

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA REALIZAÇÃO DE  
ENSAIOS SÍSMICOS *DOWN-HOLE* EM CONJUNTO COM O CPT

OSVALDO PAIVA MAGALHÃES VITALI

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós Graduação em Geotecnia.

ORIENTADOR: PROF. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETI

SÃO CARLOS - SP

2011

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA  
TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,  
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

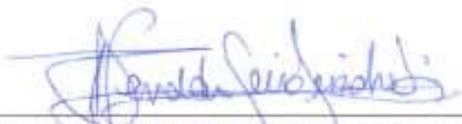
Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

V836d	<p>Vitali, Osvaldo Paiva Magalhães Desenvolvimento de um sistema para realização de ensaios sísmicos <i>down-hole</i> em conjunto com o CPT / Osvaldo Paiva Magalhães Vitali ; orientador Heraldo Luiz Giachetti. -- São Carlos, 2010.</p> <p>Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.</p> <p>1. Prospecção geológica. 2. Subsolo - investigação. 3. Ensaios de campo. 4. Ondas S. 5. <i>Down-hole</i>. 6. SCPT. I. Título.</p>
-------	---

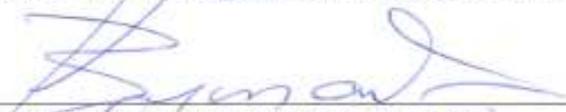
**FOLHA DE JULGAMENTO**

Candidato(a): Engenheiro OSVALDO PAIVA MAGALHÃES VITALI

Dissertação defendida e julgada em 25/02/2011 perante a Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Titular **HERALDO LUIZ GIACHETI** - (Orientador)  
(Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"/UNESP/campus de Bauru)

APROVADO

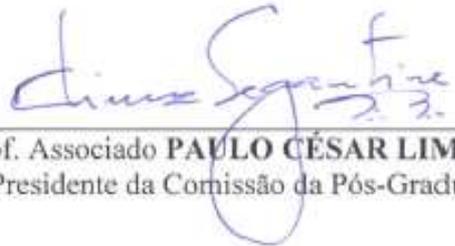
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **GEORGE DE PAULA BERNARDES**  
(Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"/UNESP/campus de Guaratinguetá)

APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Dr. **GIULIANO DE MIO**  
(e-Geo)

APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Titular **OSNI JOSÉ PEJON**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Geotecnia

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**  
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

# AGRADECIMENTOS

Aos meus Pais, Osvaldo e Maria Ângela, que sempre me incentivaram muito e por serem exemplos de caráter, honestidade e dedicação.

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

Ao Professor Leopoldo P. de Oliveira, pela colaboração na campanha de ensaios realizados no Laboratório de Dinâmica da EESC-USP.

Ao Eng<sup>o</sup> Jorge Nicolau, pelo suporte com a aquisição de dados da National Instruments e com a programação em Labview.

Ao Professor Patrick Stewart do BCIT, Vancouver, Canadá, pela atenção e pelas sugestões para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Mecânica dos Solos da UNESP – Bauru, Sérgio e Gustavo, pelos trabalhos de campo, e aos colegas Rubens Pedrini e Tiago de Jesus Souza.

Aos excelentes Professores e Funcionários do Departamento de Geotecnia da EESC –USP.

À minha namorada Tessy, pelo apoio, companheirismo e amizade, estando sempre presente.

Aos meus colegas de mestrado, pela ótima convivência.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

# RESUMO

Quando ocorrem solicitações dinâmicas nos solos, torna-se indispensável a determinação do módulo de cisalhamento máximo ( $G_0$ ) para elaboração de projetos de Engenharia Geotécnica. Este parâmetro pode ser determinado a partir da velocidade de propagação das ondas S ( $V_s$ ). Em campo, os ensaios mais empregadas para determinação de  $V_s$  são o *cross-hole* e o *down-hole*. O *down-hole* tem sido bastante empregado com a incorporação de geofones em ponteiros de piezocone. Esse ensaio tem se mostrado uma maneira rápida, econômica e muito confiável para determinação de  $G_0$ , apresentando resultados consistentes com os obtidos no ensaio *cross-hole*. O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema para realização do ensaio sísmico *down-hole* e sua implantação. Inúmeros ensaios foram realizados no Campus da Universidade Estadual Paulista, em Bauru/SP a fim de testar os procedimentos para execução do ensaio, os equipamentos utilizados e as técnicas de interpretação, onde se observou que a manutenção do eixo de vibração dos geofones paralelo a direção de aplicação do golpe foi o fator que mais influenciou na qualidade dos sinais. Para analisar a resposta dos geofones instalados na ponteira desenvolvida, realizaram-se ensaios em laboratório, onde se verificou que os geofones apresentavam resposta idêntica ao dos acelerômetro de referência. Por fim, foram realizados ensaios em três campos experimentais no interior do Estado de São Paulo, onde estão disponíveis resultados de ensaios *cross-hole* e ensaios *down-hole* realizados com equipamentos comerciais. Os resultados obtidos com o sistema desenvolvido nestes campos permitiram validar o sistema desenvolvido.

**PALAVRAS-CHAVE:** Investigação do Subsolo, Ensaios de Campo, Ensaio Sísmico, Ondas S, *down-hole*, SCPT.

# ABSTRACT

In the design stages of geotechnical engineering of a given project, it is imperative to ascertain the maximum shear modulus ( $G_o$ ) of those soils experiencing dynamic loads. One common method to determine  $G_o$  is to measure shear wave velocity. Most field experiments are the cross-hole and down-hole tests to determine the velocity of shear waves. The down-hole test has been widely used in conjunction with geophones placed behind the tip of piezocones. The down-hole test has proven to be a fast, economic, and very reliable method to determine  $G_o$ , it has produced data consistent with results obtained in cross-hole tests. The objective of this work is to present a comprehensive system for the down-hole test, which includes its implementation, execution, and the interpretation of data collected. Several tests were performed at the campus of Universidade Estadual Paulista, UNESP, in Bauru, S.P. The objective of those experiments was to test the execution procedures and method of interpretation. It was observed the quality of the results obtained was chiefly dependent on maintaining the axis of vibration of the geophones parallel to the direction of application of the original blow. The analysis of the response by the geophones installed at the tip of the cone included experiments performed at the laboratory, where it was observed that the geophones responded identically to those accelerometers used as reference. Further, down-hole experiments using system proposed here were performed in three experimental research sites of the state of São Paulo. The objective was to compare results to the data available in literature, which were obtained using commercial SCPT equipment and cross-hole tests. The down-hole tests were performed within the guidelines of the system proposed here and the results of the experiment served to corroborate the suitability of the developed system.

**KEY WORDS:** seismic test, shear waves, subsurface investigation, field tests, SCPT, *down-hole*.

# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 RELAÇÃO NÃO LINEAR DA CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO (ADAPTADO DE MAYNE E SCHNEIDER, 2000).	4
FIGURA 2 CURVA DE DEGRADAÇÃO DA RIGIDEZ (ADAPTADO DE FERREIRA, 2003) .....	6
FIGURA 3 CURVAS DE DEGRADAÇÃO DA RIGIDEZ OBTIDAS EM DIFERENTES TRABALHOS (SCHNEIDER ET AL., 1999). .....	7
FIGURA 4 ESQUEMA DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS P (A) E ONDAS S (B) (FERREIRA, 2003). .....	10
FIGURA 5 ESQUEMA DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS R (A) E ONDAS L (B) (FERREIRA, 2003).....	11
FIGURA 6 RELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE POISSON E AS RAZÕES $V_r/V_s$ , $V_p/V_s$ E $V_s/V_s$ NUM MEIO ELÁSTICO SEMI-INFINITO (FERREIRA, 2003).....	13
FIGURA 7 FAIXAS DE VARIAÇÃO DAS VELOCIDADES PARA DIFERENTES MATERIAIS (APRESENTAÇÕES DE PAUL MAYNE).....	14
FIGURA 8 ESQUEMA DO ENSAIO <i>CROSS-HOLE</i> (FERREIRA, 2003). .....	17
FIGURA 9 COMPARAÇÃO ENTRE OS PERFIS DE $V_s$ OBTIDOS ATRAVÉS DOS ENSAIOS <i>CROSS-HOLE</i> E <i>DOWN-HOLE</i> NUM PERFIL ARENOSO (ROBERTSON ET AL., 1986).....	19
FIGURA 10 COMPARAÇÃO ENTRE OS PERFIS DE $V_s$ OBTIDOS ATRAVÉS DOS ENSAIOS <i>CROSS-HOLE</i> E <i>DOWN-HOLE</i> NUM PERFIL ARGILOSO (ROBERTSON ET AL., 1986). .....	19
FIGURA 11 (A) DIVISÃO DE UM SINAL CONSIDERADO LIMPO EM PULSO PRINCIPAL DA ONDA S E ONDULAÇÕES E (B) COMPARAÇÃO DOS ESPECTROS DOS SINAIS (STEWART, 1992). .....	21
FIGURA 12 (A) DIVISÃO DE UM SINAL CONSIDERANDO DISTORCIDO EM PULSO PRINCIPAL DA ONDA S E ONDULAÇÕES E (B) COMPARAÇÃO DOS ESPECTROS DOS SINAIS (STEWART, 1992).....	22
FIGURA 13 ESQUEMA DO MÉTODO DO INTERVALO PARA O CÁLCULO DE $V_s$ COM O PSEUDO INTERVALO DE TEMPO (BUTCHER ET AL., 2005).....	25
FIGURA 14 ESQUEMA DO MÉTODO DO INTERVALO PARA O CÁLCULO DE $V_s$ COM O INTERVALO VERDADEIRO DE TEMPO (ADAPTADO DE BUTCHER ET AL., 2005).....	25
FIGURA 15 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS COM INTERVALO VERDADEIRO E COM PSEUDO INTERVALO DE TEMPO (RICE, 1984).....	27

FIGURA 16 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS COM INTERVALO VERDADEIRO E COM PSEUDO INTERVALO DE TEMPOS (BUTCHER E POWELL, 1996). .....	27
FIGURA 17 DETERMINAÇÃO DO INTERVALO DE TEMPO ATRAVÉS DO MÉTODO DO <i>CROSS-OVER</i> (CAMPANELLA E STEWART, 1992).....	29
FIGURA 18 SITUAÇÃO EM QUE O MÉTODO <i>CROSS-OVER</i> PODE SER APLICADO COM CONFIANÇA. ....	29
FIGURA 19 SITUAÇÕES ONDE O MÉTODO <i>CROSS-OVER</i> NÃO É APLICÁVEL (A) DIFERENÇA NA CHEGADA DA ONDA E (B) DISTORÇÕES NO PULSO PRINCIPAL DA ONDA S. ....	30
FIGURA 20 DETERMINAÇÃO DO INTERVALO DE TEMPO ATRAVÉS DO MÉTODO DO <i>CROSS-CORRELATION</i> NO DOMÍNIO DO TEMPO (CAMPANELLA E STEWART, 1992,).....	31
FIGURA 21 SELEÇÃO DE UMA REVOLUÇÃO DA ONDA S. ....	32
FIGURA 22 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS EMPREGANDO OS MÉTODOS DO <i>CROSS-OVER</i> E <i>CROSS-CORRELATION</i> NO CAMPO EXPERIMENTAL FAZENDA McDONALD (CAMPANELLA E STEWART, 1992).....	33
FIGURA 23 DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM GEOFONE (( <a href="http://www.geophone.com/content.asp?pageid=16">HTTP://WWW.GEOPHONE.COM/</a> CONTENT.ASP?PAGEID=16, 15/09/2010).....	36
FIGURA 24 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS COM DIFERENTES DISTÂNCIAS ENTRE A FONTE E O FURO (BUTCHER E POWELL, 1996). ....	38
FIGURA 25 CURVA DE CALIBRAÇÃO DOS GEOFONES GS-20DH. ....	40
FIGURA 26 FOTOS DO ENSAIO PARA CALIBRAÇÃO DOS GEOFONES REALIZADO NO LABORATÓRIO DE DINÂMICA DA EESC – USP.....	41
FIGURA 27 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS GEOFONES. ....	42
FIGURA 28 FOTO DA PONTEIRA SÍSMICA DESENVOLVIDA. ....	43
FIGURA 29 FOTO DOS GEOFONES SENDO PREPARADOS PARA INSTALAÇÃO NA PONTEIRA.....	44
FIGURA 30 GEOFONE INSTALADO NA PONTEIRA.....	44
FIGURA 31 FOTO DO ENSAIO REALIZADO COM A PONTEIRA SÍSMICA NO LABORATÓRIO DE DINÂMICA DA EESC – USP.....	45
FIGURA 32 COMPARAÇÃO ENTRE AS FRFs DO GEOFONE E DO ACELERÔMETRO INSTALADOS NA PONTA PARA O GOLPES APLICADOS NA PONTA.....	46
FIGURA 33 COMPARAÇÃO ENTRE AS FRFs DO GEOFONE E DO ACELERÔMETRO INSTALADOS NA BASE PARA GOLPES APLICADOS NA BASE. ....	46

FIGURA 34 COMPARAÇÃO ENTRE AS FRFS DO GEOFONE E DO ACELERÔMETRO INSTALADOS NA BASE PARA GOLPES APLICADOS NO HABITÁCULO DO MEIO. ....	47
FIGURA 35 COMPARAÇÃO ENTRE AS FRFS DO GEOFONE E DO ACELERÔMETRO INSTALADOS NA BASE PARA GOLPES APLICADOS NO MEIO. ....	48
FIGURA 36 FOTO DO FECHAMENTO DO HABITÁCULO DO MEIO, MAL FIXADO DEVIDO A UM PARAFUSO ESPANADO.	48
FIGURA 37 FOTO DO HABITÁCULO DO MEIO PRESSIONADO POR UM SARGENTO-.....	49
FIGURA 38 COMPARAÇÃO ENTRE AS FRFS DO GEOFONE E DO ACELERÔMETRO INSTALADOS NO MEIO PARA GOLPES APLICADOS NO MEIO COM SARGENTO PRESSIONANDO O HABITÁCULO. ....	49
FIGURA 39 FOTO RESULTADOS DO TESTE DE IMPERMEABILIZAÇÃO DA PONTEIRA.....	50
FIGURA 40 FONTES SÍSMICAS POSICIONADAS ATRÁS DO EQUIPAMENTO DE CRAVAÇÃO DO PIEZOCONE, A) VIGA DE MADEIRA PEQUENA REVESTIDA DE AÇO; B) BARRA DE AÇO; C) VIGA DE MADEIRA GRANDE REVESTIDA DE AÇO.....	52
FIGURA 41 FONTES SÍSMICAS POSICIONADAS À FRENTE DO EQUIPAMENTO DE CRAVAÇÃO A) VIGA DE MADEIRA GRANDE REVESTIDA DE AÇO E B) BARRA DE AÇO. ....	53
FIGURA 42 COMPARAÇÃO ENTRE AS ONDAS GERADAS COM AS DIFERENTES FONTES SÍSMICAS POSICIONADAS ATRÁS DO EQUIPAMENTO DE CRAVAÇÃO. ....	53
FIGURA 43 COMPARAÇÃO ENTRE AS ONDAS GERADAS COM AS DIFERENTES FONTES SÍSMICAS POSICIONADAS ATRÁS DO EQUIPAMENTO DE CRAVAÇÃO. ....	53
FIGURA 44 COMPARAÇÃO ENTRE AS ONDAS GERADAS COM A BARRA DE AÇO POSICIONADA A FRENTE E COM A VIGA DE MADEIRA PEQUENA ATRÁS DO EQUIPAMENTO DE CRAVAÇÃO. ....	55
FIGURA 45 COMPARAÇÃO ENTRE AS ONDAS GERADAS COM A VIGA DE MADEIRA GRANDE A FRENTE E COM A VIGA DE MADEIRA PEQUENA ATRÁS DO EQUIPAMENTO DE CRAVAÇÃO. ....	55
FIGURA 46 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A FONTE SÍSMICA À 0,3 E 1,8M EM ENSAIOS REALIZADOS NO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNESP – BAURU (A) E NO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNICAMP – CAMPINAS (B). ....	56
FIGURA 47 TELA DO SOFTWARE PARA AQUISIÇÃO DE DADOS, EM LABVIEW. ....	57
FIGURA 48 ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DA LEITURA DIFERENCIAL, ONDE S É A RESPOSTA DO GEOFONE. ....	58
FIGURA 49 COMPARAÇÃO DOS RUÍDOS OBTIDOS COM A LEITURA DIFERENCIAL E COM A LEITURA CONVENCIONAL NO CAMPO EXPERIMENTAL DE BAURU UTILIZANDO FREQUÊNCIA DE AQUISIÇÃO DE 100KHZ. ....	58

FIGURA 50 DETALHE DA LIGAÇÃO DO <i>TRIGGER</i> ENTRE A MARRETA E A VIGA. ....	60
FIGURA 51 EQUIPAMENTO PARA CRAVAÇÃO DE PIEZOCONES UTILIZADO NOS ENSAIOS. ....	61
FIGURA 52 COMPARAÇÃO ENTRE AS ONDAS REGISTRADAS COM O GEOFONE PARALELO E NÃO PARALELO A DIREÇÃO DO GOLPE.....	62
FIGURA 53 COMPARAÇÃO ENTRE AS ONDAS OBTIDAS A PARTIR DE GOLPES FORTES E FRACOS. ....	63
FIGURA 54 COMPARAÇÃO ENTRE AS ONDAS OBTIDAS A PARTIR DE GOLPES FORTES E FRACOS. ....	64
FIGURA 55 COMPARAÇÃO DAS VELOCIDADES CALCULADAS PELO SOFTWARE DESENVOLVIDO NA UNESP – BAURU COM AS CALCULADAS PELO <i>SHEAR PRÓ</i> . AMBOS UTILIZAM O MÉTODO <i>CROSS-CORRELATION</i> E O INTERVALO VERDADEIRO DE TEMPO. OS DOIS ENSAIOS FORAM REALIZADOS ATRÁS DOS LABORATÓRIOS DE ENGENHARIA CIVIL NO CAMPUS DA UNESP – BAURU. ....	65
FIGURA 56 COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE $V_s$ CALCULADOS PELOS MÉTODOS <i>CROSS-OVER</i> E <i>CROSS-</i> <i>CORRELATION</i> COM OS RESULTADOS DE UM ENSAIO REALIZADO NO CAMPUS DA UNESP – BAURU ATRÁS DOS LABORATÓRIOS DE ENGENHARIA CIVIL E OUTRO REALIZADO NO CAMPO EXPERIMENTAL EESC – USP, EM SÃO CARLOS.....	66
FIGURA 57 COMPARAÇÃO ENTRE O INTERVALO VERDADEIRO E O PSEUDO INTERVALO DE TEMPO COM OS RESULTADOS DE UM ENSAIO REALIZADO NO CAMPUS DA UNESP – BAURU, ATRÁS DOS LABORATÓRIOS DE ENGENHARIA CIVIL (A), E OUTRO REALIZADO NO OUTRO CAMPO EXPERIMENTAL DE BAURU (B).....	68
FIGURA 58 COMPARAÇÃO DO SINAL ORIGINAL COM O SINAL FILTRADO COM FILTRO DIGITAL TIPO PASSA-BAIXO COM FREQUÊNCIA DE CORTE DE 400HZ. ....	68
FIGURA 59 COMPARAÇÃO DO SINAL ORIGINAL COM O SINAL FILTRADO COM FILTRO DIGITAL TIPO PASSA-BAIXO COM FREQUÊNCIA DE CORTE DE 120HZ. ....	69
FIGURA 60 COMPARAÇÃO ENTRE O RESULTADO OBTIDO COM ESPAÇAMENTO DE 1M E DE 0,5M COM OS RESULTADOS OBTIDOS EM ENSAIO REALIZADO NO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNICAMP, EM CAMPINAS...	70
FIGURA 61 RESULTADOS DE ENSAIOS CPT, SCPT E <i>CROSS-HOLE</i> REALIZADOS NO CAMPO EXPERIMENTAL DA EESC – USP (GIACHETI ET AL, 2006A). ....	72
FIGURA 62 RESULTADOS DE ENSAIOS CPT, SCPT E <i>CROSS-HOLE</i> REALIZADOS NO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNESP – BAURU (GIACHETI ET AL, 2006B).....	75
FIGURA 63 RESULTADOS DOS ENSAIOS <i>CROSS-HOLE</i> E SCPT REALIZADOS NO CAMPO EXPERIMENTAL DE CAMPINAS (GIACHETI ET AL, 2007).....	77

FIGURA 64 POSIÇÃO DOS FUROS DOS ENSAIOS REALIZADOS NO CAMPO EXPERIMENTAL DA EESC – USP, EM SÃO CARLOS/SP.....	79
FIGURA 65 EXEMPLOS DE ONDAS REGISTRADAS NO ENSAIO DH1 REALIZADO NO CAMPO EXPERIMENTAL DA EESC – USP, EM SÃO CARLOS. ....	81
FIGURA 66 PERFIS DE $Q_c$ , $R_f$ E $V_s$ OBTIDOS NO CAMPO EXPERIMENTAL DA EESC – USP, EM SÃO CARLOS. ....	82
FIGURA 67 POSIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS NO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNESP, EM BAURU/SP. ....	83
FIGURA 68 SINAIS OBTIDOS NO ENSAIO DH1, SEM FILTRO, COM FREQUÊNCIA DE AQUISIÇÃO DE 40KHZ, REALIZADO NO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNESP – BAURU. ....	85
FIGURA 69 SINAL OBTIDO NO ENSAIO DH4, REALIZADO NO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNESP – BAURU, A 20 METROS DE PROFUNDIDADE COM FILTRO PASSA BAIXO DE 400HZ (BUTTERWORTH DE ORDEM 3) E SEM FILTRO. ....	86
FIGURA 70 SINAIS OBTIDOS NO ENSAIO DH4, REALIZADO NO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNESP – BAURU, FILTRADOS COM FILTRO PASSA BAIXO DE 400HZ (BUTTERWORTH DE ORDEM 3).....	87
FIGURA 71 PERFIS DE $Q_c$ , $R_f$ , $V_s$ OBTIDOS EM ENSAIOS NO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNESP, EM BAURU. ....	88
FIGURA 72 POSIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS NO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNICAMP, EM CAMPINAS/SP. ...	89
FIGURA 73 SINAIS OBTIDOS NO ENSAIO DH1, REALIZADO NO CAMPO EXPERIMENTAL DE CAMPINAS, FILTRADOS COM FILTRO BUTTERWORTH PASSA BAIXO DE ORDEM 3 COM FREQUÊNCIA DE CORTE DE 400HZ. ....	90
FIGURA 74 PERFIS DE $Q_c$ , $R_f$ E $V_s$ OBTIDOS NO CAMPO EXPERIMENTAL DA UNICAMP, CAMPINAS.....	92

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. IMPORTÂNCIA DA PESQUISA.....	1
1.2. OBJETIVO.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	2
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
2.1. AVALIAÇÃO DA RIGIDEZ DO SOLO.....	4
2.1.1. <i>Comportamento não linear do solo</i> .....	4
2.1.2. <i>Degradação da rigidez</i> .....	5
2.1.3. <i>Determinação de <math>G_0</math> a partir de <math>V_s</math></i> .....	7
2.2. ONDAS SÍSMICAS .....	8
2.2.1. <i>Ondas de corpo</i> .....	8
2.2.2. <i>Ondas de superfície</i> .....	10
2.2.3. <i>Aplicação da velocidade das ondas sísmicas</i> .....	11
2.3. DETERMINAÇÃO DE $V_s$ EM CAMPO .....	13
2.3.1. <i>Cross-hole</i> .....	14
2.3.2. <i>Down-hole</i> .....	15
2.3.3. <i>Ensaio híbrido</i> .....	16
2.3.4. <i>Cross-hole versus Down-hole</i> .....	17
2.4. INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO SÍSMICO DOWN-HOLE .....	20
2.4.1. <i>Análise dos sinais</i> .....	20
2.4.2. <i>Filtro</i> .....	23
2.4.3. <i>Método do intervalo de tempo</i> .....	24
2.5. MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DE $V_s$ .....	26
2.5.1. <i>Método do primeiro tempo de chegada</i> .....	26

2.5.2.	<i>Método Cross-over</i> .....	28
2.5.3.	<i>Método Cross-correlation</i> .....	30
2.5.4.	<i>Cross-over versus Cross-correlation</i> .....	32
2.6.	EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS PARA SÍSMICA DOWN-HOLE.....	33
2.6.1.	<i>Transdutores sísmicos</i> .....	33
2.6.2.	<i>Fonte sísmica</i> .....	36
2.6.3.	<i>Aquisição de dados e Trigger</i> .....	39
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>40</b>
3.1.	GEOFONES .....	40
3.1.1.	<i>Calibração dos geofones</i> .....	41
3.2.	PONTEIRA SÍSMICA.....	42
3.2.1.	<i>Instalação dos geofones na ponteira</i> .....	43
3.2.2.	<i>Ensaio para avaliar a resposta dos geofones quando instalados na ponteira</i> .....	44
3.3.	TESTE DE ESTANQUEIDADE DA PONTEIRA .....	50
3.4.	FONTE SÍSMICA .....	50
3.4.1.	<i>Ondas geradas com as fontes sísmicas posicionadas atrás do equipamento de cravação do piezocone</i> .....	51
3.4.2.	<i>Ondas geradas com as fontes sísmicas posicionadas à frente do equipamento de cravação do piezocone</i> .....	54
3.4.3.	<i>Influência da distância entre a fonte e o furo nos resultados</i> .....	54
3.5.	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	57
3.6.	TRIGGER .....	59
3.7.	EQUIPAMENTO DE CRAVAÇÃO DA PONTEIRA .....	60
3.8.	EXECUÇÃO DO ENSAIO.....	61
3.8.1.	<i>Orientação dos geofones</i> .....	62
3.8.2.	<i>Intensidade de aplicação dos golpes</i> .....	63
3.9.	INTERPRETAÇÃO DOS DADOS .....	64
3.9.1.	<i>Software desenvolvido</i> .....	64
3.9.2.	<i>Cross-Correlation versus Cross-Over</i> .....	65

3.9.3.	<i>Pseudo intervalo de tempo versus intervalo verdadeiro</i> .....	67
3.9.4.	<i>Filtro</i> .....	67
3.9.5.	<i>Espaçamento entre os geofones de 1,0m versus 0,5m</i> .....	69
<b>4.</b>	<b>CAMPOS EXPERIMENTAIS INVESTIGADOS</b> .....	<b>71</b>
4.1.	CAMPO EXPERIMENTAL DA EESC, USP – SÃO CARLOS .....	71
4.1.1.	<i>Descrição da geologia</i> .....	71
4.1.2.	<i>Resultados de ensaios sísmicos</i> .....	71
4.2.	CAMPO EXPERIMENTAL DA UNESP – BAURU.....	73
4.2.1.	<i>Descrição da geologia</i> .....	73
4.2.2.	<i>Resultados de ensaios sísmicos</i> .....	73
4.3.	CAMPO EXPERIMENTAL DA UNICAMP – CAMPINAS .....	76
4.3.1.	<i>Descrição da geologia</i> .....	76
4.3.2.	<i>Resultados de ensaios sísmicos</i> .....	76
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISE</b> .....	<b>78</b>
5.1.	CAMPO EXPERIMENTAL DA EESC, USP – SÃO CARLOS .....	78
5.1.1.	<i>Análise das velocidades das ondas S</i> .....	79
5.2.	CAMPO EXPERIMENTAL DA FEB, UNESP – BAURU .....	82
5.2.1.	<i>Análise das velocidades das ondas S</i> .....	84
5.3.	CAMPO EXPERIMENTAL DA UNICAMP – CAMPINAS .....	88
5.3.1.	<i>Análise das velocidades das ondas S</i> .....	91
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>93</b>
6.1.	QUANTO AO SISTEMA DESENVOLVIDO .....	93
6.2.	QUANTO A EXECUÇÃO DO ENSAIO .....	94
6.3.	QUANTO A INTERPRETAÇÃO DOS DADOS.....	95
6.4.	SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE.....	96
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>97</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

O objetivo do ensaio sísmico *down-hole* é a determinação da velocidade de propagação das ondas S no maciço ( $V_s$ ) e, com ela, através de uma aplicação direta da Teoria da Elasticidade, determinar o módulo de cisalhamento máximo do solo ( $G_0$ ), que é reconhecido como um parâmetro geotécnico de referência, uma vez que é a máxima rigidez que o solo pode apresentar (Ferreira, 2003). Sua determinação é indispensável em análises do comportamento dinâmico dos solos e fundações.

No início da década de 80, fruto de uma iniciativa da empresa *Fulgro Inc.* com a *University British of Columbia (UBC)*, foram acrescentados transdutores sísmicos na ponteira padrão do CPT (Robertson et al, 1986), possibilitando a realização em simultâneo do tradicional CPT e da sísmica *down-hole*. Trata-se de um ensaio híbrido denominado ensaio de penetração do cone sísmico (SCPT) de rápida execução e de custo muito inferior ao do tradicional ensaio sísmico *cross-hole*. A ponteira cravada, além de dispensar a execução de um pré-furo e de seu revestimento, mantém um contato muito íntimo com o solo, fundamental para boa execução do ensaio sísmico *down-hole*.

O CPT e o *down-hole* são ensaios complementares, uma vez que no ensaio sísmico determina-se o módulo de cisalhamento máximo, parâmetro de compressibilidade do solo, complementando os resultados do ensaio CPT. Os dados obtidos no CPT aliados aos obtidos no *down-hole* permitem a estimativa da relação não linear da tensão versus deformação do solo por uma hipérbole modificada (Mayne e Schneider, 2000). Além disso, Giacheti (2001)

destaca o potencial que a razão  $G_0/q_c$  possui para caracterização de solos tropicais. Esta razão relaciona o comportamento do solo a pequeníssimas deformações com a grandes deformações, estando ligado ao grau de cimentação do solo.

Um problema atual para realização de ensaios SCPT no Brasil é que os equipamentos disponíveis para execução de ensaios sísmicos atualmente no Brasil são em sua maioria importados. Isto tem causado dificuldades para realização destes ensaios, devido ao alto custo, além da demora para consertos e calibrações, uma vez que existe dependência de importação de peças e serviços. Como consequência, há carência na literatura de resultados de ensaios sísmicos em solos tropicais.

## 1.2.OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema para realização do ensaio sísmico *down-hole* para utilização em conjunto com o ensaio CPT, definindo os equipamentos mais adequados para realização do ensaio e a metodologia mais apropriada para execução do ensaio e interpretação dos resultados.

## 1.3.ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está organizada em seis capítulos: o primeiro, "Introdução", destaca a importância da pesquisa e seu objetivo; o segundo, "Revisão da literatura", apresenta uma síntese da literatura consultada sobre o assunto; o terceiro, "Materiais e métodos", trata dos equipamentos utilizados, dos ensaios com eles realizados, da execução do ensaio e da interpretação dos dados; o quarto, "Campos experimentais investigados", descreve, sucintamente, a geologia do local e apresenta os resultados de ensaios sísmicos previamente realizados; o quinto, "Resultados", apresenta os resultados obtidos com o sistema

desenvolvido e os compara aos resultados dos ensaios sísmicos disponíveis; o sexto, "Conclusão", apresenta as conclusões e sugestões para continuidade desta pesquisa

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. AVALIAÇÃO DA RIGIDEZ DO SOLO

#### 2.1.1. Comportamento não linear do solo

É reconhecida a não linearidade da relação tensão – deformação dos solos, comportamento este ilustrado na Figura 1, que apresenta uma relação típica para os geomateriais. Nota – se que a rigidez, representada pela inclinação da curva, diminui com o aumento da deformação axial.

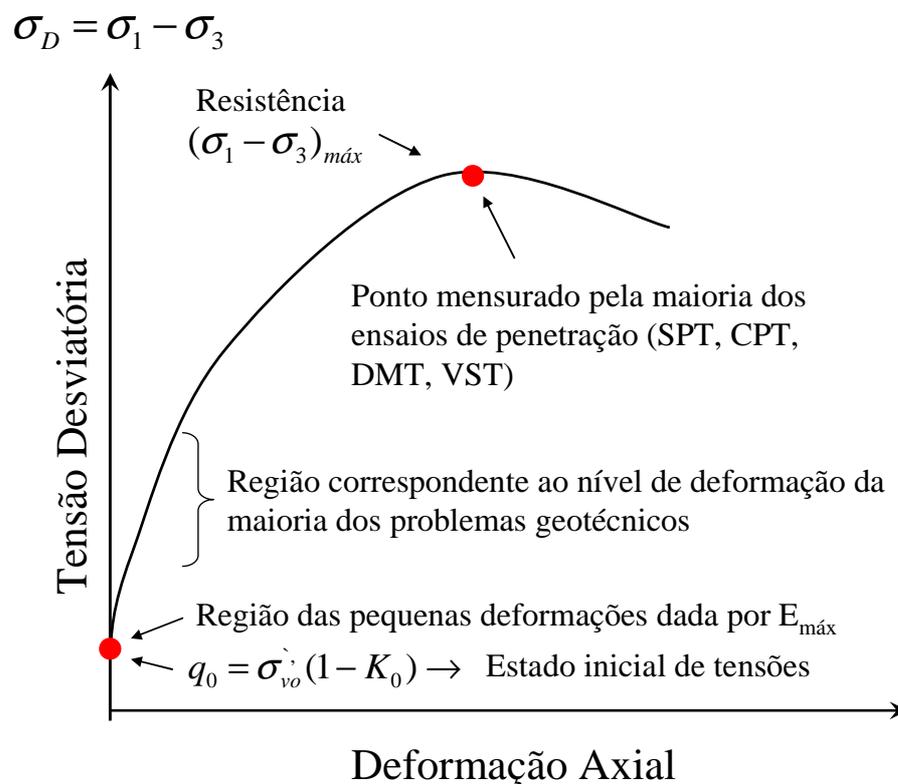


Figura 1 Relação não linear da curva tensão-deformação (adaptado de Mayne e Schneider, 2000).

Segundo Campanella e Robertson (1984) é possível estimar esta relação através de um ajuste hipérbolico conhecendo a resistência ao cisalhamento do solo e o módulo de rigidez máximo (equação 1). Este ajuste é uma maneira simples de degradar a rigidez  $G_0$ , referente às pequenas deformações, aos valores de rigidez secantes  $E_s$  correspondentes aos níveis de deformação de trabalho. Estes parâmetros podem ser obtidos através do ensaio de penetração do cone sísmico, descrito adiante (Mayne e Schneider, 2000).

$$\tau = \frac{\gamma}{\frac{1}{G_0} + \frac{\gamma}{\tau_{máx}}} \quad (\text{eq. 1})$$

Onde  $\gamma$  representa as deformações cisalhantes e  $\tau$  a tensão de cisalhamento atuante.

### 2.1.2. Degradação da rigidez

Os fatores que, reconhecidamente, mais afetam a rigidez dos solos são: (a) nível de deformação, (b) estado de tensões, (c) arranjo estrutural e (d) história de tensões (Mayne e Schneider (2000), Sully e Campanella. (1995) e Sully e Campanella (1992)).

Hardin e Drnevich (1972) citados por Scheffer (2005), realizaram ensaios cíclicos em corpos de prova vazados de areia limpa e solo coesivo, onde observaram que o nível de deformações, bem como o estado de tensão e o índice de vazios foram os fatores mais influentes na rigidez de ambos os tipos de solo. Os mesmos autores demonstraram que, em argilas, o módulo de deformabilidade é função principalmente da tensão efetiva. Já Sully e Campanella. (1992), sugerem que a rigidez seja muito mais sensível ao arranjo estrutural do solo.

É notável a diminuição da rigidez com o aumento do nível de deformação do solo,

sendo esta relação conhecida como *curva de degradação da rigidez*. A Figura 2 ilustra uma curva típica.

