



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades

unesp 

Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

RUBENS ANTONIO AMARAL PEDRINI

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA SÍSMICA UP-HOLE EM
CONJUNTO COM O ENSAIO SPT**



Bauru
2012

RUBENS ANTONIO AMARAL PEDRINI

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA SÍSMICA UP-HOLE EM
CONJUNTO COM O ENSAIO SPT**

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

Orientador: Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti

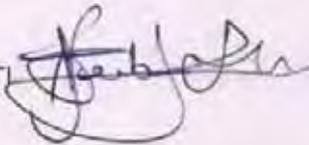


Bauru
2012

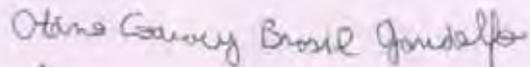
ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de RUBENS ANTONIO AMARAL PEDRINI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Ao 01 dia do mês de junho do ano de 2012, às 14:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA SEÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETI do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. OTÁVIO COARACY BRASIL GANDOLFO do(a) Centro de Tecnologia de Obras de Infraestrutura / Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, Prof. Dr. GEORGE DE PAULA BERNARDES do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de RUBENS ANTONIO AMARAL PEDRINI, intitulado "DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA SÍSMICA UP-HOLE EM CONJUNTO COM ENSAIO SPT". Após a exposição, o discente foi argüido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

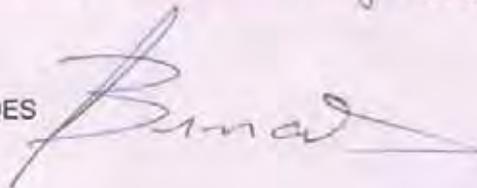
Prof. Dr. HERALDO LUIZ GIACHETI



Prof. Dr. OTÁVIO COARACY BRASIL GANDOLFO



Prof. Dr. GEORGE DE PAULA BERNARDES



Pedrini, Rubens Antonio Amaral.

Desenvolvimento de sistema para sísmica up-hole em conjunto com o Ensaio SPT / Rubens Antonio Amaral Pedrini, 2012

127 f.

Orientador: Heraldo Luiz Giacheti

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012

1. Investigação do subsolo. 2. SPT. 3. Sísmica
4. Up-hole. I. Universidade Estadual Paulista.
Faculdade de Engenharia. II. Título.

"Tornamos o nosso mundo significativo pela coragem de nossas perguntas e pela profundidade de nossas respostas"

Carl Sagan

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sempre presente em minha vida, e pelas oportunidades que tem me dado.

Aos meus pais, Cláudio e Maria, pelo carinho, apoio e incentivo em todas as etapas da minha vida. Da mesma forma, ao meu irmão Rafael, que também está sempre presente e ajudando em minhas decisões.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti, pela confiança em mim depositada, pelo tempo e dedicação despendidos durante estes últimos cinco anos na graduação e mestrado.

Aos professores do programa de pós-graduação pelos ensinamentos. Em particular, agradeço ao Prof. George, à Profa. Anna e ao Prof. Osvaldo, que contribuíram diretamente para realização deste trabalho.

Aos colegas de curso pelo companheirismo, em especial à Marcia pela amizade ao longo destes anos.

Aos técnicos do Laboratório de Mecânica dos Solos da Unesp de Bauru, Sérgio e Gustavo, pela amizade, auxílio nos testes dos equipamentos e ensaios de campo realizados.

À FAPESP pela bolsa de mestrado concedida e auxílio no desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao CNPq, que permitiu a aquisição do equipamento utilizado nesta pesquisa.

Em suma, agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta o sistema e a metodologia para realização e interpretação de ensaios sísmicos *up-hole* durante uma sondagem de simples reconhecimento (SPT). Este ensaio híbrido, conhecido também como S-SPT, incorpora a medida de velocidade de propagação de ondas de cisalhamento (V_S) ao ensaio SPT, visando uma melhor investigação do subsolo. A possibilidade de se medir, ao mesmo tempo e no mesmo furo, os valores de N do SPT e V_S , permitem calcular o módulo de cisalhamento máximo (G_0), abrindo uma nova perspectiva para investigação de solos tropicais colapsíveis, a partir da relação G_0/N , similar a relação G_0/q_c . O sistema é composto por um *hardware* (geofones, *trigger* e sistema de aquisição de dados) e *softwares*, um para registro dos sinais sísmicos e outro para sua interpretação. A metodologia de execução dos ensaios foi aperfeiçoada, a partir da realização de várias campanhas de ensaios de campo. Para a interpretação dos sinais e cálculo das velocidades foi elaborado um *software*, que possibilita definir os perfis de V_S sem a necessidade de outras ferramentas. Esse *software* possibilita o processamento e visualização dos registros, além de permitir aplicar um método específico para cálculo das velocidades de onda considerando a refração das ondas durante sua propagação através das diversas camadas do meio, conforme a Lei de Snell. Foram realizadas campanhas de ensaios S-SPT em um campo experimental localizado na cidade de Bauru, interior do estado de São Paulo, Brasil, para desenvolver o sistema e validar sua aplicação. Os resultados desses ensaios foram comparados com valores de V_S referência, determinados através de ensaios sísmicos *down-hole*, tipo SCPT. O ensaio S-SPT mostrou ser uma técnica interessante e aplicável, uma vez que a diferença entre os valores de V_S medidos com os de referência foi baixa, com um valor médio inferior a 10 % para as áreas investigadas. Deste modo, pode ser considerada uma opção para a determinação do módulo de cisalhamento máximo, com a vantagem de poder ser executado em conjunto com o ensaio mais empregado de investigação do subsolo, o SPT.

PALAVRAS-CHAVE: Investigação do subsolo, SPT, Sísmica, *Up-Hole*.

ABSTRACT

This work presents a system and methodology for performing and interpreting up-hole seismic tests together with the Standard Penetration Test (SPT). This hybrid test, also known as S-SPT, incorporates the measurement of shear waves velocity propagation (V_S) in the SPT, for a better site investigation. The possibility of measuring simultaneously in the same borehole, the N SPT and the V_S values which allows calculating the maximum shear modulus (G_0), opens new perspectives for the investigation of collapsible tropical soils, from G_0/N ratio, similar to G_0/q_c . The system consists of a hardware (geophones, trigger and data acquisition system) and softwares, one to record of the seismic signals and the other for its interpretation. The methodology for carrying out the tests was improved after several field trials. A software was developed for interpretation of records and calculating velocities, which allows to define the V_S profiles without the need of additional tools. This software enables processing and displaying records, and also allows applying a specific method for calculating velocities considering the waves refraction during their propagation through the various layers of the soil mass, according to the Snell's Law. The S-SPT campaigns were carried out in an experimental field located in the city of Bauru, São Paulo, Brazil, to develop the system and validate its application. The results of these tests were compared with V_S reference values, which were determined by the down-hole seismic test, SCPT type. The S-SPT test proved to be an interesting applicable technique, since the differences to the V_S reference values were small, with an average lower than 10 % for the investigated site. The S-SPT test can be considered as an option for determining the maximum shear modulus, with the advantage of being performed together with the most widely used test for site investigation, the SPT.

KEYWORDS: Site Investigation, SPT, Seismic, Up-Hole.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de ensaio SPT (Belincanta, 1998 apud Neves, 2004).....	6
Figura 2 - Ensaios up-hole, cross-hole e down-hole (modificado de Schneider et al, 1999).....	9
Figura 3 - Esquema do ensaio cross-hole. (modificado de Luna & Jadi, 2000).	10
Figura 4 - Resultado típico de um ensaio cross-hole (adaptado de Giacheti et al, 2006).	11
Figura 5 - Representação esquemática dos métodos up-hole(a) e down-hole (b) (modificado de Luna e Jadi, 2000).	12
Figura 6 - Curva típica de tensão-deformação de um corpo sólido (Kearey, 2009).	14
Figura 7 - Módulos (adaptado de Kearey, 2009).	15
Figura 8 - Ondas de corpo: (A) Onda P (B) Onda S (Bolt, 1992 apud Kearey, 2009).	16
Figura 9 - Ondas de Superfície: (A) Onda Rayleigh ; (B) Onda Love (Bolt, 1992 apud Kearey, 2009). ...	18
Figura 10 - Raio de onda refratado e refletido (Kearey, 2009).	19
Figura 11 - Curva de degradação (Seed & Idriss, 1970 apud Quispe, 2008).	20
Figura 12 - Seção transversal esquemática de um geofone de bobina móvel (Kearey, 2009).	25
Figura 13 - Respostas de amplitude e fase de um geofone com uma frequência de ressonância de 7 Hz para diferentes fatores de amortecimento (Baseado em Telford et al, 1976 apud Kearey, 2009).	26
Figura 14 - Relação sinal-ruído (Reynolds, 1997).	28
Figura 15 - Diversas fontes de ruídos em ensaios geofísicos (modificado de Reynolds, 1997).	28
Figura 16 - Sinal considerado limpo em pulso principal da onda S e comparação dos espectros dos sinais (Stewart, 1992 apud Vitali, 2011).	29
Figura 17 - Registro típico para do momento de chegada das ondas P e S (Giacheti, 2001).	30
Figura 18 – Método do cruzamento para intervalo de tempo (adaptado de Campanella & Stewart, 1992).	31
Figura 19 - Coeficiente de correlação versus defasagem de tempo (adaptado de Campanella & Stewart, 1992).	32
Figura 20 - Execução de um ensaio SCPT down-hole (adaptado de Karl et al, 2006).	34
Figura 21 - Piezocone sísmico - SCPTU (adaptado de Davies & Campanella, 1995 apud Giacheti, 2001).	35
Figura 22 - Procedimento para realização do piezocone sísmico (adaptado de Rice, 1984, apud Giacheti, 2001).	36
Figura 23- Método do Intervalo (adaptado de Kim et al, 2004).	36
Figura 24 - Esquema do método S-SPT (Bang & Kim, 2007).	39
Figura 25 - Modelo numérico e componentes das ondas geradas em um ensaio S-SPT (Bang & Kim, 2007).	40
Figura 26 - Simulação de sinal gerado a 3m de profundidade e recepção na superfície (Bang & Kim, 2007).	41
Figura 27 - Simulação de sinal gerado a 18m de profundidade e recepção na superfície (Bang & Kim, 2007).	41
Figura 28 - Simulação de sinal gerado a 39m de profundidade e recepção na superfície (Bang & Kim, 2007).	41
Figura 29 - Sinais típicos registrados por Bang & Kim (Bang & Kim, 2007).	43
Figura 30 - Sinais típicos registrados por Akinet al (Akin et al, 2011).	43

Figura 31 - Representação esquemática do método DTR (Bang & Kim, 2007).....	45
Figura 32 - Determinação do valor de V_s pelo método DTR (Bang & Kim, 2007).	45
Figura 33 - Representação esquemática do método DTS (Bang & Kim, 2007).	48
Figura 34 - Ilustração de equipamento SPT utilizado nos ensaios.	50
Figura 35 - Penetrômetro multi-função durante ensaio SCPT.....	51
Figura 36 - Curva de resposta do geofone modelo GS-20DH (GeoSpaceIp.com).	52
Figura 37 - Processo de montagem das caixas.	53
Figura 38 - Ponteira com 3 geofones desenvolvida por Vitali (2011).	53
Figura 39 - Esquema de trigger e geração de ondas empregados nos ensaios S-SPT.....	54
Figura 40 - Fonte sísmica e detalhe dotrigger utilizados nos ensaios SCPT.	55
Figura 41 - Caixa confeccionada para acondicionamento do equipamento de aquisição de dados e seus conectores.....	56
Figura 42 - Tela de análise de sinais sísmicos do SCPT (Pedriniet al, 2010).	57
Figura 43 - Barra de aço cravada no solo servindo para aterramento.	58
Figura 44 - Teste de eficácia do aterramento.....	58
Figura 45 - Frequências predominantes do ruído.	59
Figura 46 - Aplicação de filtro passa-baixa de 1000 Hz para eliminação de ruído.	59
Figura 47 - Fluxograma de fixação das caixas com geofones.	59
Figura 48 - Fixação dascaixas no solo.....	60
Figura 49 - Fluxograma dos procedimentos de execução do ensaio up-hole com o SPT.....	61
Figura 50 - Tela inicial do programa de aquisição de dados.	62
Figura 51 - Edição de parâmetros e arquivos de saída.	63
Figura 52 - Indicação de abas com diferentes filtros configurados e displays dos registros sísmicos pelos sensores verticais e horizontais.....	64
Figura 53 - Estrutura do arquivo de dados.....	65
Figura 54 - Programa de análise dos registros.	67
Figura 55 - Visualização de sinais.	68
Figura 56 - Aplicação de filtro.	69
Figura 57 - Aplicação de filtro de banda - 10 Hz a 180 Hz.....	69
Figura 58 - Seleção de 1 período do sinal.....	70
Figura 59 - Adicionando um sinal.	70
Figura 60 - Aplicação do método da correlação cruzada.....	71
Figura 61 - Sinais separados e sobrepostos após aplicação do método da correlação cruzada.....	71
Figura 62 - Propriedades para plotagem de perfil de ondas.....	72
Figura 63 - Perfil de ondas.	73
Figura 64 - Apresentação de perfil de ondas pela profundidade.	73
Figura 65 - Análise da soma das raízes dos quadrados dos sinais verticais e horizontais.	74
Figura 66 - Apresentação do perfil de ondas utilizando-se o recurso proposto.	74
Figura 67 - Tabela de tempos de chegada.	75
Figura 68 - Quadro para exportação dos dados.	75
Figura 69 - Módulo de análise.....	76

Figura 70 - Posição dos ensaios realizados.....	78
Figura 71 - Ensaio de laboratório de caracterização (adaptado de Avesani, 2009).....	79
Figura 72 - Ensaio de campo de caracterização.....	80
Figura 73 - Locação das caixas e orientação dos geofones (no ensaio S-SPT).	84
Figura 74 - Sinais gerados com golpe do próprio martelo do SPT.....	84
Figura 75 - Sinais gerados com golpe de martelo de mão de 2 kg.	84
Figura 76 - Variação dos sinais com profundidade do amostrador SPT.....	86
Figura 77 - Perfil de ondas a 7,5m do furo de sondagem - Filtro de 400 Hz.....	88
Figura 78 - Perfil de ondas a 7,5m do furo de sondagem - Filtro de 120 Hz.....	88
Figura 79 - Perfil de ondas a 7,5m do furo de sondagem - Filtro de 80 Hz.....	88
Figura 80 - Perfil de ondas S-SPT1 - 1,3 m do furo de sondagem.	91
Figura 81 - Perfil de ondas S-SPT1 - 2,9 m do furo de sondagem.	91
Figura 82 - Perfil de ondas S-SPT1 - 4,9 m do furo de sondagem.	91
Figura 83 - Perfil de ondas S-SPT2 - 4,5 m do furo de sondagem.	93
Figura 84 - Perfil de ondas S-SPT2 - 7,5 m do furo de sondagem.	93
Figura 85 - Perfil de ondas S-SPT2 - 10,5 m do furo de sondagem.	93
Figura 86 - Golpes aplicados no sentido normal e no sentido inverso.	94
Figura 87 - Método cross-over.	95
Figura 88 - Espectro de frequências.	95
Figura 89 - Caminhos segundo a lei de Snell.	97
Figura 90 - Caminhos sem aplicação da lei de Snell.	97
Figura 91 - Caminhos sobrepostos.	97
Figura 92 - Resultados do ensaio S-SPT 1 e comparações.....	98
Figura 93 - Resultados do ensaio S-SPT 2 e comparações 100	100
Figura 94 - Síntese da metodologia de execução desenvolvida.....	101
Figura 95 - Síntese da metodologia de análise desenvolvida.	102
Figura 96 - Registros pelo geofone horizontal a 10 m do furo de sondagem.	104
Figura 97 - Registros à 12 m do furo de sondagem.	105
Figura 98 - Cálculo do perfil de velocidades para o geofone posicionado à 12 m do furo de sondagem pelo método DTS.	105
Figura 99 - Resultados do ensaio S-SPT 3 e comparações.....	106

