocone e possui seis geofones, três para registros de ondas S, espaçados em 0,5 m, e três para registros de ondas P, também espaçados em 0,5 m.
- A determinação da velocidade de ondas S (V_S) com este sistema foi feita utilizando o intervalo verdadeiro de tempo à medida que cada golpe é aplicado. As diferenças médias entre valores de V_S determinados no campo experimental da USP de São Carlos em relação aos valores de referência dos ensaios *cross-hole* foram de 7,3% e de 6,7%, quando comparados com valores de ensaios *down-hole* realizados neste local. Já, no campo experimental da Unesp de Bauru, as diferenças médias entre valores de V_S determinados pelo *cross-hole* foram de 8,6% e de 6% quando comparados com valores de ensaios *down-hole* determinados neste local. Assim, considera-se que o sistema desenvolvido é eficiente

para determinação da velocidade de propagação de ondas S (V_s) da forma que foi realizada.

- A determinação da velocidade de ondas P (V_P) por meio desse sistema só pode ser feita utilizando o pseudo intervalo de tempo, após os registros de todas as ondas P geradas ao longo da profundidade e utilizando um *software* comercial. No entanto, as diferenças entre valores de V_P determinados no campo experimental da USP de São Carlos em relação aos valores de referência dos ensaios *cross-hole* foram elevadas, com um valor médio de 29,1%. Isto se repetiu no campo experimental da Unesp de Bauru, onde as diferenças médias entre valores de V_P determinados pelo *cross-hole* também foi elevada e igual a 35,9%. Considera-se, portanto, que o sistema desenvolvido não é confiável para determinação dos perfis de velocidade de propagação de ondas P (V_P), entretanto os valores de V_P determinados acima do nível de água ficaram dentro da faixa de valores para solos não saturados.
- Contatou-se nos ensaios realizados em áreas com presença de nível de água, ou seja, no campo experimental da USP de São Carlos e no Jardim Botânico de Bauru, os perfis de V_P apresentaram um contraste de valores de velocidade, ou seja, valores de V_P saltando bruscamente para valores elevados e próximos 1500 m/s. No entanto, esta diferença não ocorreu exatamente onde se encontrava o nível de água, mas a cerca de 1,5 m abaixo de onde acredita-se está o nível de água nesse local, de forma equivalente ao que observou nos perfis de V_P determinados no campo experimental da USP – São Carlos, onde o contraste de velocidades de ondas P está a quase 2 m de profundidade. Considera-se, portanto, que o registro e a interpretação dos registros de ondas P é sensível a presença do nível de água, mas não permitiu identificar a posição exata nos dois locais investigados.

Para continuidade desta pesquisa recomenda-se o seguinte.

- que se utilize em aplicações práticas uma ponteira sísmica menor, com apenas 3 geofones: dois geofones espaçados 0,5 m e orientados na posição horizontal para determinação de V_s e apenas um geofone, próximo daquele da ponta, orientado na posição vertical, para

determinação de V_P . Recomenda-se também o uso de uma fonte sísmica circular, de cerca de 20 cm de diâmetro, para geração de ondas de compressão.

- Dar continuidade aos estudos para melhor compreender a propagação de ondas P em ensaios *down-hole*, a fim de propor um sistema e uma forma de interpretação de resultados que possibilite determinar perfis de V_P com repetibilidade equivalente daqueles que se obtém para as ondas S.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMOROSO, S.; COMINA, C.; FOTI, S.; MARCHETTI, D. Preliminary results of P-wave and S-wave measurements by seismic dilatometer test (SPDMT) in Mirandola (Italy). In: **5th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation**, Gold Coast, Australia, ISC 2016, p. 825–830, 2016.
- ASTM D5778. **Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils**. ASTM International, 1995.
- ASTM D7400-14. **Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing**, ASTM International, 2014.
- BARROS, J. M. C. **Módulo de cisalhamento dinâmico de solos tropicais**. 1997. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 437 p., 1997.
- BUTCHER, A. P.; POWELL, J. J. M. Practical considerations for field geophysical techniques used to assess ground stiffness. In: **Advances in site investigation practice**, Thomas Telford, London, p. 701-714, 1996.
- BUTCHER, A. P.; CAMPANELLA, R. G.; KAYNIA, A. M.; MASSARSCH, K. R. Seismic cone downhole procedure to measure shear wave velocity – a guideline. The International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Technical Committee n.10: Geophysical testing and geotechnical engineering. In: **XVIth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**, Osaka, 5 p., 2005.
- CAMPANELLA, R. G.; STEWART, W. P. Seismic cone analysis using digital signal processing for dynamic site characterization. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 29, n.3, p. 477-486, 1992.
- CASTRO, G. **Liquefaction of sands**. 1969. 231 p. Thesis of Doctor of Philosophy - Cambridge Harvard University, Cambridge, Massachusetts, USA, 1969.
- CAVALCANTE, E. H. et al. Campos Experimentais Brasileiros. **Geotecnia**, Lisboa, v. 111, p. 99-205, 2007.