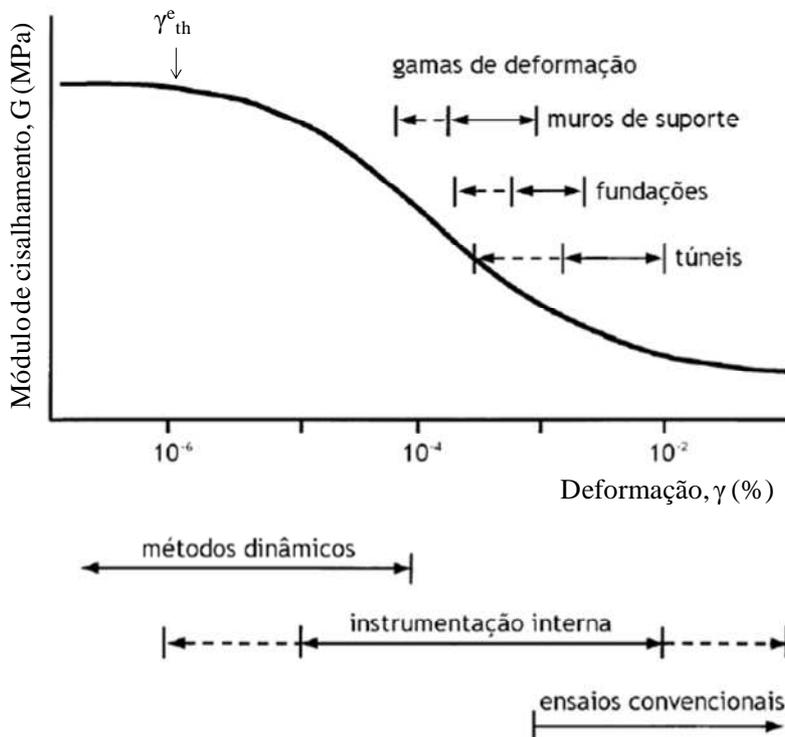


Figura 2 Curva de degradação da rigidez (adaptado de Ferreira, 2003)

Para pequenas deformações, na ordem de  $10^{-6}$  (%), os solos apresentam comportamento linear e a rigidez assume um valor máximo. A partir de um determinado nível de deformação limite ( $\gamma_{th}^e$ ) os solos passam a apresentar o típico comportamento não – linear e rigidez passa a diminuir com o aumento dos níveis de deformação.

Esta deformação limite pode ser determinada a partir da análise da curva de degradação da rigidez. A Figura 3 apresenta as tendências das curvas de degradação da rigidez como função do índice de plasticidade (Vucetic e Dobry, 1991) com os resultados de ensaios de coluna ressonante obtidos nos trabalhos de Borden et al. (1996) e Hoyos e Macari, (1999) ambos citados por Schneider et al. (1999). Este autor destaca que o valor limite  $\gamma_{th}^e$

variou entre  $6 \times 10^{-6} \%$  e  $2 \times 10^{-2} \%$ .

Estudos realizados por Santamarina e Fam (1999) e Santamarina e Aloufi (1999), citados por Schneider et al. (1999) concluem que  $\gamma_{th}^e$  é função do inverso do módulo de cisalhamento e da tensão de confinamento elevado a 2/3. Segundo Schneider et al. (1999), um incremento na tensão de confinamento, além de aumentar  $\gamma_{th}^e$ , também promove um aumento no módulo de cisalhamento máximo.

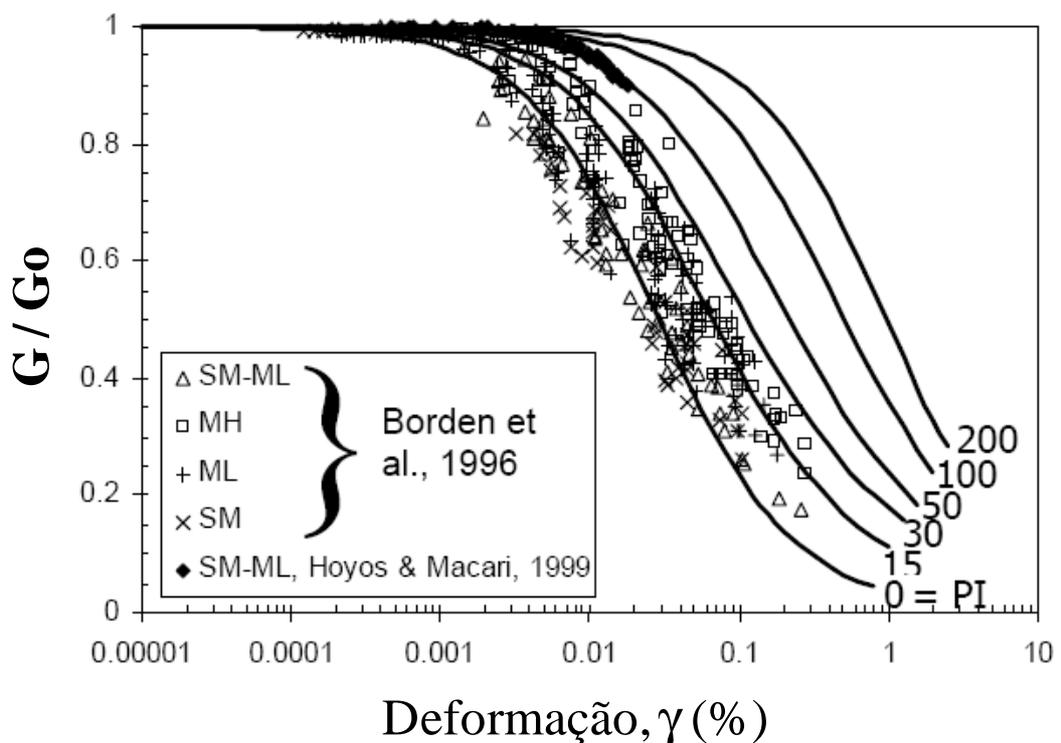


Figura 3 Curvas de degradação da rigidez obtidas em diferentes trabalhos (Schneider et al., 1999).

### 2.1.3. Determinação de $G_0$ a partir de $V_s$

Para pequenos níveis de deformação, o solo pode ser assumido como um meio elástico-linear, assim, a partir de uma aplicação direta da Teoria da Elasticidade,  $G_0$  é determinado a partir da velocidade de propagação das ondas S ( $V_s$ ) representada pela equação

2, onde  $\gamma$  é o peso específico do solo e  $g$  é a aceleração da gravidade.

$$Go = \frac{\gamma}{g} \cdot Vs^2 \quad (\text{eq. 2})$$

Esta equação é válida para qualquer tipo de solo. Ressalta-se que as ondas S devem promover níveis de deformação inferiores ao limite  $\gamma_{th}^c$ .

O nível de deformação gerado no solo pelas ondas S pode ser calculado a partir de  $V_s$  e da velocidade de vibração das partículas ( $u$ ) através da equação 3, apresentada por White (1965), citado por Robertson et al. (1986).

$$\gamma = \frac{u}{Vs} \quad (\text{eq. 3})$$

## 2.2. ONDAS SÍSMICAS

Uma onda sísmica é uma onda que se propaga através da Terra como consequência de uma perturbação (sismo ou explosão por exemplo). São classificadas em ondas de superfície e ondas de corpo.

### 2.2.1. Ondas de corpo

As ondas de corpo caracterizam-se por transportar energia cinética e potencial através da matéria durante sua propagação, que ocorre em meios deformáveis resultante de pequeníssimos deslocamentos do meio em relação a sua posição original (Sampaio, 1997).

As ondas de corpo assumem duas formas de movimento das partículas, de dilatação e de distorção, sendo classificadas em: ondas de compressão, primárias ou ondas P ou ondas de

corte, secundárias ou ondas S.

As ondas P são ondas longitudinais, apresentando vibração das partículas paralela a direção de propagação, observa-se alternadamente compressão seguida de distensão, impondo aos corpos sólidos alteração de volume sem alterar a sua forma. Caracterizam-se por grandes velocidades, altas frequências e pequenas amplitudes.

Essas ondas se propagam tanto no solo como na água. No caso do solo estar saturado, essas ondas tendem a se propagar pela água ao invés do solo. Dessa forma, a velocidade das ondas P em solos saturados não refletem as propriedades elásticas do meio (Barros, 1997).

A velocidade das ondas P pode ser utilizada para avaliar o Módulo Confinado do solo e como método alternativo para avaliação da saturação em corpos de prova (Viana da Fonseca et al., 2002 citado por Ferreira, 2003).

As ondas S são ondas transversais onde as partículas de solo vibram perpendicularmente a direção de propagação da onda, provocando o efeito de cisalhamento no solo, alterando sua forma sem, contudo, alterar o volume.

São mais lentas, possuem menor frequência e maior amplitude que as ondas P. Sendo capazes de se propagar apenas em meio sólido, pois a água não oferece resistência ao cisalhamento, sua velocidade fornece informações sobre a rigidez do solo também para solos saturados.

Em solos saturados, as ondas P apresentam velocidade maior que o dobro da velocidade das ondas S, sendo fácil a distinção entre as duas ondas. Entretanto, para solos não saturados a diferença entre as velocidades pode ser pequena e a distinção entre as ondas pode

ser muito difícil (Butcher et al., 2005).

A diferença mais significativa entre as ondas S e P é que as ondas S podem ter a sua polaridade invertida. Distingue-se duas formas de movimento dependendo da direção da polarização: as ondas SH (horizontalmente polarizadas) e as ondas SV (verticalmente polarizadas) (Ferreira, 2003). A Figura 4 ilustra o modo de propagação dessas ondas.

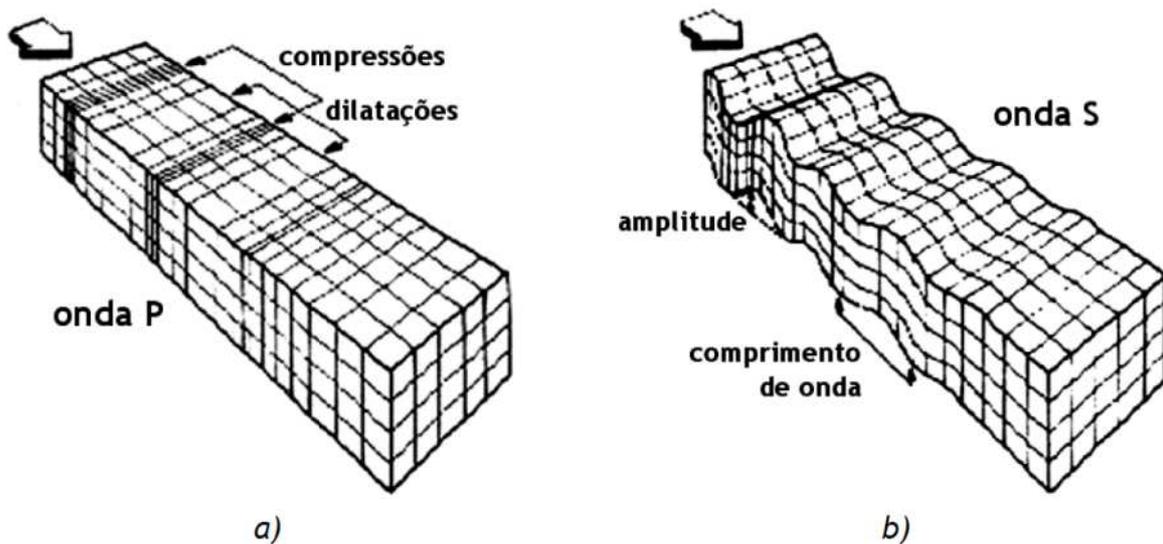


Figura 4 Esquema de propagação das ondas P (a) e ondas S (b) (Ferreira, 2003).

### 2.2.2. Ondas de superfície

Caracterizam-se por se propagarem em uma estreita camada da superfície da crosta terrestre (Timoshenko e Goodier, 1970 citado por Ferreira, 2003), assumindo duas configurações ondas Rayleigh ou ondas R e em ondas Love ou ondas L.

Nas ondas Rayleigh, as partículas se movimentam segundo uma trajetória elíptica, com eixo vertical igual a duas vezes o eixo horizontal sendo que no ponto mais alto das elipses a vibração das partículas é contrária à propagação da onda (Scheffer, 2005). As ondas R decaem exponencialmente com a profundidade (Ferreira, 2003).

As ondas Love se propagam de maneira semelhante as ondas S, porém, a vibração das partículas ocorrem apenas na direção horizontal. Trata-se uma onda Rayleigh propagando em material estratificado (Scheffer, 2005).

As ondas de superfície tem aplicação mais restrita que as ondas de corpo. Destaca-se o ensaio sísmico *Spectral Analysis of Surface Waves* (SASW) que mede a velocidade de propagação das ondas Rayleigh ( $V_r$ ) e calcula  $V_s$  e  $V_p$  a partir da velocidade mensurada (Bonito et al, 2002). A Figura 5 apresenta o esquema de propagação das ondas de superfície.

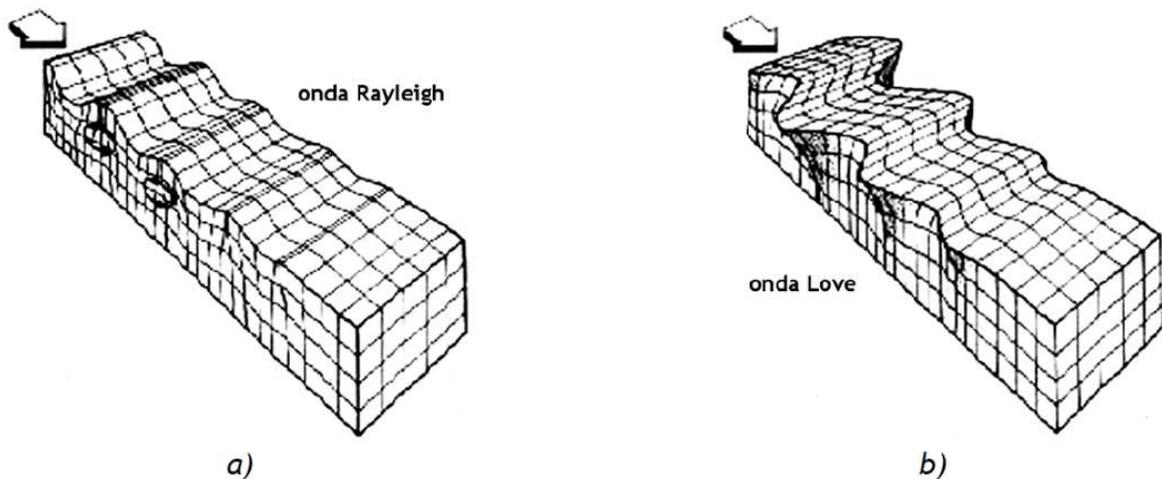


Figura 5 Esquema de propagação das ondas R (a) e ondas L (b) (Ferreira, 2003).

### 2.2.3. Aplicação da velocidade das ondas sísmicas

A propagação das ondas de corpo é independente de fatores secundários, como a história de tensões do solo, relacionando-se estritamente com a estrutura e com as condições de estado. Tendo em vista os baixíssimos níveis de deformação com que essas ondas se propagam, é plausível assumir o solo como um meio elástico, homogêneo e isotrópico, possibilitando a aplicação da Teoria da Elasticidade e da Propagação de Ondas.

A velocidade de propagação das ondas P está relacionada com o Módulo Confinado

(M) através da equação 4, resultante de uma aplicação direta da teoria da elasticidade, em que  $\gamma$  é o peso específico do solo e  $g$  a aceleração da gravidade.

$$M = \frac{\gamma}{g} \cdot V_p^2 \quad (\text{eq. 4})$$

$V_p$  também está relacionada com o módulo de elasticidade ( $E$ ) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) através da equação 5. Segundo Ferreira (2003), para níveis muito pequenos de deformação, pode-se adotar o valor de 0,2 para o coeficiente de Poisson.

$$V_p = \sqrt{\frac{E \cdot g}{\gamma} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu) \cdot (1+\nu)}} \quad (\text{eq. 5})$$

A aplicação mais importante da velocidade das ondas sísmicas é a relação entre a velocidade da onda S ( $V_s$ ) com o módulo de cisalhamento máximo ( $G_0$ ) (equação 2).

Segundo Campanella e Stewart., 1992, a velocidade das ondas S são fortemente afetadas pela tensão de confinamento, tipo de solo e densidade. A velocidade das ondas S também pode ser aplicada para estimar a susceptibilidade a liquefação de areias não cimentadas (Youd et al. 2001, citado por Butcher, 2005). A cimentação entre as partículas de solo, comum em solos tropicais, promovem um aumento na rigidez do maciço, sendo um fator influente na velocidade de propagação das ondas S (De Mio, 2005).

A Figura 6 apresenta as relações entre  $V_r/V_s$  e  $V_p/V_s$  em função do coeficiente de Poisson. Segundo Barros (1997), considera-se  $V_r = 0,94 \cdot V_s$  em aplicações práticas pois a relação  $V_r/V_s$  é praticamente constante. Para  $\nu=0$ ,  $V_r/V_s$  é igual a 0,874 e para  $\nu=0,5$ ,  $V_r/V_s$  assume valor igual a 0,955 (Ferreira, 2003). A razão  $V_p/V_s$  está relacionada com o coeficiente

de Poisson através da equação 6.

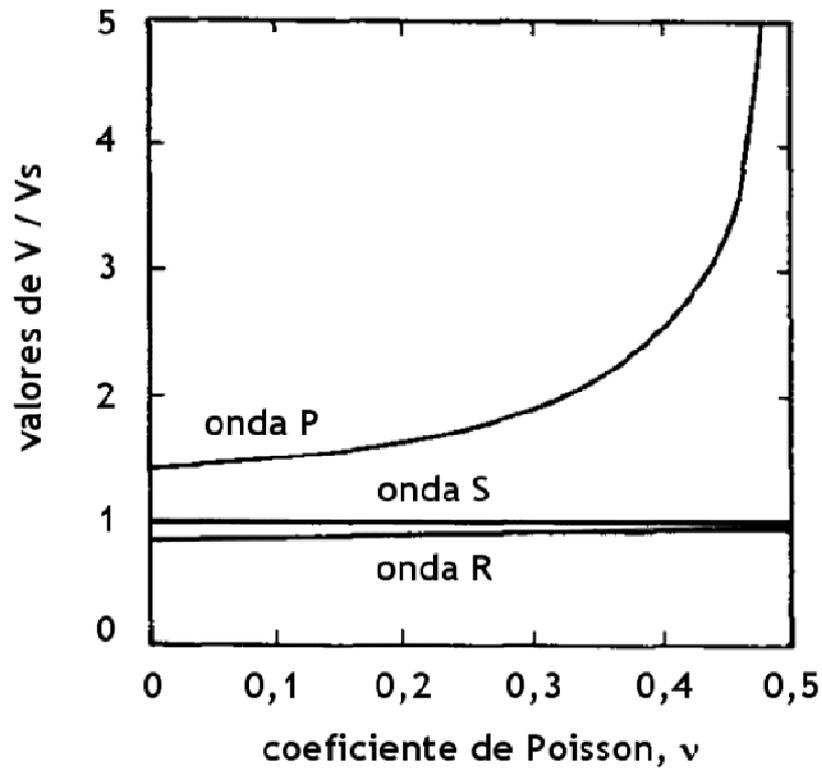


Figura 6 Relação entre o coeficiente de Poisson e as razões  $V_r/V_s$ ,  $V_p/V_s$  e  $V_s/V_s$  num meio elástico semi-infinito (Ferreira, 2003).

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2 \cdot \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2} \quad (\text{eq. 6})$$

A Figura 7 apresenta as faixas de variação das velocidades das ondas S e P para diversos materiais.

### 2.3. DETERMINAÇÃO DE $V_s$ EM CAMPO

Neste item são descritos os ensaios *cross-hole*, *down-hole* (reconhecidos ensaios sísmicos de referência) e ensaios híbridos, como o SCPT, que une o CPT com o

*down-hole* a partir da instalação de transdutores sísmicos junto a ponteira do cone. Por fim, apresentam-se comparações entre os resultados dos ensaios *down-hole* e *cross-hole*.

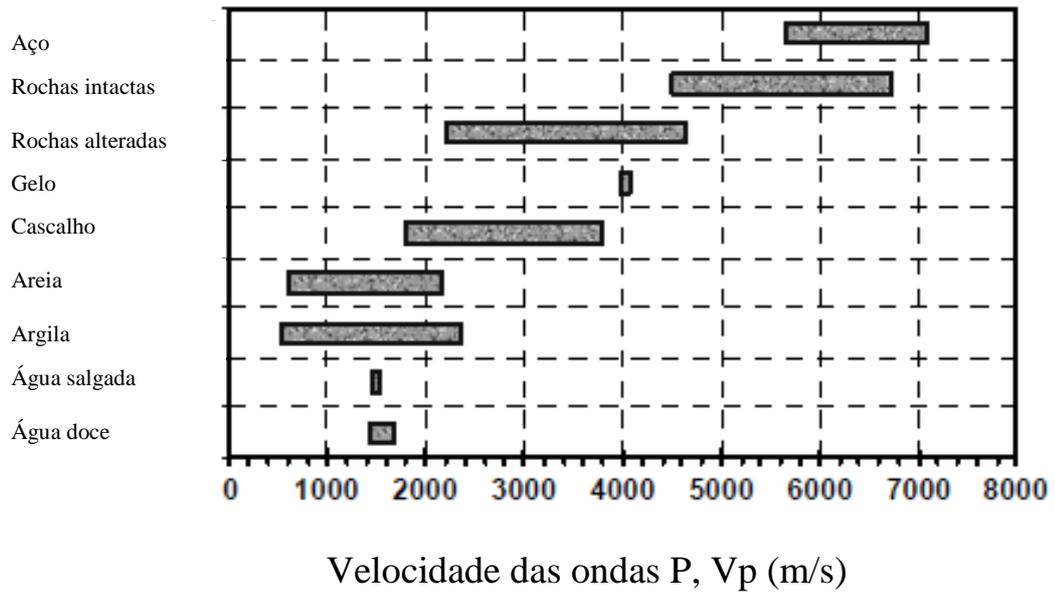
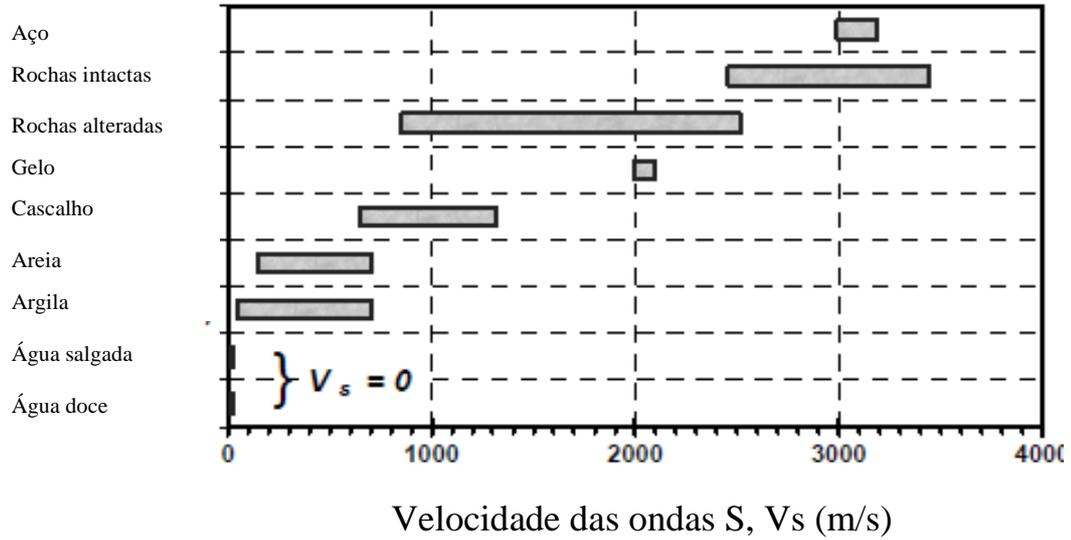


Figura 7 Faixas de variação das velocidades para diferentes materiais (apresentações de Paul Mayne).

### 2.3.1. Cross-hole

O ensaio consiste na medição do tempo de propagação das ondas sísmicas, que

seguem uma trajetória horizontal, entre dois ou mais furos. Num dos furos instala-se uma fonte sísmica e nos demais, transdutores sísmicos. Calcula-se  $V_s$  através da razão entre a distância percorrida e o tempo de propagação. Este ensaio é padronizado internacionalmente através da ASTM D4428.

A vantagem deste ensaio está na trajetória horizontal percorrida pelas ondas sísmicas, dessa forma, garante-se que a velocidade de propagação corresponde aquela camada, caso o perfil geológico seja composto de camadas horizontais.

Segundo Sully e Campanella (1995), o ensaio *cross-hole* com apenas dois furos é o ensaio sísmico menos desejável pois suas possibilidades de interpretação dos sinais são limitadas e subjetivas.

Este ensaio tem aplicação limitada devido ao elevado custo de execução e a necessidade de executar, pelo menos, dois pré-furos revestidos. Segundo Dourado et al. (1994), as dificuldades de execução do ensaio devido principalmente a manipulação de instrumentação dentro dos furos de sondagem. Robertson et al. (1986) destacam a dificuldade de realizar este ensaio em prospecções off-shore, tornando-o praticamente inviável.

### 2.3.2. Down-hole

Trata-se de uma opção econômica ao ensaio *cross-hole*. Pode ser realizado em um furo revestido ou cravando-se uma ponteira sísmica no subsolo. O ensaio consiste em determinar o tempo de propagação das ondas sísmicas geradas na superfície e captadas por um ou mais transdutores sísmicos posicionados a diferentes profundidades. Detalhes sobre a execução e interpretação deste ensaio são apresentados nos itens seguintes.

Considera-se que as ondas percorram o percurso da fonte ao receptor em trajetória linear. Stewart (1992) e Rice (1984) compararam as velocidades obtidas adotando a trajetória curva, devido a refração das ondas entre as camadas, e a linear e obteve um desvio inferior a 3%, assim, a aproximação a trajetória linear é bastante razoável. Entretanto, se o perfil geológico for estratificado com diferença acentuada de rigidez entre as camadas, deverá ser adotada a trajetória curva, definida com base na Lei de Snell.

A cravação da ponteira é preferível pois mantém um excelente contato entre o instrumento e solo circundante, possibilitando o registro de sinais com excelente qualidade (Campanella e Stewart., 1992), além de dispensar a execução de um pré-furo, agilizando e barateando o processo.

Tipicamente, este ensaio é realizado em profundidades maiores que três metros devido a grande interferência das ondas de superfície em profundidades inferiores a esta. (Butcher et al., 2005 e Campanella et al., 1994). A Figura 8 ilustra o esquema do ensaio *cross-hole* e *down-hole*.

### 2.3.3. Ensaio híbridos

Estes ensaios consistem na união de duas ou mais técnicas de ensaio, destacam-se o piezocone sísmico, o dilatômetro sísmico e o cone pressiométrico. O piezocone sísmico e o dilatômetro sísmico consistem na incorporação de transdutores sísmicos ao cone e ao dilatômetro, possibilitando a realização do ensaio sísmico *down-hole* durante interrupções na cravação do instrumento. Estes ensaios são mais econômicos e mais rápidos que os demais ensaios sísmicos, além de fornecerem um quantidade muito maior de dados. Detalhes sobre piezocone sísmico são encontrados em Campanella e Howie (2008) e em Butcher et al. (2005)

e, sobre o dilatômetro sísmico, em Marchetti et al. (2008).

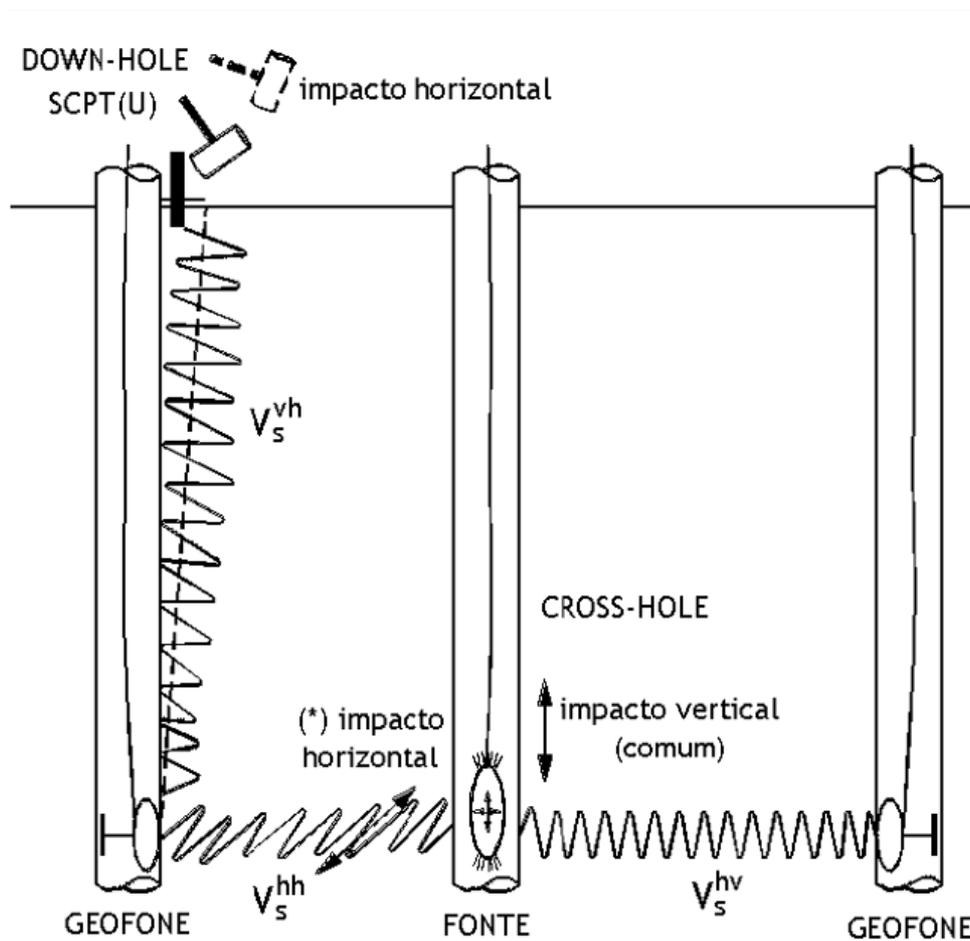


Figura 8 Esquema do ensaio *cross-hole* (Ferreira, 2003).

#### 2.3.4. Cross-hole versus Down-hole

Muitos autores compararam os resultados obtidos por estes ensaios, onde é destacada a influência da heterogeneidade do solo e de sua anisotropia nos resultados obtidos. Ferreira (2003) ressalta a possibilidade de avaliação da anisotropia e de  $K_0$  a partir dos resultados de ambos os ensaios.

Sully e Campanella (1995) comparam as velocidades das ondas S do tipo HH e HV (propagação horizontal e vibração horizontal e vertical) obtidas através do ensaio

*cross-hole* com as velocidades das ondas S do tipo VH (propagação vertical com vibração horizontal) obtidas no ensaio *down-hole*. As velocidades obtidas no ensaio *cross-hole* ( $V_s^{HV}$  e  $V_s^{HH}$ ) apresentaram a mesma ordem de grandeza, sendo ligeiramente inferiores às obtidas no ensaio *down-hole* ( $V_s^{VH}$ ).

Robertson et al., 1986, compararam os resultados obtidos através do ensaio *down-hole* com o cone sísmico com os obtidos pelo ensaio *cross-hole* em quatro campos experimentais no Canadá e na Noruega. Os autores obtiveram perfis de Vs muito semelhantes (Figuras 9 e 10).

Entretanto, Butcher e Powell (1996) obtiveram valores de Vs muito diferentes para cada ensaio nas argilas fortemente pré-adensadas de Londres. Os autores concluem que os ensaios são equivalentes para solos normalmente adensados, sendo os resultados mais discrepantes quanto mais pré-adensado for o solo. Parece que esta diferença está relacionada com a história de tensões e as características da estrutura do solo. Ressalta-se que Jacobs e Butcher (1996) obtiveram valores muito próximos de Vs pelos dois ensaios na argila de Londres.

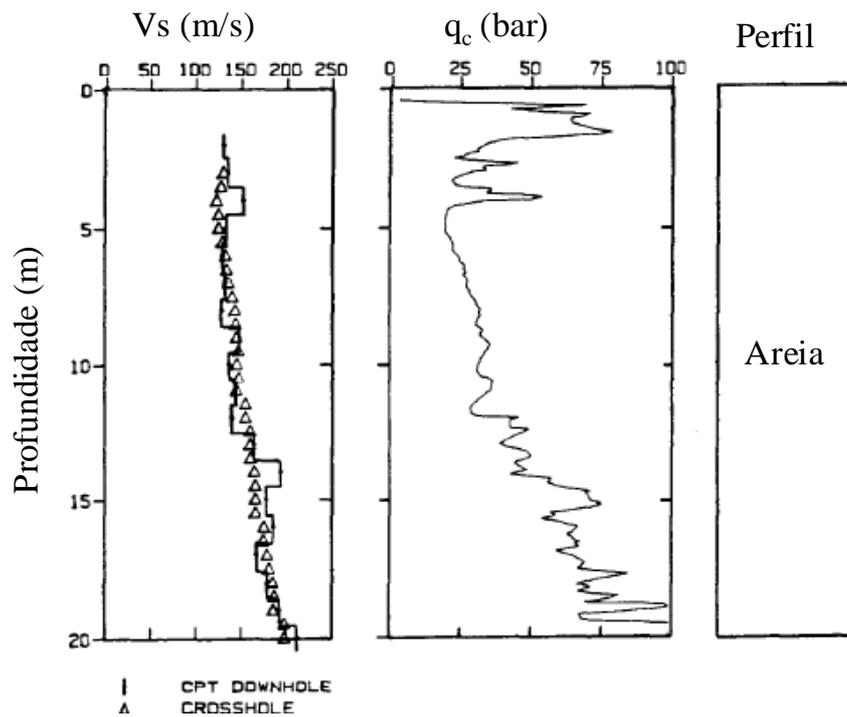


Figura 9 Comparação entre os perfis de Vs obtidos através dos ensaios *cross-hole* e *down-hole* num perfil arenoso (Robertson et al., 1986).

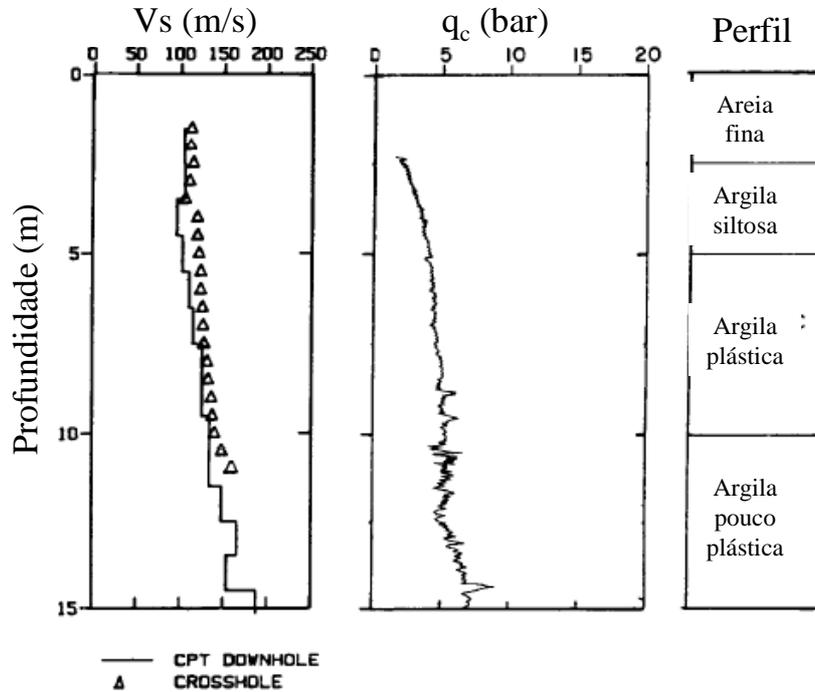


Figura 10 Comparação entre os perfis de Vs obtidos através dos ensaios *cross-hole* e *down-hole* num perfil argiloso (Robertson et al., 1986).