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Algumas vantagens e desvantagens na utilização do SPT.....	7
Tabela 2 - Correlações: N(SPT) e V_s (adaptado de Hanumantharao & Ramana, 2008).	22
Tabela 3 - Requisitos de uma fonte sísmica (Reynolds, 1997).....	27
Tabela 4 - Principais ensaios de campo e os parâmetros medidos (Mayne, 2000).....	33

SUMÁRIO

RESUMO	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABELAS	VI
SUMÁRIO.....	VII
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
3 REVISÃO DA LITERATURA	4
3.1 ORGANIZAÇÃO DA REVISÃO DA LITERATURA.....	4
3.2 ENSAIOS GEOTÉCNICOS.....	5
3.2.1 <i>Ensaio SPT (Standard Penetration Test)</i>	5
3.3 ENSAIOS GEOFÍSICOS.....	8
3.3.1 <i>Considerações iniciais</i>	8
3.3.2 <i>Ensaio sísmico</i>	8
3.4 ELEMENTOS E PARÂMETROS EM ENSAIOS SÍSMICOS	13
3.4.1 <i>Considerações iniciais</i>	13
3.4.2 <i>Meio elástico</i>	14
3.4.3 <i>Ondas e propagação</i>	15
3.4.4 <i>Lei de Snell</i>	18
3.4.5 <i>Parâmetros dinâmicos a partir de ensaios sísmicos</i>	20
3.5 AQUISIÇÃO DE DADOS SÍSMICOS E PROCESSAMENTO	24
3.5.1 <i>Transdutores sísmicos</i>	24
3.5.2 <i>Fontes sísmicas</i>	26
3.5.3 <i>Aplicação de filtros</i>	27
3.6 MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DO INTERVALO DE TEMPO	30
3.6.1 <i>Método da primeira chegada (first arrival)</i>	30
3.6.2 <i>Método do cruzamento (cross-over)</i>	31
3.6.3 <i>Método da correlação cruzada (cross-correlation)</i>	31
3.7 ENSAIOS HÍBRIDOS	33
3.7.1 <i>Introdução</i>	33
3.7.2 <i>Ensaio do cone ou piezocone sísmico (SCPT/SCPTU)</i>	34
3.8 ENSAIO SPT COM SÍSMICA UP-HOLE (S-SPT).....	38
3.8.1 <i>Considerações iniciais</i>	38
3.8.2 <i>Orientação das ondas em um ensaio S-SPT</i>	40
3.8.3 <i>Equipamento, procedimento de instalação e características das ondas registradas em campo</i>	42
3.8.4 <i>Determinação da velocidade da onda S</i>	44
4 MATERIAIS E METODOLOGIA	50
4.1 ENSAIO SPT.....	50
4.2 PENETRÔMETRO UTILIZADO NOS ENSAIOS SCPT E CPTU	51
4.3 GEOFONES	51
4.3.1 <i>Geofones nos ensaios sísmicos up-hole</i>	52
4.3.2 <i>Geofones nos ensaios SCPT</i>	53
4.4 FONTE SÍSMICA E TRIGGER.....	54
4.4.1 <i>Ensaio SPT com sísmica up-hole</i>	54
4.4.2 <i>Ensaio SCPT</i>	55

4.5	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	55
4.6	SOFTWARES	57
4.7	DETALHAMENTO DA METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DO S-SPT	57
5	PROGRAMAS COMPUTACIONAIS.....	62
5.1	PROGRAMA DE AQUISIÇÃO.....	62
5.1.1	<i>Introdução</i>	<i>62</i>
5.1.2	<i>Parâmetros para a aquisição</i>	<i>63</i>
5.1.3	<i>Apresentação dos registros sísmicos.....</i>	<i>64</i>
5.1.4	<i>Arquivo de saída de dados.....</i>	<i>65</i>
5.2	PROGRAMA DE PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE SINAIS.....	66
5.2.1	<i>Considerações iniciais.....</i>	<i>66</i>
5.2.2	<i>Carregamento e visualização dos arquivos de dados.....</i>	<i>67</i>
5.2.3	<i>Processamento de sinais.....</i>	<i>68</i>
5.2.4	<i>Adicionando registros no banco de dados.....</i>	<i>70</i>
5.2.5	<i>Visualização e aplicação do método da correlação cruzada</i>	<i>71</i>
5.2.6	<i>Configuração para visualização dos perfis das ondas</i>	<i>72</i>
5.2.7	<i>Ferramentas para identificação do tempo de chegada</i>	<i>72</i>
5.2.8	<i>Perfil de ondas simples.....</i>	<i>73</i>
5.2.9	<i>Perfil de ondas pela raiz média dos quadrados dos sinais.....</i>	<i>74</i>
5.2.10	<i>Preenchimento dos tempos de chegada</i>	<i>75</i>
5.2.11	<i>Exportação dos dados.....</i>	<i>75</i>
5.3	MÓDULO DE CÁLCULO DE VELOCIDADES	76
6	ÁREA EXPERIMENTAL.....	78
6.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	79
6.2	ENSAIOS REALIZADOS	81
6.2.1	<i>S-SPT.....</i>	<i>81</i>
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
7.1	ANÁLISE QUALITATIVA DOS REGISTROS NO ENSAIO S-SPT 0	83
7.1.1	<i>Sinal gerado com o próprio golpe do martelo SPT</i>	<i>84</i>
7.1.2	<i>Variação dos registros com parte cravada do amostrador</i>	<i>86</i>
7.2	ANÁLISES DOS PERFIS DE ONDAS S NOS ENSAIOS S-SPT 1 E 2.....	87
7.2.1	<i>Quanto aos filtros de frequência</i>	<i>87</i>
7.2.2	<i>Posicionamento dos geofones e identificação de ponto de referência no perfil de registros de ondas.....</i>	<i>90</i>
7.2.3	<i>Da determinação do tempo de chegada</i>	<i>94</i>
7.3	PRIMEIROS PERFIS DE V_s DEFINIDOS PELO S-SPT PARA VALIDAÇÃO DO SISTEMA E DAS METODOLOGIA.....	96
7.3.1	<i>Método de cálculo e consideração da Lei de Snell.....</i>	<i>96</i>
7.3.2	<i>Resultados do ensaio S-SPT 1</i>	<i>98</i>
7.3.3	<i>Resultados do ensaio S-SPT 2</i>	<i>99</i>
7.4	SÍNTESE DA METODOLOGIA DE EXECUÇÃO E ANÁLISE PARA A REALIZAÇÃO DE ENSAIOS S-SPT .	101
7.5	CAMPANHA PARA VALIDAÇÃO DO SISTEMA (ENSAIO S-SPT 3).	103
8	CONCLUSÕES.....	107
8.1	SISTEMA DE ENSAIO.....	107
8.2	METODOLOGIA PARA INTERPRETAÇÃO	107
8.3	SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA	108
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o comportamento dos solos tropicais vem chamando a atenção da comunidade geotécnica. Nestes solos, a ação do intemperismo químico associada às condições climáticas propicia a formação de depósitos não saturados de grande espessura. Com isso, diferentes obras se encontram assentes, pelo menos em parte, sobre tais solos, tornando-se frequente a necessidade de se conhecer as peculiaridades de seu comportamento. O estudo do comportamento desses solos tem aplicação em diversas áreas do conhecimento, não somente em obras convencionais de engenharia civil, mas também em geotecnia ambiental. Contribui para este fato a interdisciplinaridade em função da interação entre os solos e as rochas com os ciclos ambientais.

A investigação do subsolo deve ser a primeira providência a ser tomada para uma adequada previsão do comportamento de solos tropicais. Nela deve-se determinar o perfil estratigráfico, a posição do lençol freático e os parâmetros mecânicos necessários ao projeto. Para aplicações ambientais deve-se ainda definir as condições do lençol freático e a composição química de contaminantes, potenciais ou já existentes.

O ensaio mais utilizado para definir o perfil estratigráfico e obter uma estimativa de parâmetros geotécnicos é a sondagem de simples reconhecimento (SPT). Porém, Mayne (2000) questiona a validade de se utilizar um único número para se obter tantos parâmetros geotécnicos.

Nas últimas duas décadas observa-se uma tendência de que muitos ensaios vêm incorporando novas técnicas para execução conjunta. Estes ensaios híbridos promovem uma melhor avaliação da estratigrafia e das propriedades geotécnicas dos solos. São exemplos desses ensaios: O SPT-T, que associa além da medida do N_{SPT} a medida do torque; o SCPTu, piezocone (q_c , f_s e U) e medida de velocidade de ondas; o SDMT, dilatômetro e a medida de velocidades de ondas; o RCPTU, que além do piezocone, associa também medidas de resistividade. Portanto o S-SPT, SPT com sísmica *up-hole*,

é mais um destes ensaios, uma vez que associado ao ensaio SPT, proporciona uma medida de velocidade de propagação de ondas no terreno.

Schnaid *et al* (1998) sugerem a utilização de ensaios com cone sísmico para avaliação do tipo de solo a partir da relação entre G_0/q_c . Segundo Giacheti *et al* (1999), a utilização de um parâmetro de rigidez (G_0), relacionado a um parâmetro de resistência (q_c), ou a um índice de resistência do SPT (N), pode vir a ser mais apropriada para o entendimento do comportamento do solo, contribuindo assim, para um desenvolvimento mais racional da engenharia geotécnica em solos tropicais.

Além disso, pesquisas recentes como a de Chen *et al* (2005) correlacionam a velocidade de propagação de ondas S (V_S) com a resistência à liquefação, sendo este um tópico relevante no contexto da mineração e, em especial, das barragens de rejeito.

Verifica-se hoje no Brasil que a rotina na investigação geotécnica é a sondagem de simples reconhecimento com medida de SPT. Alguns autores, como Bang & Kim (2007), têm mostrado que é possível incorporar a medida da velocidade de ondas S a partir do golpe de um ensaio SPT empregando a técnica *up-hole*. Esse recurso é bastante antigo, como descreve Ohta *et al* (1978). Porém, não se tem conhecimento de seu emprego no Brasil.

No ensaio S-SPT, o impacto para geração das ondas S é fornecido pelo próprio golpe do martelo que age no amostrador. Uma vez que o ensaio *up-hole* é realizado simultaneamente ao ensaio SPT, essa técnica torna-se mais econômica que os ensaios SCPT e menos trabalhosa do que ensaios *cross-hole*. A possibilidade de se medir, ao mesmo tempo e no mesmo furo, os valores de N do SPT e a velocidade de onda S (V_S), que permite calcular o módulo de cisalhamento máximo (G_0), abre uma nova perspectiva para a investigação de solos tropicais colapsíveis, a partir da relação G_0/N , similar à relação entre G_0/q_c .

Sendo assim, o desenvolvimento do trabalho aqui descrito vem colaborar na caracterização do subsolo, em especial dos solos tropicais, além de ser mais uma alternativa na determinação do módulo de cisalhamento máximo (G_0), o qual é predominantemente determinado através de ensaios SCPT. O ensaio S-SPT, por sua vez, é um ensaio mais econômico que o anterior e sua aplicabilidade é de grande potencial, principalmente em países como o Brasil, onde o ensaio SPT já é amplamente utilizado.

2 OBJETIVOS

O principal objetivo do trabalho é incorporar a medida de velocidade de propagação de ondas de cisalhamento a uma sondagem de simples reconhecimento (SPT), visando uma melhor caracterização geotécnica e geoambiental de solos tropicais. Assim fez-se necessário desenvolver um equipamento específico e sua metodologia para a determinação do módulo de cisalhamento máximo (G_0), além de validá-lo através de comparações com os resultados dos ensaios SCPT. Destaca-se que o ensaio S-SPT é mais uma alternativa para determinação do parâmetro G_0 (a um custo mais baixo que as demais técnicas) e com potencial para utilização, uma vez que no Brasil o ensaio de SPT é um dos mais utilizados, sendo seu emprego obrigatório pelas normas vigentes. Os objetivos específicos são os seguintes:

- Desenvolver um sistema (*hardware e software*) para realização de sondagens SPT em conjunto com a medida de velocidade de ondas sísmicas pela técnica *up-hole*;
- Elaborar e descrever metodologia para execução e análise dos resultados empregando esta técnica combinada para obtenção de parâmetros do solo, em especial o parâmetro (G_0), a partir da determinação de V_S ;
- Validar o sistema desenvolvido, comparando seus resultados aos obtidos com o cone sísmico (SCPT) no campo experimental da Unesp-Bauru.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Organização da revisão da literatura

Este capítulo de revisão da literatura pode ser dividido em três partes principais:

A primeira trata de uma breve descrição do ensaio SPT, por ser o ensaio que propicia a aplicação da técnica sísmica *up-hole*. A apresentação se dá no item 3.2.

Uma segunda parte, dos itens de número 3.3 ao 3.6, aborda algumas técnicas de geofísica sísmicas; propriedades dinâmicas obtidas a partir destas técnicas; o equipamento utilizado para registro dos sinais; os métodos de avaliação dos sinais sísmicos; e tratamento de sinais com aplicações de filtros.

Uma terceira e última parte, itens 3.7 e 3.8, descreve os ensaios híbridos dos ensaios mecânicos apresentados (SPT e CPT) e ensaios sísmicos, nestes casos, o SCPT (cone sísmico, utilizando sísmica *down-hole*) e o S-SPT (SPT em conjunto com sísmica *up-hole*).

3.2 Ensaios geotécnicos

3.2.1 *Ensaio SPT (Standard Penetration Test)*

O SPT (*Standard Penetration Test*), no Brasil denominado de Sondagem de Simples Reconhecimento com medida de SPT, conforme diversos autores da literatura é o ensaio mais empregado rotineiramente no mundo. Isto se deve ao fato de possuir vantagens como a simplicidade de execução e custos, aliado a um grande conhecimento e correlações, sendo estas válidas para os solos em que foram obtidas com equipamentos equivalentes. É neste contexto que Mayne (2000) questiona a validade de se utilizar um único número para se obter tantos parâmetros geotécnicos.

Segundo Schnaid (2000), esta técnica permite uma identificação da densidade de solos granulares, também aplicada à identificação da consistência de solos coesivos e mesmo de rochas brandas. Além disto, no Brasil, métodos rotineiros de projeto de fundações diretas e profundas utilizam sistematicamente os resultados de SPT.

O ensaio SPT é um ensaio que começou a ser desenvolvido desde o início do século passado. Cavalcante (2002) descreve detalhadamente a evolução desse ensaio bem como sua normatização.

Ainda quanto à evolução dessa técnica de ensaio, é interessante notar a tendência de se incorporar novas ferramentas e procedimentos junto ao ensaio SPT, buscando uma melhor caracterização do solo, acrescentando sensores e procedimentos. Um Exemplo é o SPT-T, procedimento inicialmente sugerido por Ranzine (1988) com nome de SPT-F e difundido por Décourt, em trabalhos como Décourt & Quaresma Filho (1994) com a nomenclatura consagrada de SPT-T. Este ensaio incorpora uma medida de torque após cravação do amostrador do SPT e é melhor descrito em Peixoto (2001).

Além do exemplo do SPT-T, também é notável a pesquisa desenvolvida em torno do cálculo da eficiência do SPT em virtude do trabalho realizado pela penetração do amostrador SPT ao invés da energia dinâmica, baseando-se no princípio de Hamilton, descrita por Aoki & Cintra (2000) e mais recentemente por Neves (2004).

Outro exemplo é o denominado S-SPT (denominação dada por Bang & Kim, 2007), ou SPT com a técnica sísmica *up-hole*, que na verdade é um recurso antigo inicialmente descrito por Ohta *et al* (1978). Bang & Kim (2007) retomam esta linha de pesquisa posteriormente, que permaneceu sem muitas novidades até então.

Do processo de normatização do ensaio SPT, segundo Schnaid (2000), a normatização foi feita inicialmente pela ASTM em 1958, sendo comum o não uso dos equipamentos conforme o padrão internacional. Na América do Sul é usada com frequência a norma americana ASTM D1. 586/67. Já no Brasil, o SPT deve seguir as recomendações de sua norma de 1980, a NBR 6484/80, atualizada posteriormente pela NBR 6484/01- Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio.