- DOURADO, J. C. A utilização da Sísmica na Determinação de Parâmetros Elásticos Dinâmicos de Maciços Rochosos e Terrosos. In Situ. **Publicações de Artigos Técnicos da ABGE**, n.8, 12 p. 1984.
- FERNANDES, J. B. **Estudo da Resistência e da Deformabilidade de um Perfil de Solo Tropical não saturado**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – UNESP, Bauru, 143 p., 2022.
- FERREIRA, C. **Implementação e Aplicação de Transdutores Piezoelétricos na Determinação de Velocidades de Ondas Sísmicas em Provetes. Avaliação da Qualidade de Amostragem em Solos Residuais**. 2003. Dissertação (Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica) - FEUP, Porto, Portugal, 2003.
- FREITAS, M. D. N. **Análise da Integridade Física de Barragens de Terra a partir de Métodos Sísmicos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – UNESP, Rio Claro, 99 p., 2020.
- GIACHETI, H. L. **Estudo experimental de parâmetros dinâmicos de alguns solos tropicais do estado de São Paulo**. 1991. Tese (Doutorado em Geotecnia) – EESC, USP, São Carlos, 232 p., 1991.
- GIACHETI, H. L. **Os ensaios de campo na investigação do subsolo: Estudo e considerações quanto à aplicação em solos tropicais**. 2001. Livredocência – Faculdade de Engenharia, UNESP, Bauru, 327 p., 2001.
- GIACHETI, H. L.; ELIS, V. R.; DE MIO, G.; CAVALCANTE, E. H. Ensaio de Campo na Investigação Geotécnica e Geoambiental (artigo de palestra convidada). In: **XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, Curitiba-PR, Palestra. p. 1-25, 2006.
- GIACHETI, H. L.; VITALI, O. P. M.; SOUZA, T. DE J.; PEDRINI, R. A. A. O ensaio de piezocone sísmico: execução, interpretação e exemplos de aplicação. In: **Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia**. São Paulo-SP, Seminário. p. 1-10, 2012.
- GREENHOUSE, J.; GUDJURGIS, P.; SLAINE, D. **Applications of surface geophysics to environmental investigations**. Reference Notes for EEGS Short Course, 173 p., 1995.

- KEAREY, P. **Geofísica de exploração**. Michael Brooks, Ian Hill. Tradução: Maria Cristina Moreira Coelho. – São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- KRAMER, S. L. **Geotechnical Earthquake Engineering**. 1 ed. New Jersey, USA: Editora Upper Saddle River, 673 p., 1996.
- LEGION DRILLING & NUMAC. **In-Situ Testing with the Seismic Dilatometer (SDMT/SPDMT) (Numac Webinar #9)**. Youtube, 19 dez. 2022. Disponível em: <<https://youtube.com/watch?v=VWenw90ji1Y&si=EnSIkaIECMiOmarE>>. Acesso em: 14 fev. 2023.
- LOUREIRO, F. O. **Análise da geometria e correção estática no processamento sísmico 3D**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 59 p., 2013.
- LUNNE, T.; ROBERTSON, P. K.; POWELL, J. J. M. **Cone penetration test in geotechnical practice**. 1 ed. London: Editora Blackie Academic Professional. 311 p., 1997.
- MAYNE, P. W. Enhanced Geotechnical Site Characterization by Seismic Piezocone Penetration Tests. Invited Lecture. In: **Fourth International Geotechnical Conference**, Cairo University, p. 95-120, 2000.
- MCDOWELL, P. W. et al. **Geophysics in engineering investigations**. London: Construction Industry Research & Information Association, CIRIA C562. 252 p., 2002.
- MONDELLI, G. **Investigação geoambiental em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos utilizando a tecnologia do piezocone**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Poli, USP, São Paulo, 391 p., 2004.
- PEDRINI, R. A. A.; VITALI, O. P. M.; GIACHETI, H. L. Software para Análise de Registros Sísmicos em Ensaios Down-Hole com o Piezocone. In: **XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. Gramado, p 1-8. 2010.