## 2.4. INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO SÍSMICO DOWN-HOLE

A determinação precisa de  $V_s$  é fundamental para a avaliação precisa de  $G_o$ , uma vez que a velocidade é elevada ao quadrado para o cálculo deste parâmetro. Rodrigues et al. (2006), destaca que um erro na determinação de  $V_s$  resulta em um erro duas vezes maior no valor do módulo de cisalhamento máximo e apresenta as equações abaixo:

$$\frac{\Delta G_o}{G_o} = 2 \cdot \frac{\Delta V_s}{V_s} \quad (\text{eq. 7}) ;$$

$$\frac{\Delta G_o}{G_o} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (\text{eq.8})$$

Onde  $\Delta G_o/G_o$  é o erro associado ao módulo de cisalhamento máximo,  $\Delta V_s/V_s$  é o erro associado a determinação de  $V_s$  e  $\Delta \rho/\rho$  é o erro associado a determinação da massa específica. Portanto, é de suma importância adotar uma metodologia de análise fundamentada a fim de se obter um valor preciso de  $V_s$ .

### 2.4.1. Análise dos sinais

Para determinação de  $V_s$ , não é necessário calibrar a energia de entrada nem realizar um processamento detalhado do sinal (Davies et al., 1994). Campanella e Davies (1994), afirmam que a resolução do sinal apresenta muito menor importância do que a precisão na determinação da chegada da onda S para determinação da velocidade.

Stewart (1992) dividiu um registro sísmico típico obtido com uma fonte mecânica (martelo-viga) num ensaio *down-hole* em três partes, sendo elas: a) porção praticamente horizontal, correspondente ao ruído ambiente; b) pulso principal da onda S e c) ondulações que seguem o pulso principal, cuja origem não é conhecida. Parece que estas

ondulações ocorrem devido a vibrações residuais do sensor após a excitação do pulso principal das ondas S.

Para avaliar a influência de cada parcela, o autor dividiu o sinal em pulso principal e ondulações e fez comparações no domínio das frequências para dois registros, um considerado limpo e outro distorcido, ilustrados nas Figuras 11 e 12.

Para os dois sinais estudados, Stewart (1992) destaca a suavidade e a semelhança entre os espectros do pulso principal das duas ondas e observa que as ondulações que seguem o pulso principal possuem magnitude da mesma ordem de grandeza que o pulso principal da onda S, interferindo significativamente no sinal. Portanto, o autor recomenda que se utilize apenas uma revolução completa do pulso principal da onda S para interpretação dos resultados, descartando o restante do sinal.

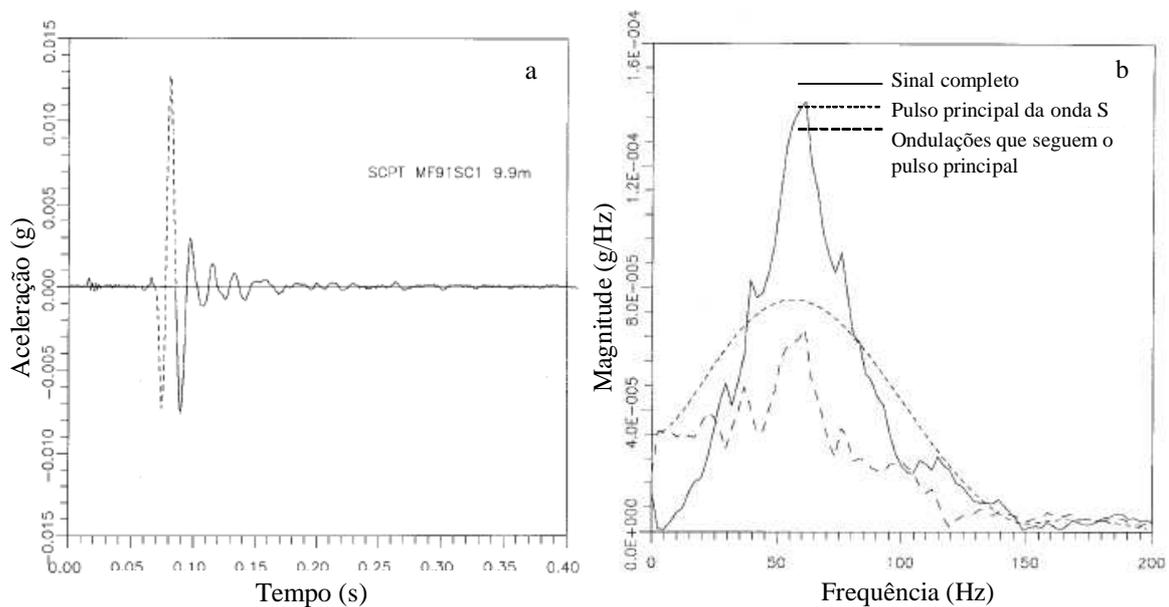


Figura 11 (a) Divisão de um sinal considerado limpo em pulso principal da onda S e ondulações e (b) comparação dos espectros dos sinais (Stewart, 1992).

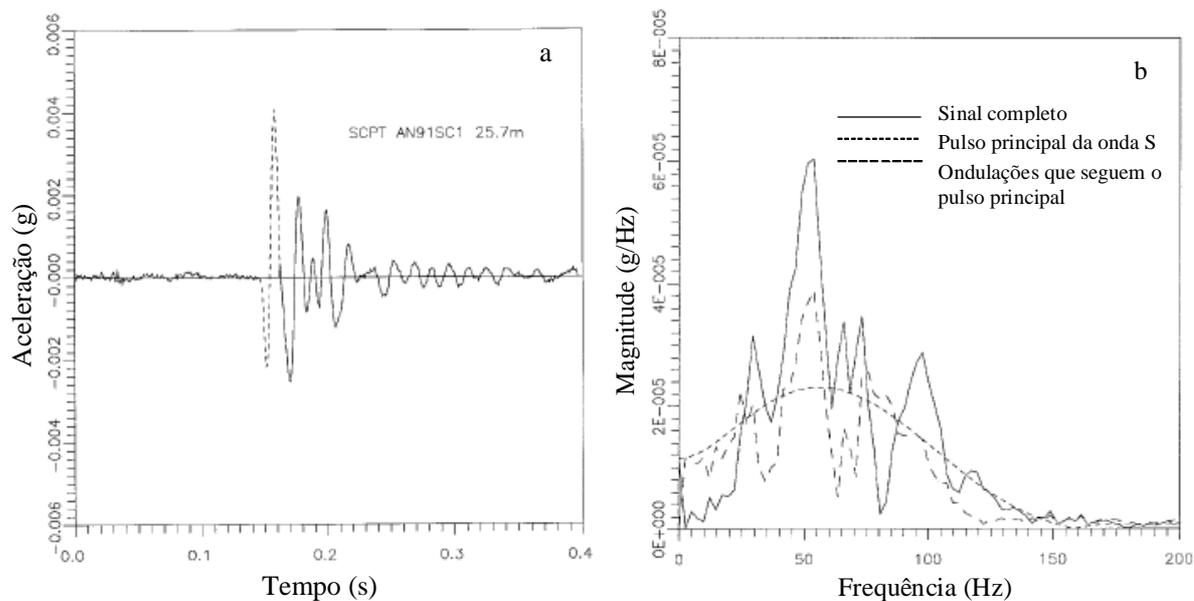


Figura 12 (a) Divisão de um sinal considerando distorcido em pulso principal da onda S e ondulações e (b) comparação dos espectros dos sinais (Stewart, 1992).

Butcher et al. (2005), recomenda uma avaliação dos sinais durante a execução do ensaio a partir da sobreposição de ondas referentes a eventos idênticos, que devem se sobrepor perfeitamente. Caso isto não ocorra, deve-se descartar o sinal registrado e repetir o evento. Os sinais visivelmente distorcidos devem ser eliminados ou incluídos na análise com cautela (Campanella et al., 1994). O mesmo autor considera suficiente o registro de quatro sinais para cada profundidade resultantes da aplicação de dois golpes em cada extremidade da viga.

A energia das ondas sísmicas diminui conforme se propagam pelo subsolo devido ao amortecimento do material, que consiste na dissipação da energia na massa de solo e devido ao amortecimento geométrico, que consiste no espriamento da energia (Davies et al., 1994). Para maiores distâncias da fonte sísmica, a identificação das ondas S passa a ser difícil. A amplificação do sinal e/ou a soma de registros obtidos em eventos idênticos são soluções para este problema.

Campanella e Stewart (1992) observaram que as ondas S apresentam energia máxima para frequências em torno de 75 Hz independente do tipo de solo e da profundidade. Também destacam que os efeitos da atenuação diminuem com o aumento da profundidade. Butcher e Powell (1996) apresentaram espectros de sinais cujo pico de energia das ondas S ocorre em torno de 40Hz, diferente do observado por Campanella e Stewart (1992).

#### 2.4.2. Filtro

O uso de filtros muitas vezes é recomendado para eliminar os ruídos que distorcem as ondas S e a interferência da ressonância dos transdutores. Em alguns casos, as ondas P também interferem no sinal das ondas S, principalmente em solos não saturados e em profundidades maiores, onde a amplitude das ondas S são próximas das ondas P devido ao efeito da atenuação (Giacheti, 2005).

A utilização de filtros analógicos podem provocar a defasagem do sinal não sendo recomendados por Hoar e Stokoe (1978), citados por Campanella et al. (1989). Entretanto, Butcher et al (2005) afirma ser indispensável a utilização de filtro analógico *anti-alias* para garantir que os registros não sejam corrompidos. Os autores destacam que os efeitos do filtro analógico sobre o sinal devem ser avaliados antes da sua utilização.

Filtros digitais podem ser utilizados sem defasagem do sinal, sendo recomendado por Campanella e Stewart (1992). Os autores recomendam ainda uso de filtro passa cima de 40Hz e passa baixo de 120Hz pois é nestas frequências que as ondas S apresentam maior nível de energia.

Já Sully e Campanella (1995), recomendam a aplicação de filtro em intervalo definido a partir do estudo do espectro dos sinais, onde se seleciona intervalo que apresenta a

maior energia. Estes autores utilizaram filtro passa-baixo de 300Hz para interpretação dos dados destacando que a energia das ondas S se encontram entre 20 Hz e 250 Hz.

O registro dos sinais sem a geração de ondas sísmicas é útil para avaliar o ruído ambiente, este procedimento é recomendado por Butcher et al. (2005), que ainda recomenda subir ligeiramente o cone e desligar o motor do equipamento de penetração antes da medição das ondas a fim de diminuir o ruído.

### 2.4.3. Método do intervalo de tempo

O intervalo de tempo é a diferença entre os tempos de chegada das ondas sísmicas aos transdutores em duas profundidades/distâncias da fonte (Butcher et al, 2005). A velocidade média de propagação das ondas S é dada pela equação 9, onde as distâncias  $L_1$  e  $L_2$ , ilustradas nas Figuras 13 e 14.

$$V_s = \frac{L_2 - L_1}{T_2 - T_1} \quad (\text{eq. 9})$$

O intervalo de tempo pode ser determinado utilizando dois ou mais transdutores posicionados em profundidades diferentes (intervalo verdadeiro de tempo) ou utilizando apenas um transdutor posicionado em diferentes profundidades sucessivamente (pseudo-intervalo de tempo) (Butcher et al., 2005). A determinação do pseudo intervalo de tempo é apresentada na Figura 13 e a do intervalo verdadeiro, na Figura 14.

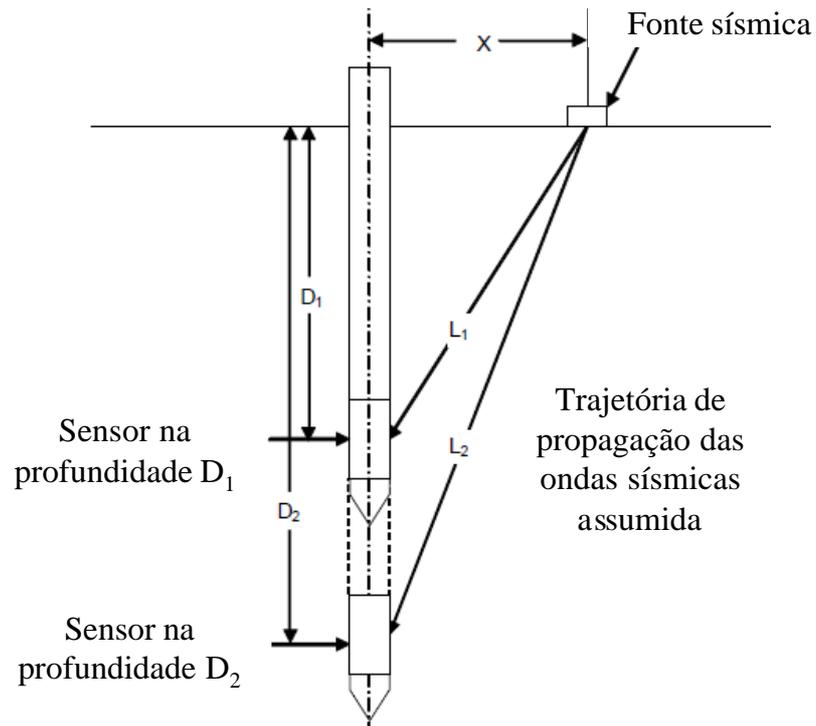


Figura 13 Esquema do método do intervalo para o cálculo de  $V_s$  com o pseudo intervalo de tempo (Butcher et al., 2005).

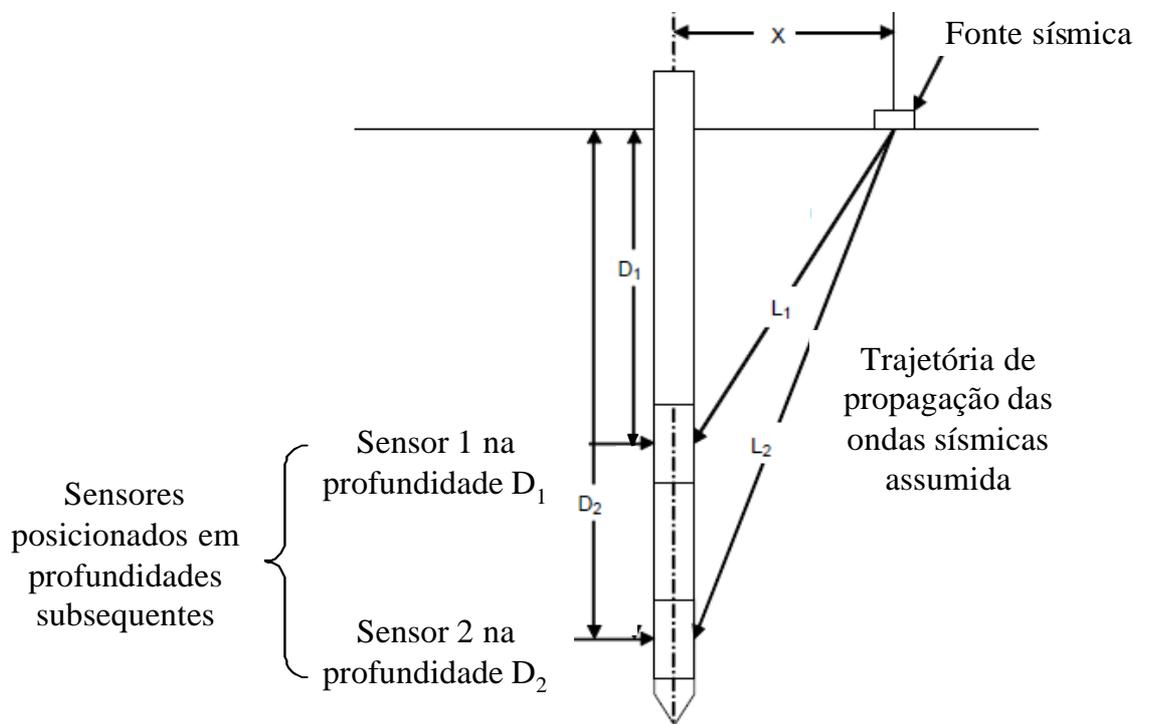


Figura 14 Esquema do método do intervalo para o cálculo de  $V_s$  com o intervalo verdadeiro de tempo (adaptado de Butcher et al., 2005).

Para o emprego do intervalo verdadeiro de tempo, usualmente são utilizados dois transdutores espaçados em 0,5m ou 1,0m. Este procedimento elimina erros devido a imprecisões no dispositivo de *trigger*, variações nas ondas geradas e imprecisões na leitura da profundidade (uma vez que são registrados sinais em diferentes profundidades para um mesmo evento), e requer a utilização de transdutores sísmicos idênticos (Butcher et al., 2005). Já utilização do pseudo-intervalo de tempo, requer um *trigger* repetitivo aliado a uma fonte sísmica capaz de gerar ondas sísmicas idênticas. As Figuras 15 e 16 apresentam a comparação de resultados obtidos com os dois tipos distintos de intervalos de tempo.

Rice (1984), estudou detalhadamente a comparação entre os resultados empregando o intervalo verdadeiro e o pseudo intervalo e obteve desvio inferior a 1,5%, o que indica que os métodos são equivalentes desde que o *trigger* e as ondas geradas sejam repetitivos. Entretanto, caso não se tenha um *trigger* adequado, a utilização do pseudo intervalo não é confiável.

## 2.5. MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DE $V_s$

### 2.5.1. Método do primeiro tempo de chegada

A velocidade de propagação da onda sísmica é calculada adotando o ponto de chegada da onda S ou um ponto notável, como um pico por exemplo, como referência do tempo de chegada. Trata-se de uma técnica puramente visual, sendo muito subjetiva e com alta dependência da qualidade do sinal. Os erros cometidos podem ser grosseiros, especialmente quando se trata de pequenas distâncias entre a fonte e os receptores (Sully e Campanella, 1995).

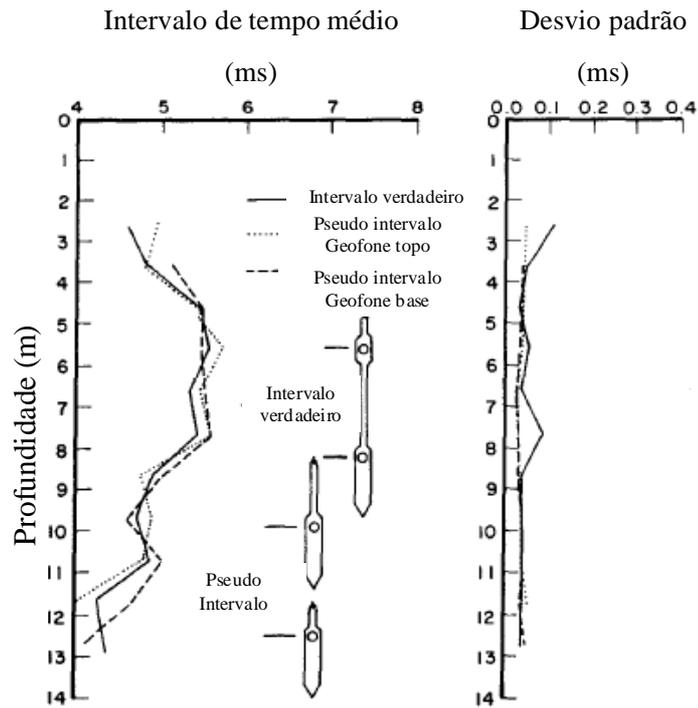


Figura 15 Comparação entre os resultados obtidos com intervalo verdadeiro e com pseudo intervalo de tempo (Rice, 1984).

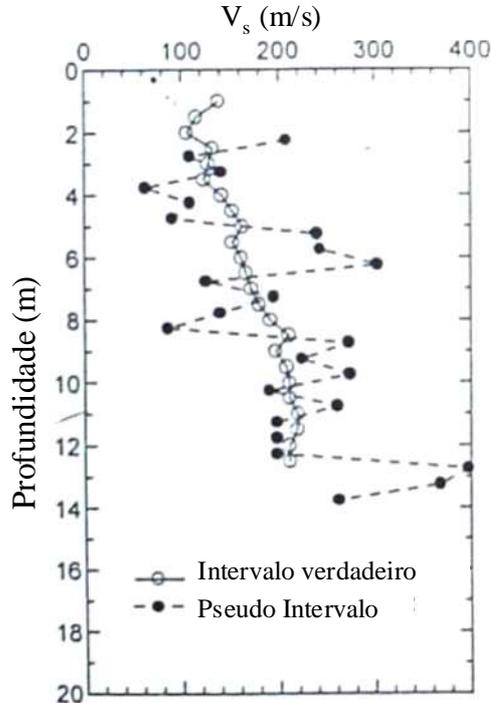


Figura 16 Comparação entre os resultados obtidos com intervalo verdadeiro e com pseudo intervalo de tempos (Butcher e Powell, 1996).

Entretanto, Sully e Campanella (1995) citam bons resultados obtidos com emprego deste método e destacam que sua aplicação é confiável desde que os sinais apresentem excelente qualidade sem praticamente haver ruído.

### 2.5.2. Método Cross-over

O método consiste em sobrepor dois sinais, registrados a mesma profundidade, com polaridades opostas obtidas através da aplicação de golpes em extremidades opostas da fonte sísmica. Não é possível aplicar este método caso se utilize uma fonte explosiva, pois não haverá meios de se produzir ondas com polaridades reversas.

O cruzamento entre as ondas é a referência do tempo de chegada. Diversos autores como por exemplo Butcher et al. (2005) e Campanella e Stewart. (1992), sugerem utilizar o primeiro cruzamento por ser um ponto facilmente identificável e não sofrer o efeito da atenuação do sinal. A Figura 17 apresenta a aplicação deste método.

Este método considera apenas a informação de um ponto de todo o sinal registrado e não pode ser aplicado caso ocorra distorção no sinal na região do cruzamento ou haja um deslocamento relativo entre as ondas (Campanella e Stewart, 1992). A Figura 18 mostra uma situação em que este método pode ser aplicado e a Figura 19, ilustra duas situações onde este método não é aplicável.

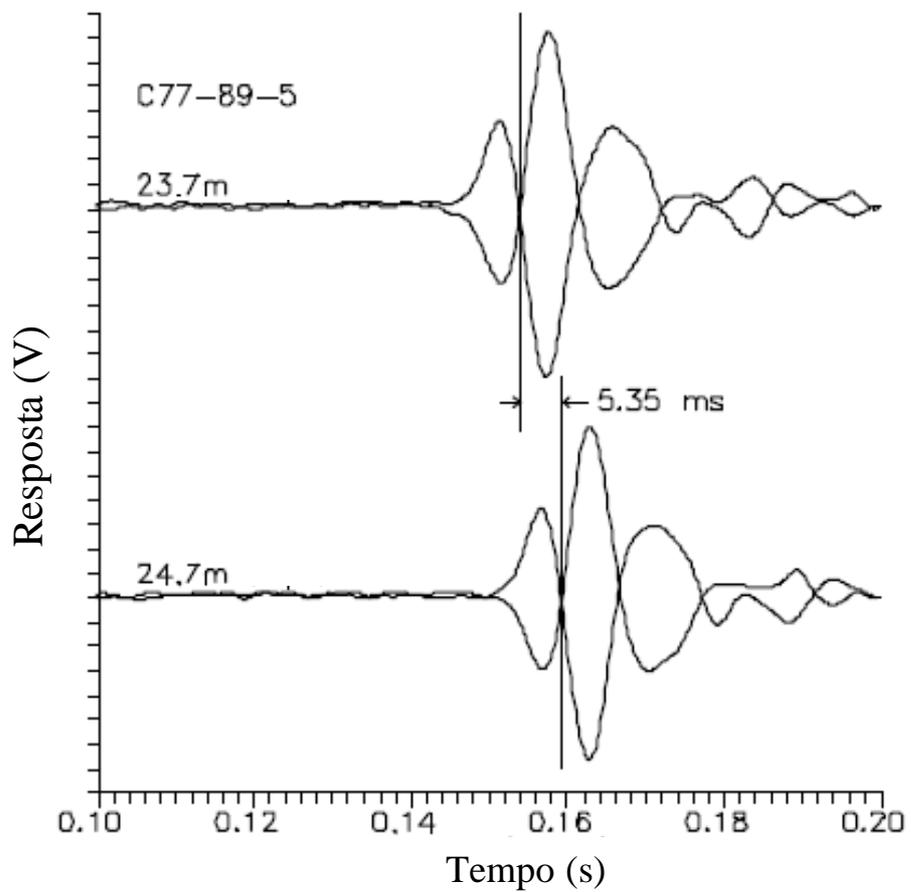


Figura 17 Determinação do intervalo de tempo através do método do *cross-over* (Campanella e Stewart, 1992).

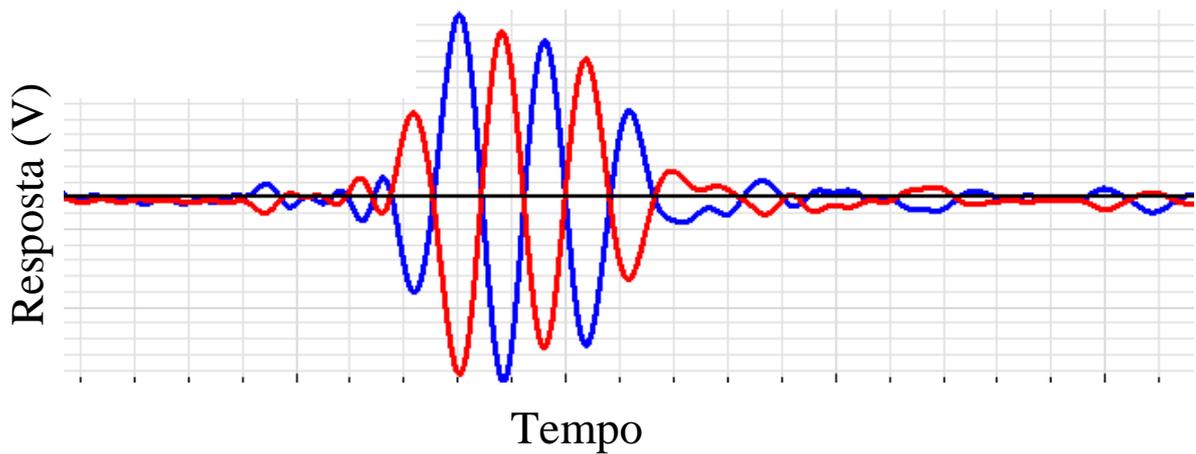


Figura 18 Situação em que o método *cross-over* pode ser aplicado com confiança.

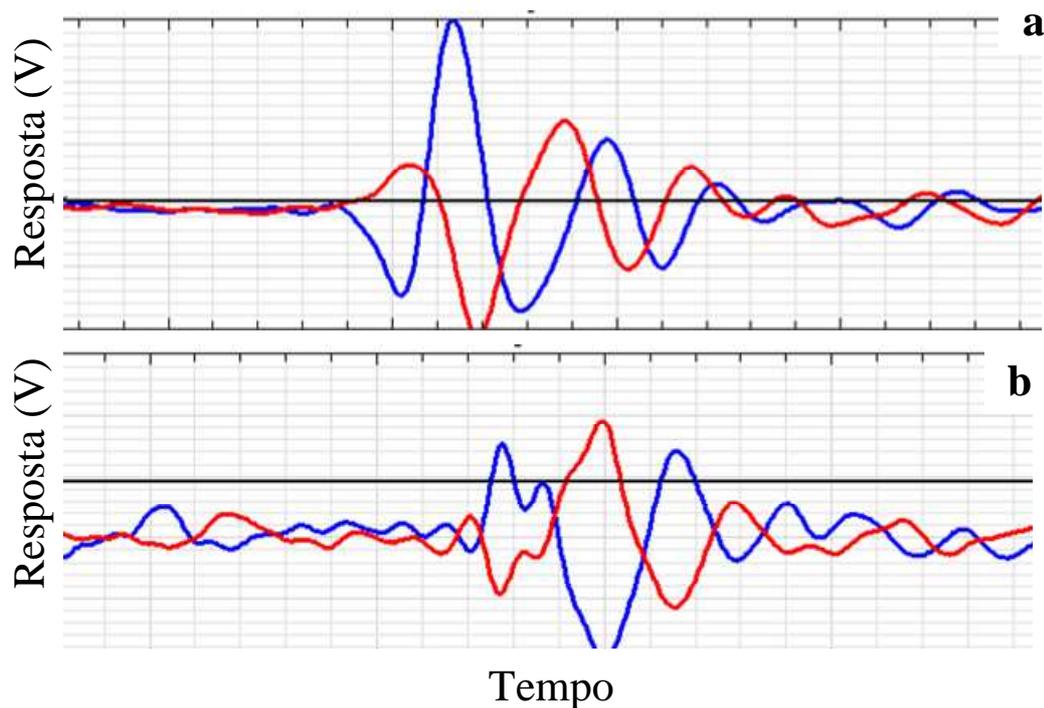


Figura 19 Situações onde o método *cross-over* não é aplicável (a) diferença na chegada da onda e (b) distorções no pulso principal da onda S.

### 2.5.3. Método Cross-correlation

Este método supera a limitação dos métodos apresentados anteriormente ao utilizar todo o sinal registrado para determinação de  $V_s$ . Campanella e Stewart (1992) destacam que este método não é afetado por distorções localizadas no sinal sendo considerado pelos autores o que conduz a resultados mais confiáveis e consistentes. Entretanto, é um método muito mais complexo que requer o emprego de um software para sua utilização.

Pode ser aplicado tanto no domínio dos tempos como no domínio das frequência. No domínio dos tempos, este método consiste em deslocar no eixo das abcissas (tempo) um sinal em relação ao outro, o intervalo de tempo que fornecer a maior correlação entre os sinais é o intervalo de tempo utilizado para o cálculo de  $V_s$ . A Figura 20 ilustra a aplicação deste método.

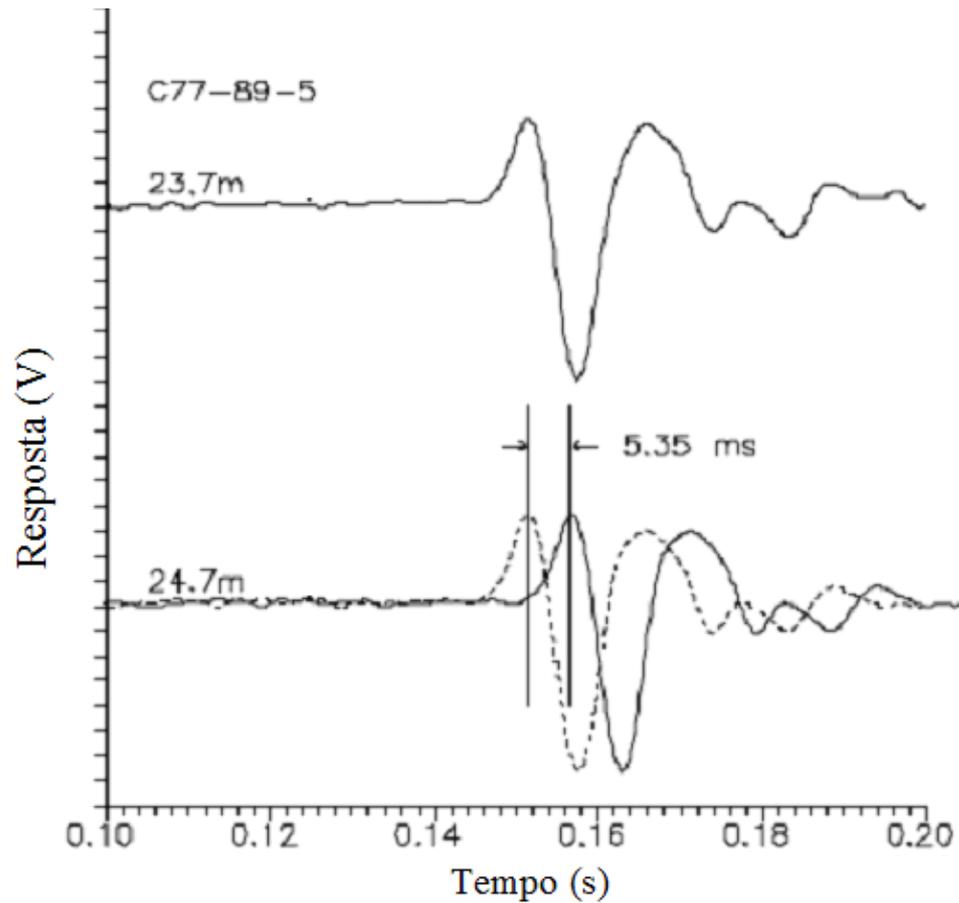


Figura 20 Determinação do intervalo de tempo através do método do *cross-correlation* no domínio do tempo (Campanella e Stewart, 1992.).

Os registros antecessores e posteriores ao pulso principal da onda S interferem na interpretação dos dados sendo conveniente remove-los. Campanella e Stewart (1992) recomendam selecionar uma revolução completa do pulso principal da onda S. A Figura 21 ilustra esse procedimento.

Campanella e Stewart (1992) destacam que esse método assume semelhança entre os dois sinais registrados em profundidades subsequentes. De acordo com os autores, para distâncias menores ou iguais a um metro isto normalmente ocorre.

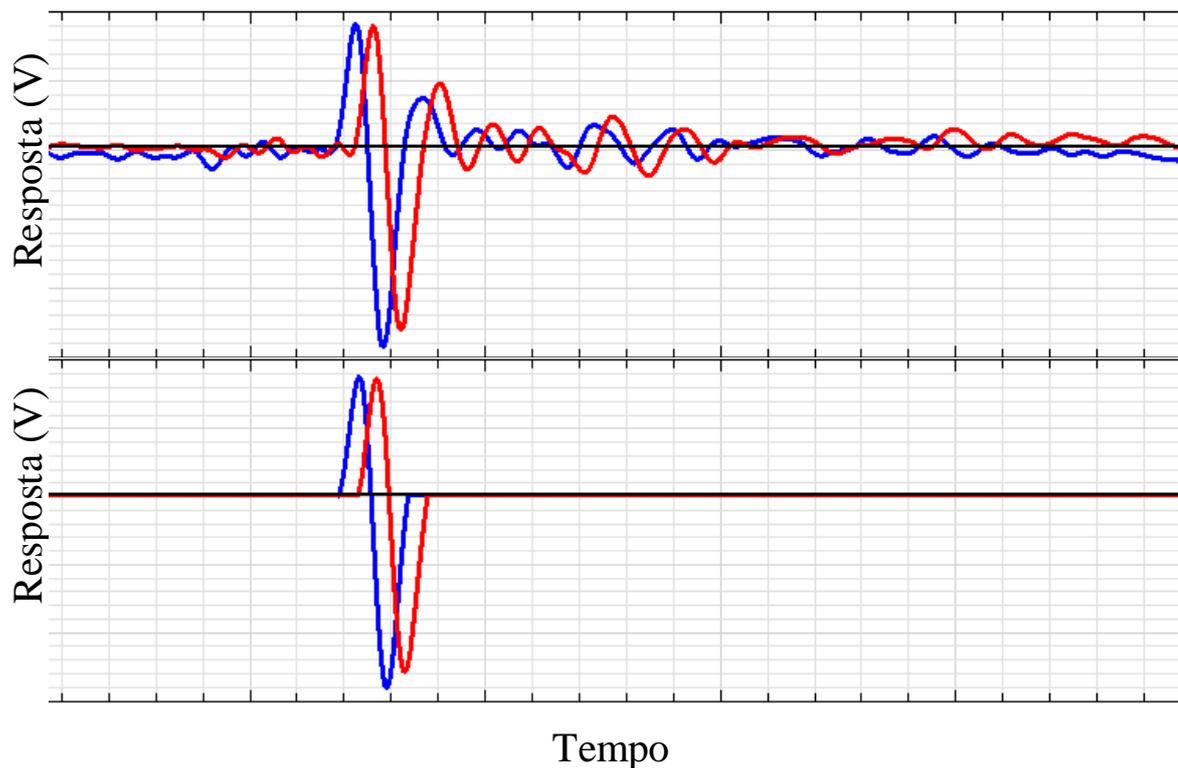


Figura 21 Seleção de uma revolução da onda S.