A norma ABNT NBR 6484 (2001) traz inovações como, por exemplo, especificações relativas à aparelhagem que não existiam nas edições anteriores, processos de avanço de perfuração, métodos para a observação do nível do lençol freático e observações sobre a apresentação formal dos resultados. Também permite fazer classificações das camadas de solos em função dos valores de N_{SPT} e prevê a utilização de dois tipos de martelo: o cilíndrico vazado e o prismático dotado de pino-guia (Neves, 2004).

A respeito da metodologia de ensaio, o SPT é realizado para a obtenção de um índice de resistência aliado à coleta de amostras do furo de sondagem através da cravação num total de 45 cm de um amostrador padrão, com seguidos golpes de um martelo de 65 kg em queda livre, da altura de 75 cm conforme a NBR 6484/01. Para a obtenção do valor do índice de resistência à penetração (o N_{SPT}) deve-se inicialmente dividir os 45 cm de cravação do amostrador em três partes iguais de 15 cm, onde são contados para cada uma delas o número de golpes necessários para cravação de cada 15 cm. O N do SPT corresponde à somatória do número de golpes relativos às últimas duas seções de 15 cm, ou seja, os 30 cm finais de penetração do amostrador no solo. Um esquema do ensaio SPT é apresentado na Figura 1.

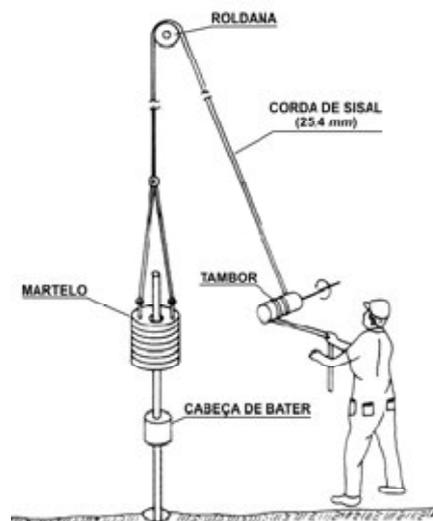


Figura 1 - Esquema de ensaio SPT (Belincanta, 1998 *apud* Neves, 2004).

A norma brasileira padroniza a utilização de tripé para a execução de ensaios SPT, com hastes de diâmetro nominal de 25 mm de massa teórica de 3,23 kg/m, cabeça de bater de 90 mm de altura, amostrador de diâmetro externo de 50,8 mm e interno de 34,9 mm, martelo maciço ou vazado (Neves, 2004).

Porém, conforme Cavalcante *et al* (2006), destaca-se que apesar de o ensaio possuir norma própria no Brasil, muitas empresas ainda continuam realizando o ensaio de maneira diferente e com aparelhagem não padronizada, resultando em diferentes valores de N para um mesmo solo.

Diversos autores afirmam que apesar do ensaio SPT estar normatizado e existirem correlações, estas por vezes não podem ser consideradas válidas, devido a diferentes metodologias e vícios de execução que o ensaio incorpora causando uma desuniformidade da energia utilizada nos ensaios. Por isso é importante que os usuários que utilizam do SPT tenham atenção a todos os fatores de controle do teste, onde os mais importantes são:

- Variações no aparelho e metodologia de ensaio;
- A perturbação criada por perfuração do furo, e
- O solo em que o ensaio é dirigido

Na Tabela 1 é apresentado sinteticamente um arranjo das vantagens e desvantagens encontradas na literatura (Schnaid, 2000, Cavalcante, 2002, entre outros) na utilização do SPT como ferramenta de investigação geotécnica e ambiental.

Tabela 1 - Algumas vantagens e desvantagens na utilização do SPT.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Simplicidade de execução; • Baixo custo; • Coleta de amostras deformadas para caracterização; • Permite a determinação direta do nível d'água do subsolo; • Amplamente utilizado, devido a muita experiência acumulada do meio técnico em interpretações e correlações. 	<ul style="list-style-type: none"> • Controle da energia de cravação considerando as perdas de energia ocorridas no equipamento; • Dificuldade de interpretação racional dificulta extrapolação, devido à regionalização da experiência; • Baixa uniformização da técnica, dificultando comparar resultados; • Formação precária das equipes favorece vícios de execução.

3.3 Ensaaios Geofísicos

3.3.1 *Considerações iniciais*

Segundo Greenhouse *et al* (1995), geofísica é a aplicação dos princípios físicos no estudo da Terra. Sua tarefa fundamental é detectar um alvo em subsuperfície, o que dependerá do contraste entre as propriedades físicas do alvo e do meio em que ele está. Deste modo, os resultados obtidos a partir da geofísica proporcionam a distribuição no tempo ou no espaço de algumas propriedades físicas do meio em estudo, como a condutividade ou resistividade elétrica, a permissividade e a constante dielétrica, a susceptibilidade magnética, densidade, velocidades sísmicas, entre outras (Mondelli, 2008).

Segundo Mondelli (2004), entre outras vantagens que destacam a aplicação das técnicas geofísicas dos métodos tradicionais de investigação de subsuperfície é a rapidez que a primeira fornece para aplicação em grandes áreas e também que muitas vezes tratam-se de métodos não invasivos. Além disso, algumas técnicas geofísicas se apresentam com custo relativamente menor e propiciam a execução de perfis contínuos, e conseqüentemente maior precisão das variações laterais decorrentes das mudanças litológicas ou originadas pela presença da contaminação subterrânea, por exemplo.

3.3.2 *Ensaaios sísmicos*

Diversos ensaios sísmicos tais como o *cross-hole*, *down-hole*, *suspension PS logging*, *SASW*, entre outros podem ser feitos para a avaliação de parâmetros dinâmicos do solo, cada um com sua vantagem e particularidade. Como o objetivo deste trabalho trata do desenvolvimento de uma ferramenta com a técnica de sísmica *up-hole*, são apresentados alguns métodos similares, que utilizam furos de sondagem, que são o *down-hole*, *cross-hole* e *up-hole*. Segundo Bang & Kim (2007), os ensaios feitos através de furos de sondagem fornecem resultados mais confiáveis do que os métodos de superfície. Na Figura 2 é representado esquematicamente cada um desses ensaios.

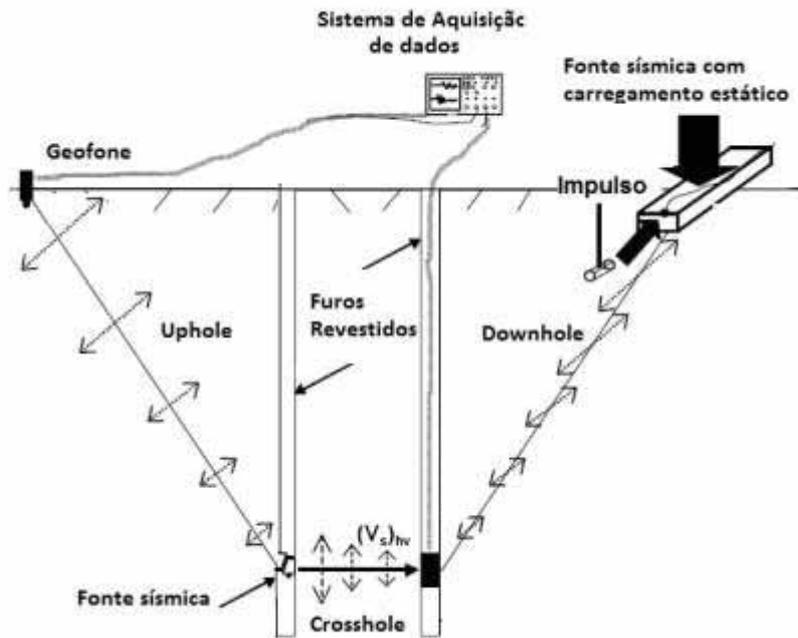


Figura 2 - Ensaios *up-hole*, *cross-hole* e *down-hole* (modificado de Schneider *et al*, 1999).

a) Ensaio *Cross-hole*

A técnica sísmica do *cross-hole*, ou transmissão direta entre furos, tem como principal objetivo a determinação em profundidade das velocidades de propagação das ondas de compressão (P) e cisalhantes (S).

Esse ensaio requer um conjunto de equipamentos, que compreende um sísmógrafo, uma fonte sísmica e transdutores sísmicos (geofones). Apresenta como vantagem a medida direta da velocidade da onda na cota do maciço. Sua desvantagem é o custo relativamente elevado, pois exige a perfuração e preparação prévia dos furos que devem estar revestidos e com espaço anelar preenchido com calda de cimento.

O ensaio consiste em se colocar uma fonte mecânica geradora de ondas elásticas num furo e dois geofones em outros dois furos, alinhados horizontalmente com o primeiro, com fonte e geofones posicionados nas mesmas cotas (Figura 3). A fonte mecânica irá produzir ondas de compressão e cisalhantes e nos demais furos onde estão localizados os geofones (receptores sísmicos) se registram estes sinais sísmicos gerados. Segundo Giacheti (2005), com essas velocidades e conhecendo-se a massa específica do

solo, calculam-se os módulos de Young (E), de cisalhamento máximo (G_0) e o coeficiente de Poisson (ν) pela teoria da elasticidade (conforme visto no item 3.4.5).

O afastamento entre os furos vai depender das condições do local, mas em princípio, esse deve ser tal, que garanta o registro de ondas diretas, ou seja, aquelas que não tenham sofrido refração.

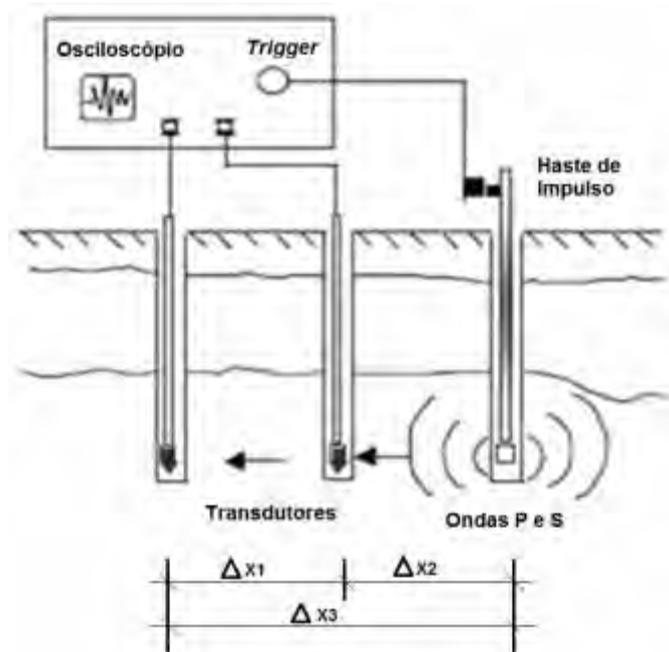


Figura 3 - Esquema do ensaio *cross-hole*. (modificado de Luna & Jada, 2000).

Um aspecto importante deste ensaio é a preparação dos furos. Como são utilizados equipamentos caros e estes devem estar perfeitamente apoiados ao terreno tanto próximo à superfície quanto em grandes profundidades, é necessário um cuidado especial com a abertura e preparação desses furos. A forma mais adequada consiste em revestir os furos de sondagem com tubos metálicos ou de PVC, solidários ao terreno.

Para identificação da primeira chegada das ondas P pode-se identificar a primeira deflexão do sinal, utilizando-se o recurso da soma de sinais. A identificação da chegada das ondas S pode ser feita utilizando-se o recurso da inversão da polaridade, uma vez que, quando se inverte o sentido do golpe, todas as fases correspondentes às ondas cisalhantes aparecem de forma invertida.

Na Figura 4 é exemplificado um resultado típico de um ensaio *cross-hole*.



Figura 4 - Resultado típico de um ensaio *cross-hole* (adaptado de Giacheti *et al*, 2006).

Conforme Giacheti *et al* (2006), a velocidade de propagação da onda S ou P é calculada dividindo o comprimento do trajeto percorrido (ΔX) pelo tempo de propagação da onda (ΔT), conforme a Equação (1). Na Figura 3 há a indicação de três distâncias, nas quais se podem calcular as velocidades de ondas de acordo com as respectivas medidas de tempo. A precisão dos cálculos está diretamente relacionada com a medida das distâncias entre os furos, devendo-se ter cuidado para que a fonte e os receptores estejam na mesma cota. É recomendável realizar a medição da inclinação dos furos com inclinômetro para obtenção de uma medida precisa do comprimento do trajeto percorrido pela onda.

$$V_s \text{ ou } V_p = \frac{\Delta X}{\Delta T} \quad (1)$$

b) Ensaio down-hole e up-hole

Os ensaios *down-hole* e *up-hole* são ensaios alternativos para a medição da propagação de ondas no solo, porém para estes ensaios é necessário apenas um furo de sondagem, idealmente revestido do mesmo modo daquele dos ensaios do tipo *cross-hole*.

O ensaio *down-hole* se diferencia do *up-hole* pelo posicionamento da fonte geradora das ondas que é colocada na superfície e do transdutor sísmico que é instalado em várias profundidades do furo de sondagem ao decorrer do ensaio. Já no ensaio *up-*

hole, o posicionamento do sensor é fixo na superfície e as ondas são geradas em diferentes profundidades. A Figura 5 a e b ilustra o ensaio *up-hole* e *down-hole*, respectivamente.

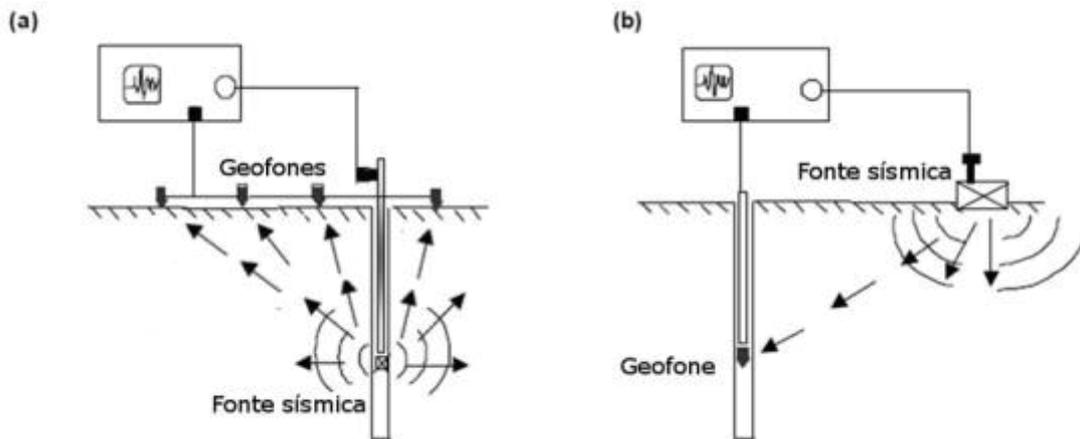


Figura 5 - Representação esquemática dos métodos *up-hole*(a) e *down-hole* (b) (modificado de Luna e Jád, 2000).

Para ambas as técnicas, as velocidades de ondas são estabelecidas a partir do tempo de propagação, cuja definição se obtém comparando os registros de ondas em profundidades subsequentes. Dessa forma, as velocidades calculadas representam o valor médio da velocidade naquele intervalo de profundidade. Repetindo esse procedimento ao longo do furo, obtém-se o perfil de velocidades das ondas sísmicas.

O ensaio *down-hole* pode ser realizado utilizando um ou mais transdutores posicionados em diferentes profundidades. A utilização de dois transdutores é desejável, pois permite o registro das ondas em profundidades diferentes para o mesmo impulso evitando possíveis variações no impulso e no tempo do *trigger* e erros na medida da profundidade. O princípio deste ensaio é empregado no cone sísmico descrito mais detalhadamente adiante no item 3.7.2.

Uma vantagem dos ensaios *down-hole* sobre os *up-hole* é a facilidade que o primeiro possui para a geração de ondas, com quantidade expressiva de energia e possibilidade de direcionamento do golpe na fonte, já que a fonte encontra-se na superfície, possibilitando gerar predominantemente ondas P ou S, em função do que se pretende medir no ensaio. Enquanto isso, no ensaio *up-hole*, pelo motivo da fonte estar dentro do furo, esse processo é mais complicado pela dificuldade de direcionamento do golpe para a geração das ondas de diferentes tipos e menor geração de energia do que na superfície.