- PEDRINI, R. A. A. **Desenvolvimento de Sistema para Sísmica Up-Hole em Conjunto com o Ensaio SPT**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – UNESP, Bauru, 127 p., 2012.
- PEREIRA, E. L. **Estudo do Potencial de Liquefação de Rejeitos de Minério de Ferro sob Carregamento estático**. 2005. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – UFOP, Ouro Preto, 210 p., 2005.
- PEREIRA, L. B. **Estudo Comparativo entre a Eficiência de Sondagens SPT e Sísmica Rasa para Determinação de Parâmetros Geotécnicos em uma área do Município de Caçapava do Sul, RS**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Geologia) – Universidade Federal do Pampa, UNIPAMPA, Caçapava do Sul, 71 p., 2015.
- ROBERTSON, M. D. **Principles and parameters for the design of a portable shear wave source**. 1986. Thesis (Degree of Bachelor of applied Science), Faculty of Applied Science Geological Engineering, University of British Columbia, Vancouver, 81 p., 1986.
- ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R. G.; GILLESPIE, D.; RICE, A. Seismic CPT to measure in-situ shear wave velocity. **Journal of Geotechnical Engineering**. ASCE, v. 112, n. 8, p. 791-804, 1986.
- ROCHA, B. P. **Emprego do Ensaio SPT sísmico na Investigação de Solos Tropicais**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - EESC, USP, São Carlos, 117 p., 2013.
- ROCHA, B. P.; GIACHETI, H. L. A determinação do Módulo de Cisalhamento Máximo (G_0) dos solos em furos de sondagem. In: **Fundações e Obras Geotécnicas**, v. 6, p. 46-52, 2016.
- ROCHA, B. P. **Caracterização geotécnica de solos tropicais não saturados por meio de ensaios de campo**. 2018. Tese (Doutorado em Geotecnia) – EESC, USP, São Carlos, 272 p., 2018.
- SALLES, J. C. **Determinação de módulos de deformabilidade através de provas de carga no cone elétrico**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – EESC, USP, São Carlos, 117 p., 2013.

- SCHNAID, F.; CONSOLI, N. C.; AVERBECK, J. H. Aspects of cone penetration in natural weakly-cemented deposits. In: **Geotechnical Site Characterization**, Atlanta, v. 2., p. 1159-1163, 1998.
- SCHNAID, F.; YU, H. S. Interpretation of the seismic cone test in granular soils. In: **Géotechnique**, v. 57, n. 3, p. 265-272, 2007.
- SCHNEIDER, J. A. et al. Field and laboratory measurements of dynamic shear modulus of Piedmont residual soils. In: **Behavioural Characteristics of Residual Soils**, GSP 92, ASCE, Reston, VA, p. 12-25, 1999.
- SEED, H. B.; IDRIS, I. M. A Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. In: **Journal of the Geotechnical Engineering Division**. ASCE, v. 97, n. 9. p. 1249-1273, 1971.
- TSUKAMOTO, Y. et al. Resistance of partly saturated sand to liquefaction with reference to longitudinal and shear wave velocities. In: **Soils and Foundations**. v. 42, n. 6. p. 93-104, 2002.
- VITALI, O. P. M. **Desenvolvimento de um Sistema para Realização de Ensaios Sísmicos *Down-Hole* em Conjunto com o CPT**. 2011. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - EESC, USP, São Carlos, 114 p., 2011.
- WIGHTMAN, W. E.; JALINOOS, F.; SIRLES, P.; HANNA, K. **Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems**. Washington, DC: Federal Highway Administration. 742 p., 2003.