#### 2.5.4. Cross-over versus Cross-correlation

Segundo Campanella et al. (1989), os métodos são equivalentes apenas quando os registros estão completamente livres de interferência. Campanella e Stewart. (1992) apresentam resultados obtidos com ambos os métodos para o campo experimental Fazenda MacDonald (Figura 22), onde obtiveram boa concordância entre as velocidades calculadas. Apenas em 11 metros de profundidade houve diferença de 30% entre a velocidade calculada pelo método *cross-over* e a calculada pelo método *cross-correlation* causada por uma distorção na região do cruzamento entre as ondas polarizadas inversamente.

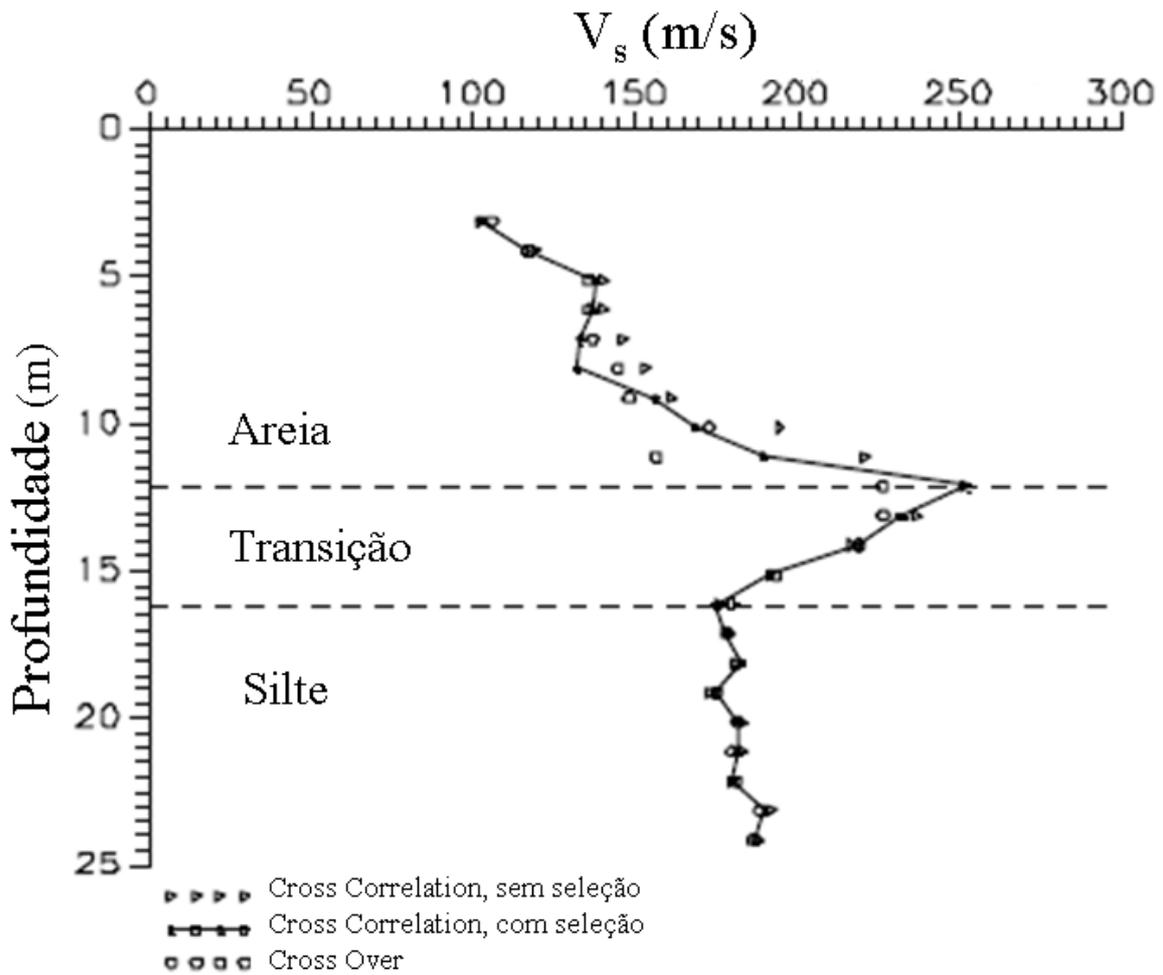


Figura 22 Comparação entre os resultados obtidos empregando os métodos do *cross-over* e *cross-correlation* no campo experimental Fazenda McDonald (Campanella e Stewart, 1992).

## 2.6. EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS PARA SÍSMICA DOWN-HOLE

### 2.6.1. Transdutores sísmicos

Transdutores sísmicos são definidos por Butcher et al. (2005), como dispositivos que fornecem uma resposta calibrada mediante excitação de ondas sísmicas, fornecendo resposta máxima quando ativado na sua frequência natural. Usualmente são utilizados geofones ou acelerômetros para determinação do tempo de propagação das ondas.

Os transdutores oferecem máxima resposta quando o eixo de vibração é mantido paralelo à direção de aplicação dos golpes. Segundo Campanella e Howie (2008) rotações até 45 graus são aceitáveis, acima disso, é difícil reconhecer o pulso principal da onda S. Os autores recomendam marcar com giz face das hastes a fim de evitar que elas sejam rotacionadas durante a manobra de adição de hastes e, caso isto ocorra, corrigir a posição usando chave de grifo.

A utilização de dois transdutores posicionados ortogonais entre si (ambos na horizontal) garante que pelo menos um dos transdutores fornecerá bons resultados, entretanto, Campanella e Howie (2008) consideram isto necessário apenas quando a manutenção da orientação for difícil.

O emprego de transdutores posicionados na vertical permitem o registro de ondas P. Butcher et al. (2005) destacam que a interpretação conjunta das ondas S e P facilita a delimitação das camadas de subsolo. Entretanto, Campanella e Stewart (1992) obtiveram velocidades muito elevadas de ondas P, sugerindo que elas viajam pelas hastes ao invés do solo, dessa forma, não recomendam a utilização de um transdutor posicionado na vertical. Campanella e Howie (2008) destacam que os transdutores horizontais também respondem a chegada das ondas P, sendo possível sua interpretação através dos registros destes transdutores.

O transdutor deve manter contato íntimo com solo circundante assegurando que o receptor capte as ondas sísmicas, o que é conseguido facilmente através da cravação de uma ponteira. Além disso o transdutor deve ser fixado firmemente na ponteira. Butcher et al. (2005) destaca a importância de verificar se os transdutores cumprem as especificações do

fabricante (frequência natural, ângulo de fase e amortecimento).

Os transdutores usualmente utilizados são os geofones e os acelerômetros, que são transdutores de velocidade e de aceleração, respectivamente.

A Figura 23 mostra o desenho esquemático de um geofone, onde se observa um ímã fixado entre duas molas e envolto por uma bobina. Quando o sensor detecta uma vibração, a ímã passa a vibrar gerando um campo magnético. Em resposta ao campo gerado, a bobina fornece uma voltagem proporcional a velocidade de vibração, que pode ser medida com precisão.

O geofone é um sensor passivo, ou seja, não requer uma fonte de energia para o seu funcionamento e apresenta a vantagem de fornecer sinais com baixíssimo nível de ruído quando comparados a sensores ativos sendo também são mais econômicos. A banda de frequência dos geofones é definida pelo intervalo entre a frequência natural e a frequência de espúrio (<http://www.geophone.com/content.asp?pageid=16>, consultado em 15/09/2010).

Campanella e Stewart (1992) obtiveram ótimos resultados utilizando geofones fabricados pela Geospace Corporation modelo GSC-I4-L3, com frequência natural de 28Hz, utilizando fonte sísmica mecânica. Os autores registraram bons sinais mesmo em profundidades superiores a 50 metros utilizando a fonte martelo/viga. Laing (1985) destaca como vantagens dos geofones a sua rigidez, baixo custo e não necessidade de amplificar e/ou filtrar os sinais registrados.

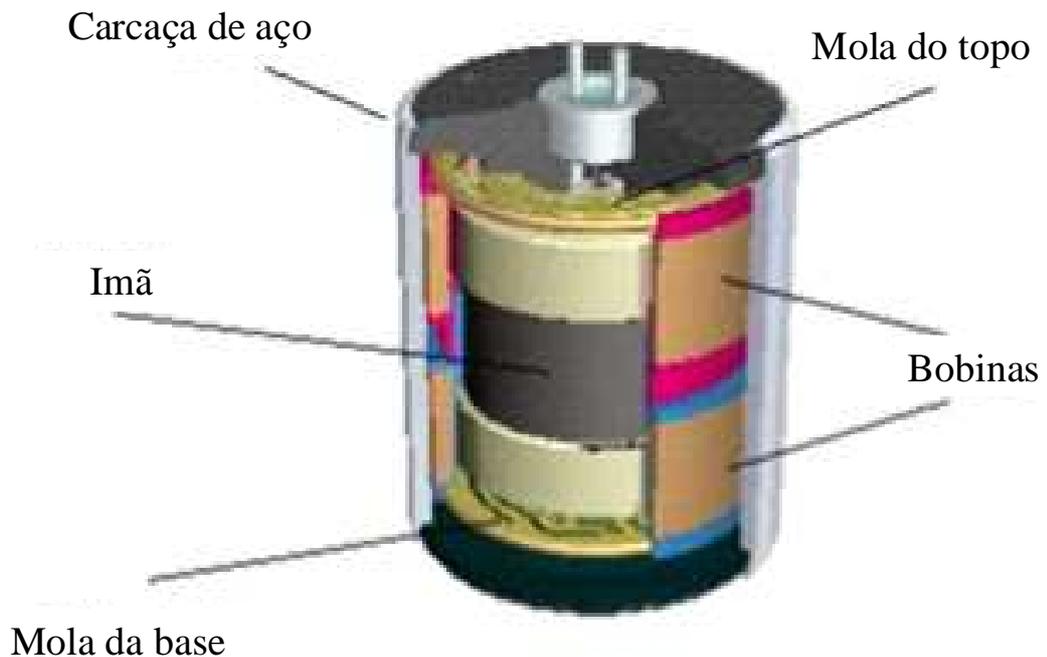


Figura 23 Desenho esquemático de um geofone (<http://www.geophone.com/content.asp?pageid=16>, 15/09/2010)

Segundo Campanella e Stewart (1992), a frequência natural do geofone está na gama de frequências de interesse das ondas S, impedindo a sua utilização para avaliação do amortecimento do solo, onde é necessário um estudo detalhado de todo sinal obtido. Stewart (1992) destaca os maus resultados obtidos com estes sensores quando se utilizou fonte explosiva.

### 2.6.2. Fonte sísmica

As fontes de energia mais comuns utilizadas para geração de ondas sísmicas são as fontes explosivas e fontes mecânicas. As fontes explosivas tendem a gerar ondas P com muita energia, sendo a sua chegada bem definida, entretanto, a identificação da chegada da onda S é muito subjetiva (Ferreira, 2003). Já as fontes mecânicas têm o efeito contrário das fontes explosivas, gerando ondas S bastante claras quase sem produzir ondas P.

Uma fonte sísmica básica consiste numa chapa ou barra (denominada viga de cisalhamento) carregada contra o solo que é golpeada lateralmente por uma marreta. Este esquema é a forma mais comum de gerar ondas sísmicas nos ensaios *down-hole*, pois maximiza a geração de ondas S além da facilidade em manipular e transportar. Também permite a geração de ondas S com diferentes polaridades, útil para identificação dessas ondas. A limitada energia das ondas geradas a principal desvantagem deste sistema.

Segundo Butcher et al. (2005), a viga de cisalhamento pode ser de aço ou de madeira revestida com, pelo menos, 25mm de aço nas extremidades e na base. Devem possuir largura e altura superiores a 15cm e comprimento maior que o veículo ou equipamento utilizado para aplicação do carregamento. É desejável que possuam cunhas na base para evitar o seu deslocamento com a aplicação de golpes.

Segundo Crice (?), melhores resultados são obtidos apoiando a viga sobre o solo natural ao invés de colocar sobre uma camada de areia ou sobre solo removido. A viga não deve vibrar ou deslizar devido a ação do golpe, para que não ocorra dissipação da energia, dessa forma, é essencial um alto carregamento vertical sobre a viga (Campanella e Stewart, 1992). De acordo com Davies et al. (1994), as rodas de um veículo e as hastes de nivelamento de um equipamento de cravação do piezocone promovem uma carga adequada.

Segundo Butcher et al (2005), a viga deve estar a, pelo menos, 1m do furo. Para distâncias maiores, as ondas sísmicas podem ser refratadas para uma trajetória horizontal resultando num menor tempo de chegada das ondas e, conseqüentemente, maior velocidade da onda S (ver Figura 24) (Butcher e Powell, 1996).

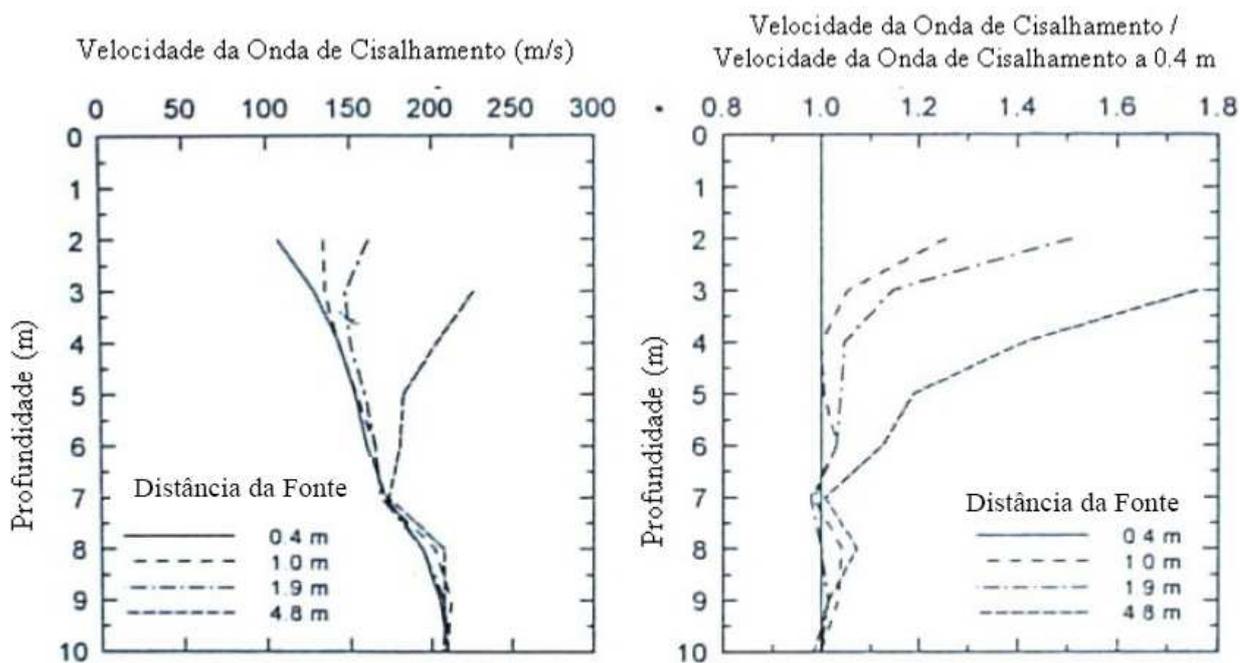


Figura 24 Comparação entre os resultados obtidos com diferentes distâncias entre a fonte e o furo (Butcher e Powell, 1996).

Utilizando um sistema de pêndulo para aplicação dos golpes consegue-se o controle da energia e, assim, a geração de ondas sísmicas idênticas. A geração de ondas com mesma amplitude é desejável pois facilita a interpretação pelo método *cross-over*, a utilização do pseudo intervalo de tempo e é fundamental para comparar o nível de energia das ondas em diferentes profundidades (Campanella e Stewart, 1992).

Já as fontes explosivas apresentam grande aplicação em ambientes off-shore. Campanella et al. (1986) apresenta os resultados de uma campanha de ensaios SCPT realizados no oceano ártico onde se utilizou explosivos, que eram detonados em diferentes profundidades, para geração das ondas S. Os autores destacam o alto nível de energia das ondas P geradas, que dificultaram bastante a interpretação do ensaio. Consideraram aceitáveis os sinais registrados e recomendam a utilização dos resultados do ensaio CPTu para auxiliar na interpretação dos sinais.

### 2.6.3. Aquisição de dados e Trigger

O equipamento para aquisição de dados pode ser um osciloscópio digital, um computador com um software que simula um osciloscópio ou um sistema de aquisição de dados comercial (Butcher et al, 2005). Para assegurar um registro confiável de ondas S, Butcher, et al. (2005) e Campanella e Howie (2008) recomendam utilizar uma frequência de aquisição de, pelo menos, 20 kHz. Estes autores recomendam ainda registrar os sinais sem qualquer tipo de modificação.

O sistema de aquisição de dados é ativado por um gatilho (*trigger*) que deve apresentar um tempo de reação inferior a 10  $\mu$ s e ser muito repetitivo (Butcher et al., 2005). Campanella e Stewart (1992), estudaram uma variedade de sistemas de *trigger* e consideraram o *trigger* elétrico como sendo mais simples e mais confiável que os demais.

O *trigger* elétrico é ligado a marreta, a viga de cisalhamento e ao sistema de aquisição de dados, formando um circuito aberto. No instante em que a marreta atinge a viga, o circuito do *trigger* é fechado e uma reação elétrica ativa o sistema de aquisição de dados. Após aplicação do golpe, o *trigger* automaticamente se rearma para um novo evento.

De acordo com Butcher et al. (2005) a utilização do pseudo intervalo de tempo requer o emprego de um *trigger* com variação inferior a 1%. Scheffer (2005) destaca as diferenças que obteve entre os tempos de resposta medidos em laboratório e em campo. Esta diferença foi associada a oxidação dos materiais e ao acúmulo de solo no contato entre a viga de cisalhamento e a marreta. Os erros do *trigger* podem ser associados a relação entre o seu posicionamento, a energia gerada no golpe e a frequência de ativação do dispositivo (Butcher e Powell, 1996).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, os equipamentos utilizados são apresentados nos itens 3.1 a 3.6, bem como o procedimento para realização do ensaio com o sistema desenvolvido (3.7) e para interpretação dos resultados (3.8).

#### 3.1. GEOFONES

Foram utilizados três geofones fabricados pela Geospace modelo OMNI tipo GS-20DH, das características destes sensores, destacam-se: frequência natural de 28Hz, sensibilidade de 35,4 V/m/s, frequência de espúrio de 400Hz e manutenção das especificações de fabricada para ângulos inferiores a 15° em relação ao eixo de vibração, ressaltando a importância de posicionar corretamente os geofones durante o ensaio. A curva de calibração dos geofones é apresentada na Figura 25.

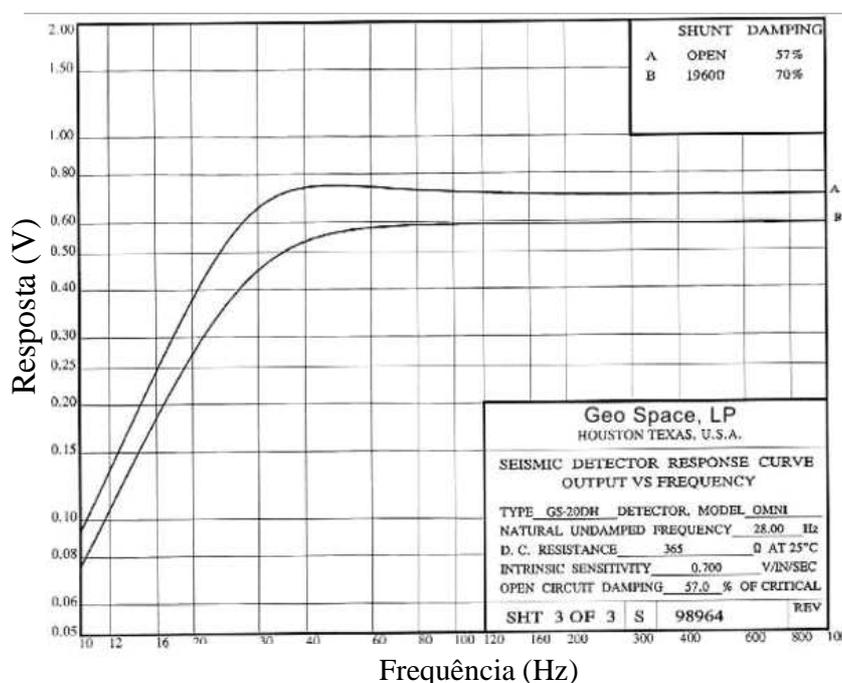


Figura 25 Curva de calibração dos geofones GS-20DH.

### 3.1.1. Calibração dos geofones

Foram realizados ensaios de calibração dos geofones no Laboratório de Dinâmica da EESC – USP, com a colaboração do Professor Leopoldo Oliveira, a fim de verificar se os geofones apresentam respostas idênticas, fundamental para interpretação através do intervalo verdadeiro de tempo (Butcher et. al., 2005), e se elas correspondem às especificações.

O ensaio consistiu em medir as vibrações aleatórias produzidas por um shaker com um geofone, um acelerômetro e um laser medidor de velocidade, cujas medidas serviram de referência para os dois sensores. Realizaram-se três ensaios, um para cada geofone. O acelerômetro foi utilizado como uma referência para os geofones. A Figura 26 ilustra fotos do ensaio e a Figura 27 os resultados obtidos, onde transmissividade representa a resposta dos sensores em relação a do laser.

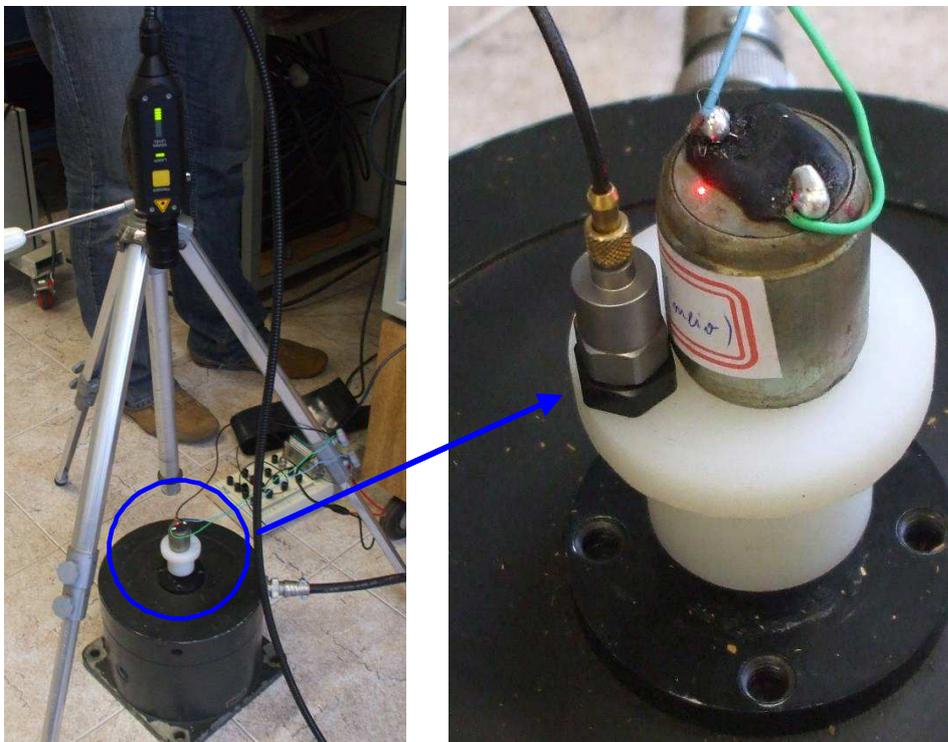


Figura 26 Fotos do ensaio para calibração dos geofones realizado no Laboratório de Dinâmica da EESC – USP.

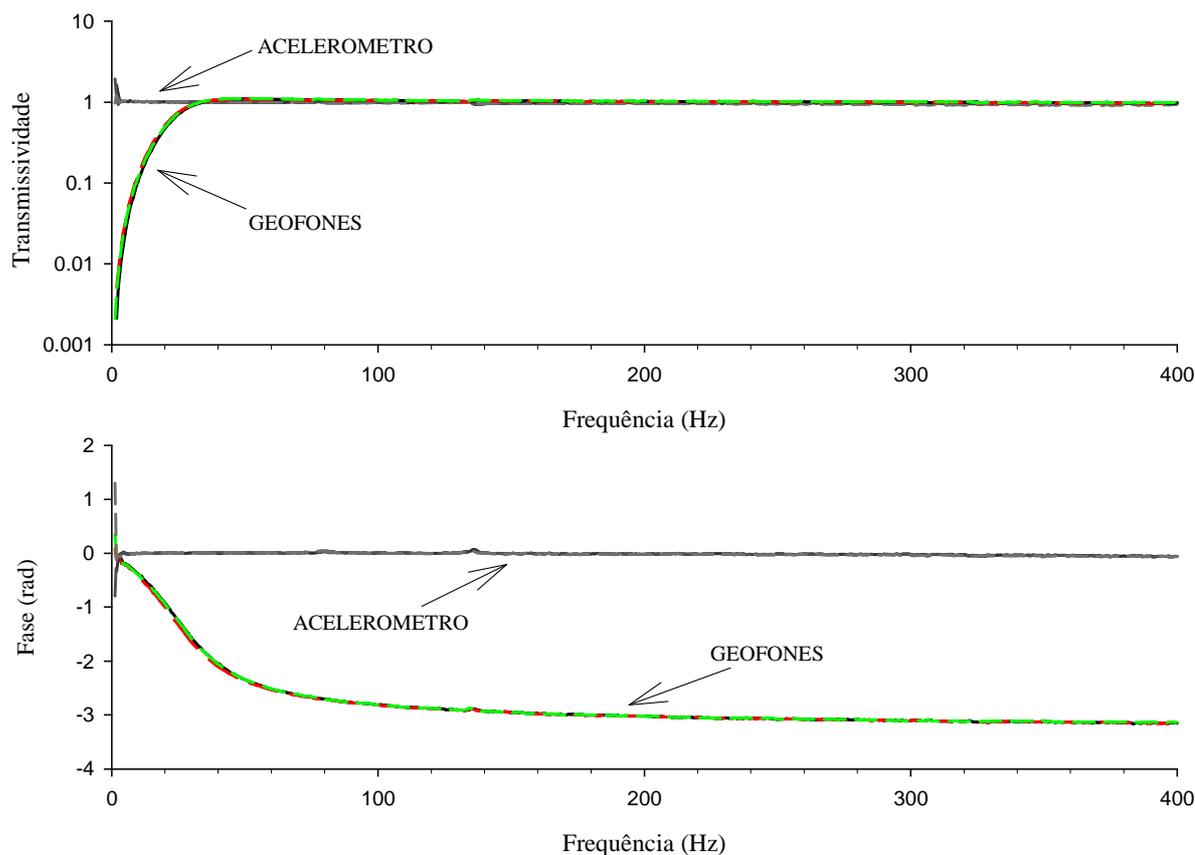


Figura 27 Resultados da calibração dos geofones.

Os resultados mostram que os três geofones fornecem respostas idênticas e consistentes com a curva de calibração fornecida pelo fabricante e que, para frequências acima de 40Hz, as respostas dos geofones foram iguais a do laser e do acelerômetro. A mais importante verificação foi a coincidência entre as fases, pois diferenças entre as fases no domínio das frequências representam atrasos (*delay*) no domínio dos tempos, que comprometem completamente a interpretação do ensaio pelo intervalo verdadeiro de tempo.

### 3.2. PONTEIRA SÍSMICA

Foi desenvolvida uma ponteira sísmica com três habitáculos, espaçados em 0,5m, para instalação dos geofones, sendo um geofone por habitáculo (arranjo uniaxial). Assim, obtém-se três registros em diferentes profundidades para um mesmo evento aumentando

muito as possibilidades de interpretação do ensaio e conseguindo um perfil de Vs com mais detalhes (de 0,5 em 0,5m) sem consumir maior tempo de ensaio.

Como se dispõe de arranjos uniaxiais, é fundamental posicionar o eixo de vibração dos geofones paralelamente a direção de aplicação do golpe e manter esta posição durante a realização do ensaio.

A ponteira é de aço usinado e os habitáculos são soldados a haste. À princípio, a união dos habitáculos à haste seria por meio de rosca, entretanto, apesar de facilitar muito a instalação dos geofones, não foi adequado porque, durante a cravação da ponteira no solo, os habitáculos giravam, desalinhando os geofones. A Figura 28 apresenta uma foto da ponteira.



Figura 28 Foto da ponteira sísmica desenvolvida.

### 3.2.1. Instalação dos geofones na ponteira

Antes de colocados na ponteira, os geofones são envolvidos com fita isolante, para evitar o contato direto entre a carcaça do geofone com o aço da ponteira, que anula a resposta dos geofones. A Figura 29 apresenta uma foto dos geofones preparados para instalação na ponteira.

Para o perfeito funcionamento dos geofones, a carcaça de aço não deve se movimentar, portanto, os geofones devem estar firmemente fixados na ponteira. Para esta fixação, o geofone é comprimido na direção do eixo de vibração, através de uma saliência no feixo do habitáculo. A Figura 30 apresenta fotos do geofone instalado na ponteira.



Figura 29 Foto dos geofones sendo preparados para instalação na ponteira.

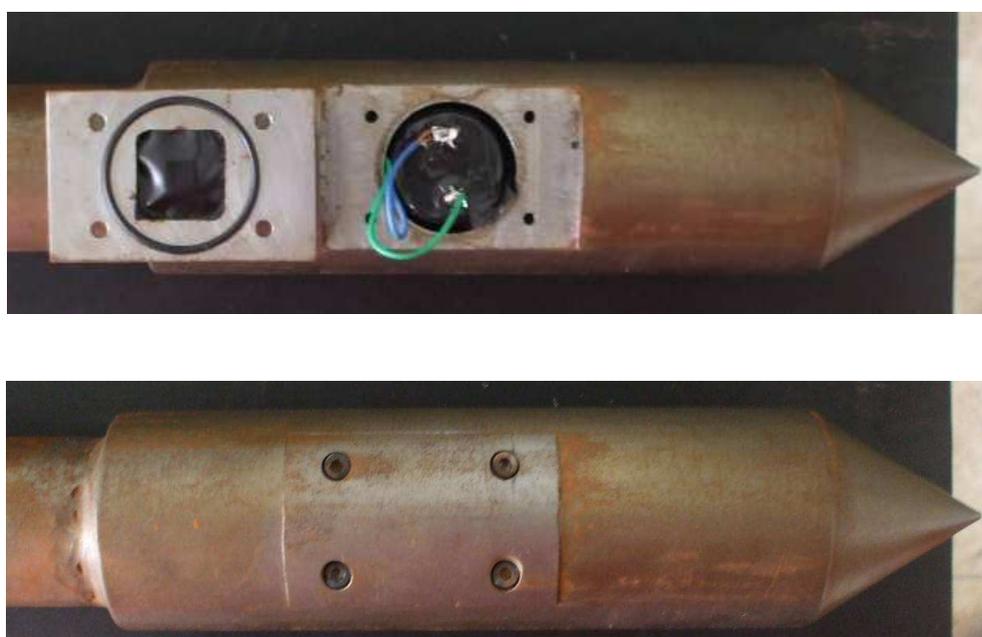


Figura 30 Geofone instalado na ponteira.

### 3.2.2. Ensaio para avaliar a resposta dos geofones quando instalados na ponteira

Para avaliar se a resposta dos geofones instalados na ponteira são confiáveis, foram realizados ensaios no Laboratório de Dinâmica da EESC – USP onde a ponteira foi suspensa com elásticos, simulando um corpo livre, e foram instalados acelerômetros sob os habitáculos com os geofones. A avaliação foi feita comparando a função resposta em frequência (FRF)

dos geofones com a dos acelerômetros obtidas de golpes aplicados com um martelo instrumentado com célula de carga sobre os habitáculos. A Figura 31 ilustra fotos do ensaio e as Figuras 32 e 33 os resultados obtidos com os geofones instalados na ponta e na base da ponteira. Informações sobre as FRFs podem ser obtidas em Inman (1989).

Os resultados apresentados correspondem a média de cinco golpes, sendo utilizado uma frequência de aquisição de 1000Hz com tempo de coleta de 1,6s, que permitiu uma resolução de um ponto a cada 0,625Hz.

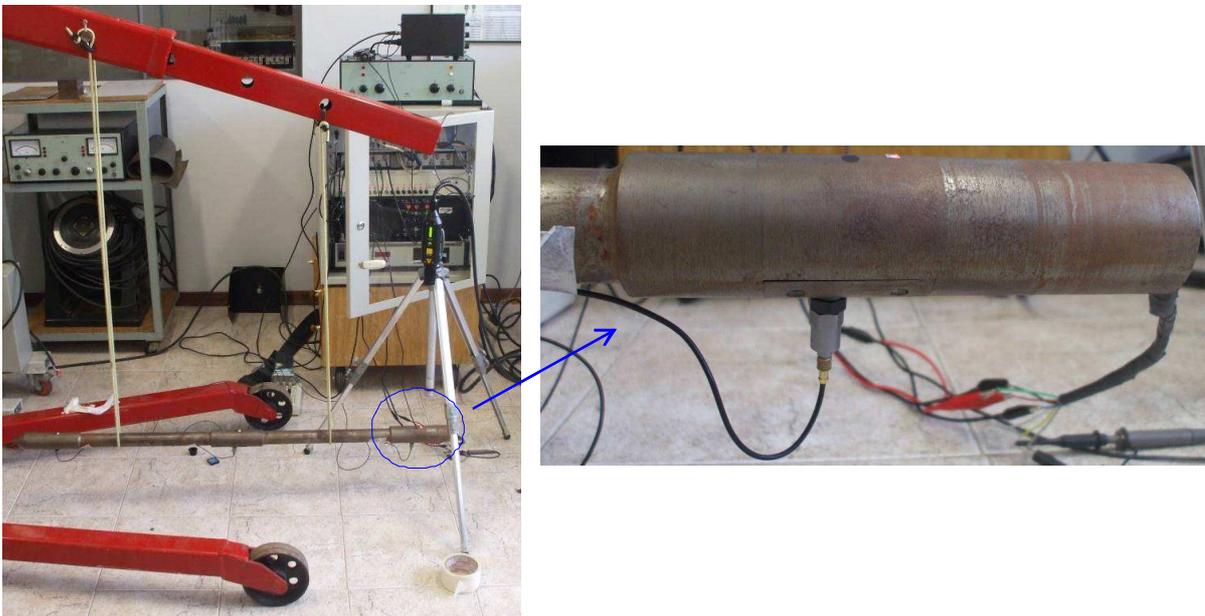


Figura 31 Foto do ensaio realizado com a ponteira sísmica no Laboratório de Dinâmica da EESC – USP.