3.4 Elementos e parâmetros em ensaios sísmicos

3.4.1 Considerações iniciais

A avaliação de problemas dinâmicos em engenharia geotécnica envolve a transmissão de ondas através do solo, como ondas sísmicas em um terremoto ou resposta das fundações perante um carregamento dinâmico. Para isso é necessário conhecer a rigidez do solo, bem como parâmetros de amortecimento.

Geralmente a obtenção de parâmetros dinâmicos do solo é feita apenas em projetos onde é necessário, como por exemplo, em projetos de fundações de usinas nucleares, instalações de máquinas vibratórias, plataformas *offshore* e quando devam ser considerados os esforços dinâmicos provocados por terremotos.

Conforme Kearey (2009), o exame de estruturas não visíveis, pelo estudo de seus efeitos sobre ondas acústicas ou sísmicas geradas artificialmente, tem grande quantidade de aplicações, em um largo intervalo de escalas espaciais, desde o ultrassom em medicina, e no âmbito das aplicações geofísicas, geotécnicas e ambientais, em escalas desde metro ou menores até as que ultrapassam dezenas de quilômetros nos estudos crustais ou do manto superior.

Ensaio como o *cross-hole*, *down-hole*, dentre outros, são atualmente utilizados para avaliações do perfil de V_S (velocidade de ondas cisalhantes, utilizadas para determinação do módulo de cisalhamento máximo, G_0). Cada teste tem suas vantagens e desvantagens, e o resultado pode não ser coincidente, em muitos casos, devido à escala de problemas e diferenças entre os testes. Portanto, é importante selecionar um ensaio de campo adequado que considere as condições do local e a importância da obtenção de um perfil V_S confiável para o projeto (Bang & Kim, 2007).

São apresentadas a seguir algumas informações fundamentais para o entendimento das ondas sísmicas, tais como: considerações do meio elástico, ondas de superfície e ondas de corpo, os parâmetros dinâmicos obtidos a partir das velocidades de ondas, enfatizando-se o módulo de cisalhamento máximo (G_0).

3.4.2 Meio elástico

Para um estudo de como as ondas se propagam no meio elástico e como o meio se comporta com estes deslocamentos e esforços é necessário, primeiramente, apresentar algumas observações sobre a Lei de Hooke e definir alguns dos módulos que representam o comportamento dos materiais.

Conforme Beer & Russel (1995), Kearey (2009) e outros autores, um corpo submetido à tensão sofre uma mudança de forma e/ou de volume, conhecida como deformação. Até certo valor máximo de deformação (*strain*), conhecido como limite elástico (*yield strain*) de um material, a deformação é diretamente proporcional ao esforço aplicado. Esse limite elástico é caracterizado pelo fato que, caso a tensão anteriormente submetida seja retirada, o corpo voltará às condições iniciais de deformação (deformação nula), ou seja, trabalhou-se unicamente no regime elástico do material.

Caso o corpo seja submetido a uma tensão superior ao limite elástico, há deformações que são permanentes ao material, ocorrendo plastificação do mesmo. Para esse campo, dá-se o nome de campo dúctil, no qual o material sai do regime elástico e passa para o regime plástico. Na medida em que a tensão aumenta, esses materiais continuam a sofrer deformações irreversíveis (plásticas), até que o material se rompa.

A Figura 6 ilustra o comportamento típico de uma curva tensão versus deformação, caracterizando o campo elástico, o campo dúctil e a tensão máxima que ocasiona o rompimento do material.

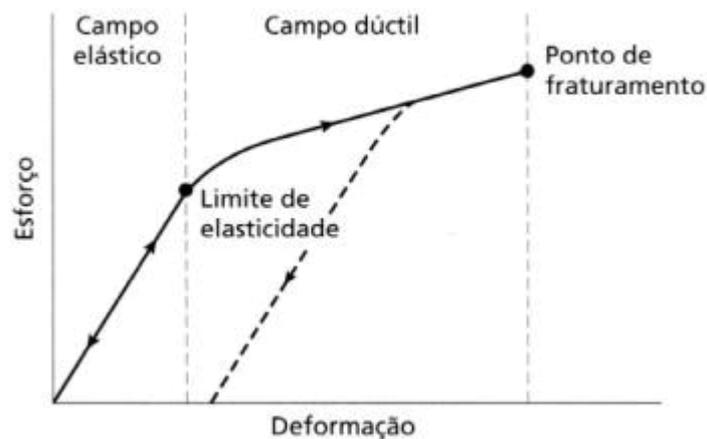


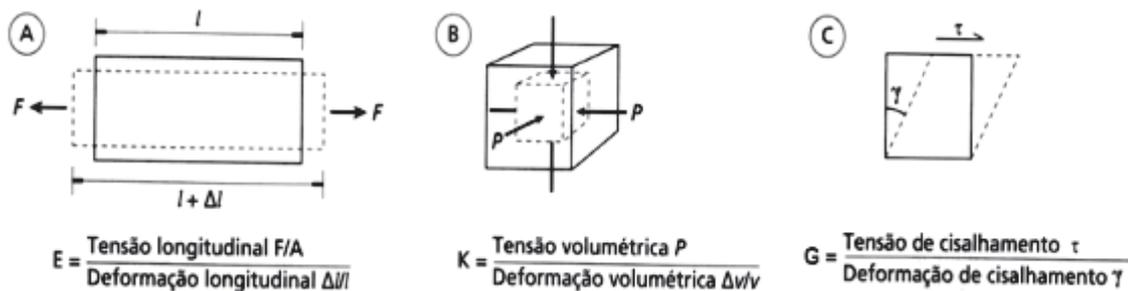
Figura 6 - Curva típica de tensão-deformação de um corpo sólido (Kearey, 2009).

Com isso, podem-se definir alguns módulos de deformabilidade ou elasticidade do material, sendo o primeiro a ser tratado, o módulo de Young (E). Este módulo é a

razão de uma tensão longitudinal (força/área) pela deformação longitudinal ($\Delta l/l$), conforme a Figura 7a. Nota-se ainda, que há uma redução na seção transversal deste material. Essa razão de deformação transversal pela longitudinal é chamada de razão de Poisson.

O módulo de volume ou confinado, expresso pela letra K, representa, em um caso de confinamento, a razão da tensão confinante pela deformação volumétrica ocasionada por esta tensão, conforme mostra a Figura 7b.

Outro módulo importante que se pretende determinar neste trabalho é o módulo de rigidez ou módulo de cisalhamento (G). Este módulo é a razão de uma tensão cisalhante (τ) aplicada a um corpo pela deformação de cisalhamento por ela provocada (γ). Esse módulo é ilustrado pela Figura 7c.



(A) Módulo de Young (B) Módulo de volume (C) Módulo de cisalhamento

Figura 7 - Módulos (adaptado de Kearey, 2009).

3.4.3 Ondas e propagação

Quando é aplicada uma tensão em um corpo elástico ou quando há um alívio repentino de tensão, são propagadas ondas elásticas no meio, correspondentes a esta solitação (Sharma, 1997). Conforme Kearey (2009), as fontes apropriadas para um ensaio sísmico comumente geram trens de onda de curta duração, conhecidos como pulsos, que contêm uma ampla gama de frequências. Afirma ainda que exceto nas proximidades da fonte, as deformações associadas à passagem deste pulso, são minúsculas, e se admite que sejam elásticas.

Existem dois tipos principais de ondas elásticas: ondas internas ou de corpo (*body waves*) e de superfície ou superficiais (*surface waves*).

a) Ondas internas ou de corpo (*body waves*)

Um meio elástico está sujeito a dois tipos de deformação: de compressão e de cisalhamento.

Segundo Kearey (2009) e Sharma (1997), as ondas de compressão ou ondas P (também denominadas ondas primárias ou longitudinais), propagam-se por deformação uniaxial, envolvendo movimentos alternados de expansão e compressão no meio, na direção de propagação da onda.

As ondas de cisalhamento (*shear waves*) - a transversal, secundária ou ondas S - propagam-se por meio de um cisalhamento puro numa direção perpendicular à direção de propagação da onda. Os movimentos das partículas envolvem oscilação, ao redor de um ponto fixo, num plano perpendicular à direção de propagação da onda (Kearey, 2009). As ondas P e S são ilustradas pela Figura 8.

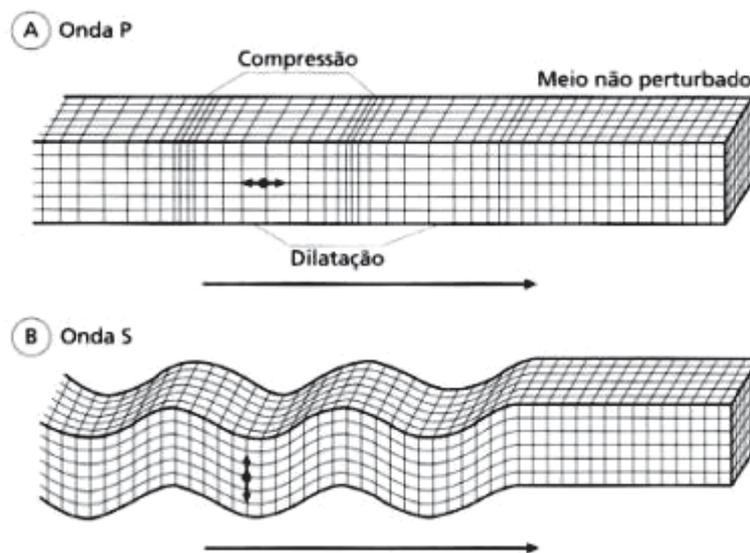


Figura 8 - Ondas de corpo: (A) Onda P (B) Onda S (Bolt, 1992 *apud* Kearey, 2009).

A diferença essencial, segundo Sharma (1997), entre estes dois tipos é que nas ondas de compressão (ondas P) há mudança de volume sem a rotação das partículas do meio, enquanto que nas ondas de cisalhamento (ondas S) há uma rotação das partículas do meio, porém sem alteração do volume.

A partir do desenvolvimento das equações de propagação de ondas através de um material, para velocidades de ondas P e ondas S (V_P e V_S , respectivamente), chega-se à conclusão que estas velocidades estão ligadas aos módulos elásticos e à densidade do material. Segundo Kearey (2009), a velocidade de propagação de uma dada onda de

corpo num material homogêneo, isotrópico, é dada para onda P e onda S, respectivamente pelas Equações (2) e (3):

$$V_P = \sqrt{\frac{K + 4G/3}{\rho}} = \sqrt{\frac{(1 - \nu)E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)\rho}} \quad (2)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \nu)}} \quad (3)$$

onde:

G = módulo de cisalhamento

ρ = densidade

V_S = velocidade da onda cisalhante

V_P = velocidade da onda de compressão

E = módulo de Young

ν = razão de Poisson

Sharma (1997) relata, a partir da análise das Equações (2) e (3) e no caso em que o módulo de cisalhamento é igual a zero (quando se trata de meios líquidos ou gasosos), que a velocidade da onda P é reduzida. Portanto, quando esta onda atravessa uma rocha bastante fraturada e porosa, sua velocidade é consideravelmente atenuada. No caso das ondas S, como a velocidade é função primária do módulo de cisalhamento, nota-se claramente que quando este módulo é igual a zero, a velocidade de onda cisalhante (V_S) é igual a zero. Conclui-se que as ondas S não se propagam em meio gasoso ou líquido.

Outra observação importante, feita por Sharma (1997), é que uma vez que os módulos das equações de velocidades são positivos, isto implica que sempre V_P será superior a V_S . Logo, as ondas P sempre serão as primeiras a serem registradas.

b) Ondas de superfície (surface waves)

Existem dois tipos de ondas de superfície: ondas Rayleigh e ondas Love. Estas ondas se propagam ao longo da superfície de um sólido elástico. As ondas de superfície, segundo Sharma (1997), são registradas depois das ondas P e das ondas S, pois suas velocidades são inferiores àquelas das ondas de corpo.

As ondas Rayleigh (Figura 9a) vibram as partículas em um plano que aponta na direção de propagação da onda com movimento elíptico horizontal e vertical, simultaneamente. Seu movimento é similar às ondas na superfície da água. Conforme Kearey (2009), as ondas Rayleigh propagam-se ao longo de uma superfície livre ou ao longo da interface entre dois meios sólidos não similares. O movimento orbital da partícula se dá no sentido oposto ao do movimento circular associado a uma onda oscilatória na água, e é, portanto, algumas vezes descrito como retrógrado.

Já, as ondas Love (Figura 9b) fazem a partícula vibrar no sentido perpendicular à trajetória da onda, produzindo efeito cisalhante no meio sólido, semelhante àquele das ondas S, porém no sentido horizontal.

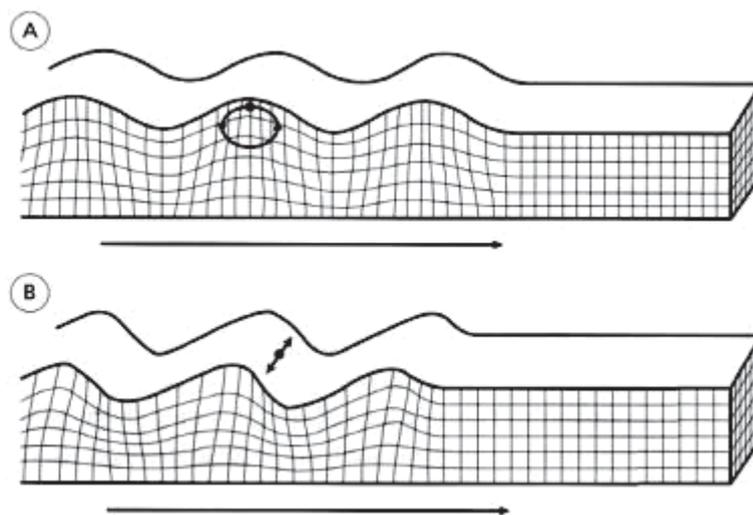


Figura 9 - Ondas de Superfície: (A) Onda Rayleigh ; (B) Onda Love (Bolt, 1992 *apud* Kearey, 2009).

3.4.4 Lei de Snell

Segundo Sharma (1997), quando uma onda sísmica atinge a interface entre duas camadas elásticas, a energia desta onda, parcialmente, sofre reflexão e outra parte, refração. A concepção básica que governa a reflexão e refração de ondas sísmicas é a mesma da geometria óptica.

Conforme Kearey (2009), no caso de incidência oblíqua de onda P transmitida, ela percorre (em um sinal gerado a partir da superfície) da camada superior para a camada inferior com uma mudança na direção de propagação. Essa trajetória que é percorrida pela onda, é chamada de raio refratado (*refracted ray*). A Figura 10 exemplifica o raio de uma onda oblíqua refratada e refletida entre a interface de duas camadas distintas, sendo que a velocidade da camada superior é menor daquela da camada inferior.

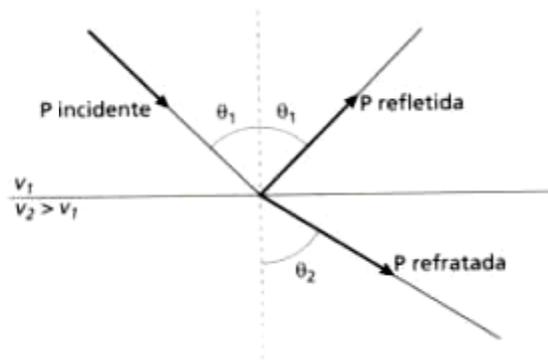


Figura 10 - Raio de onda refratado e refletido (Kearey, 2009).

Assim, conforme Sharma (1997) e Kearey (2009), esse caso é análogo ao comportamento de um raio de luz oblíquo incidente entre, por exemplo, água e ar, e logo, a lei de refração de Snell (*Snell's Law of Refraction*) é aplicável igualmente à sísmica.

Snell definiu o parâmetro do raio $p = \text{sen } i/v$, onde i é o ângulo de inclinação do raio em relação a normal em uma camada em que se propaga a uma velocidade v . A forma generalizada da lei de Snell afirma que, ao longo de qualquer raio, o parâmetro de raio permanece constante (Kearey, 2009).

Logo, para um raio de onda P refratado e ilustrado pela Figura 10, a equação (4) é apresentada.

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{V_1} = \frac{\text{sen } \theta_2}{V_2} \quad (4)$$

Segundo Bang & Kim (2007), a aplicação do raio refratado baseado na Lei de Snell no S-SPT é pertinente, considerando que os receptores estão longe do furo de sondagem e, portanto há considerável diferença entre um raio reto e um raio refratado.

Assim, essa diferença não pode simplesmente ser desconsiderada no cálculo das velocidades de ondas.

3.4.5 *Parâmetros dinâmicos a partir de ensaios sísmicos*

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

Segundo Campanella & Stewart (1992), dentre estes parâmetros, os que são mais utilizados são o módulo de cisalhamento máximo (G_0) e a razão de amortecimento interno (D). São apresentados, a seguir, alguns desses parâmetros, dando-se ênfase ao módulo de cisalhamento máximo (G_0), como sendo o parâmetro objeto desta pesquisa.

a) Módulo de cisalhamento máximo (G_0 ou G_{max})

O módulo de cisalhamento diminui com o aumento do nível de deformação cisalhante aplicada. O valor máximo do módulo de cisalhamento, G_0 é, portanto, determinado em ensaios que produzem as menores deformações, enquanto o material se comporta ainda no regime elástico. Conforme Hardin & Drevich (1972) *apud* Scheffer (2005) essa deformação é da ordem de 10^{-4} % ou menor do que isto. A curva que indica a diminuição do módulo de cisalhamento com a deformação é chamada "curva de degradação" para esse material, ilustrada pela Figura 11.

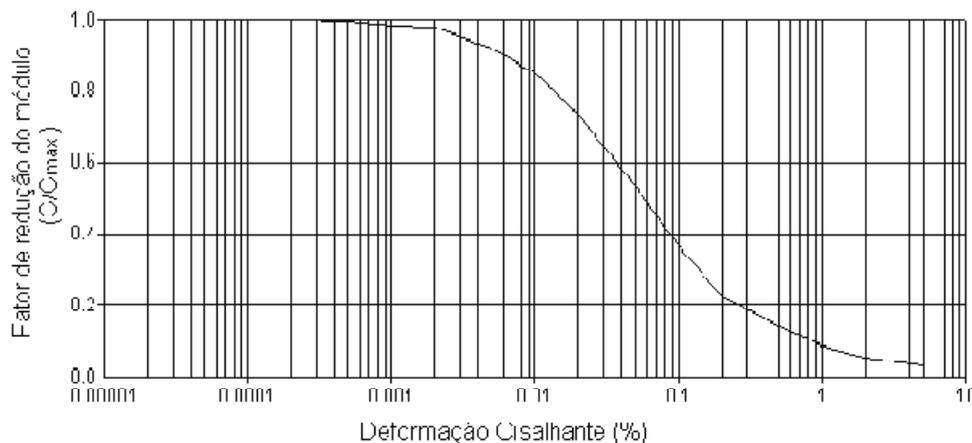


Figura 11 - Curva de degradação (Seed & Idriss, 1970 *apud* Quispe, 2008).

Portanto, para estas deformações, o material permanece em seu regime elástico e assim a teoria da elasticidade é aplicável. Logo, o módulo de cisalhamento máximo G_0 pode ser determinado pela Equação (5) a seguir:

$$G_0 = \rho \cdot V_S^2 = \frac{\gamma}{g} \cdot V_S^2 \quad (5)$$

onde:

G_0 = módulo de cisalhamento máximo

ρ = densidade

V_S = velocidade da onda cisalhante

γ = massa específica

g = gravidade

Ressalta-se que a formulação apresentada acima, trata propriamente da determinação deste parâmetro, ou seja, ele é medido e não estimado por correlação.

Segundo Barros (1997), podem ser utilizados tanto ensaios de laboratório quanto ensaios de campo para a determinação do módulo de cisalhamento máximo. Segundo Barros (1997), os ensaios de campo que podem ser utilizados, para determinação de V_S (e posteriormente de G_0) são *cross-hole*, *down-hole*, *up-hole*, *piezocone* ou *cone sísmico* e *refração sísmica*.

No laboratório, os ensaios mais utilizados são os de *coluna ressonante* e *bender elements*.

Existem várias correlações para a estimativa deste parâmetro, inclusive com o N do SPT, como por exemplo, a fornecida por Stroud (1988).

Ainda, correlações entre N do SPT e V_S , e posterior cálculo de G_0 , são apresentadas na Tabela 2 (Hanumantharao & Ramana, 2008), que sintetiza várias dessas correlações.

Tabela 2 - Correlações: N(SPT) e V_s (adaptado de Hanumantharao & Ramana, 2008).

Autor	Correlação	Solo	País
Imai & Yoshimura (1970)\$	$V_s = 76.0N^{0.39}$	Todos	Japão
Ohba & Toriumi (1970)\$	$V_s = 84.0N^{0.31}$	Aluvião	Japão
Shibata (1970) **	$V_s = 32.0N^{0.50}$	Areias	Japão
Ohta <i>et al</i> (1972)\$	$V_s = 87.0N^{0.36}$	Areias	Japão
Ohsaki & Iwasaki (1973)	$V_s = 82.0N^{0.39}$	Todos	Japão
Ohsaki & Iwasaki (1973)	$V_s = 59.0N^{0.47}$	Sem coesão	Japão
Imai <i>et al</i> (1975) **	$V_s = 90.0N^{0.34}$	Todos	Japão
Imai (1977)	$V_s = 91.0N^{0.34}$	Todos	Japão
Ohta & Goto (1978)	$V_s = 85.3N^{0.35}$	Todos	Japão
JRA (1980) **	$V_s = 100.0N^{0.33}$	Argilas	Japão
JRA (1980) **	$V_s = 80.0N^{0.33}$	Areias	Japão
Imai & Tonouchi (1982)	$V_s = 97.0N^{0.31}$	Todos	Japão
Yokota <i>et al</i> (1991) **	$V_s = 121.0N^{0.27}$	Todos	Japão
Seed & Idriss (1981) **	$V_s = 61.0N^{0.50}$	Todos	USA
Seed <i>et al</i> (1983)	$V_s = 56.4N^{0.50}$	Areias	USA
Sykora & Stokoe (1983)	$V_s = 106.7N^{0.27}$	Granulares	USA
Fumal & Tinsley (1985)	$V_s = 152 + 5.1N^{0.27}$	Areais	USA
Sykora & Koester (1988)	$V_s = 63.0N^{0.43}$	Holoceno - cascalho	USA
Sykora & Koester (1988)	$V_s = 132.0N^{0.32}$	Pleistoceno - cascalho	USA
Lee (1990)	$V_s = 57.0N^{0.49}$	Areias	USA
Lee (1990)	$V_s = 114.0N^{0.31}$	Argilas	USA
Lee (1990)	$V_s = 106.0N^{0.32}$	Siltes	USA
Rollins <i>et al</i> (1998a, b)	$V_s = 63.0(N_{60})^{0.43}$	Holoceno - cascalho	USA
Rollins <i>et al</i> (1998a, b)	$V_s = 132.0(N_{60})^{0.32}$	Pleistoceno - cascalho	USA
Rollins <i>et al</i> (1998a, b)	$V_s = 222.0N^{0.06}$	Aterro recente	USA
Andrus <i>et al</i> (2004)	$V_{s1cs} = 87.8(N_{1,60cs})^{0.25}$	Todos	USA
Pitikilas <i>et al</i> (1992)	$V_s = 155.1N^{0.17}$	Aterro de detritos	Grécia
Pitikilas <i>et al</i> (1992)	$V_s = 162.0N^{0.17}$	Aterro siltoso	Grécia
Pitikilas <i>et al</i> (1992)	$V_s = 165.7N^{0.19}$	Argilas moles	Grécia
Pitikilas <i>et al</i> (1992)	$V_s = 357.5N^{0.19}$	Argilas rijas	Grécia
Kalteziotis <i>et al</i> (1992)~	$V_s = 76.2N^{0.24}$	Todos	Grécia
Kalteziotis <i>et al</i> (1992)~	$V_s = 76.6N^{0.45}$	Coesivos	Grécia
Kalteziotis <i>et al</i> (1992)~	$V_s = 49.1N^{0.50}$	Sem coesão	Grécia
Athanasopoulos (1995)	$V_s = 107.6N^{0.36}$	Todos	Grécia
Raptakis <i>et al</i> (1995)	$V_s = 123.4N^{0.29}$	Areiafofa	Grécia
Raptakis <i>et al</i> (1995)	$V_s = 100.0N^{0.24}$	Area meio densa	Grécia
Raptakis <i>et al</i> (1995)	$V_s = 105.7N^{0.33}$	Argilas moles	Grécia
Raptakis <i>et al</i> (1995)	$V_s = 184.2N^{0.17}$	Argilas rijas	Grécia
Raptakis <i>et al</i> (1995)	$V_s = 192.4N^{0.13}$	Cascalho	Grécia
Jafari <i>et al</i> (1997) **	$V_s = 22.0N^{0.85}$	Todos	Iran
Jafari <i>et al</i> (2002)	$V_s = 27.0N^{0.73}$	Argilas	Iran
Jafari <i>et al</i> (2002)	$V_s = 22.0N^{0.77}$	Siltes	Iran
Jafari <i>et al</i> (2002)	$V_s = 19.0N^{0.85}$	Solo bem graduado	Iran
Chein <i>et al</i> (2000)	$V_s = 22.0N^{0.76}$	Areias siltosa	Taiwan
Kayabali (1996)	$V_s = 175 + 3.75N$	Granulares	Turquia

\$Adotado de Ohsaki & Iwasaki (1973);

**Adotado de Jafari *et al*(2002);

~Adotado de Athanasopoulos (1995).

b) Demais parâmetros dinâmicos

O coeficiente de Poisson é definido como sendo a relação entre a deformação transversal e a que ocorre na direção do esforço aplicado. É um parâmetro fundamental que é difícil medir, sendo frequentemente estimado em projetos de engenharia. O coeficiente de Poisson para solos encontra-se entre 0,2 e 0,5. Valores menos comuns podem ser próximos de 0,1 para depósitos de sedimentos e argilas não saturadas.

O coeficiente de Poisson (ν) pode ser determinado para pequenas deformações pela equação (6), utilizando-se de medidas de V_P e V_S :

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_P}{V_S}\right) - 2}{2 \cdot \left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2} \quad (6)$$

onde:

ν = coeficiente de Poisson dinâmico

V_P = velocidade da onda de compressão

V_S = velocidade da onda cisalhante

O módulo de Young (E) também pode ser determinado, utilizando-se da velocidade das ondas P, de compressão, e do módulo de Young. É apresentada a equação (7), do módulo de Young, relacionando o parâmetro definido em (6) e V_P .

$$E = \rho \cdot V_P^2 \cdot \frac{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}{(1 - \nu)} \quad (7)$$

onde:

E = módulo de elasticidade longitudinal dinâmico

ρ = densidade

V_P = velocidade da onda de compressão

ν = coeficiente de Poisson dinâmico

Ainda é apresentada a equação (8), relacionando os parâmetros definidos anteriormente.

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (8)$$

onde:

G = módulo de cisalhamento

E = módulo de elasticidade longitudinal dinâmico

ν = coeficiente de Poisson dinâmico

3.5 Aquisição de dados sísmicos e processamento

Segundo Kearey (2009), o objetivo fundamental dos ensaios sísmicos é precisamente registrar os movimentos do terreno causados por uma fonte conhecida de localização também conhecida. O registro do movimento do terreno no tempo constitui um sismograma. Os requisitos instrumentais essenciais são: pulso gerado por fonte sísmica; detecção através de transdutor apropriado; registrar e apresentar as formas de onda sísmica em um sismógrafo apropriado.

Serão introduzidos, a seguir, conceitos sobre os diferentes tipos de equipamentos que possibilitam a realização de campanhas sísmicas e quais as suas características e configurações. Dentre os equipamentos destacam-se: descrição dos geofones utilizados como transdutores sísmicos; fontes sísmicas empregadas em ensaios geofísicos; e informações sobre aquisição de sinal, da relação sinal/ruído e do tratamento através de filtros.

3.5.1 *Transdutores sísmicos*

Na literatura, nota-se que normalmente são utilizados tanto geofones quanto acelerômetros como transdutores sísmicos, para fins de obtenção de velocidades de ondas sísmicas, o que não se verifica quando o objetivo é avaliação de propriedades de amortecimento (Campanella & Stewart, 1992). Apesar da possibilidade de utilização de acelerômetros para obtenção de velocidades de ondas, pelo seu preço elevado e complexibilidade, não são tão usuais quanto os geofones, que apresentam resultados adequados e possuem um preço mais acessível.

Existem vários tipos de geofones, mas o mais comum é o geofone de bobina móvel (*moving coil geophone*) (Figura 12). Uma bobina cilíndrica é suspensa em uma mola no campo de um magneto permanente acoplado ao corpo do instrumento. O magneto possui uma haste cilíndrica dentro da bobina e uma haste anelar em torno da mesma. A bobina suspensa é um sistema oscilatório com uma frequência de ressonância determinada pela massa da bobina e pelo grau de rigidez da mola de suspensão (Kearey, 2009).

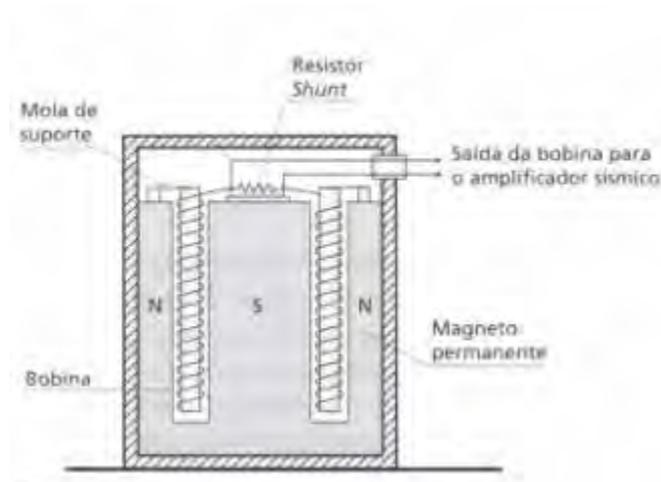


Figura 12 - Seção transversal esquemática de um geofone de bobina móvel (Kearey, 2009).

Segundo Vitali (2009) diversos autores, dentre eles Campanella & Stewart (1992), utilizaram geofones com frequência natural de 28 Hz e obtiveram ótimos resultados. Ainda, conforme Campanella & Stewart (1992), a frequência natural deve estar prioritariamente fora da faixa das frequências principais da onda sísmica da qual se deseja fazer o registro.

No trabalho apresentado por Bang e Kim (2007), há a recomendação para o ensaio do S-SPT de geofones de 4,5 Hz ou 10 Hz, pois a faixa principal de frequências nas ondas de corpo neste ensaio encontra-se dentro de 40-60 Hz. Portanto, as recomendações seguem a mesma linha de raciocínio expressa por Campanella & Stewart (1992).

Outra especificação importante de um geofone é sua curva de resposta (Figura 13), a qual apresenta as diferentes respostas de amplitude para diferentes fatores de amortecimento.