Analisando os gráficos das Figuras 32 e 33, é notável que, para frequências acima de 30Hz, as respostas obtidas entre os geofones e os acelerômetros são praticamente idênticas. A diferença de 180° observada na fase é devido ao posicionamento dos sensores quanto ao sentido do eixo de vibração. Portanto, conclui-se que os geofones instalados na ponteira fornecem respostas confiáveis.

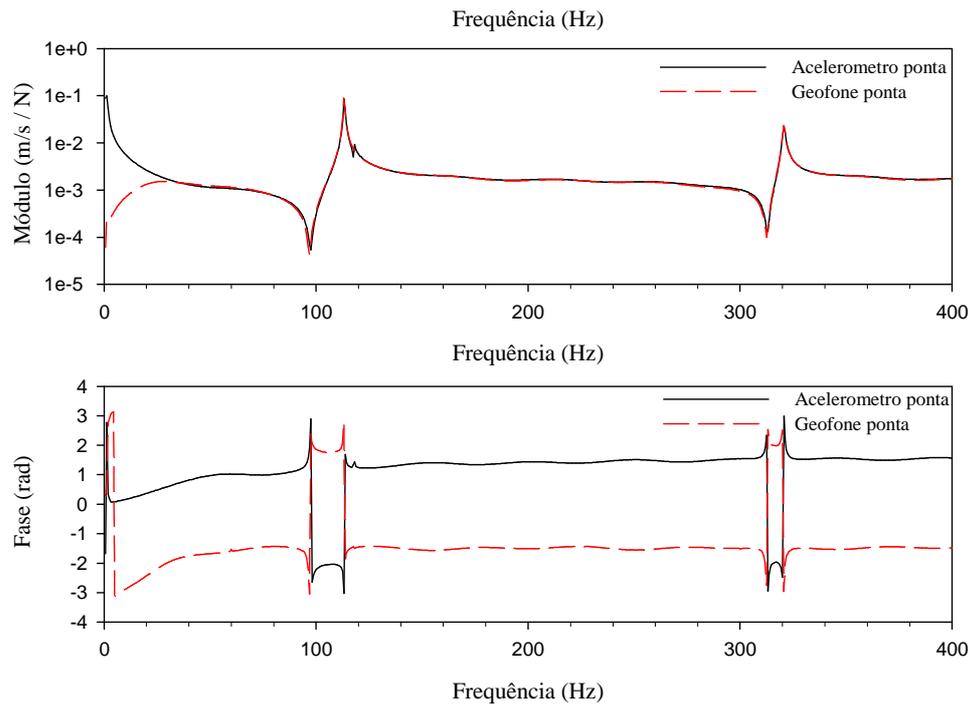


Figura 32 Comparação entre as FRFs do geofone e do acelerômetro instalados na ponta para o golpes aplicados na ponta.

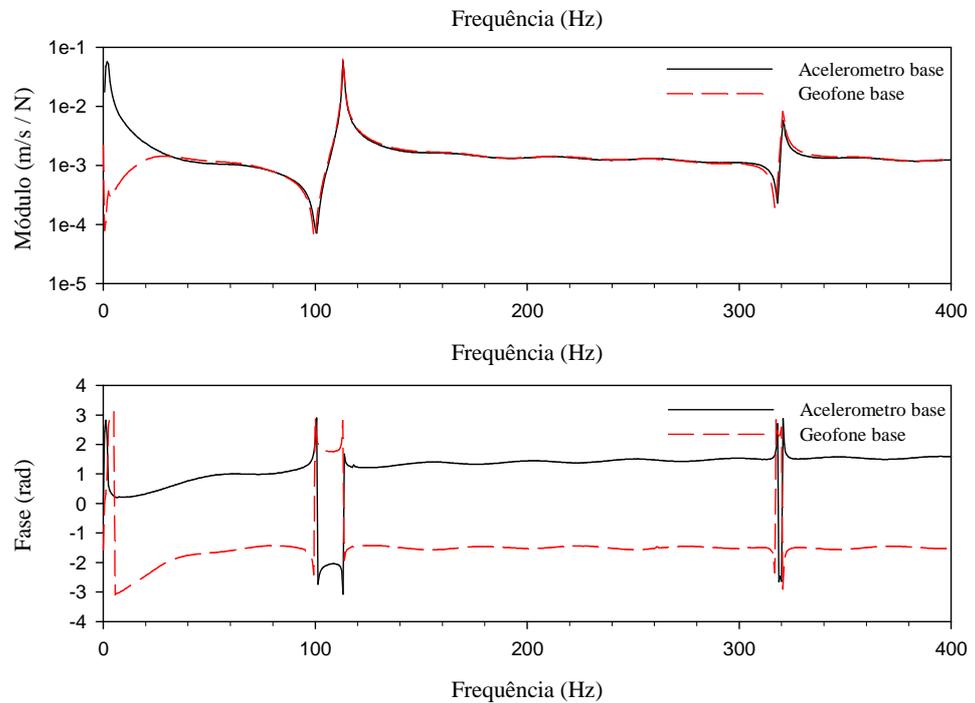


Figura 33 Comparação entre as FRFs do geofone e do acelerômetro instalados na base para golpes aplicados na base.

Já com o geofone instalado no habitáculo do meio, observou-se que as respostas dos sensores não eram tão semelhantes, destacando-se uma anti-ressonância em 68Hz ora registrada ora não registrada por ambos os sensores (Figura 34 e 35). Este fato foi atribuído a um dos parafusos que fecham o habitáculo do meio estar espanado e assim, o geofone não ficava tão bem pressionado quanto os outros e o acelerômetro registrava a vibração da tampa, que não estava perfeitamente fixada a ponteira.

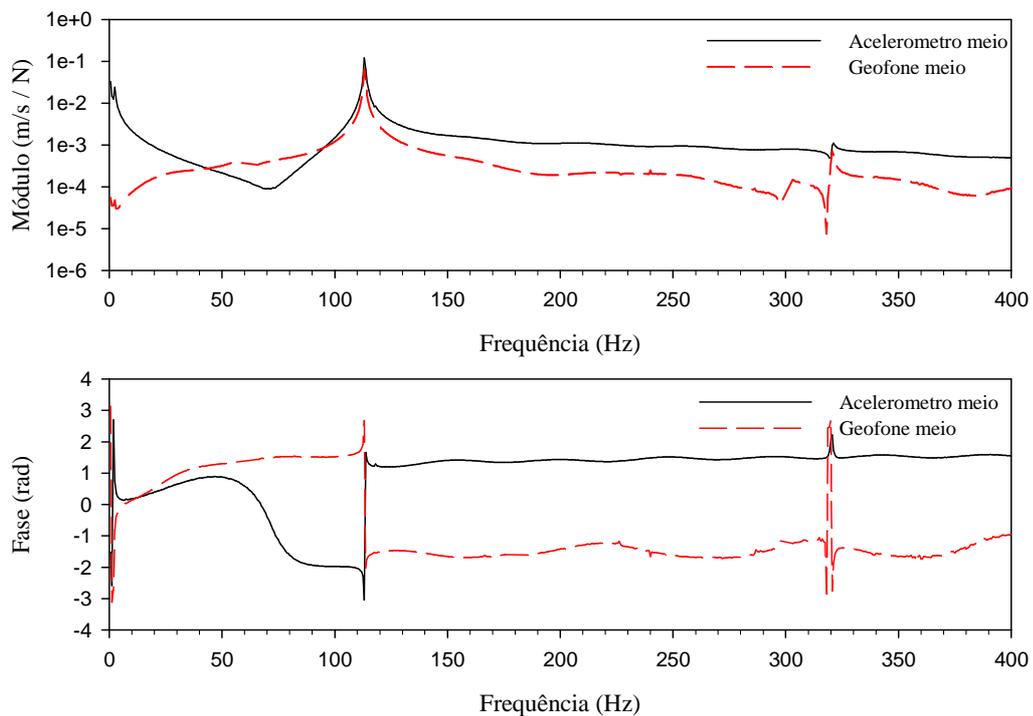


Figura 34 Comparação entre as FRFs do geofone e do acelerômetro instalados no meio para golpes aplicados no habitáculo do meio.

Para verificar se esta era a causa das diferenças observadas, repetiu-se o ensaio pressionando o habitáculo com um sargento. A Figura 36 mostra uma foto do fechamento do habitáculo do meio e a Figura 37, foto do teste. O resultado apresentado na Figura 38 mostra que o geofone e o acelerômetro forneceram respostas idênticas, confirmando a hipótese levantada. A diferença nas fases foi associada a interferência do sargento.

Este imprevisto destaca a importância de uma fixação adequada dos geofones na ponteira, valendo comentar que uma pressão excessiva sobre o geofone compromete o seu desempenho (observado nos testes com o sargento). Para solucionar o problema no habitáculo do meio da ponteira, foi feita uma nova rosca para a fixação adequada desse geofone.

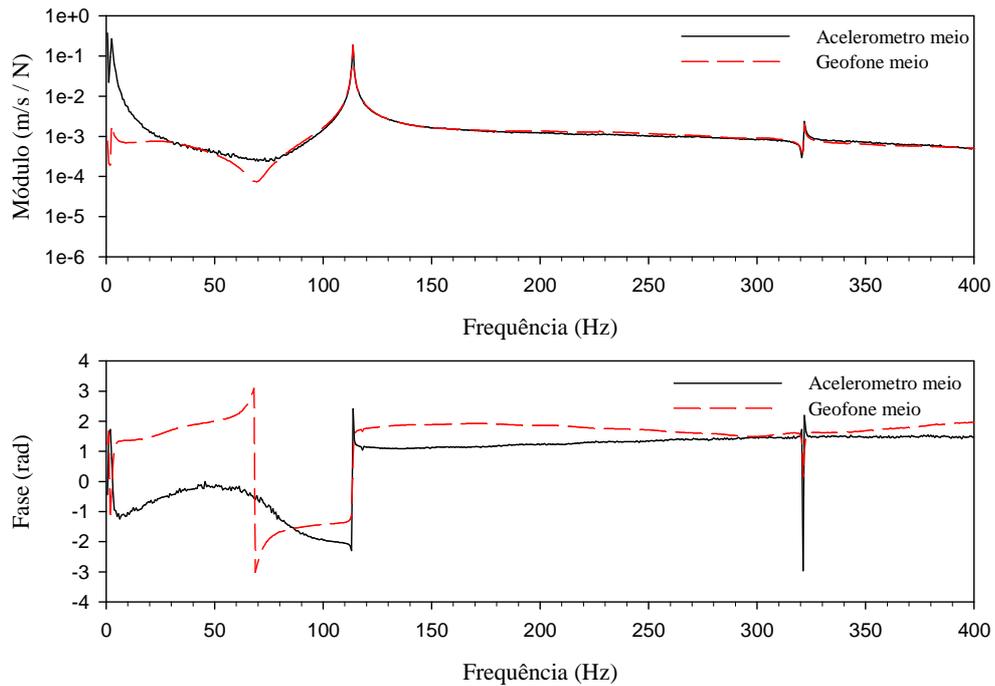


Figura 35 Comparação entre as FRFs do geofone e do acelerômetro instalados no meio para golpes aplicados no meio.

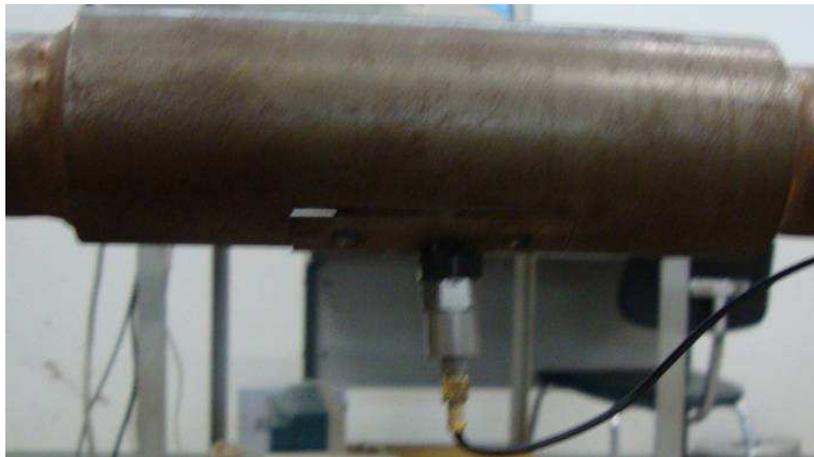


Figura 36 Foto do fechamento do habitáculo do meio, mal fixado devido a um parafuso espanado.



Figura 37 Foto do habitáculo do meio pressionado por um sargento-

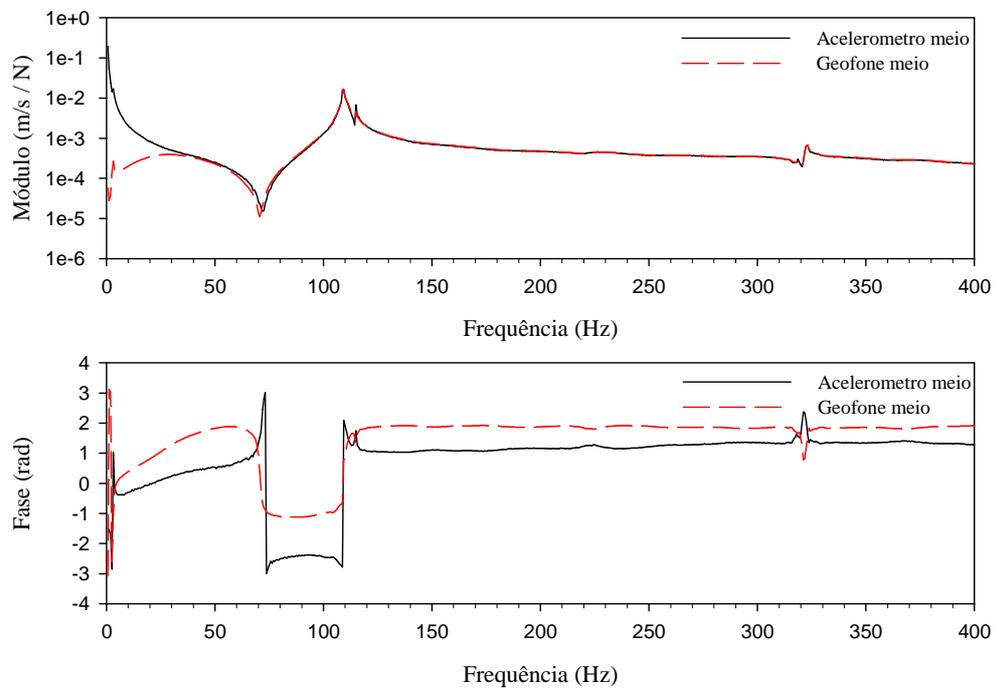


Figura 38 Comparação entre as FRFs do geofone e do acelerômetro instalados no meio para golpes aplicados no meio com sargento pressionando o habitáculo.

### 3.3. TESTE DE ESTANQUEIDADE DA PONTEIRA

Para vedação da ponteira, foram instalados anéis de vedação de borracha (O-rings) nos habitáculos (Figura 30) e na ligação com a haste aplicou-se silicone líquido. Para avaliar a estanqueidade, a ponteira foi imersa num tubo de PVC com água e submetida a pressões de 350 e 748kPa isolando a fonte de alimentação de pressão durante uma hora. Durante este tempo, observou-se que não houve decréscimo da pressão aplicada, indicando que não houve vazamento o que foi comprovado no final do ensaio ao verificar o interior da mesma. A Figura 39 apresenta os resultados deste teste.

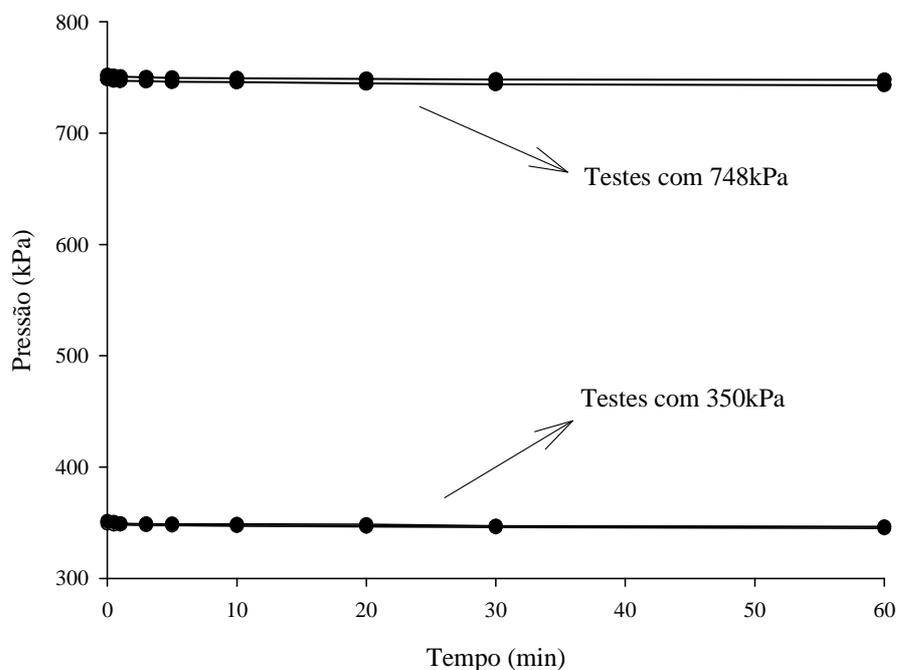


Figura 39 Foto dos resultados do teste de impermeabilização da ponteira.

### 3.4. FONTE SÍSMICA

As fontes sísmicas utilizadas consistem em barras carregadas contra o solo pelas hastes de nivelamento do equipamento de cravação que são golpeadas lateralmente por uma

marreta. Este tipo de fonte é muito adequada pois gera predominantemente ondas S e permite a geração de ondas com polaridade invertida.

Foram testadas três diferentes fontes sísmicas sendo elas: uma barra de aço com dimensão de 25 x 15cm e duas vigas confeccionadas seguindo as recomendações de Butcher et al. (2005), ambas de madeira revestidas com 25mm de aço nas laterais, sendo uma com 60 x 20 cm e a outra 115 x 20cm de base. O revestimento com aço tem a função de permitir a ativação do *trigger* elétrico no instante do golpe e de fornecer uma superfície adequada para receber os golpes. As barras de madeira dispõem de cunhas na base com 1cm de comprimento a fim de melhorar o contato com o solo.

A fonte foi testada tanto atrás (carregada pela haste de nivelamento traseira) como na frente (carregada pela haste de nivelamento dianteira). À princípio, a fonte foi posicionada atrás do equipamento de cravação pois o carregamento fornecido pela haste traseira é muito maior, entretanto, a distância entre a fonte e o furo fica em 1,80 metros que, conforme o estudo desenvolvido por Butcher e Powell (1996) (Figura 24) fornecerá resultados confiáveis a partir de três metros de profundidade. A Figura 40 mostra as fontes posicionadas atrás do equipamento de cravação do piezocone e a Figura 41, na frente.

Foi elaborado um sistema de pêndulo para controle dos golpes, entretanto, o mesmo não foi utilizado pois se mostrou dispensável uma vez que se conseguiu repetitividade semelhante aplicando golpes manualmente.

#### 3.4.1. Ondas geradas com as fontes sísmicas posicionadas atrás do equipamento de cravação do piezocone

As Figuras 42 e 43 comparam as ondas geradas com as três fontes testadas

em duas profundidades distintas. É notável o maior nível de energia obtido com a viga de madeira pequena. Essa diferença foi associada ao carregamento vertical promovido pela haste de nivelamento traseira do equipamento de cravação (5 kN), que é mais efetivo na viga de madeira pequena do que na grande. Calculando a tensão na base de cada viga, tem-se 43 kPa na viga pequena e 22 kPa na viga grande. Parece que as dimensões da barra de aço são insuficientes para gerar ondas S com nível alto de energia. Destaca-se que o tipo de fonte não interferiu nas velocidades calculadas e foram registrados sinais com boa qualidade com as três fontes empregadas.



Figura 40 Fontes sísmicas posicionadas atrás do equipamento de cravação do piezocone, a) viga de madeira pequena revestida de aço; b) barra de aço; c) viga de madeira grande revestida de aço.



Figura 41 Fontes sísmicas posicionadas à frente do equipamento de cravação a) viga de madeira grande revestida de aço e b) barra de aço.

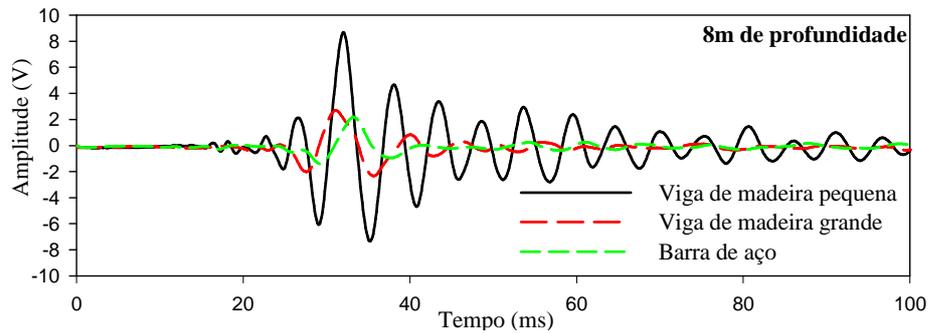


Figura 42 Comparação entre as ondas geradas com as diferentes fontes sísmicas posicionadas atrás do equipamento de cravação.

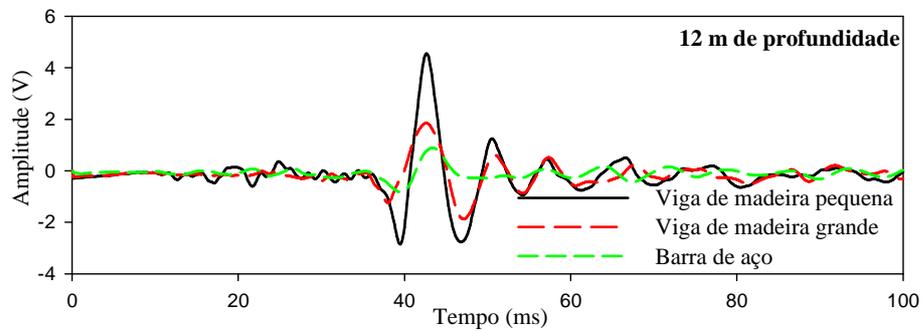


Figura 43 Comparação entre as ondas geradas com as diferentes fontes sísmicas posicionadas atrás do equipamento de cravação.

### 3.4.2. Ondas geradas com as fontes sísmicas posicionadas à frente do equipamento de cravação do piezocone

Realizaram-se ensaios com a barra de aço e com a viga de madeira grande posicionada à frente do equipamento de cravação. Com ambas as fontes, obtiveram-se registros com boa qualidade e com bom nível de energia. A viga de madeira grande posicionada na frente gerou ondas P com grande intensidade, o que não foi observado quando ela foi posicionada atrás do equipamento de cravação do piezocone e nem com a barra de aço posicionada na frente.

Tendo em vista que o objetivo do ensaio é determinar a velocidade de propagação das ondas S e sendo que a frequência de espúrio dos geofones utilizados é de 400Hz (portanto, sensores inadequados para o registro de ondas P), a barra de aço foi à escolhida, pois sua utilização é muito mais prática.

As Figuras 44 e 45 apresentam a comparação dos sinais filtrados, com filtro passa baixo Butterworth de ordem 3 e frequência de corte de 400Hz, obtidos com a fonte posicionada na frente (viga de madeira grande e barra de aço) e com ela atrás (viga de madeira pequena). Nota-se que o nível de energia das ondas é semelhante.

### 3.4.3. Influência da distância entre a fonte e o furo nos resultados

A Figura 46 apresenta os gráficos que comparam os perfis de velocidade obtidos com a fonte sísmica posicionada à frente, muito próximo ao furo de sondagem, e atrás, a 1,80m do furo. Analisando vários perfis de Vs obtidos com a fonte sísmica posicionada atrás e na frente em um mesmo ensaio, foram verificados apenas em alguns velocidades maiores com a fonte à 1,80m de distância do furo até aproximadamente 6m de profundidade, o que era esperado

conforme Butcher e Powell (1996).

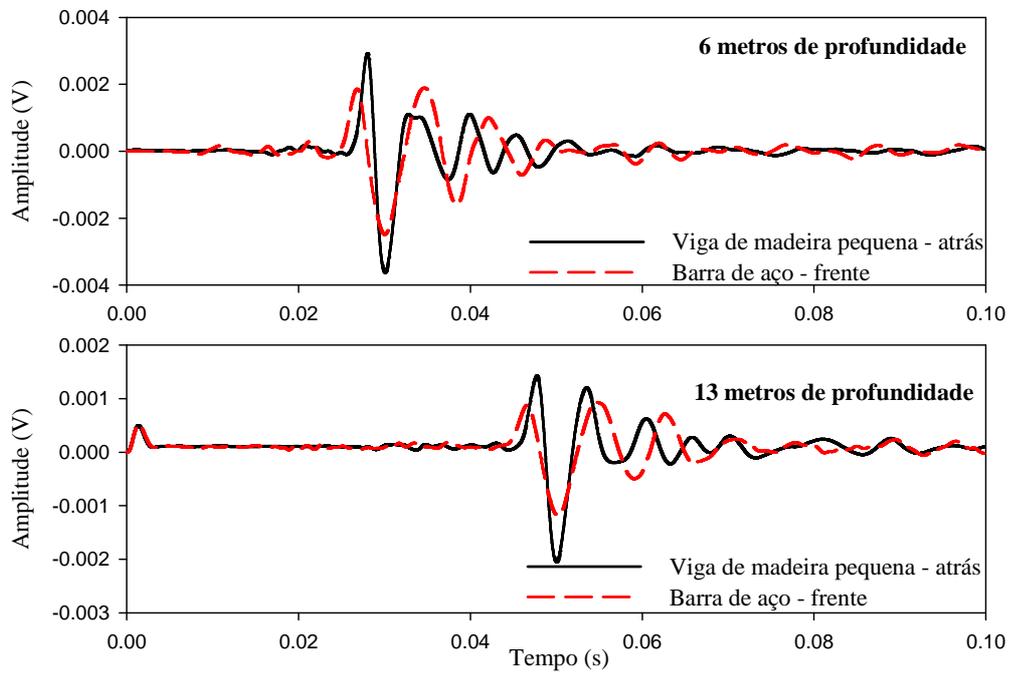


Figura 44 Comparação entre as ondas geradas com a barra de aço posicionada a frente e com a viga de madeira pequena atrás do equipamento de cravação.

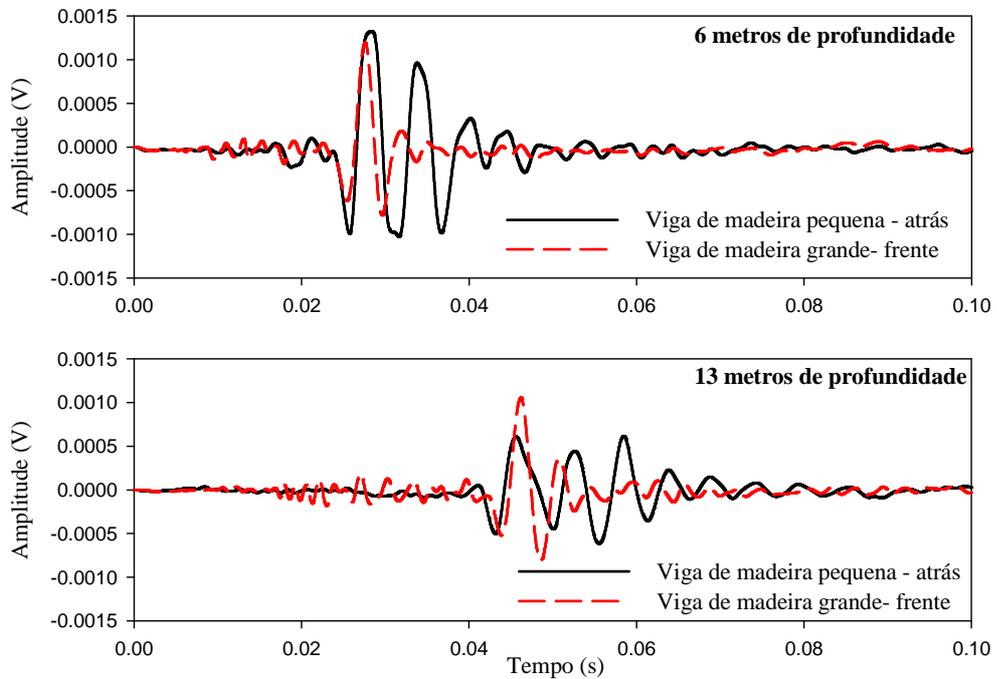


Figura 45 Comparação entre as ondas geradas com a viga de madeira grande a frente e com a viga de madeira pequena atrás do equipamento de cravação.

Os perfis de velocidade obtidos com a fonte na frente apresentaram uma evolução mais suave, assim, considerou-se esta posição mais adequada. Destaca-se que quanto mais próxima a fonte do furo, menor será a diferença entre as trajetórias percorridas pelas ondas ( $L_1-L_2$ ) (equação 1) do espaçamento entre os geofones, diminuindo o erro associado a propagação das ondas no solo.

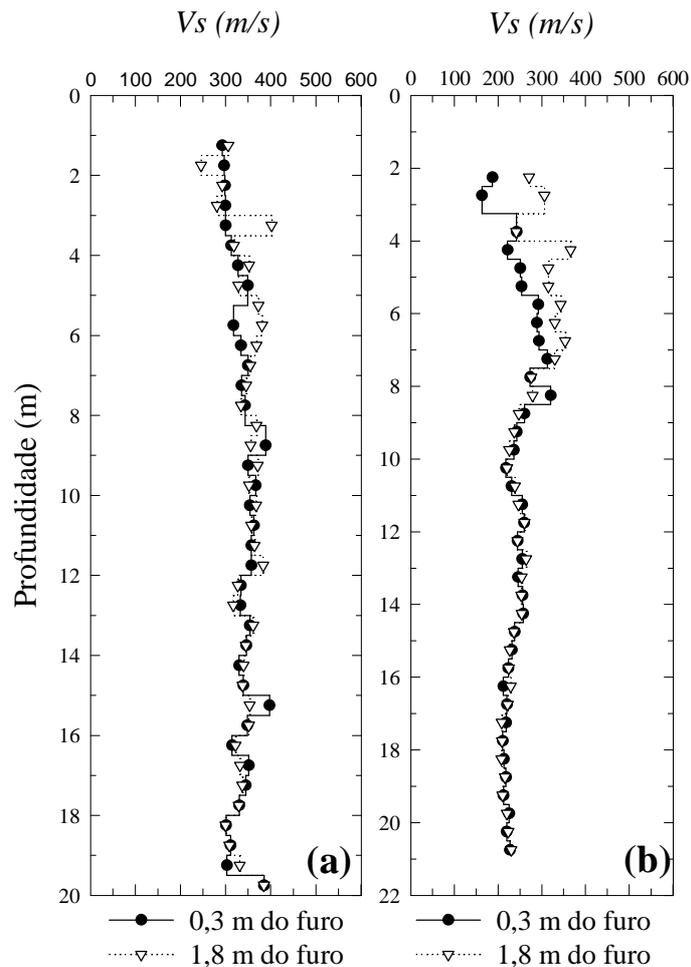


Figura 46 Comparação dos resultados obtidos com a fonte sísmica à 0,3 e 1,8m do furo em ensaios realizados no campo experimental da UNESP – Bauru (a) e no campo experimental da UNICAMP – Campinas (b).

### 3.5. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

À princípio foi utilizado um módulo conversor analógico-digital de 16 canais, modelo ADS2000, com condicionador de sinais modelo AI-2161, fabricados pela Lynx Tecnologia Eletrônica com o software para aquisição de dados o desenvolvido por Pedrini et al (2010). Este sistema permite utilizar uma frequência de aquisição de 15 kHz, que é inferior ao mínimo de 20kHz recomendado por Butcher et al (2005). Portanto, optou-se por substituir esta placa por uma com maior capacidade de aquisição.

Passou-se a utilizar uma placa de aquisição da National Instruments modelo NI USB-6251 e o software labview para aquisição dos dados, o programa para aquisição dos dados foi desenvolvido pelo Engº Jorge Nicolau, técnico do Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos da EESC – USP. A placa utilizada possui 16 canais com uma taxa de aquisição de 1,25 MHz por canal e resolução de 16 Bits. A Figura 47 ilustra a tela do software de aquisição.

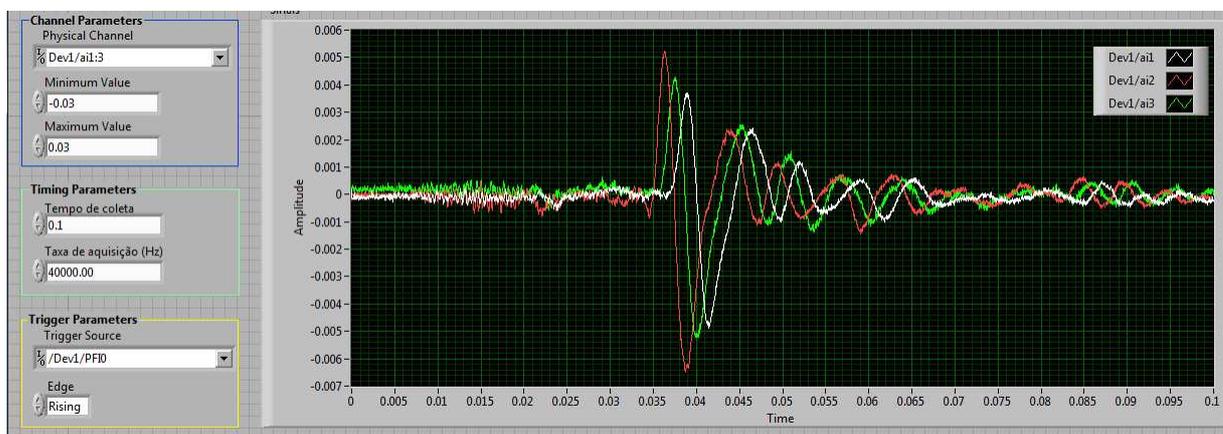


Figura 47 Tela do software para aquisição de dados, em Labview.

Utilizaram-se dois canais para cada geofone, sendo a leitura diferencial. Durante o evento, um dos terminais fornece o sinal do sensor mais o ruído ambiente, enquanto o outro fornece o sinal do sensor invertido mais o ruído, o sinal obtido é a diferença dos dois sinais,

que corresponde ao sinal duplicado do sensor livre do ruído ambiente. Este procedimento é desejável mas não é uma necessidade, pois os ruídos podem ser removidos com utilização de filtro digital. A Figura 48 apresenta um esquema que explica a leitura diferencial e a Figura 49, os ruídos medidos com a leitura diferencial e a leitura convencional onde se observa muito menor intensidade dos ruídos quando se utiliza a leitura diferencial.



Figura 48 Esquema de funcionamento da leitura diferencial, onde S é a resposta do geofone.

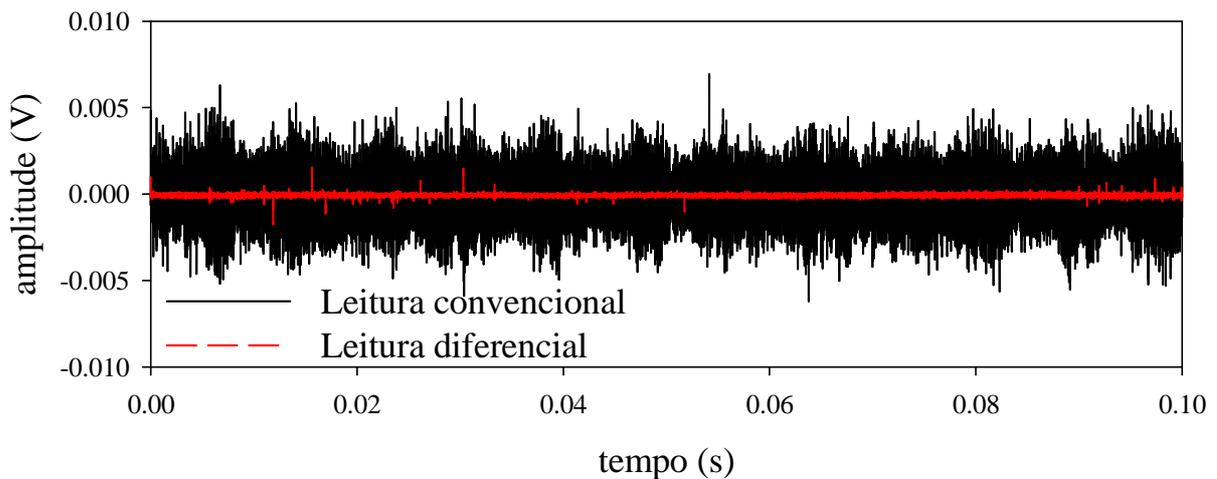


Figura 49 Comparação dos ruídos obtidos com a leitura diferencial e com a leitura convencional no campo experimental de Bauru utilizando frequência de aquisição de 100kHz.

Durante o ensaio, procurou-se manter a resposta em voltagem próxima das amplitudes das ondas registradas para obtenção de sinais com melhor resolução, não foi utilizado ganho nos sinais.

Segundo o Teorema da Amostragem de Niquist, a frequência de amostragem mínima para que não ocorra corrupção do sinal (fenômeno aliasing) deve ser, no mínimo, o

dobro da máxima frequência existente no sinal. O sistema da Lynx utilizado possui filtro anti-aliasing, que garante amostragem adequada do sinal, já o sistema da National Instruments não possui tal filtro e deve-se utilizar uma frequência de aquisição bastante elevada para se garantir amostragem adequada do sinal. Utilizou-se frequência de aquisição de 150kHz, que garantiu boa amostragem e uma excelente resolução no domínio do tempo, importante para a aplicação do método *cross-correlation*. No item 5.3, citam-se problemas de amostragem do sinal, que prejudicaram dois ensaios *down-hole* realizados com o sistema desenvolvido no Campo Experimental da UNESP, campus Bauru.

Com a experiência acumulada, o software para aquisição, em Labview, foi aperfeiçoado. Após a aplicação do golpe na fonte sísmica, o programa apresenta o sinal original e o sinal filtrado (com filtro digital Butterworth tipo passa-banda com as frequências de corte e a ordem determinadas pelo operador), possibilitando a inspeção visual dos sinais durante a execução do ensaio e os sinais, tanto o original como o filtrado, são registrados em arquivo.txt.

Este software também realiza o cálculo de três valores  $V_s$  pelo método *cross-correlation* utilizando os sinais filtrados dos três geofones para as três combinações possíveis do intervalo verdadeiro de tempo. As velocidades calculadas vão sendo registradas num arquivo.txt ao longo do ensaio, assim, a etapa de interpretação dos dados é dispensada, dando muita praticidade ao ensaio.

### 3.6. TRIGGER

Este dispositivo tem a função de acionar o sistema de aquisição de dados no instante em que a onda sísmica é gerada. Trata-se de uma ligação entre a marreta, a viga de

cisalhamento e o sistema de aquisição de dados. No instante em que a marreta atinge a viga, o circuito é fechado e uma reação elétrica ativa o sistema de aquisição de dados. Após aplicação do golpe, o *trigger* automaticamente se rearma para um novo evento. Campanella e Stewart (1992) compararam diversos dispositivos de *trigger* e consideraram o elétrico como sendo o mais simples e o mais confiável. A Figura 50 ilustra o detalhe da ligação do *trigger* entre a viga e a marreta.



Figura 50 Detalhe da ligação do *trigger* entre a marreta e a viga.

### 3.7. EQUIPAMENTO DE CRAVAÇÃO DA PONTEIRA

Empregou-se um equipamento de cravação de piezocones fabricado pela Pagani para execução dos ensaios. Esta máquina tem capacidade de cravação de 150 kN, é fixada ao solo através de duas ancoragens de 4 metros de comprimento, permitindo uma execução rápida do ensaio e eliminando a necessidade de executar um furo revestido. A ponteira cravada no solo mantém um contato perfeito entre o sensor e o solo, aspecto fundamental para garantir a

qualidade dos sinais registrados. A Figura 51 mostra uma foto do equipamento utilizado.



Figura 51 Equipamento para cravação de piezocones utilizado nos ensaios.

### 3.8. EXECUÇÃO DO ENSAIO

O ensaio consiste em cravar uma ponteira sísmica no subsolo e registrar as ondas geradas na superfície em diferentes profundidades. Optou-se por registrar seis ondas em cada profundidade, sendo aplicados três golpes em cada lado da viga de cisalhamento. O motor do equipamento de cravação do piezocone era desligado durante o registro das ondas, a fim de diminuir os ruídos, conforme recomendado por Butcher et al (2005). As ondas eram avaliadas durante a execução do ensaio sendo rejeitadas as que apresentavam baixa qualidade.

Observou-se que mudanças no posicionamento do *trigger* durante a realização do ensaio provocavam alterações na chegada das ondas, portanto, o *trigger* deve ser mantido na mesma posição durante todo o ensaio.

Durante a execução dos ensaios observou-se que a orientação dos geofones, cujo eixo de vibração deve manter-se paralelo a direção de aplicação do golpe, e a intensidade de aplicação dos golpes foram os fatores que mais influenciavam na qualidade das ondas registradas. Segue uma análise destes fatores.

### 3.8.1. Orientação dos geofones

Durante a realização dos ensaios notou-se que a ponteira sísmica girava no subsolo devido a manobra de adição de hastes. Esta rotação alterava o eixo de vibração dos geofones prejudicando muito a qualidade das ondas registradas, sendo este o fator que mais interferiu na qualidade dos registros sísmicos. De fato, segundo a especificação dos geofones, eles não mantêm as suas especificações de fabrica para desvios maiores que  $15^\circ$ . A Figura 52 compara duas ondas registradas com o geofone alinhado paralelamente a direção do golpe e não alinhado.

Para evitar a rotação da ponteira durante a cravação, seguiu-se a recomendação de Campanella e Howie (2008), que sugerem apertar com força as hastes utilizando chave de grifo.

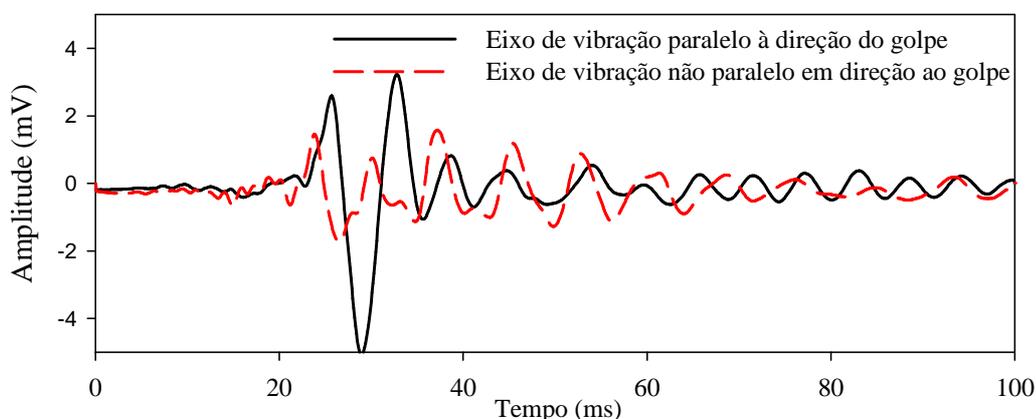


Figura 52 Comparação entre as ondas registradas com o geofone paralelo e não paralelo a direção do golpe.

### 3.8.2. Intensidade de aplicação dos golpes

Observou-se que golpes aplicados com grande intensidade geravam ondas com maior amplitude e qualidade inferior que as geradas a partir de golpes com menor intensidade. Este fato foi atribuído a vibração excessiva da viga de cisalhamento ao se aplicar golpes fortes, que favorecem a dissipação da energia ao invés de sua transferência ao solo.

Para avaliação deste fator, em um ensaio realizado no Campus da UNESP de Bauru, registraram-se ondas a partir de golpes fortes e fracos utilizando a viga grande de madeira como fonte sísmica. As Figuras 53 e 54 mostram exemplos de ondas geradas com golpes de pequena e grande intensidade, onde é notável a melhor qualidade das ondas geradas com golpes fracos.

Os resultados obtidos tanto com golpes fortes como com golpes fracos foram praticamente equivalentes. Considerou-se adequado aplicar golpes fracos, registrando ondas com melhor qualidade e de mais fácil interpretação.

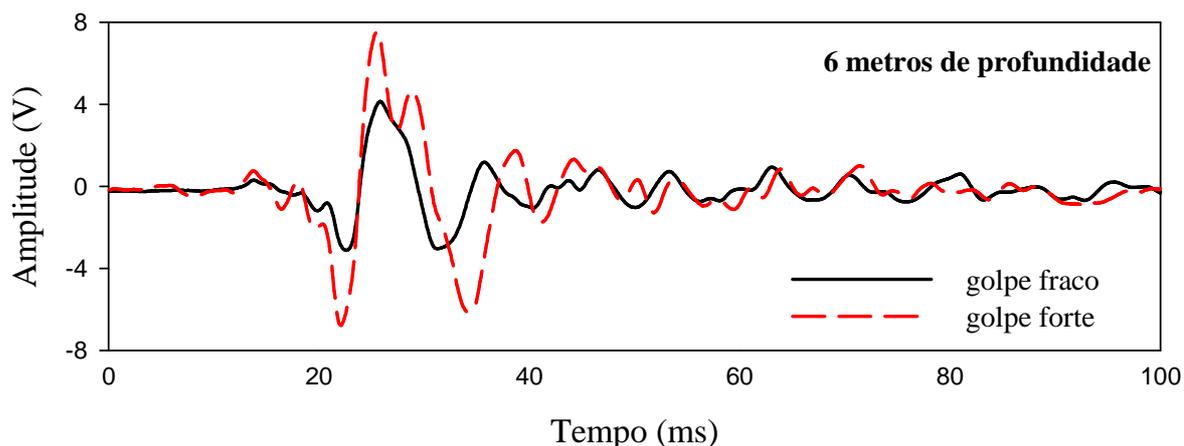


Figura 53 Comparação entre as ondas obtidas a partir de golpes fortes e fracos.

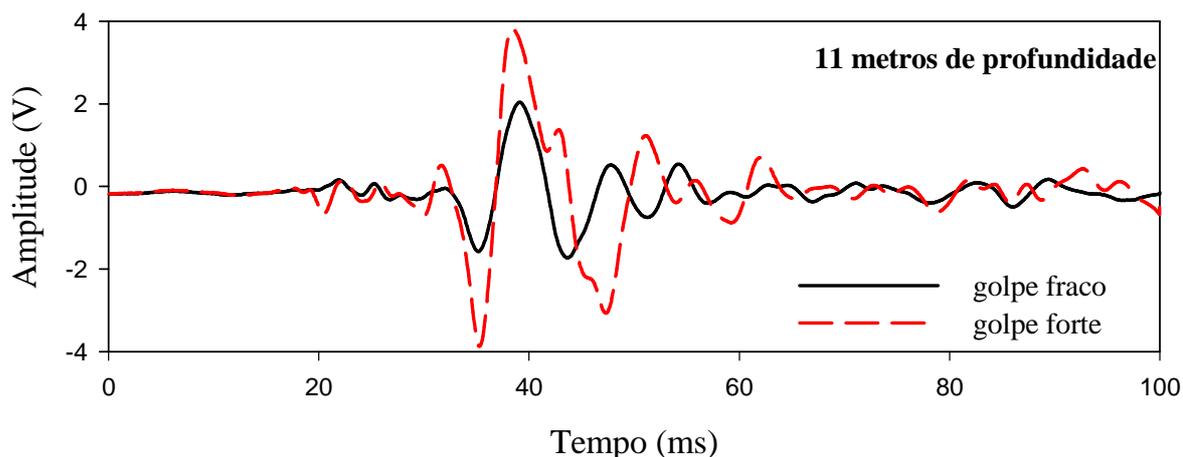


Figura 54 Comparação entre as ondas obtidas a partir de golpes fortes e fracos.

### 3.9. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

#### 3.9.1. Software desenvolvido

Um software em Visual Basic, que aplica o método *cross-correlation* para o cálculo de  $V_s$ , foi desenvolvido na UNESP – Bauru, pelo Eng<sup>o</sup> Rubens Pedrini. Este software possui recurso para seleção do pulso principal das ondas S e de filtro digital do sinal. Ele foi utilizado para a interpretação dos registros dos ensaios sísmicos obtidos nesta pesquisa. Este programa é descrito em Pedrini et al. (2010). A grande vantagem deste software é a possibilidade de calcular  $V_s$  durante a execução do ensaio.

Para validação deste software, os resultados obtidos com ele foram comparados com aqueles obtidos empregando o software *Shear Pró* disponível gratuitamente no site <http://geosystems.ce.gatech.edu/Faculty/Mayne/papers/index.html> (14/07/2010) que também calcula  $V_s$  pelo método *cross-correlation*, onde é notável observar que ambos os softwares fornecem resultados idênticos (Figura 55). O software *Shear Pró* apresenta os inconvenientes de aceitar apenas sinais adquiridos com 40kHz e de aplicar um filtro desconhecido às ondas.

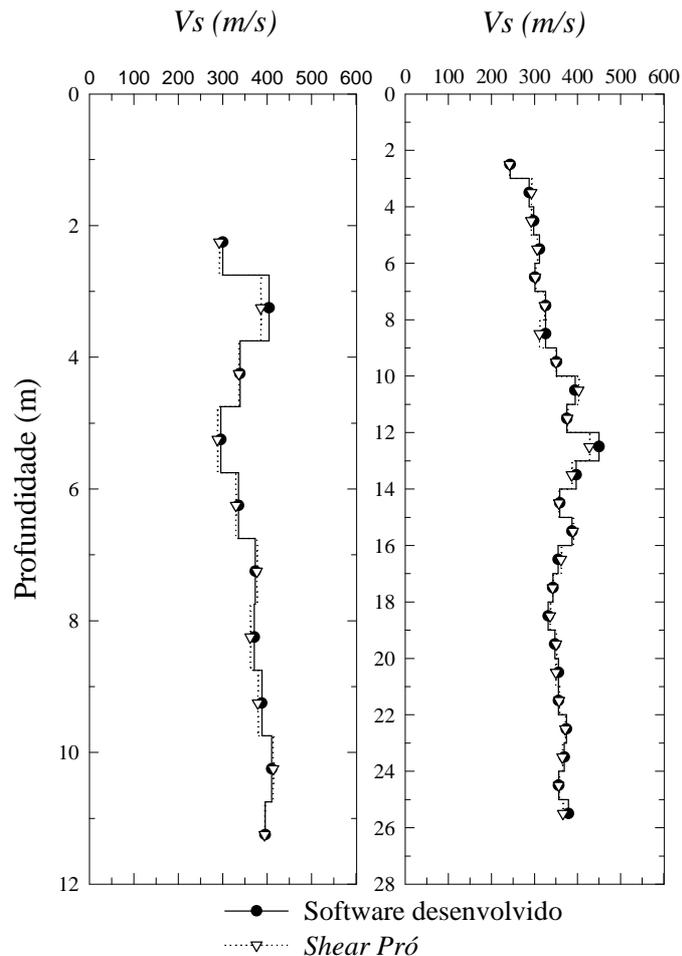


Figura 55 Comparação das velocidades calculadas pelo software desenvolvido na UNESP – Bauru com as calculadas pelo *Shear Pró*. Ambos utilizam o método *cross-correlation* e o intervalo verdadeiro de tempo. Os dois ensaios foram realizados atrás dos Laboratórios de Engenharia Civil no campus da UNESP – Bauru.

### 3.9.2. Cross-Correlation versus Cross-Over

A Figura 56 apresenta a comparação das velocidades calculadas pelos métodos *cross-correlation* e *cross-over*, onde se observa que ambos os métodos fornecem resultados equivalentes. Segundo Campanella e Stewart (1992) a interpretação pelo método *cross-correlation* é preferível pois este método considera todo o sinal registrado no cálculo de Vs e não apenas um ponto do sinal.

Entretando, a interpretação pelo método *cross-over* pode ser preferível caso não se

disponha de uma frequência de aquisição elevada (em ensaios realizados com frequência de aquisição de 10kHz, observou-se repetição exagerada das velocidades calculadas com o método *cross-correlation*) ou se as ondas registradas em profundidades subsequentes não são semelhantes (neste caso, observou-se variação alta nas velocidades calculadas pelo *cross-correlation* referentes a golpes numa mesma profundidade). É recomendável analisar as velocidades através dos dois métodos a fim de aferir os resultados.

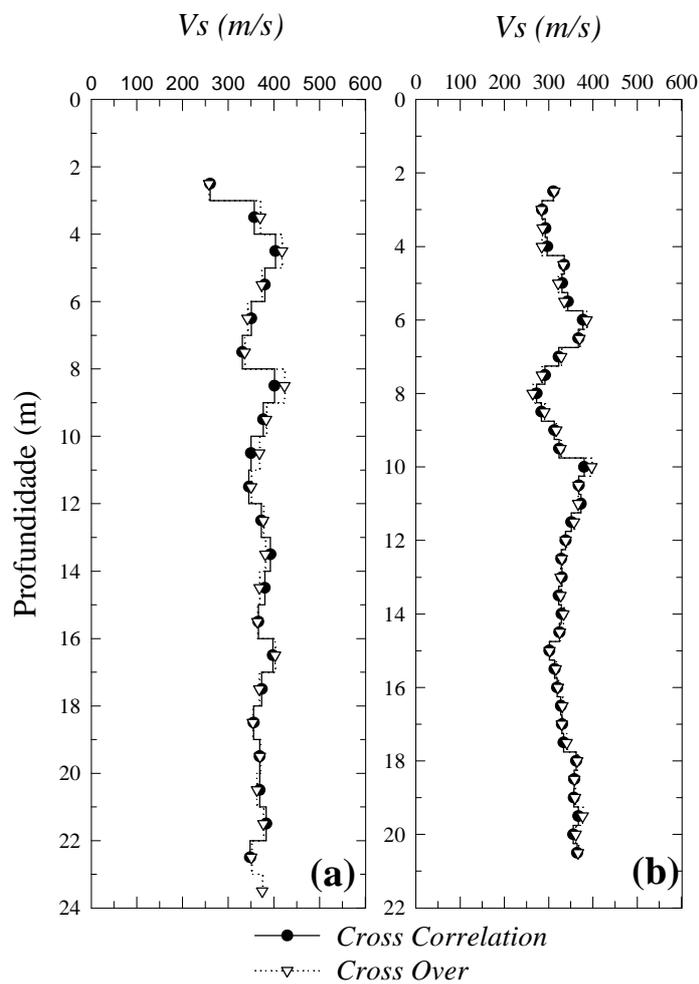


Figura 56 Comparação entre os valores de  $V_s$  calculados pelos métodos *cross-over* e *cross-correlation* com os resultados de um ensaio realizado no campus da UNESP – Bauru atrás dos Laboratórios de Engenharia Civil e outro realizado no campo experimental EESC – USP, em São Carlos.

### 3.9.3. Pseudo intervalo de tempo versus intervalo verdadeiro

Esta comparação tem por objetivo avaliar o dispositivo de *trigger* utilizado, uma vez que é sabido que as técnicas fornecem o mesmo resultado desde que se utilize um dispositivo de *trigger* preciso e repetitivo e uma fonte sísmica que gere ondas idênticas (Campanella e Howie, 2008). A Figura 57 apresenta a comparação dos resultados obtidos com ambos os intervalos de tempo.

Os perfis de velocidade obtidos com as duas técnicas são muito próximos. Vale destacar que, em alguns ensaios, obtiveram-se bons resultados com o intervalo verdadeiro e maus com o pseudo intervalo, portanto, a interpretação pelo método do intervalo verdadeiro de tempo é mais adequada.

Os gráficos apresentados na Figura 57 mostram três perfis de Vs obtidos com o pseudo intervalo, que correspondem a cada um dos geofones instalados na ponteira e um perfil de Vs obtido com o intervalo verdadeiro. A interpretação pelo pseudo intervalo é útil, pois permite comparar os resultados obtidos com cada geofone isoladamente.

### 3.9.4. Filtro

Tendo em vista as especificações dos geofones, utilizou-se o filtro Butterworth passa baixo de 400Hz de ordem 3, que corresponde a frequência de espúrio dos geofones utilizados. A aplicação deste filtro se mostrou bastante adequada pois ele elimina os ruídos sem defasar ou alterar a amplitude do sinal. Já o filtro passa baixo de 120Hz, recomendado por Campanella e Stewart (1992), mostrou ser totalmente inadequado, pois causa grande distorção no sinal. As Figuras 58 a 59 apresentam a influência dos filtros de 400Hz e de 120Hz.

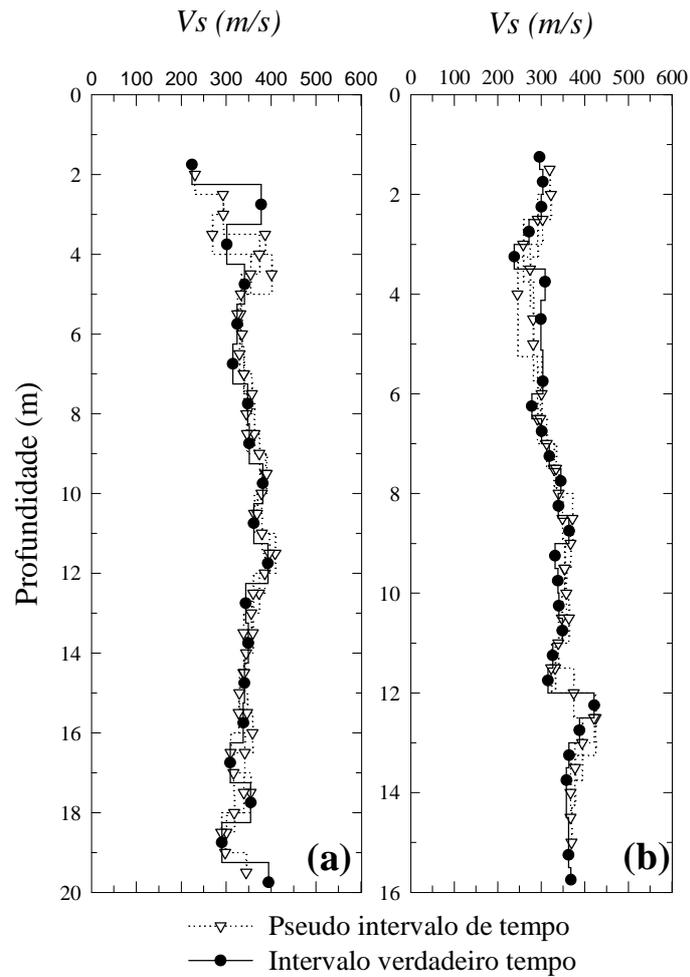


Figura 57 Comparação entre o intervalo verdadeiro e o pseudo intervalo de tempo com os resultados de um ensaio realizado no campus da UNESP – Bauru, atrás dos Laboratórios de Engenharia Civil (a), e outro realizado no outro campo experimental de Bauru (b).

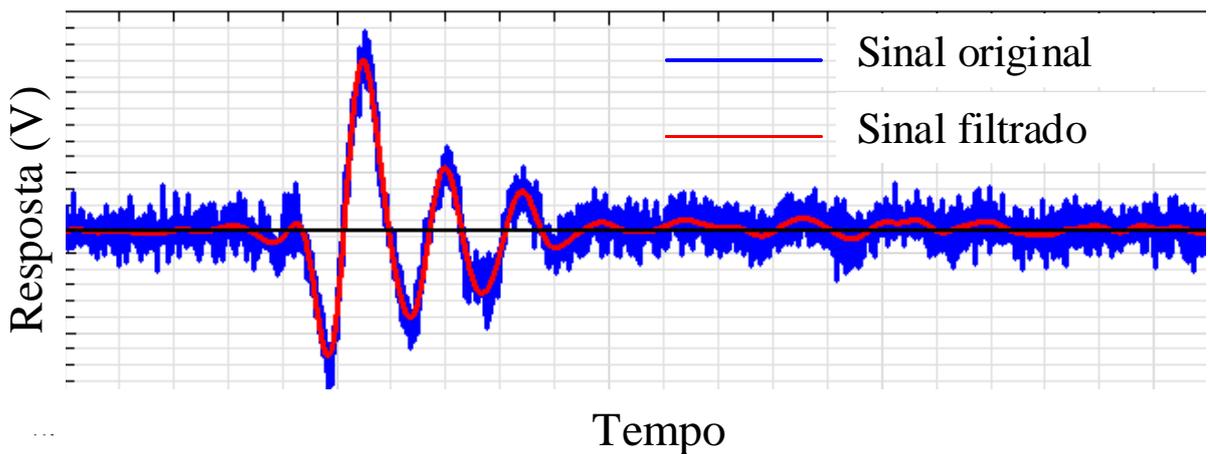


Figura 58 Comparação do sinal original com o sinal filtrado com filtro digital tipo passa-baixo com frequência de corte de 400Hz.

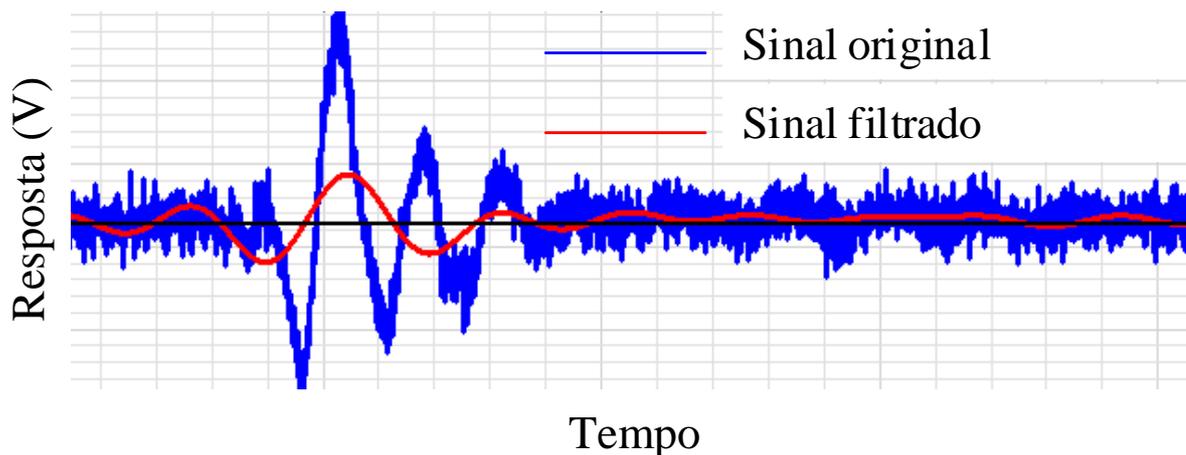


Figura 59 Comparação do sinal original com o sinal filtrado com filtro digital tipo passa-baixo com frequência de corte de 120Hz.

### 3.9.5. Espaçamento entre os geofones de 1,0m versus 0,5m

Com os resultados obtidos com a ponteira desenvolvida obtém-se, através do intervalo verdadeiro de tempo, duas velocidades com os geofones espaçados em 0,5m e uma velocidade com os geofones espaçados em 1m. Assim, é possível comparar os resultados obtidos com cada espaçamento.

Não foi encontrada na literatura pesquisada comparação similar a esta. Supõe-se que os resultados sejam equivalentes e que a utilização de um espaçamento menor seria mais adequada pois as ondas seriam mais semelhantes, favorecendo a aplicação do método *cross-correlation*, e a diferença das trajetórias percorridas pelas ondas sísmicas ( $\Delta L$ ) seria mais próxima ao espaçamento dos geofones, diminuindo os erros associados trajetória de propagação das ondas. A Figura 60 apresenta esta comparação, onde se observa que os resultados são equivalentes.

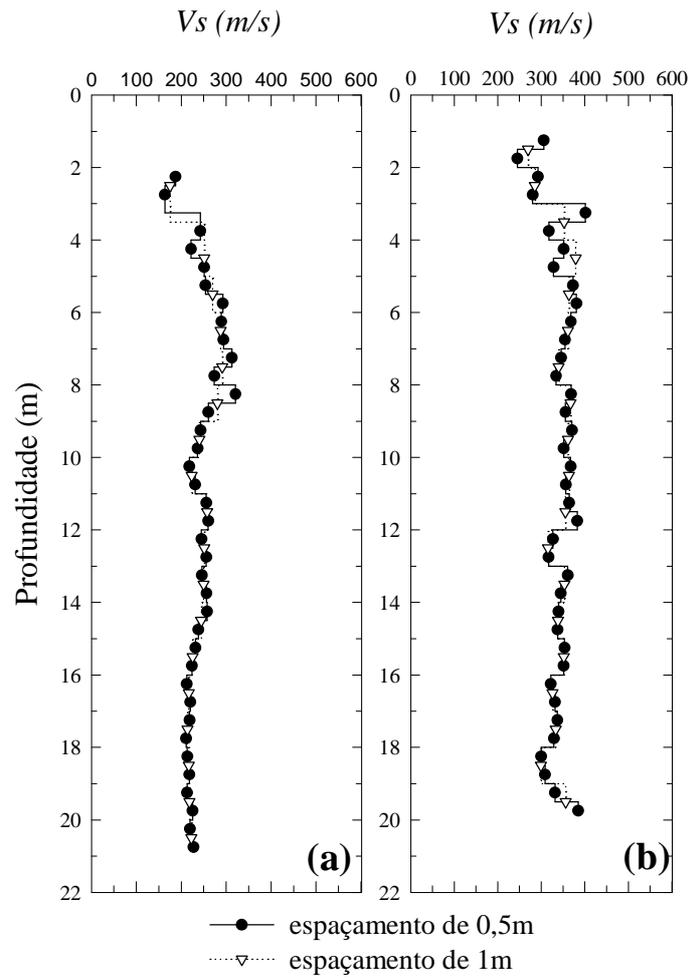


Figura 60 Comparação entre as velocidades calculadas com espaçamento de 1m e de 0,5m com os resultados obtidos no (a) campo experimental da UNICAMP, em Campinas, e (b) no campo experimental da UNESP, em Bauru.

## 4. CAMPOS EXPERIMENTAIS INVESTIGADOS

### 4.1. CAMPO EXPERIMENTAL DA EESC, USP – SÃO CARLOS

#### 4.1.1. Descrição da geologia

Segundo Giacheti (2001), o subsolo deste campo é composto por areia fina a média argilosa, colapsível e porosa até cerca de 7m de profundidade, seguida por uma camada de solo residual de Arenito do Grupo Bauru, arenito médio bem graduado, grãos angulosos, com cerca de 45% de areia e 35% de argila e de cor vermelha a rosada, com pontos brancos constituídos de feldspatos parcialmente alterados. Uma linha de seixos divide estas duas camadas. Uma descrição detalhada deste campo experimental pode ser encontrada Cintra et al (1991), citado por Giacheti (2001)

#### 4.1.2. Resultados de ensaios sísmicos

Resultados de dois ensaios *cross-hole* (CH1 e CH2) e de dois ensaios de cone sísmico (SCPTv3 e SCPTv4) realizados no campo experimental de São Carlos são apresentados e interpretados por Giacheti et al (2006b).

Os dois ensaios *cross-hole*, levados até 9m de profundidade, foram realizados em arranjo linear com três furos espaçados em 3m sendo os arranjos afastados em 30m. Os furos foram revestidos com PVC e utilizou-se argamassa para conseguir contato perfeito entre o tubo de PVC e o solo. A fonte sísmica gerava ondas sísmicas a partir de golpes na direção

vertical, gerando predominantemente ondas S tipo HV. Para aquisição dos dados, utilizou-se um osciloscópio.

Comparando os valores de Vs obtidos nos ensaios, os autores obtiveram uma diferença média de 9% entre o SCPT e o *cross-hole*, destacando maior diferença em 2m de profundidade, e de 6% entre os dois ensaios SCPT. Essa diferença foi atribuída a variações na geologia e a anisotropia do solo. Giacheti et al (2006a) também destaca a tendência de diminuição da razão  $G_0/q_c$  com a evolução do perfil. A Figura 61 apresenta os resultados obtidos pelos autores.

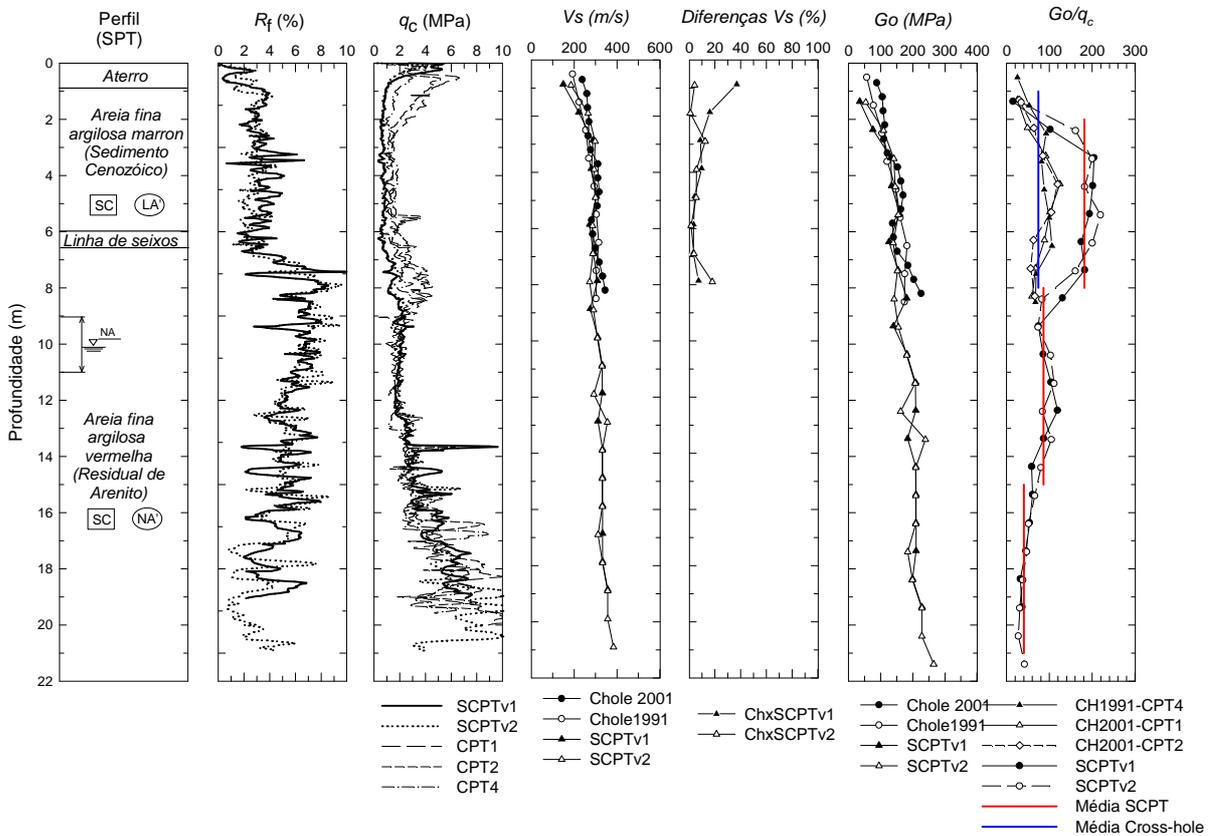


Figura 61 Resultados de ensaios CPT, SCPT e *cross-hole* realizados no campo experimental da EESC – USP (Giacheti et al, 2006a).