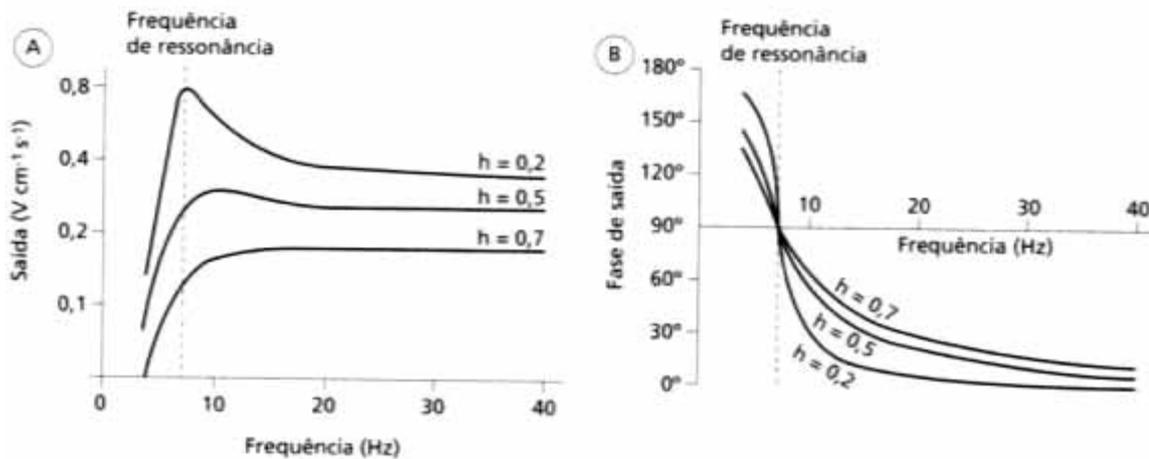


Figura 13 - Respostas de amplitude e fase de um geofone com uma frequência de ressonância de 7 Hz para diferentes fatores de amortecimento (Baseado em Telford *et al*, 1976 *apud* Kearey, 2009).

Conforme Kearey (2009), pouco amortecimento resulta numa saída com oscilações restritas à frequência de ressonância, enquanto o amortecimento em excesso leva a uma redução da sensibilidade. O amortecimento é fixado em aproximadamente 0,7 do valor crítico, no qual ocorre oscilação em resposta a uma entrada mecânica impulsiva, como, por exemplo, um leve golpe. Com esse grau de amortecimento, a resposta de frequência do geofone situa-se exatamente acima da frequência de ressonância.

Idealmente, a forma de onda da saída de um geofones reflete o movimento do solo, e isso é controlado por uma seleção cuidadosa do grau de amortecimento (Kearey, 2009).

3.5.2 Fontes sísmicas

Existem diversos tipos de fontes sísmicas, tanto para uso em solo como para uso em água. Reynolds (1997) descreve detalhadamente cada tipo de fonte e sua utilização.

A escolha da fonte apropriada é fundamental para bons resultados dos ensaios sísmicos. Não se estendendo muito neste item, Reynolds (1997) descreve alguns aspectos/requisitos desejáveis, tanto de cunho técnico como de cunho operacional conforme exibido pela Tabela 3.

Tabela 3 - Requisitos de uma fonte sísmica (Reynolds, 1997).**Técnicos:**

1. Energia suficiente para gerar um sinal mensurável com uma relação sinal/ruído boa
2. Pulso de pequena duração (com frequência alta suficiente) para a resolução requerida
3. Geração mínima de ruído na fonte

Operacionais

1. Uso eficiente, especialmente se no caso são múltiplos golpes ou se repetições rápidas são requeridas.
2. Repetibilidade da forma do pulso
3. De operação segura e com o mínimo de manutenção
4. Para ser operada com o menos número de pessoas possível
5. Preços razoáveis para comprar/criar/alugar e para usá-la

3.5.3 Aplicação de filtros

Para maior confiabilidade dos resultados, devem-se tomar certos cuidados para que se possam tirar conclusões corretas dos dados obtidos. Segundo Campanella & Stewart (1992), a determinação da velocidade da onda cisalhante pode ser mascarada por presença de ruído.

A aplicação de filtros muitas vezes é desejável para eliminar os ruídos que distorcem as ondas S e a ressonância dos transdutores. Em muitos 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 é próxima das ondas P devido ao efeito da atenuação (Giacheti, 2005). Portanto, com a presença de ruídos, é desejável a utilização de filtros para ter-se clareza nos sinais, eliminando as frequências indesejáveis.

Segundo Reynolds (1997), é importante ter-se uma alta relação na amplitude entre sinal gerado e ruído, para que o sinal se sobressaia ao ruído. Esquemáticamente, na Figura 14, é apresentado em (a) um sinal adequado e em (b) um sinal de qualidade inferior.

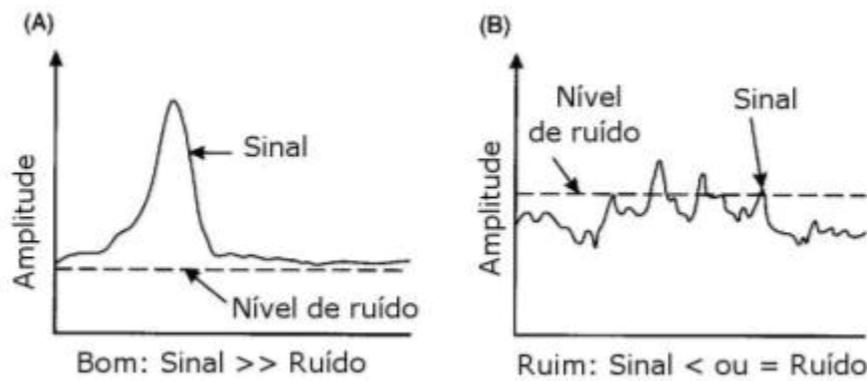


Figura 14 - Relação sinal-ruído (Reynolds, 1997).

A Figura 15 ilustra várias fontes de ruídos que influenciam na clareza dos sinais, prejudicando-os. Para minimizar esses ruídos, que muitas vezes são inevitáveis, é desejável utilizar filtros para eliminar as frequências relativas aos ruídos. A seguir serão apresentadas algumas recomendações sobre a importância de aplicação de filtros de frequência e maneiras de minimizar ruídos.

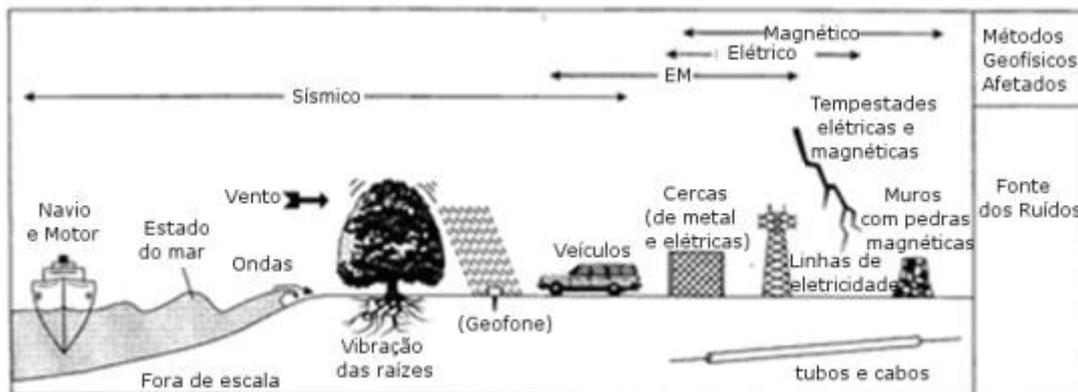


Figura 15 - Diversas fontes de ruídos em ensaios geofísicos (modificado de Reynolds, 1997).

Os filtros de ruído fundamentados em Transformada de Fourier (FT ou STFT) apresentam bons resultados para a maioria dos sinais encontrados na prática e são considerados como técnica padrão para a remoção de ruído, em diversas áreas da ciência e da engenharia (Cerqueira *et al*, 2000).

Segundo Campanella & Stewart (1992), a FFT (Fast Fourier Transform) do sinal das ondas cisalhantes mostra que a maior parte da energia gerada por esta onda corresponde às frequências entre 40 e 120 Hz.

Stewart (1992) *apud* Vitali (2011) estudou a frequência predominante em uma onda S gerada em ensaios do cone sísmico ilustrada através do espectro de frequência.

Ele faz três análises em um mesmo sinal (Figura 16), a primeira do sinal completo, uma segunda do pulso principal de onda S, e dos pulsos que acompanham a onda S.

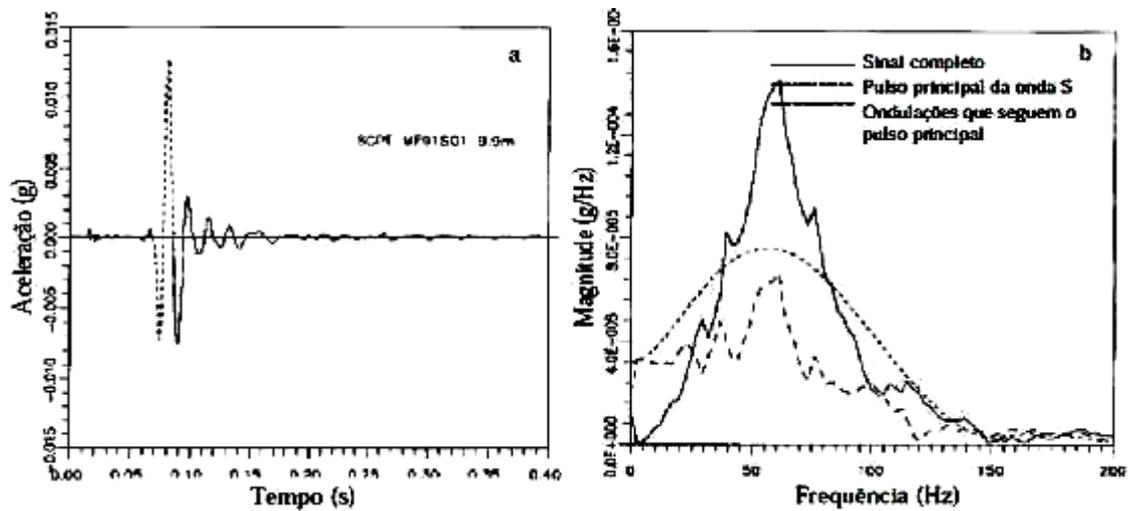


Figura 16 - Sinal considerado limpo em pulso principal da onda S e comparação dos espectros dos sinais (Stewart, 1992 *apud* Vitali, 2011).

Campanella & 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 & Powell (1996) apresentaram espectros de sinais cujo pico de energia das ondas S ocorre em torno de 40 Hz, diferente do observado pelos autores anteriores (Vitali, 2011).

No caso do S-SPT, quando se emprega um martelo mecanizado, Bang & Kim (2007) aconselham que no momento do golpe, se possível, haja o desligamento do equipamento para diminuição do ruído. Estes autores não comentam a aplicação de filtro de frequência no citado trabalho, porém há referência de que as ondas de corpo têm suas frequências principais entre 40-60 Hz.

3.6 Métodos para determinação do intervalo de tempo

A primeira fase para determinação das velocidades de ondas nos ensaios *down-hole* e *up-hole* é a determinação do tempo das ondas S ou das ondas P em uma faixa do solo. Normalmente, as velocidades são calculadas a partir de dois sinais de profundidades distintas, porém há a possibilidade do cálculo a partir de uma mesma profundidade no caso dos ensaios *up-hole*, conforme metodologia de Bang & Kim (2007), descrita mais adiante. Independentemente do modo que será calculada a velocidade, deverá ser empregado um método para determinação da diferença de tempo entre dois sinais sísmicos registrados. Três métodos serão descritos a seguir.

3.6.1 Método da primeira chegada (*first arrival*)

Este método consiste na identificação da chegada das ondas P e S. Feita a identificação desta chegada em dois registros de ondas, é subtraído o tempo de chegada uma da outra e calculado o tempo de defasagem entre elas. A Figura 17 exemplifica o instante de chegada das ondas P e S.

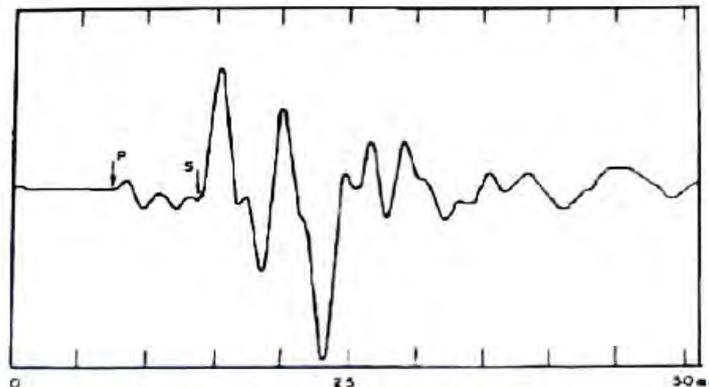


Figura 17 - Registro típico para do momento de chegada das ondas P e S (Giacheti, 2001).

Segundo Bang & Kim (2007) é muito difícil de se medir a chegada da onda S precisamente no ensaio S-SPT. Assim, para a análise de ondas geradas ou captadas em profundidades diferentes (caso dos ensaios *up-hole* e *down-hole*, respectivamente), não há a necessidade da identificação exata da chegada, conforme apresentada na Figura 17, mas deve-se buscar um ponto de referência, e este pode ser, por exemplo, o ponto de pico da onda, facilitando assim sua identificação e evitando erros. Para Bang & Kim (2007), esta forma de interpretação no S-SPT para a determinação dos tempos pelos picos das ondas traz mais precisão aos resultados.

3.6.2 **Método do cruzamento (cross-over)**

Para ensaios *down-hole*, onde há controle da direção do golpe e consequentemente a possibilidade de polarização dos sinais, o método do cruzamento é aplicável. No caso do *up-hole* em conjunto com o S-SPT, este método é possível de ser aplicado com equipamento especial que permitisse o emprego de um golpe de baixo para cima, porém afetaria a execução do ensaio SPT.

Para este método, em ensaios *down-hole*, é uma vantagem a utilização de uma viga e martelo como fonte dos sinais sísmicos. Segundo Campanella & Stewart (1992) os sinais são polarizados quando se atinge lados diferentes da viga, porém estes permanecem com a mesma amplitude. A determinação do tempo é feita pela comparação da intersecção das ondas polarizadas de uma profundidade comparada a de outra, conforme está ilustrado na Figura 18.

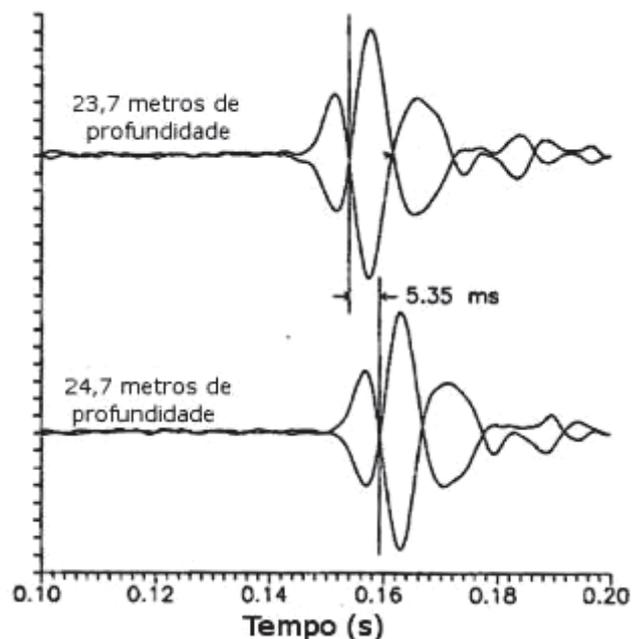


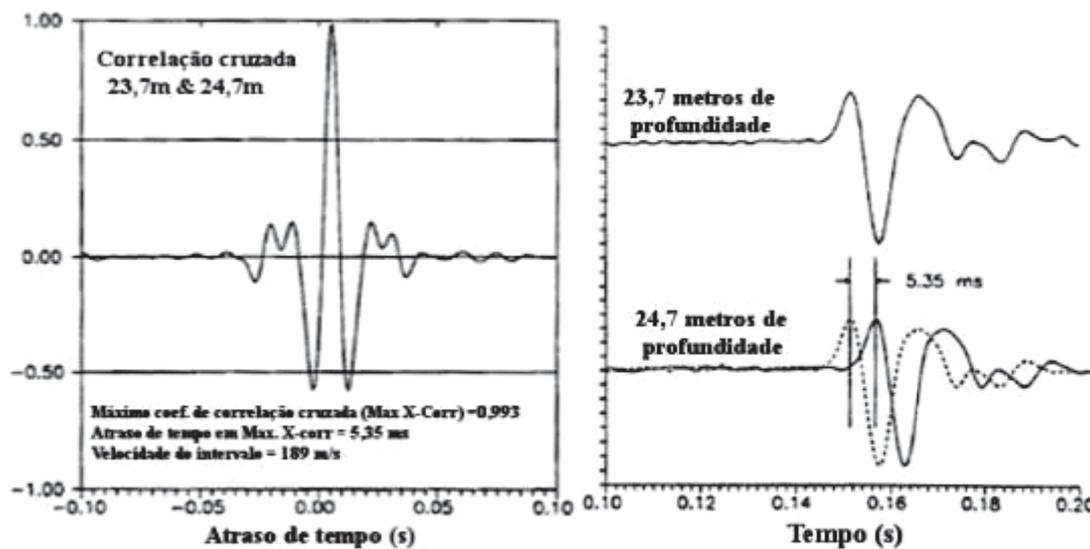
Figura 18 – Método do cruzamento para intervalo de tempo (adaptado de Campanella & Stewart, 1992).

3.6.3 **Método da correlação cruzada (cross-correlation)**

Os métodos da primeira chegada e do cruzamento utilizam a informação do tempo em apenas um ponto do sinal. Uma alternativa para determinar o intervalo de tempo de uma onda para outra que utiliza toda a informação do tempo e do sinal é o método da correlação cruzada.

Este método consiste na relação entre duas ondas de profundidades adjacentes, consequentemente semelhantes, porém defasadas em relação ao tempo.

Segundo Campanella & Stewart (1992) o coeficiente do método que indica a semelhança das ondas é determinado defasando-se a onda de profundidade inferior no tempo em relação à superior. Este coeficiente é calculado a cada defasagem e é a soma dos produtos da amplitude do sinal a cada intervalo. É possível representar esse coeficiente de correlação cruzada, que varia de -1 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1 existe uma relação maior entre as duas ondas, em função da defasagem da onda como mostra a Figura 19.



(a) Coeficiente da correlação cruzada

(b) defasagem das ondas

Figura 19 - Coeficiente de correlação versus defasagem de tempo (adaptado de Campanella & Stewart, 1992).

O cálculo da correlação entre duas ondas é melhor descrito em Pedrini *et al* (2010). Para exemplificar o resultado do método da correlação cruzada é apresentada a Figura 19b, onde se verifica que a onda da profundidade inferior está adiantada em 5,35 ms.

3.7 Ensaios Híbridos

3.7.1 Introdução

Com o objetivo de dar ênfase aos ensaios que são utilizados nesse trabalho, neste item somente será abordado o ensaio SCPT e o S-SPT, sendo o último detalhado em um item à parte. Porém, deve-se destacar a grande quantidade de ensaios híbridos existentes, representado na Tabela 4 por Mayne (2000), onde se tem os ensaios de campo, suas designações, a metodologia utilizada (ASTM), as medidas pertinentes em cada um dos ensaios e quais parâmetros foram acrescentados.

Tabela 4 - Principais ensaios de campo e os parâmetros medidos (Mayne, 2000).

<i>Ensaios Geotécnicos</i>	Designação	Número de parâmetros medidos
Sondagem de simples Reconhecimento	SPT	1 (+ amostra)
	SPTT	2 (+ amostra)
Ensaio da palheta	VST	2 (pico e deformado)
	VST/r	3 (nível de tensão)
Ensaio do Cone	CPT	2 (q_c , fs)
	SCPT	4 ($+V_p$, $+V_s$)
	PCPT	3 (+u)
	PCPT/d	3 (efeito do tempo)
	SPCPT	5 (combinado)
	RCPT	3 (+ condutividade)
	Ensaio Pressiométrico	PMT
	SBPMT	4 (de difícil execução)
	PIPMT	3 (p_L , E, T_j)
	FDPMT	3 (P_L , E, T_m , J)
	CPMT	5 (+ dados CPT)
	PCPMT	6 (+ dados PCPT)
Ensaio do Dilatômetro Plano	DMT	2 (p_0 e p_1)
	DMT/t	3 (p_0 , p_1 , q_D)
	DMT/c	3 (p_0 , p_1 , p_2)
	DMT/d	3 (+ decaimento no tempo)
<i>Ensaios geofísicos:</i>		
Ensaio de Refração sísmica	SPv	1 (ondas de compressão)
Ensaio de ondas de superfície	SASW	1 (ondas Rayleigh)
	SASW/d	2 (+ atenuação)
Ensaio <i>cross-hole</i>	CHT	2 (ondas de corpo)
	CHT/d	3 (+ atenuação)
Ensaio <i>down-hole</i>	DHT	2 (ondas de corpo)
	DHT/d	3 (+ atenuação)
<i>Ensaios híbridos:</i>		
Cone pressiométrico	CPMT	5 (CPT + PMT completo)
	PCPMT	6 (PCPT + FDPMT)
Piezocone sísmico	SPCPT	6 (DHT + PCPT)
Dilatômetro sísmico	SDMT	5 (DHT + DMT)
Pressiômetro sísmico	SPCPMT	9 (DHT+PCPT+PMT)

3.7.2 Ensaio do cone ou piezocone sísmico (SCPT/SCPTU)

a) Introdução

A partir de meados dos anos 80, incorporou-se ao cone um sistema para aquisição de ondas sísmicas, que passou a ser conhecido como cone sísmico (SCPT). O cone sísmico apresenta as mesmas características de um cone padrão ao qual é acrescido um geofone ou um acelerômetro localizado no seu interior.

Conforme descrito por Campanella & Stewart (1992), o procedimento de cravação do cone proporciona um contato mecânico bastante eficiente entre o solo e o geofone, permitindo uma excelente recepção do sinal. O ensaio SCPT consiste basicamente no ensaio do cone, acrescido do procedimento do ensaio *down-hole*. A etapa mais importante da interpretação desse ensaio (fora as medidas do cone) é a determinação precisa do tempo de chegada da onda S. Um esquema de como é realizado o ensaio *down-hole*, utilizando o SCPT, é apresentado na Figura 20.

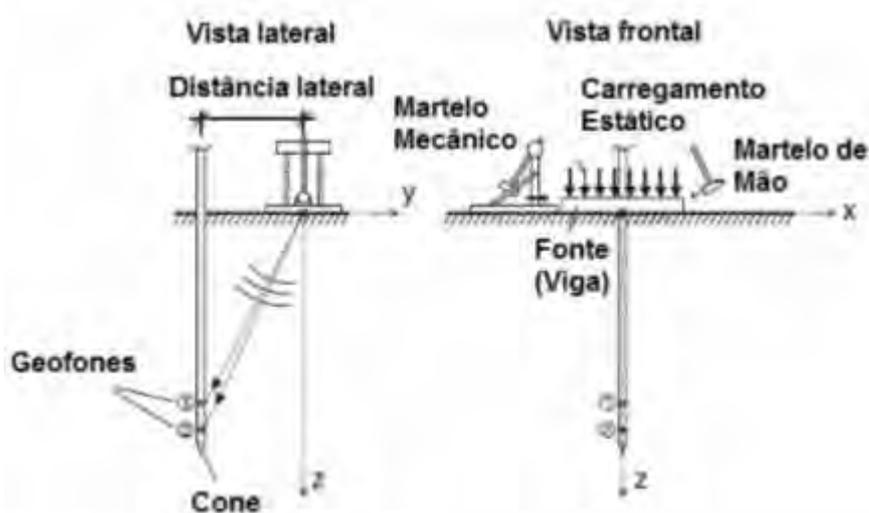


Figura 20 - Execução de um ensaio SCPT *down-hole* (adaptado de Karl *et al*, 2006).

Conforme descrito por diversos pesquisadores, o piezocone acoplado a outros dispositivos como um geofone para medidas de ondas sísmicas (SCPTU) tem demonstrado ser um recurso eficiente e competitivo para ser utilizado na caracterização geotécnica e geoambiental do subsolo.

b) Equipamento e metodologia de ensaio

O cone sísmico apresenta as mesmas características de um cone padrão, distinguindo-se deste por possuir um ou mais geofones ou acelerômetros que se localizam no seu interior, conforme ilustrado na Figura 21.

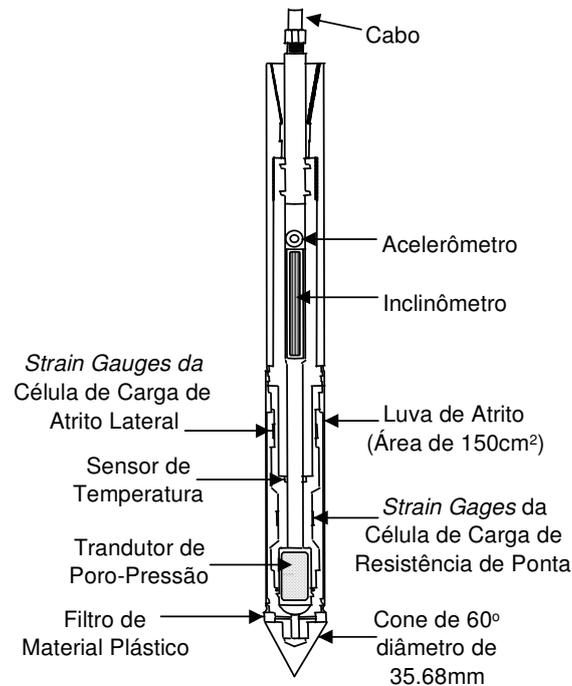


Figura 21 - Piezocone sísmico - SCPTU (adaptado de Davies & Campanella, 1995 apud Giacheti, 2001).

O procedimento adotado para cravação do cone fornece um contato mecânico firme entre o solo e o geofone, o que permite uma excelente recepção do sinal. Além disso, a orientação do geofone pode ser controlada da superfície e a determinação da profundidade pode ser feita com extrema precisão.

A metodologia do ensaio é a mesma de um ensaio de piezocone, no que diz respeito ao procedimento de preparação, saturação e medidas de q_c , f_s e U . A determinação da velocidade de ondas pode ser feita a cada parada de penetração do cone, seja no momento da cravação, como no momento da retirada do cone. A seguir é apresentado, na Figura 22, um diagrama do procedimento passo a passo para realização desse ensaio sugerido por Rice (1984) apud Giacheti (2001).

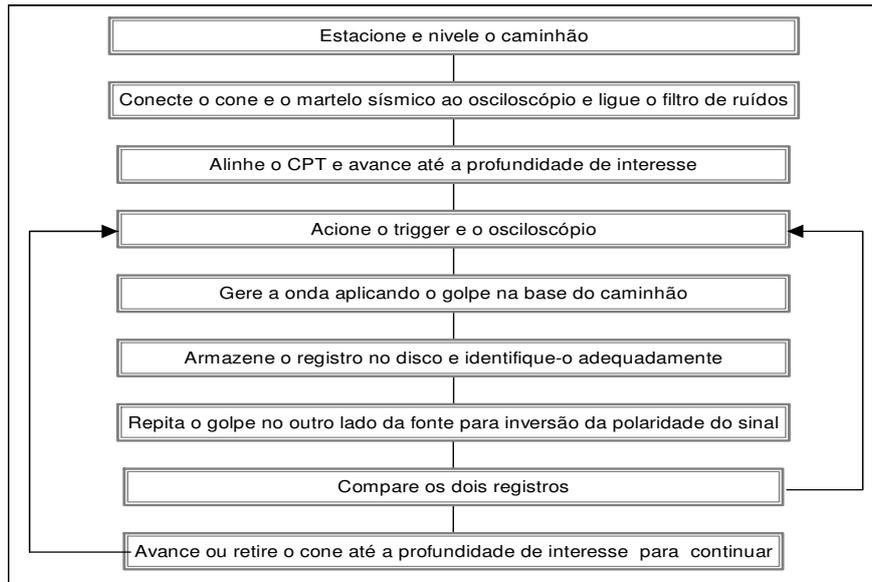


Figura 22 - Procedimento para realização do piezocone sísmico (adaptado de Rice, 1984, *apud* Giacheti, 2001).

Segundo Kim *et al* (2004) para a determinação das velocidades, a onda gerada viaja por diversas camadas com diferentes propriedades e características, e conseqüentemente ela é refratada devido à rigidez de cada camada. Alguns métodos, como aqueles propostos por Kim *et al* (2004), podem ser utilizados para a determinação das velocidades de ondas S, que são: o método direto; o método do intervalo; o método do intervalo modificado; e o método do intervalo modificado considerando a lei de Snell, o qual pode ser considerado.

Até o presente momento, para o desenvolvimento do trabalho aqui apresentado, os resultados foram interpretados utilizando-se o método do intervalo de forma adaptada para o *up-hole*. O método originalmente concebido é apresentado a seguir, exemplificado pela Figura 23.

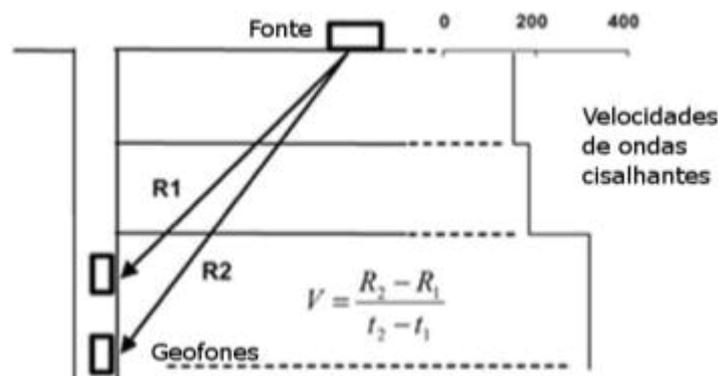


Figura 23- Método do Intervalo (adaptado de Kim *et al*, 2004).

Originalmente, este método se aplica para a interpretação dos ensaios do tipo *down-hole*, no qual a velocidade é determinada pelo intervalo de tempo e distância entre dois receptores instalados em diferentes profundidades. Logo, a velocidade de onda da camada entre receptores é obtida utilizando-se da Equação (9).

$$V = \frac{R_2 - R_1}{t_2 - t_1} \quad (9)$$

onde:

V = velocidade da onda

R_1 = distância da fonte até o receptor superior

R_2 = distância da fonte até o receptor inferior

t_1 = tempo de chegada ao receptor superior

t_2 = tempo de chegada ao receptor inferior

Para dados obtidos através de ensaios SCPT com dois ou mais receptores espaçados no cone, há ainda uma diferenciação para o método do intervalo, os chamados: intervalo verdadeiro e o pseudo-intervalo. Utilizando o mesmo golpe e fazendo o registro destes dois ou mais receptores em profundidades diferentes, tem-se o que é chamado de intervalo verdadeiro. No caso da utilização de um mesmo receptor em diferentes profundidades conseqüentemente serão gerados dois golpes, um para cada profundidade, e para essa análise de intervalo com golpe em dois momentos e utilização de apenas um receptor dá-se o nome de pseudo-intervalo. Detalhes dessas duas formas distintas para execução e interpretação de ensaios SCPT podem ser obtidos em Vitali (2011).

c) Resultados SCPT na investigação de solos tropicais

Giacheti (1991) e Barros (1997) demonstraram as peculiaridades do comportamento dinâmico de solos tropicais e atribuíram à cimentação e a condição não saturada dos solos lateríticos à elevada rigidez a baixa amplitude de deformação. Schnaid *et al* (1998) sugeriram que ensaios SCPT possam ser utilizados para avaliação do tipo de solo a partir da relação entre G_0/q_c . Essa recomendação está de acordo com as

conclusões de Giacheti & Carvalho (1994) os quais mostraram as diferenças de comportamento de horizontes lateríticos e não lateríticos, a partir das limitações de formulações desenvolvidas para solos sedimentares, para estimativa de G_0 , a partir de valores do N e q_c .

Giacheti & De Mio (2008) interpretaram resultados de ensaios SCPT realizados em três campos experimentais brasileiros (Bauru, São Carlos e Campinas) e mostraram que os solos lateríticos apresentam uma relação G_0/q_c muito superior aos solos saprolíticos, de modo que este índice pode ser empregado para diferenciar o comportamento desses horizontes distintos.

Os resultados dessas pesquisas encorajavam a continuidade dos trabalhos, do desenvolvimento de novas técnicas de ensaio. A obtenção de resultados semelhantes, a partir da relação G_0/N , indica a necessidade do emprego de equipamentos e técnicas de tratamento de dados e interpretação mais apurados para que se possam tirar todas as vantagens que a ferramenta oferece, especialmente para a investigação de solos tropicais.