## 4.2. CAMPO EXPERIMENTAL DA UNESP – BAURU

### 4.2.1. Descrição da geologia

Giacheti (2001) descreve o solo presente no campo experimental como uma areia fina pouco argilosa de cor vermelha, classificada como SM-SC, porosa e colapsível, sendo que a densidade aumenta com a profundidade. O autor afirma que o solo apresenta comportamento laterítico até a profundidade de 13m, deixando de apresentá-lo a partir dessa profundidade. Giacheti et al. (2006b), destaca a variabilidade horizontal do comportamento do solo, observada através de análises dos resultados de ensaios CPT com cone elétrico. A grande variabilidade geotécnica deste campo é destacada por De Mio (2005) e Giacheti (2001), sendo esta associada a gênese do solo.

### 4.2.2. Resultados de ensaios sísmicos

Neste item são apresentados os resultados de um ensaio *cross-hole* e de dois ensaios de cone sísmico realizados neste campo e interpretados por Giacheti et al (2006b). Estes resultados (Figura 62) serão comparados aos resultados obtidos com a ponteira sísmica desenvolvida nesta pesquisa.

O ensaio *cross-hole* foi realizado até a profundidade de 15 metros com arranjo de três furos alinhados e espaçados em 2 e 3 metros registrando dados a cada 0,5m. Os dados foram adquiridos por um sismógrafo digital de 24 canais modelo DAS-1, da Oyo Geospace. Utilizaram-se geofones modelo DHTG da Gisco Inc., em arranjo triaxial. A fonte sísmica utilizada foi um martelo sísmico modelo DHSW, da Gisco Inc., que aplica golpes na direção vertical (de cima para baixo e vice-versa), gerando predominantemente ondas S do tipo HV (propagação na direção horizontal e vibração na vertical). As ondas P foram

identificadas a partir da primeira inflexão do sinal e as ondas S através da sobreposição de ondas com polaridade reversa (técnica *cross-over*).

Os ensaios SCPT foram realizados próximo aos furos do ensaio *cross-hole* até 20m de profundidade com um cone sísmico fabricado pela Vertek que possui um arranjo triaxial de geofones registrando ondas de metro em metro. As ondas sísmicas foram geradas através de golpes aplicados na lateral de uma placa metálica carregada com pesos, gerando predominantemente ondas S tipo VH (propagação na direção vertical e vibração na horizontal) e os dados foram aquisitados por um módulo condicionador de sinais de 16 canais, modelo ADS2000, da Lynx utilizando o software AqDados, também da Lynx. As velocidades das ondas sísmicas foram calculadas pelo método do intervalo utilizando o pseudo intervalo de tempo com técnica *cross-over*.

Giacheti et al. (2006b) destaca a semelhança entre as velocidades obtidas nos ensaios *down-hole* e *cross-hole* até a profundidade de 10m, com diferença relativa média de 9% sendo que a partir dessa profundidade, a diferença aumenta para, em média, o dobro. Os autores sugerem que este aumento da diferença é devido a anisotropia do solo e a grande variabilidade geológica deste campo analisada detalhadamente em De Mio (2005).

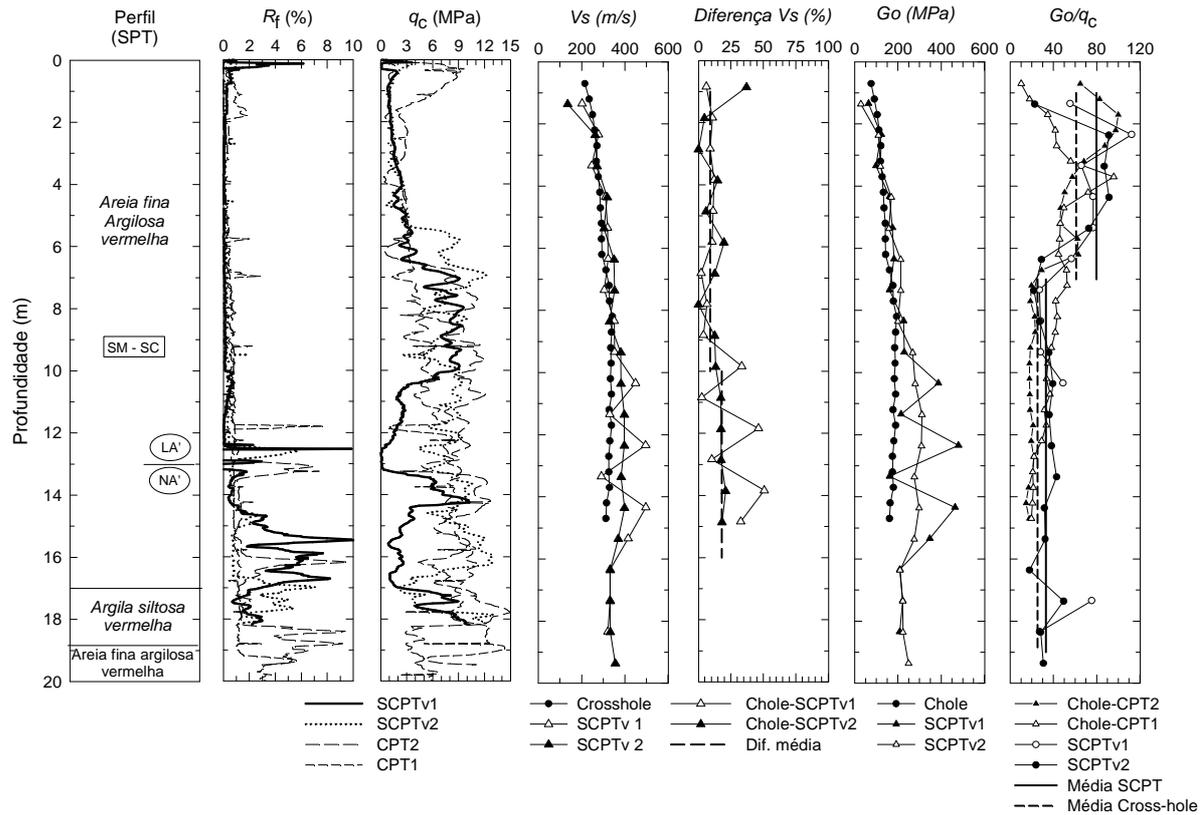


Figura 62 Resultados de ensaios CPT, SCPT e *cross-hole* realizados no campo experimental da UNESP – Bauru (Giacheti et al, 2006b).

No ensaio SCPTv2, a grande variação de  $V_s$  a partir entre 10 e 16m foi atribuída pelos autores à geologia, devido a intercalação de camadas com diferentes rigidez, assim, houve refração de ondas sísmicas que prejudicaram o ensaio. Os autores ainda destacam a grande variação na resistência de ponta do cone ( $q_c$ ) neste trecho, conforme mostra a Figura 62. Outra possível explicação seria erros na leitura das profundidades, que tendem a se compensar provocando a obtenção velocidades altas e baixas intercaladas.

Os autores destacam que a razão  $Go/q_c$ , que relaciona um parâmetro obtido à pequeníssimas deformações ( $Go$ ) com outro à grandes deformações ( $q_c$ ), tende a diminuir com o aumento da profundidade e, conseqüentemente, com a evolução do perfil sendo útil para a caracterização de solos tropicais.

### 4.3. CAMPO EXPERIMENTAL DA UNICAMP – CAMPINAS

#### 4.3.1. Descrição da geologia

O subsolo deste campo é composto basicamente por duas camadas, a primeira se estende até aproximadamente seis metros de profundidade e é constituída por uma argila areno-siltosa, porosa, de comportamento laterítico e colapsível. Abaixo desta, ocorre um solo silte argiloso residual de diabásio (Giacheti, 2001). Uma descrição pormenorizada deste campo pode ser encontrada em Carvalho et al (2000), citado por Giacheti (2001).

#### 4.3.2. Resultados de ensaios sísmicos

Giacheti et al (2007) apresentam os resultados obtidos em dois ensaios *cross-hole* (CH1 e CH2) e de dois ensaio SCPT (SCPTv1 e SCPTv2) neste campo experimental (Figura 63). Os ensaios *cross-hole* foram realizados nos mesmos furos (arranjo de três furos alinhados e espaçados em 2 e 3 metros) sendo que num dos ensaios foram obtidos dados de 0,5 em 0,5 metro e no outro de metro em metro. Utilizou-se fonte sísmica que aplica golpes na direção vertical nos dois sentidos e os dados foram registrados por osciloscópio.

Os autores ressaltam a semelhança dos resultados obtidos nos parâmetros  $q_c$  e  $R_f$  obtidos nos ensaios SCPTv1 e SCPTv2, indicando semelhança nos locais do ensaio. A diferença média entre  $V_s$  obtidas nos ensaios *cross-hole* e SCPT foi de 11,2%. As maiores diferenças ocorreram em 2m de profundidade e próximo a concreção. A diferença média entre as velocidades obtidas nos dois ensaios SCPT foi de 10,7%. Assim, as variações encontradas entre os ensaios *cross-hole* e SCPT foram consistentes com as variações encontradas entre os ensaios SCPT. Os autores associam esta diferença a variabilidade geológica e uma possível

anisotropia do solo.

Giacheti et al (2007) observam que a razão  $G_0/q_c$  é maior na espessura de solo laterítico e diminui com a evolução do solo. Barros et al (1999) citado por Giacheti et al (2007), explicam que isto acontece por causa da estrutura fracamente cimentada do solo, que aumenta a rigidez a pequeníssimas deformações e não interfere em grandes deformações.

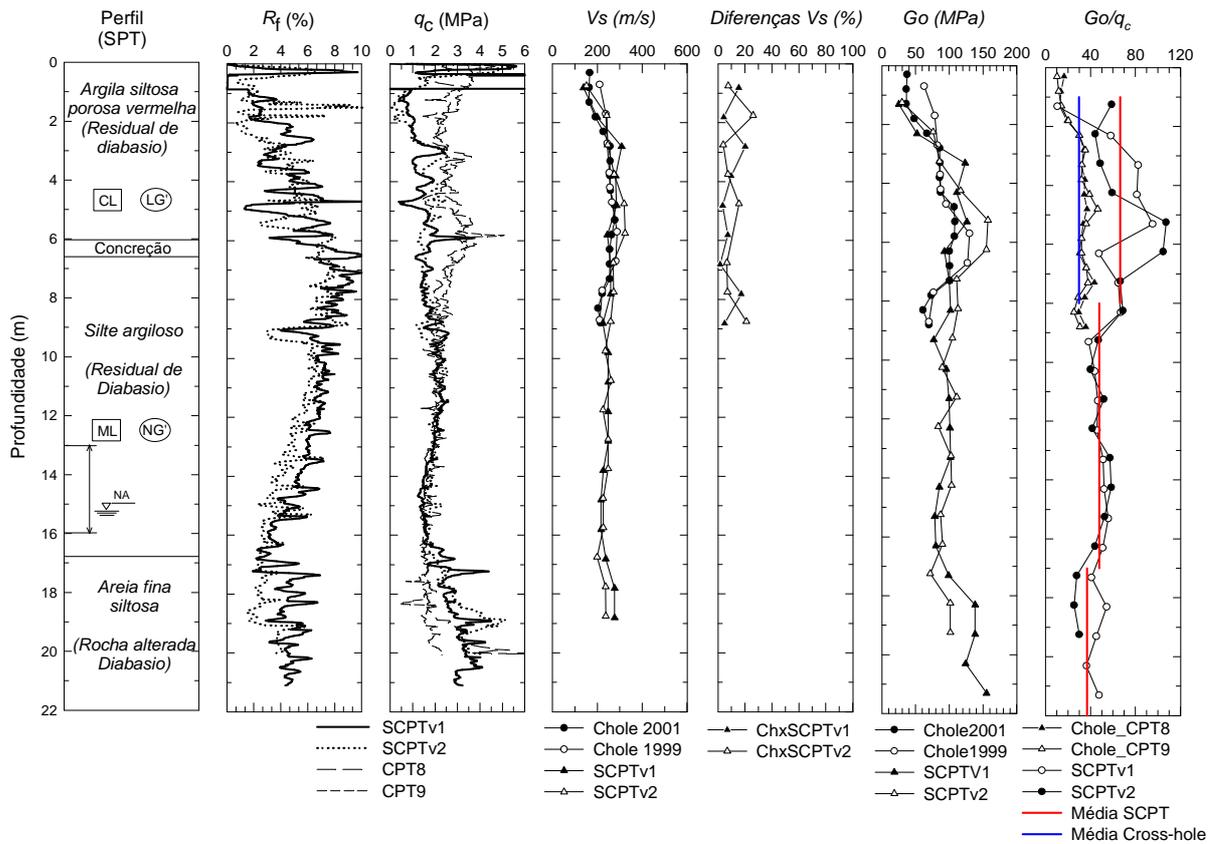


Figura 63 Resultados dos ensaios *cross-hole* e SCPT realizados no campo experimental de Campinas (Giacheti et al, 2007)

## 5. RESULTADOS E ANÁLISE

### 5.1. CAMPO EXPERIMENTAL DA EESC, USP – SÃO CARLOS

Realizou-se uma campanha de ensaios no campo experimental da EESC-USP, São Carlos/SP sendo um dos objetivos testar o sistema desenvolvido. Executaram-se três ensaios *down-hole* (DH1, DH2 e DH3) com o sistema desenvolvido, um SCPT (SCPT3) com o cone sísmico fabricado pela Vertek e três ensaios CPT (CPT1, CPT2 e CPT3) com o cone fabricado pela Geotech. Dispõe-se ainda dos resultados de dois ensaios *cross-hole* (CH1 e CH2) e de dois ensaios SCPT (SCPT1 e SCPT2) realizados com o cone sísmico fabricado pela Vertek, apresentados por Giacheti et al. (2006a) e no item 4.1. desse trabalho A Figura 64 apresenta a posição dos ensaios realizados.

Os ensaios *down-hole* (DH) foram realizados com o primeiro protótipo da ponteira sísmica, que possuía dois arranjos uniaxiais de geofones espaçados em 1m. A aquisição de dados foi feita com o sistema da Lynx, com frequência de aquisição de 15kHz, e com a fonte sísmica de madeira pequena distante 1,80m do furo. Os dados foram interpretados através do método *cross-correlation* utilizando o intervalo verdadeiro de tempo.

Os ensaios DH1 e DH2 forneceram excelentes resultados, já o DH3 forneceu resultados apenas satisfatórios. Parece que a ponteira girou durante a execução do ensaio, mudando a direção do eixo de vibração dos geofones e, conseqüentemente, registrando ondas sísmicas com menor nível de energia, portanto, seus resultados não serão apresentados. A Figura 65 apresenta exemplos de ondas sísmicas registradas no ensaio DH1. Nota-se

pior qualidade das ondas registradas em 7 e 8m, próximo a linha de seixos, devido a interferencia na trajetória das ondas que esta camada provoca.

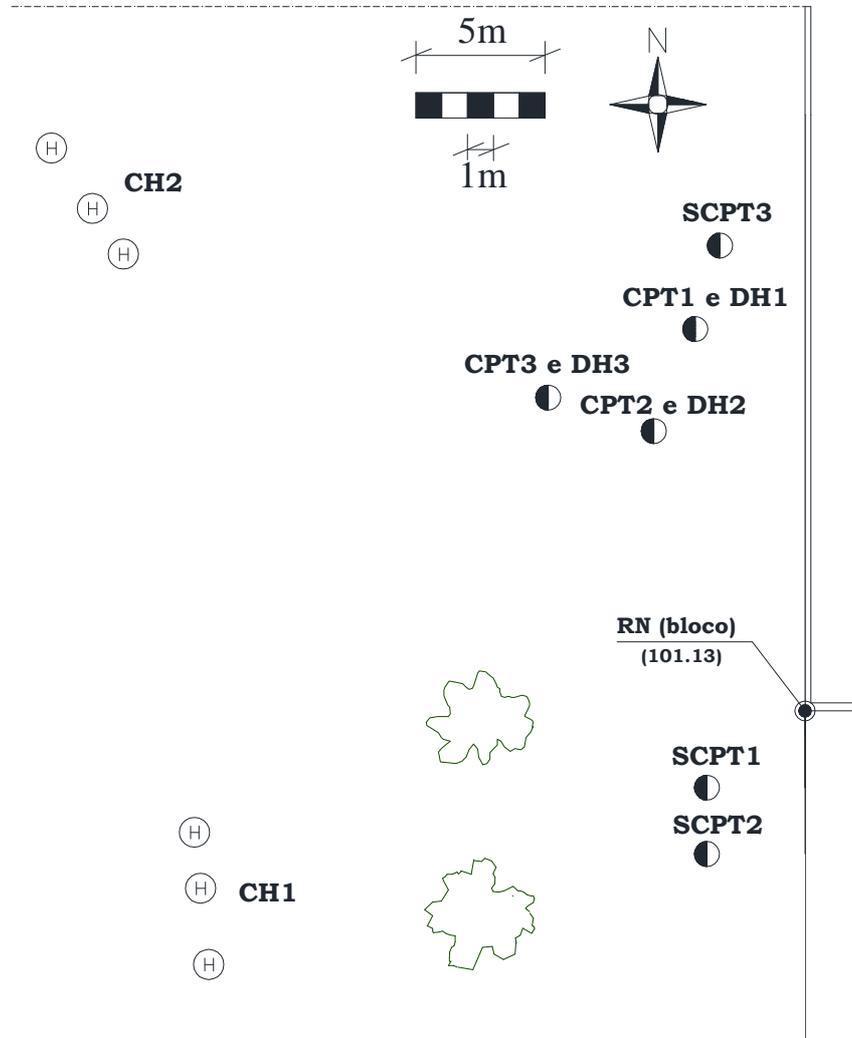


Figura 64 Posição dos furos dos ensaios realizados no campo experimental da EESC – USP, em São Carlos/SP.

### 5.1.1. Análise das velocidades das ondas S

A Figura 66 apresenta os resultados obtidos nos ensaios DH1, DH2, SCPT1, SCPT2, SCPT3, CH1 e CH2. Destaca-se que a diferença média entre os resultados dos ensaios DH1 e DH2 em relação ao CH1, de 7,7% e 6,3% respectivamente, e a diferença média entre os

ensaios *cross-hole* CH2 em relação ao CH1, de 7,9%, se encontram na mesma faixa de variação, indicando que os ensaios fornecem resultados equivalentes.

Esta semelhança não foi observada no primeiro metro de ensaio, entre 2 e 3m, provavelmente por causa da posição da fonte sísmica, que foi mantida a uma distância de 1,8m do furo, e na região da linha de seixos, entre 5 e 7m de profundidade, onde a diferença média entre os resultados dos ensaios DH1 e DH2 em relação ao CH1 foram, respectivamente, 25,4% e 14,6%. Destaca-se que nesta região os sinais obtidos nos ensaios sísmicos *down-hole* apresentaram pior qualidade, que foi associada a interferência da linha de seixos na trajetória de propagação das ondas sísmicas.

A partir de 8m de profundidade, onde não se dispõe de resultados de ensaios *cross-hole*, observa-se consistência entre os resultados obtidos nos ensaios *down-hole* obtidos com o sistema desenvolvido e com o cone sísmico comercial fabricado pela Vertek. Nesse caso a diferença média relativa variou entre 6%, exceto entre 9 e 11m de profundidade, que corresponde a região de variação do nível d'água, que essa diferença foi em torno 15,5%, tendo em vista que os ensaios foram realizados em épocas distintas. Acredita-se que esta diferença esteja associada a uma possível variação na profundidade do nível de água, que varia muito de acordo com a época do ano segundo, Giacheti et al (2006b). Esta variação implica em variações na sucção matricial do solo, que afetam a sua rigidez e, conseqüentemente, a velocidade de propagação das ondas S.

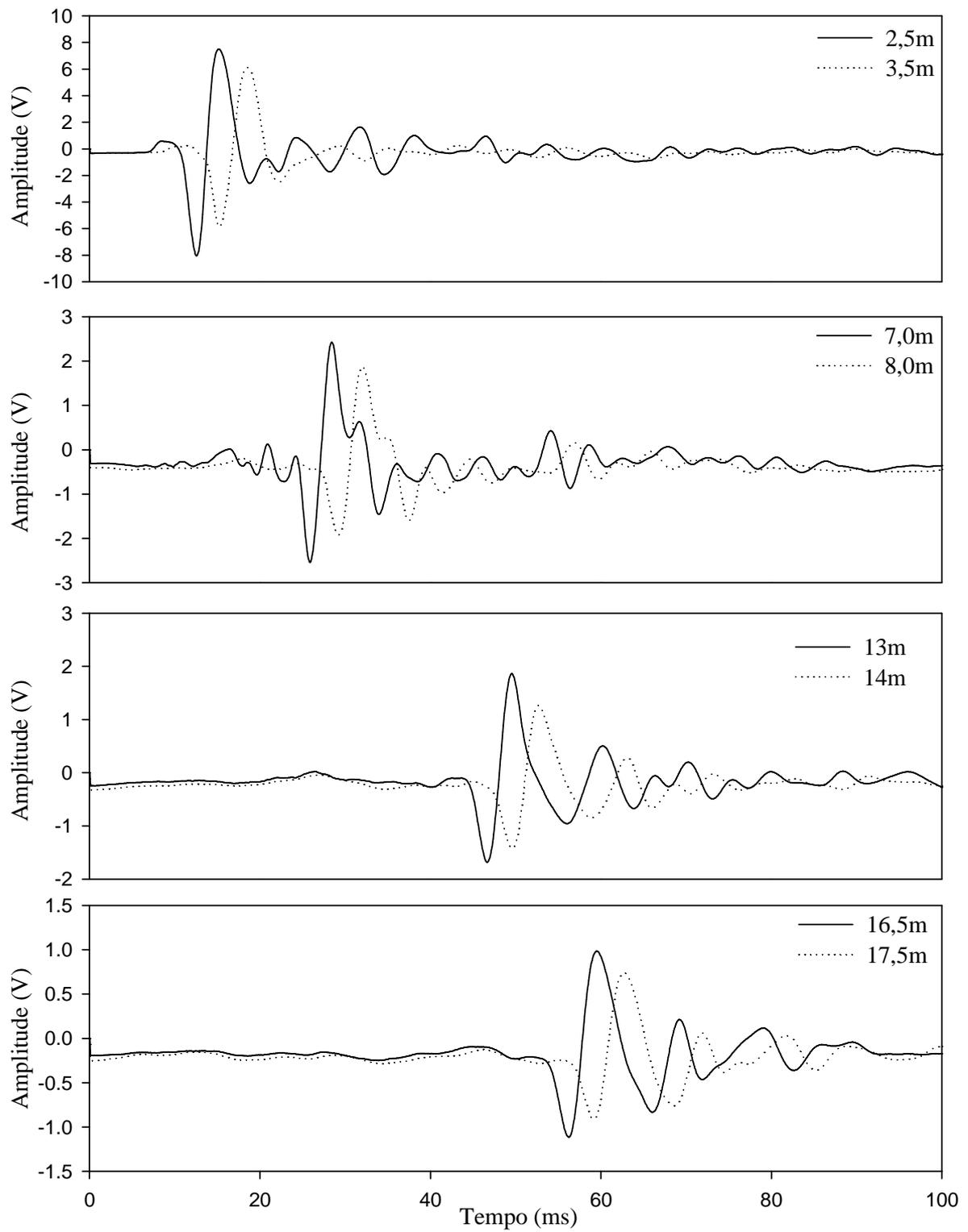


Figura 65 Exemplos de ondas registradas no ensaio DH1 realizado no campo experimental da EESC – USP, em São Carlos.

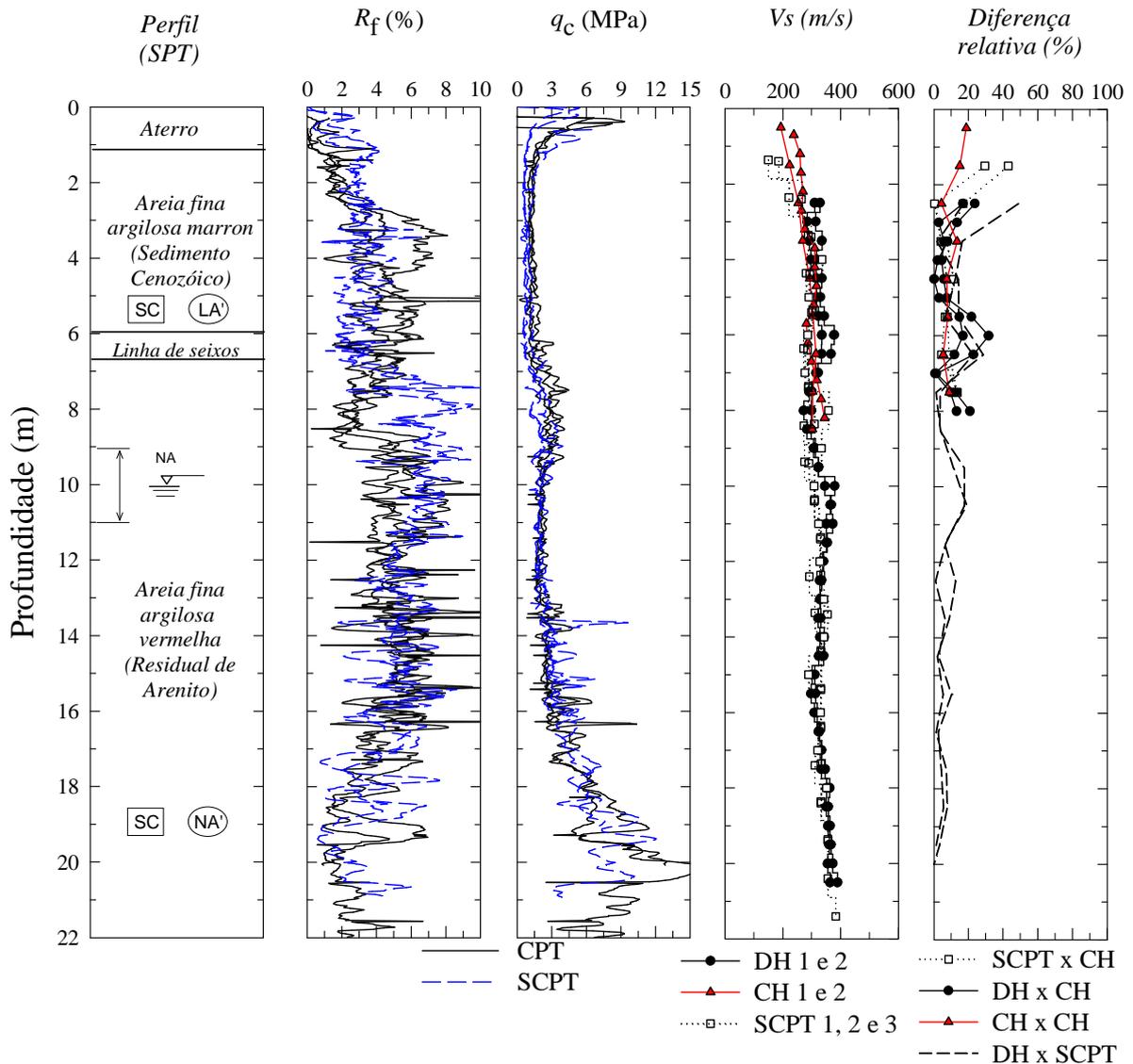


Figura 66 Perfis de  $q_c$ ,  $R_f$  e  $V_s$  obtidos no campo experimental da EESC – USP, em São Carlos.

## 5.2. CAMPO EXPERIMENTAL DA FEB, UNESP – BAURU

No campo experimental da UNESP, em Bauru, foram realizados quatro ensaios *down-hole* (DH1, DH2, DH3, DH4) com sistema desenvolvido e dois ensaios CPT (CPT1 e CPT2), com o cone fabricado pela Geotech. Neste campo são disponíveis resultados de um ensaio *cross-hole* (CH) e dois ensaios SCPT (SCPT1 e SCPT2) realizados com o cone sísmico fabricado pela Vertek. Estes ensaios foram descritos no item 4.2. desse trabalho A Figura 67

apresenta a posição dos ensaios realizados no campo experimental da UNESP, em Bauru.

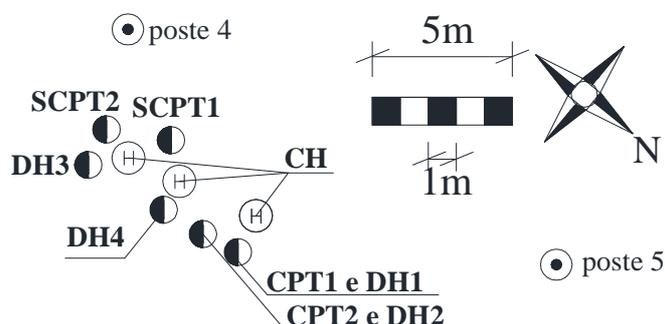


Figura 67 Posição dos ensaios realizados no campo experimental da UNESP, em Bauru/SP.

Os ensaios DH1 e DH4 foram realizados com o equipamento de cravação do piezocone posicionado paralelamente ao alinhamento dos furos do *cross-hole* e os ensaios DH2 e DH3, perpendicularmente. O objetivo deste procedimento é avaliar uma possível anisotropia do solo.

Este campo é próximo ao IPMET (Instituto de Pesquisas Meteorológicas de Bauru), assim, os ruídos presentes neste campo são muito intensos devido a interferência dos radares. Os ensaios DH1 e DH2 realizados com o sistema de aquisição da National Instruments utilizando frequência de aquisição de 40kHz, que corresponde ao dobro da frequência de aquisição mínima recomendada por Butcher et al. (2005), forneceram registros de baixa qualidade devido ao fenômeno *aliasing*, que consiste na amostragem inadequada do sinal devido a utilização de frequência de aquisição menor do que a requerida. Como efeito, os ruídos de alta frequência apareciam no sinal com uma frequência mais baixa, corrompendo o sinal. Portanto, os resultados obtidos nestes ensaios foram desconsiderados.

A Figura 68 apresenta alguns registros obtidos no ensaio DH1, onde se observa que para pequenas profundidades, a chegada da onda S é facilmente identificada no sinal. Com o

aumento da profundidade e consequente atenuação das ondas S, sua identificação torna-se cada vez mais difícil.

No ensaio DH3, utilizou-se o sistema da Lynx e as ondas registradas apresentaram excelente qualidade pois este sistema, que tem uma capacidade de aquisição baixa, possui filtro analógico *anti-aliasing*, que impede a aquisição de frequências acima da capacidade de aquisição do sistema. Dessa forma, os ruídos que haviam corrompido o sinal nos ensaios anteriores não foram registrados.

No ensaio DH4, voltou-se a utilizar o sistema de aquisição da National Instruments, agora utilizando uma frequência de aquisição de 150kHz. Dessa forma, os ruídos presentes foram registrados adequadamente e removidos do sinal posteriormente com filtro digital, fornecendo excelentes resultados. A Figura 69 apresenta o sinal original e o sinal filtrado com filtro passa baixo com frequência de corte de 400Hz num dos registros. A Figura 70 mostra os sinais obtidos neste ensaio em diferentes profundidades, filtrados com filtro Butterworth tipo passa-baixo de ordem 3 com frequência de corte de 400Hz.

### 5.2.1. Análise das velocidades das ondas S

Os resultados dos ensaios sísmicos *down-hole* realizados com o sistema desenvolvido foram interpretados utilizando o intervalo verdadeiro de tempo e o método *cross-correlation* com os sinais obtidos com a barra de aço posicionada a frente do equipamento de cravação do piezocone, a 30cm do furo.

A Figura 71 apresenta os resultados obtidos neste campo nos ensaios (DH3, DH4, CPT1, CPT2, SCPT1 e CH). Destaca-se que o ensaio DH4 foi feito posicionando o equipamento de cravação paralelo ao alinhamento dos furos do ensaio *cross hole* e o

DH3, perpendicular a este alinhamento, o objetivo disto é avaliar uma possível anisotropia do solo.

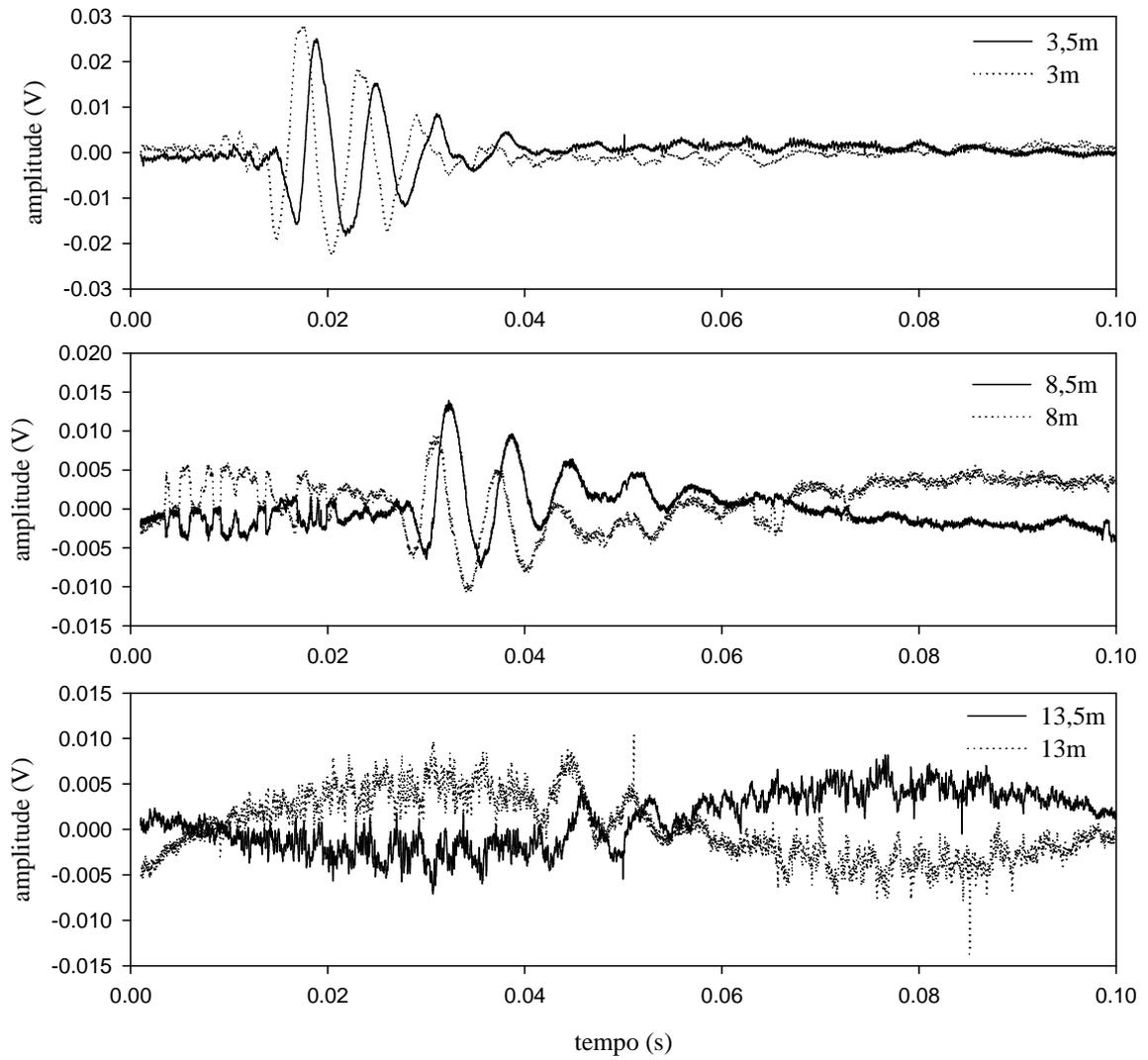


Figura 68 Sinais obtidos no ensaio DH1, sem filtro, com frequência de aquisição de 40kHz, realizado no campo experimental da UNESP – Bauru.

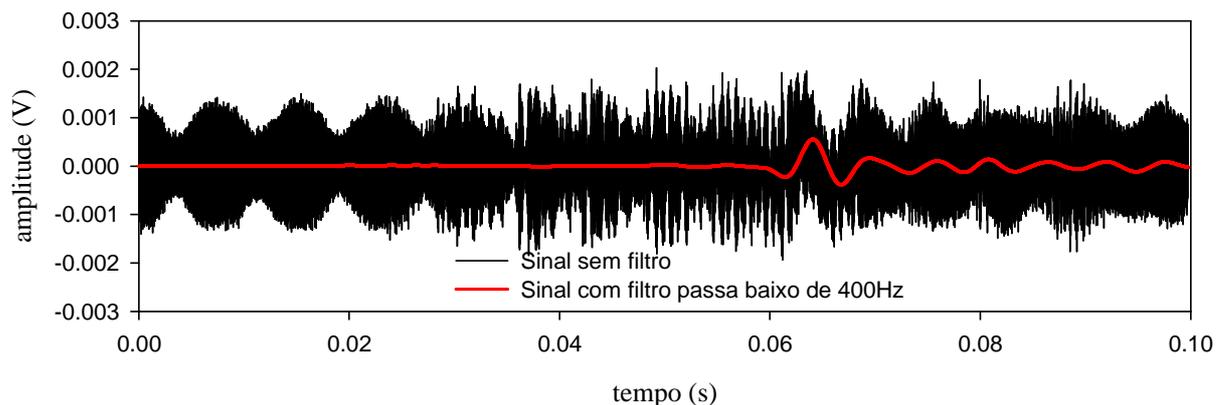


Figura 69 Sinal obtido no ensaio DH4, realizado no campo experimental da UNESP – Bauru, a 20 metros de profundidade com filtro passa baixo de 400Hz (Butterworth de ordem 3) e sem filtro.

Nesta mesma Figura também é apresentada a comparação dos resultados obtidos nos ensaios *down-hole* feitos com o sistema desenvolvido com os resultados obtidos nos outros ensaios sísmicos. Em relação ao resultado obtido no ensaio *cross-hole*, nota-se que:

a) o ensaio DH4 forneceu resultados muito semelhantes, com diferença média de 5,8% com pouca variação desta diferença ao longo da profundidade;

b) com resultado obtido no ensaio DH3 a diferença média foi de 14,7% até 7m de profundidade e de 5,9% a partir daí;

c) com resultado obtido no ensaio SCPT1 a diferença foi de 9,2% até 10m de profundidade e de 18,2% de 10 até 15m.

As diferenças observadas foram associadas a grande heterogeneidade do solo deste campo experimental, destacada por Giacheti et al. (2006a), e por uma possível anisotropia do solo.

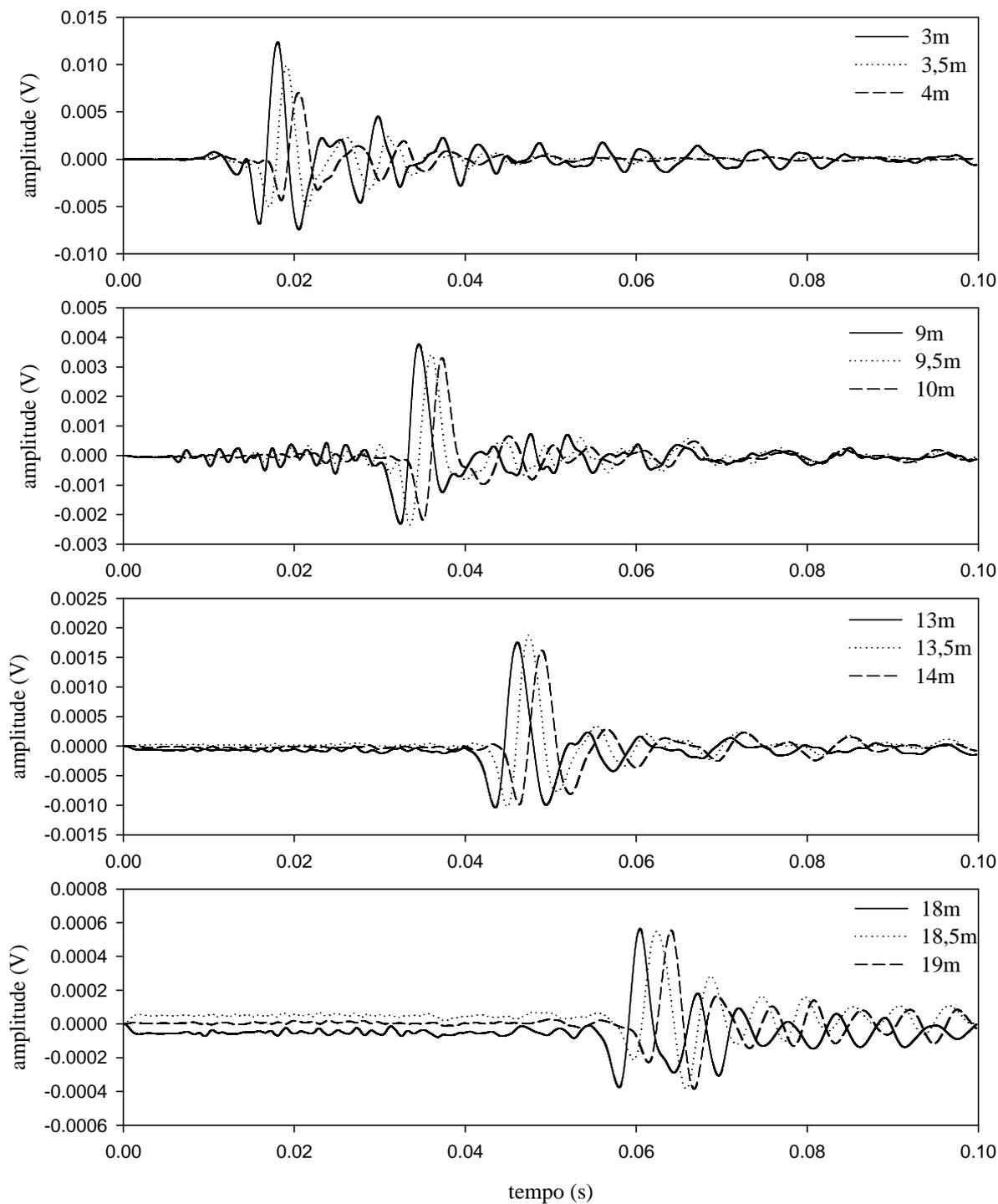


Figura 70 Sinais obtidos no ensaio DH4, realizado no campo experimental da UNESP – Bauru, filtrados com filtro passa baixo de 400Hz (Butterworth de ordem 3).

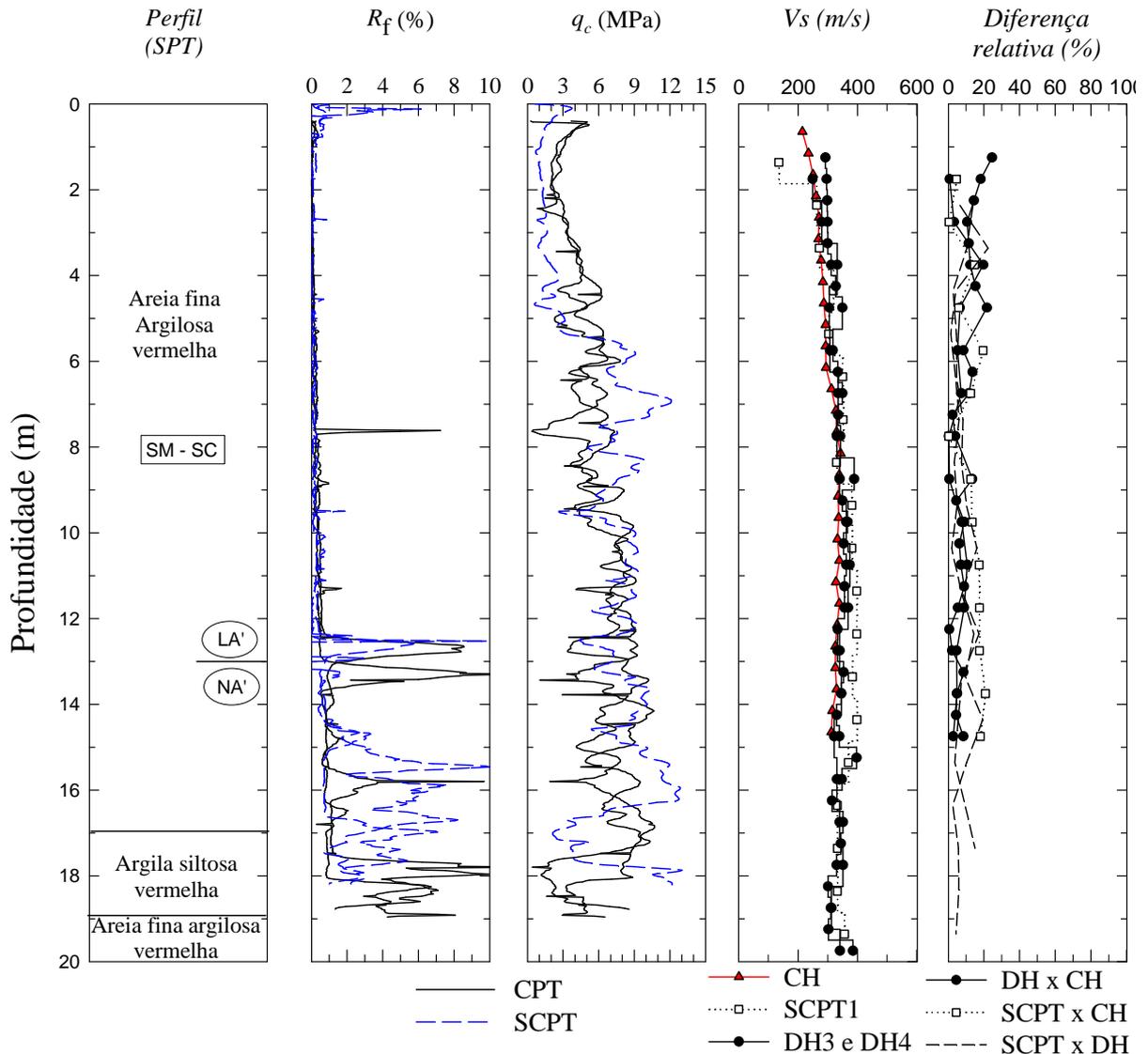


Figura 71 Perfis de  $q_c$ ,  $R_f$ ,  $V_s$  obtidos em ensaios no campo experimental da UNESP, em Bauru.

### 5.3. CAMPO EXPERIMENTAL DA UNICAMP – CAMPINAS

No campo experimental da UNICAMP, em Campinas, foram realizados dois ensaios *down-hole* (DH1 e DH2) com sistema desenvolvido, que foram comparados aos resultados obtidos em um ensaio *cross-hole* (CH) e em dois ensaios SCPT (SCPT1 e SCPT2) realizados com cone sísmico fabricado pela Vertek, apresentados por Giacheti et al (2007) e descritos no item 4.3 deste trabalho.

A Figura 72 apresenta a posição dos ensaios no campo experimental da UNICAMP. O ensaio DH2 (levado até a 7m de profundidade) foi realizado no novo campo experimental da UNICAMP, em Campinas, distante cerca de 500m do local onde os demais ensaios foram realizados.

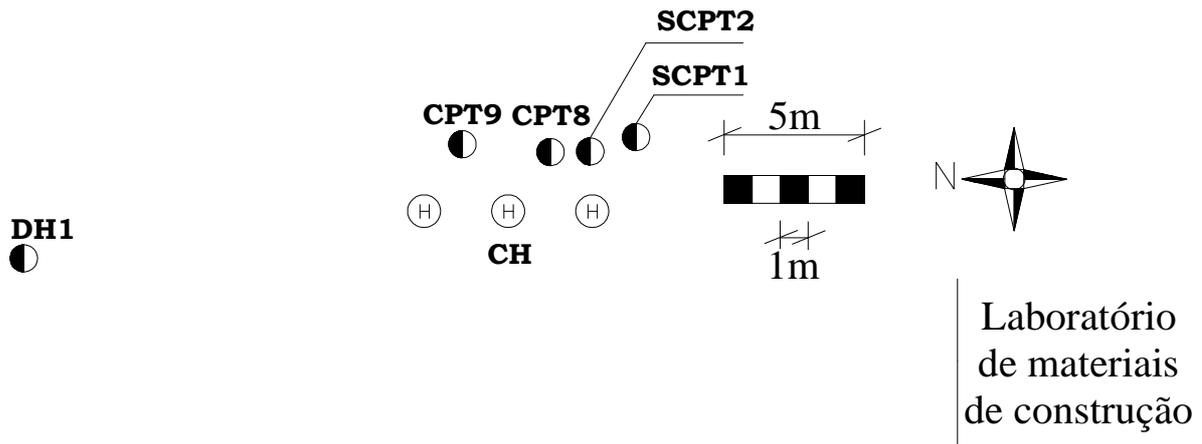


Figura 72 Posição dos ensaios realizados no campo experimental da UNICAMP, em Campinas/SP.

Para realização dos ensaios com o sistema desenvolvido, utilizou-se a aquisição de dados da National Instruments, com frequência de aquisição de 150kHz, e a barra de aço posicionada na frente como fonte sísmica. Os resultados foram interpretados pelo método *cross-correlation* utilizando o intervalo verdadeiro de tempo.

A Figura 73 apresenta alguns sinais obtidos nesta campanha. Os registros obtidos apresentaram qualidade inferior ao dos ensaios realizados nos outros campos experimentais, mas isto não interferiu na interpretação pois as ondas S eram facilmente identificadas. Destaca-se que a partir de 15m de profundidade, passaram a ser registradas ondas P que não eram removidas pelo filtro passa baixo de 400Hz.

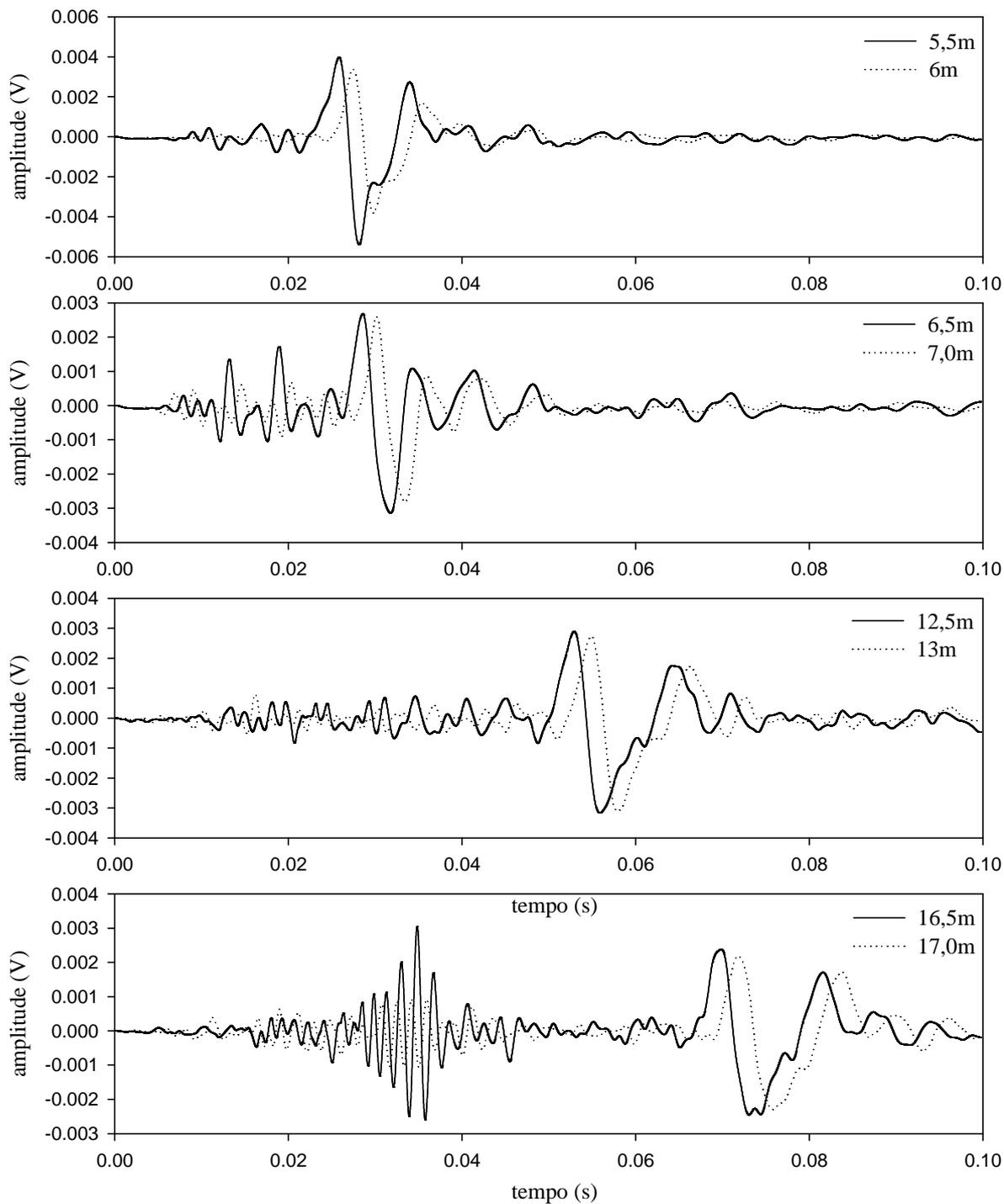


Figura 73 Sinais obtidos no ensaio DH1, realizado no campo experimental de Campinas, filtrados com filtro Butterworth passa baixo de ordem 3 com frequência de corte de 400Hz.

### 5.3.1. Análise das velocidades das ondas S

A Figura 74 apresenta os resultados obtidos neste campo nos ensaios DH1, DH2, CPT8, CPT9, SCPT1, SCPT2 e CH. Observa-se que os resultados obtidos nos ensaios DH1 e DH2 apresentaram excelente consistência. Até a profundidade de 9m, observa-se grande dispersão tanto dos valores de  $V_s$  como nos valores de resistência de ponta ( $q_c$ ), indicando grande variabilidade geológica do local.

As diferenças dos resultados obtidos nos ensaios DH1, DH2, SCPT1 e SCPT2 em relação ao resultado obtido no ensaio CH foram, respectivamente, 22,4%, 19,4%, 9,3% e 14,8%.

De 9m até 17m, onde ocorre solo residual de diabásio, há excelente consistência entre os resultados dos ensaios SCPT1, SCPT2 e DH1, apresentando uma diferença média de 5,8%. Destaca-se também a semelhança dos resultados dos valores de  $q_c$  nesta região, indicando maior homogeneidade das propriedades geotécnicas dessa camada. Passados 17m de profundidade, quando atinge uma camada de areia fina siltosa, nota-se aumento nas diferenças tanto de  $V_s$  quanto de  $q_c$ , sendo que a diferença média entre os resultados do ensaio DH1 em relação aos dois ensaios SCPT, foram de 18% e 9,8%.

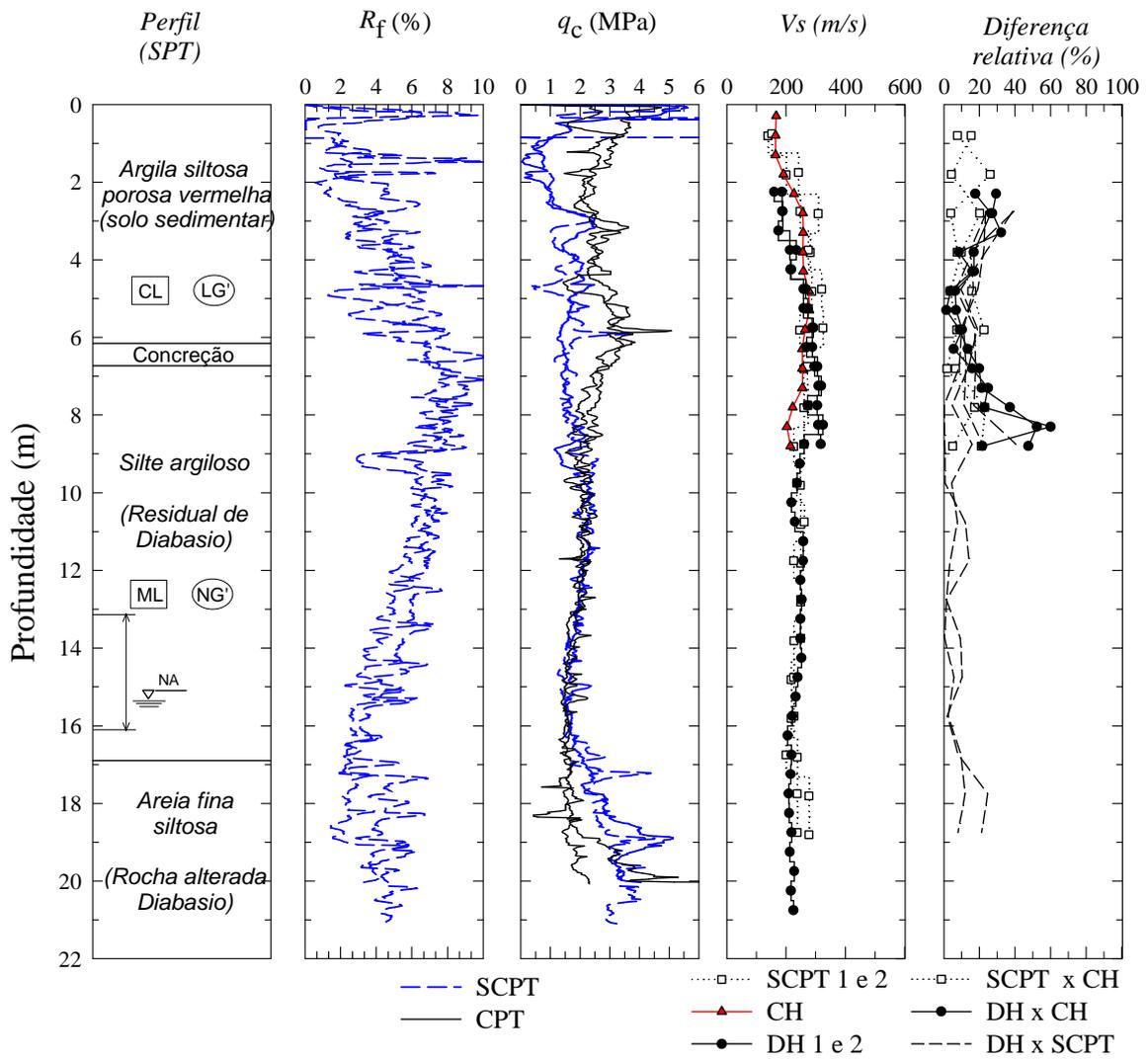


Figura 74 Perfis de  $q_c$ ,  $R_f$  e  $V_s$  obtidos no campo experimental da UNICAMP, Campinas.

## 6. CONCLUSÃO

### 6.1. QUANTO AO SISTEMA DESENVOLVIDO

O sistema desenvolvido para realização da sísmica *down-hole* mostrou ser muito eficiente e confiável. Com o aperfeiçoamento do software de aquisição em Labview, incluindo a interpretação dos resultados com o método *cross-correlation* e utilizando o intervalo verdadeiro de tempo durante a execução do ensaio, a etapa posterior aos trabalhos de campo de interpretação dos resultados foi dispensada, dando maior praticidade ao ensaio.

Os testes realizados no Laboratório de Dinâmica da EESC – USP mostraram que os sensores apresentam resposta idêntica, fundamental para utilização do intervalo verdadeiro de tempo, e que o processo de instalação não interferiu na sua resposta.

A utilização de três geofones espaçados em 0,5m na ponteira sísmica foi muito interessante, pois permite a obtenção de um perfil de Vs mais detalhado, importante para identificação de camadas mais ou menos rígidas, sem demandar maior tempo de ensaio. Os resultados obtidos com espaçamento de 1m e de 0,5m foram considerados equivalentes.

A consistência dos resultados obtidos com o intervalo verdadeiro de tempo e o pseudo intervalo de tempo mostrou que o dispositivo de trigger utilizado é adequado.

O sistema de aquisição da National Instruments utilizando o software Labview foi muito apropriado, pois este sistema possui uma alta capacidade de aquisição e seu custo é relativamente baixo. Deve-se ter atenção quanto a frequência de aquisição utilizada a fim de

evitar o fenômeno *aliasing*, que pode comprometer o ensaio. A utilização de uma frequência de aquisição alta garante uma amostragem adequada dos ruídos presentes, que podem ser removidos com filtro digital. Outra opção é utilizar filtro analógico, que filtra o sinal no momento da aquisição, entretanto, deve-se verificar se este filtro não provoca defasagem do sinal. A utilização de uma frequência de aquisição de 150kHz mostrou ser adequada, garantindo amostragem apropriada e uma excelente resolução do domínio do tempo, importante para interpretação através do método *cross-correlation*. Recomenda-se utilizar a maior frequência de aquisição permitida pelo sistema de aquisição de dados e utilizar filtro digital para remoção dos ruídos, se necessário.

Foram obtidos melhores resultados com a fonte sísmica posicionada na frente do equipamento de cravação, mantendo uma distância de 0,3m do furo, consistente com a recomendação de Butcher et al. (2005). O posicionamento da fonte sísmica próximo ao furo torna a diferença entre as distâncias percorridas pela onda sísmica ( $L_2-L_1$ ) mais próxima do espaçamento entre os geofones na ponteira, diminuindo os erros associados a trajetória de propagação das ondas.

Por fim, a consistência obtida entre os resultados obtidos nos ensaios *down-hole*, realizados com o sistema desenvolvido com os resultados de ensaios SCPT realizados com equipamento comercial e com os obtidos no ensaio *cross-hole*, permitiram validar o sistema. As diferenças observadas foram associadas a heterogeneidade do solo bem como pelo possível comportamento anisotrópico deles.

## 6.2. QUANTO A EXECUÇÃO DO ENSAIO

Observou-se que a confiabilidade dos resultados do ensaio *down-hole* está diretamente

relacionada com a qualidade dos sinais obtidos, que depende fortemente dos cuidados tomados durante a execução do ensaio. Para obtenção de registros sísmicos com qualidade, o fator que mais influenciou foi o posicionamento do eixo de vibração dos geofones paralelo à direção de aplicação dos golpes. O procedimento de fixar fortemente as hastes, com chave de grifo, assegurou a manutenção da posição correta dos geofones durante a execução do ensaio. A intensidade com que o golpe era aplicado à fonte sísmica também apresentou grande influência na qualidade dos sinais. Constatou-se que aplicando golpes com baixa intensidade as ondas obtidas apresentavam melhor qualidade, sendo preferíveis pois facilitam a interpretação.

### 6.3. QUANTO A INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

A utilização do intervalo verdadeiro de tempo e do método *cross-correlation*, selecionando o pulso principal das ondas S, foi a que forneceu melhores resultados, embora a interpretação com o pseudo intervalo de tempo e com o método *cross-over* também terem fornecido bons resultados. É interessante interpretar os dados por mais de uma técnica, a fim de avaliar a qualidade dos resultados.

A utilização de filtro de sinais é fundamental quando o nível de ruídos é elevado, possibilitando uma interpretação confiável dos resultados do ensaio. O filtro Butterworth tipo passa-baixo com frequência de corte de 400Hz, que corresponde a frequência de espúrio dos geofones utilizados nesta pesquisa, mostrou ser bastante adequado e sua utilização é recomendada.

#### 6.4. SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE

Desenvolver um piezocone possível de ser incorporado a ponteira sísmica desenvolvida, possibilitando a realização simultânea dos ensaios CPTu e *down-hole*.

Avaliar o potencial razão  $G_0/q_c$  para caracterização de solos tropicais, levando em consideração a influência da sucção matricial do solo através de medidas de sucção feitas *in situ*.

Explorar outras interpretações dos resultados do ensaio *down-hole*, como a determinação do amortecimento do solo, apresentado por Stewart (1992). Para isso, seria necessário substituir os geofones utilizados neste trabalho por acelerômetros ou geofones com frequência natural baixa.

## REFERÊNCIAS

BARROS, J. M. C. Módulo de cisalhamento dinâmico de solos tropicais. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

BONITO, F.; ALMEIDA, F.; CARDOSO, C.; GOMES, C.; ROCHA, F. O piezocone sísmico e sua aplicação no reconhecimento e caracterização de solos da região de Aveiro. Anais do 8º Congresso Nacional de Geotecnia, Vol 1. pp 165-172, Lisboa, 2002.

BUTCHER, A. P. E POWELL, J. J. M. Practical considerations for field geophysical techniques used to assess ground stiffness. Advances in site investigation practice. Thomas Telford, p.701-714, London, 1996

BUCHER, A. P., CAMPANELLA, R.G., KAYNIA, A. M., MASSARCH, K. R. Seismic cone downhole procedure to measure shear wave velocity – a guideline. The International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Technical Committee No 10: Geophysical testing and geotechnical engineering, 2005.

CRICE D. Shear waves: techniques and systems. California, USA. Disponível em: <ftp://geom.geometrics.com/pub/Literature/Seismic/seismic.html>, acesso em: 23/10/2010.

CAMPANELLA, R; G. E HOWIE, J.A. Guidelines for the use, interpretation and application of seismic piezocone test data, Geotechnical Research Group Department of Civil Engineering The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2008.

CAMPANELLA, R. G, ROBERTSON, P. K., LAING, N. E KURFURST, P. J. Seismic cone penetration testing in the Beaufort sea. 3rd Canadian Conference on Marine Geotechnical Engineering, Memorial University, St. John's, Newfoundland, June 11-13, 1986.

CAMPANELLA, R. G. E STEWART, W. P. Seismic cone analysis using digital signal processing for dynamic site characterization, Canadian Geotechnical Journal, vol. 29, n.3, p.477-486, 1992.

CAMPANELLA, R. G.; STEWART, W. P.; ROY, D. E DAVIES, M. P. Low strain dynamic characteristics of soils with the downhole seismic piezocone penetrometer, ASTM Symposium on Dynamic Geotechnical Testing II, 1213, Reno, p. 73-87, 1994.

CAMPANELLA, R. G. E DAVIES, M. P. The seismic piezocone: A practical site investigation tool. XIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Technical Comitte #10, New Delphi, India, 1994.

DE MIO, G. Condicionantes geológicos na interpretação de ensaios de piezocone para identificação estratigráfica na investigação geotécnica e geoambiental, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, Departamento de Geotecnia, São Carlos, SP, 2005.

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. Dissertação de Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, FEUP, Porto, Portugal, 2003.

GIACHETI, H. L. Os ensaios de campo na investigação do subsolo: Estudo e considerações quanto à aplicação em solos tropicais. Livre Docência, Faculdade de Engenharia, UNESP, Bauru/SP, 2001.

GIACHETI, H. L.; DE MIO, G; PEIXOTO, A. S. P. Cross-hole and Seismic CPT Tests in a Tropical Soil Site. Proceedings of the ASCE GeoCongress 2006, Atlanta/GA/USA,,: ASCE, v. CD-ROM. p. 1-6, 2006a.

GIACHETI, H. L.; DE MIO, G.; DOURADO, J. C.; MALAGUTTI FILHO, W. Comparação entre Resultados de Ensaio Sísmicos Down-Hole e Cross-Hole no Campo Experimental da UNESP de Bauru. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Curitiba. v. 2. p. 669-674, 2006b.

GIACHETI, H. L.; PEIXOTO, A. S. P. DE MIO; G. Cross-hole and SCPT tests in a tropical soil from Campinas-SP, Brazil. XIII Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. CD-Rom. p. 1-6. ETI, Isla Margarita, Venezuela, 2007.

HOAR, R. J. E STOKOE, K. H, Generation and measurement shear waves in situ. Dynamic Geotechnical testing, ASTM STP 654, American Society for Testing Materials, pp 3-29. 1978. (citado por Campanella e Robertson, 1986 e por Ferreira, 2003).

INMAN, D. J. Vibration with control, measurement and stability. Prentice Hall, New Jersey, 1989.

JACOBS P. A. E BUTCHER A. P. The development of the seismic cone penetration test and its use in geotechnical engineering. Advances in site investigation practices, Thomas Telford, London, 1996.

LAING, N. L. Sources and receivers with the seismic cone test. Dissertação de Mestrado, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1985.

MAYNE P. W., SCHNEIDER J. A. Evaluating axial drilled shaft response by seismic cone. Foundations & Ground Improvement, GSP 113, ASCE, Reston/VA, pp. 655-669, 2000.

MARCHETTI S., MONACO P., TOTANI G., MARCHETTI D. In situ tests by seismic dilatometer (SDMT), ASCE Geotechnical Special Publications Honoring Dr, John H. Schmertmann From Research to Practise in Geotechnical Engineering GSP N° 170, 2008.

PEDRINI R. A. A.; VITALI O. P. M.; GIACHETI, H. L. Software para Análise de Registros Sísmicos em Ensaios Down-hole com o Piezocone. Anais do XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Gramado, RS, 2010.

RICE A. H. The seismic cone penetrometer. Dissertação de mestrado. University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1984.

ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R. G.; GILLESPIE, D. E RICE, A. Seismic CPT to measure in-situ shear wave velocity, Journal of Geotechnical. Engineering. ASCE, vol. 112, n.8, p. 791-804, 1986.

RODRIGUES, C.; BONITO, F., ALMEIDA, F., MOURA, R., CARDOSO, C., CONSTANTINO, F., Ondas de superfície na avaliação de parâmetros elásticos de solos: estudo comparativo com outros métodos sísmicos. Anais do X Congresso Nacional de Geotecnia, CD-ROM, Lisboa, Portugal, 2006.

SAMPAIO, M. A. Avaliação de metodologia de projetos de fundações superficiais de aerogeradores assentes em areia de duna. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

SCHEFFER, L. Desenvolvimento e aplicação do cone sísmico. Dissertação de mestrado. Departamento de engenharia civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.

SCHNEIDER, J.A.; HOYOS, L.; JR., MAYNE; P.W., MACARI; E.J.; RIX, G.J. Field and laboratory measurements of dynamic shear modulus of Piedmont residual soils. Behavioural Characteristics of Residual Soils, GSP 92, ASCE, Reston, VA, pp. 12-25, 1999.

STEWART, W. P. In situ measurement of dynamic soil properties with emphasis on damping. Tese de doutorado, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1992.

SULLY, J. P.; CAMPANELLA R. G. In situ shear wave velocity determination using seismic cone penetrometer for evaluating soil anisotropy. Earthquake Engineering, Tenth World Conference , Balkema, Rotterdam, 1992.

SULLY, J. P.; CAMPANELLA R. G. Evaluation of in situ anisotropy from cross-hole and down-hole shear wave velocity measurements, Géotechnique 45, nº 2, 267 – 282, 1995.

VIANA DA FONSECA A.; FERREIRA, C. Bender elements como técnicas laboratoriais excelentes para avaliação de parâmetros geotécnicos referenciais. Anais do 8º Congresso Nacional de Geotecnia, Vol. 1, pp. 353-365. SPG, Lisboa, Portugal, 2003.

VITALI O. P. M.; PEDRINI R. A. A.; GIACHETI, H. L. Primeiros resultados do desenvolvimento de um sistema para realização de ensaios sísmicos down-hole. Anais do 12º Congresso Nacional de Geotecnia, Guimarães, Portugal, 2010.

VITALI O. P. M.; PEDRINI R. A. A.; GIACHETI, H. L. Fatores que afetam a determinação do módulo de cisalhamento máximo em ensaios sísmicos down-hole com o piezocone. Anais do XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotecnia, CD-ROM, Gramado, RS, 2010.