3.8 Ensaio SPT com sísmica *up-hole* (S-SPT)

3.8.1 Considerações iniciais

O ensaio SPT com sísmica *up-hole* é um recurso antigo, porém pouco empregado. Ohta *et al* (1978) destaca esse novo método de medida da velocidade das ondas cisalhantes em campo que poderia ser amplamente utilizado, uma vez que o SPT é empregado largamente na engenharia de solos por causa de sua simplicidade e o uso comum.

Atualmente, o ensaio SPT com sísmica *up-hole* foi detalhadamente descrito em Bang & Kim (2007), inclusive com a criação de um modelo numérico em elementos finitos para estudar a geração e propagação da onda, e posteriormente ainda apresenta alguns métodos que possibilitam o cálculo da velocidade de onda cisalhante. Há alguns exemplos de utilização do SPT com sísmica *up-hole* no mundo como, por exemplo, na Turquia, onde foi empregado por Akin *et al* (2011).

Bang & Kim (2007) discutem e comparam a utilização do método *up-hole* com SPT com o método *down-hole*, utilizado, por exemplo, no SCPT. Este último tem uma

série de vantagens quanto à geração de onda e tem um custo relativamente econômico na Coreia, país onde estes autores realizaram suas pesquisas. A desvantagem do SCPT é que, em terrenos onde há fragmentos de rochas ou cascalho, sua execução torna-se difícil.

No Brasil pode-se considerar que existe uma visão diferente quanto ao emprego do SCPT. Aqui a maior dificuldade não se encontra em penetrar solos com cascalho ou rocha, mas sim, no fato de que este ensaio requer equipamento especial de elevado custo, enquanto isso, o ensaio SPT em conjunto da sísmica *up-hole* é um ensaio atrativamente mais econômico.

Bang & Kim (2007) mostram que este método adaptado do ensaio *up-hole* com o ensaio SPT (na denominação de S-SPT, também adotada de agora em diante neste trabalho), tem sido bastante eficiente. De acordo com Ohta et al (1978) e Bang & Kim (2007), a energia do impacto gerado pelo SPT, pode ser utilizada como fonte do método *up-hole*. O método SPT *up-hole* (S-SPT) é ilustrado na Figura 24.

Há uma geração significativa de ondas de compressão e cisalhamento causadas pela ponta e parte lateral do amostrador (σ_t e σ_s , respectivamente no círculo da Figura 24) quando da penetração no solo.

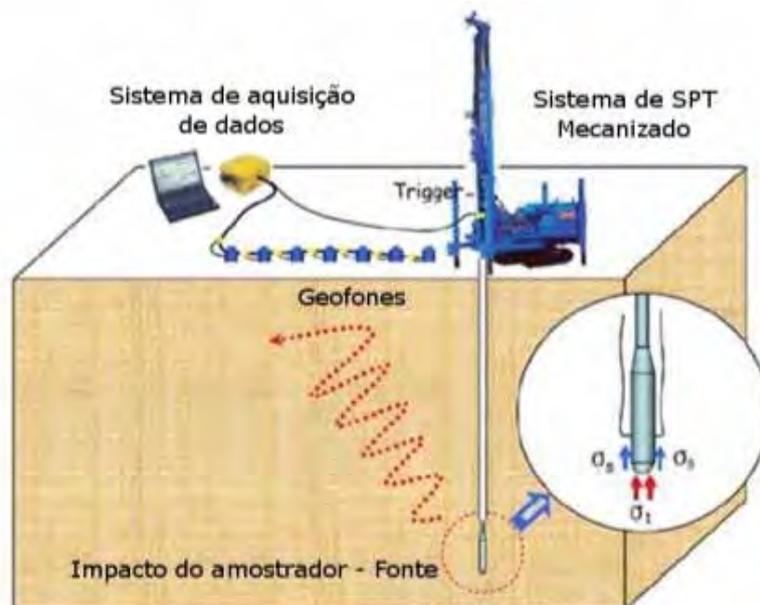


Figura 24 - Esquema do método S-SPT (Bang & Kim, 2007).

De acordo com Bang & Kim (2007), devido ao fato da fonte utilizada ser o próprio SPT, as ondas contêm grandes componentes de ondas de compressão da mesma forma que possuem componentes de ondas de cisalhamento, e não podendo usar as características de inversão de polaridade das ondas cisalhantes como no *down-hole*, fica

difícil a identificação do momento exato da primeira chegada da componente da onda cisalhante.

3.8.2 Orientação das ondas em um ensaio S-SPT

Bang & Kim (2007) empregam modelagem numérica de um perfil de duas camadas com V_S distintas (Figura 25a) para verificação de como e em quais direções seriam registradas as ondas P e S na superfície. Considerando que há indicação de refração entre estas camadas, conforme à lei de Snell, então as ondas cisalhantes verticais se inclinam para a horizontal, dependendo da profundidade em que se realiza o ensaio. Ainda através dessa modelagem, são ilustradas na Figura 25b a intensidade e a direção de ondas P e S na direção vertical Y e horizontal X quando a fonte é acionada.

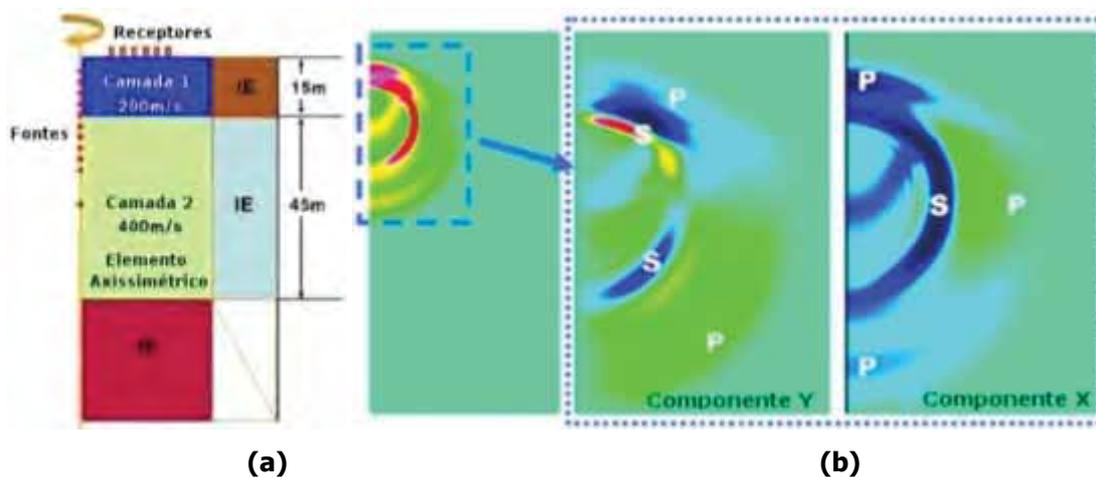


Figura 25 - Modelo numérico e componentes das ondas geradas em um ensaio S-SPT (Bang & Kim, 2007).

Com este modelo numérico, foram feitas observações pelos autores, seguindo uma metodologia de registro e análise em vários pontos equidistantes na superfície, todos nas componentes horizontal e vertical, e com a geração de ondas em diferentes profundidades. A metodologia consiste na análise do sinal vertical e horizontal separadamente, e também pela soma do quadrado destes sinais. Essa análise mostra que, para profundidades pequenas, a maior componente de onda S é registrada pelos geofones verticais, conforme ilustra a Figura 26, para uma onda gerada na profundidade de 3 metros, e o registro pelos geofones localizados desde 2m até 16m, espaçados de 2 em 2 metros na superfície.

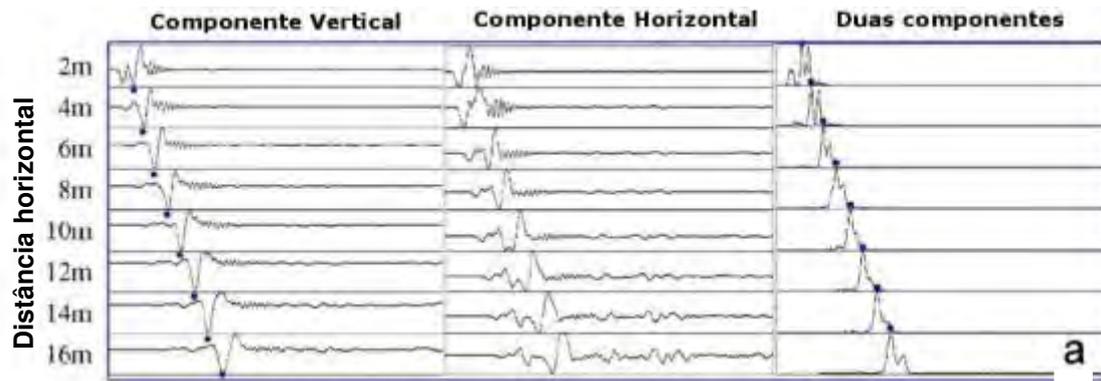


Figura 26 - Simulação de sinal gerado a 3m de profundidade e recepção na superfície (Bang & Kim, 2007).

Para a mesma análise, a uma profundidade de 18m (Figura 27), notou-se que tanto as componentes horizontais, quanto as verticais, registram grande parte da onda cisalhante, sendo de fácil identificação em ambas.

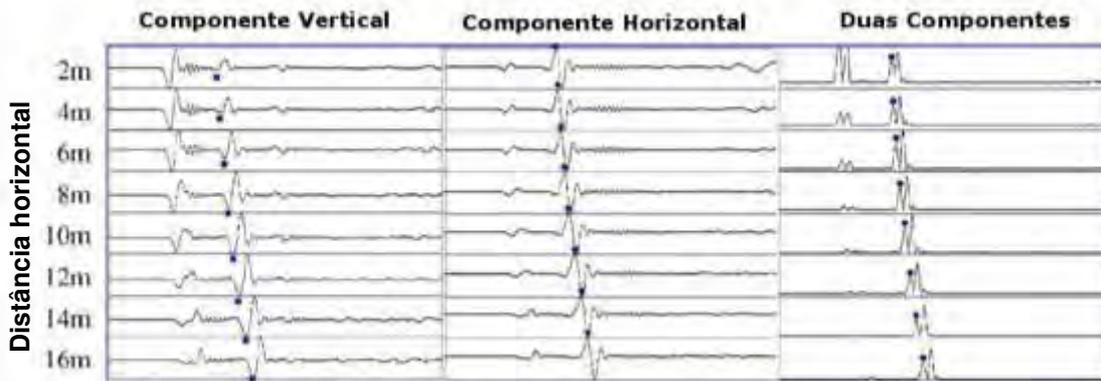


Figura 27 - Simulação de sinal gerado a 18m de profundidade e recepção na superfície (Bang & Kim, 2007).

Já na profundidade de 39m (Figura 28), a componente vertical registra em sua maioria as ondas P, e somente a componente horizontal registra com um grau maior de precisão o momento de chegada das ondas S.

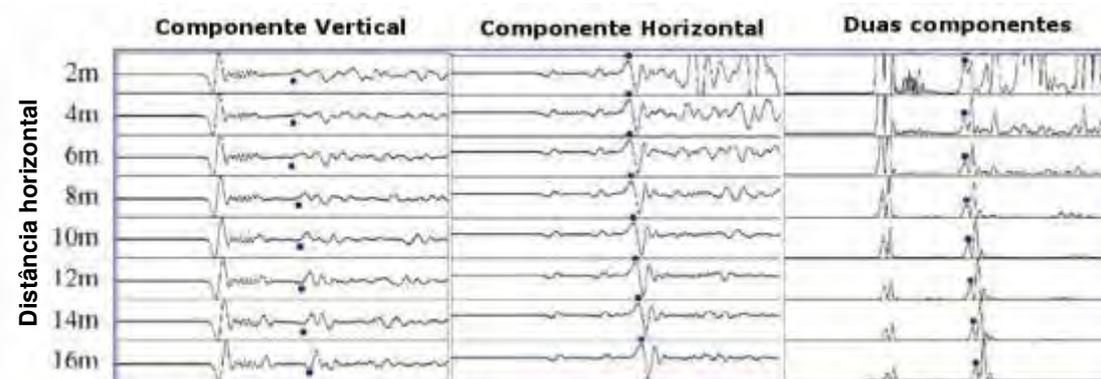


Figura 28 - Simulação de sinal gerado a 39m de profundidade e recepção na superfície (Bang & Kim, 2007).

3.8.3 **Equipamento, procedimento de instalação e características das ondas registradas em campo**

Conforme Bang & Kim (2007), na execução de ensaios sísmicos de campo, como o S-SPT, basicamente é necessário dispor-se de fonte geradora da onda elástica, de um sistema receptor para detectar os movimentos (geofones ou acelerômetros) e de um sistema de aquisição de dados para gravar os sinais.

Ohta *et al* (1978) descrevem o equipamento que utilizaram em campo para registro dos sinais, sendo este composto de geofones de frequência natural de 28 Hz, nas direções vertical e horizontal. O mesmo utiliza também como *trigger* um geofone de alta frequência (100 Hz) logo abaixo da cabeça de bater como um detector de quando o golpe é aplicado.

A questão do *trigger* é um ponto particular a ser observado. Há uma recomendação de Bang & Kim (2007) para instalar o *trigger* logo abaixo da cabeça de bater, igualmente ao que foi utilizado em Ohta *et al* (1978). Portanto, se trata de um *pré-trigger*, e não de um *trigger* propriamente dito. O tempo *pós-trigger* deve ser corrigido nas diferentes profundidades de realização do ensaio, em função do comprimento de hastes da composição e da velocidade medida na haste (o que necessitaria de instrumentação apropriada) ou na teórica de 5.123 m/s. Conforme Sancio & Bray (2010), essa velocidade é calculada por "c" (velocidade de propagação de onda), a qual é igual à raiz da relação entre o Módulo de elasticidade da haste "E" (206.840 MPa) e a densidade da haste " ρ " (7.880 kg/m³).

Durante o ensaio é empregada uma fonte de impacto vertical. A energia é inicialmente gerada a partir do martelo do SPT ou de um martelo de mão que atinge a cabeça de bater na superfície. Esta energia é transmitida pela haste até o amostrador padrão do SPT, que por sua vez transmite ao solo.

Bang & Kim (2007) sugerem o emprego de uma série de geofones, cabos e um *trigger*, usados com um sistema de aquisição de dados ligado a um computador. Os geofones posicionados na superfície devem ser em arranjos de dois em cada posição. Um dos geofones deve ser posicionado verticalmente para captação dos sinais verticais e o outro na horizontal, no sentido radial em relação ao furo de sondagem.

Ainda, quanto à disposição dos geofones, há uma recomendação de que eles devam ser colocados na superfície do solo nos intervalos selecionados a partir do ponto de perfuração, com no mínimo a utilização de dois receptores. Recomenda-se a

utilização de mais do que dois, se possível, com a premissa de que a utilização de mais receptores proporcionará melhores resultados. Ainda segundo Bang & Kim (2007), se a profundidade final do ensaio não for muito grande, usam-se apenas geofones verticais.

Seguem outras recomendações destes mesmos autores no que se refere aos procedimentos de execução do S-SPT para cada profundidade de realização do ensaio: deixar o martelo cair manualmente após ter desligado o motor, a fim de reduzir o ruído da máquina, reduzindo o ruído nos registros; os sinais devem ser obtidos martelando de duas a três vezes em cada profundidade para verificação da repetibilidade; e é importante manter controle preciso da profundidade exata da fonte na geração das ondas.

É apresentado, na Figura 29, um perfil típico de ondas registradas de um geofone vertical por Bang & Kim (2007), que representa o sinal captado a 12m do furo de sondagem, variando-se a profundidade do SPT.

O registro das ondas variando a posição do receptor na superfície também é apresentado na Figura 30, em trabalho realizado por Akin *et al* (2011), para uma profundidade de 3,8 metros do amostrador do SPT,

Nos dois casos, os autores não comentam quais são os processamentos de sinais utilizados, mas observa-se que para cada onda, o período dela é aproximadamente de 20ms, o que implica em uma frequência predominante na faixa em torno de 50 Hz.

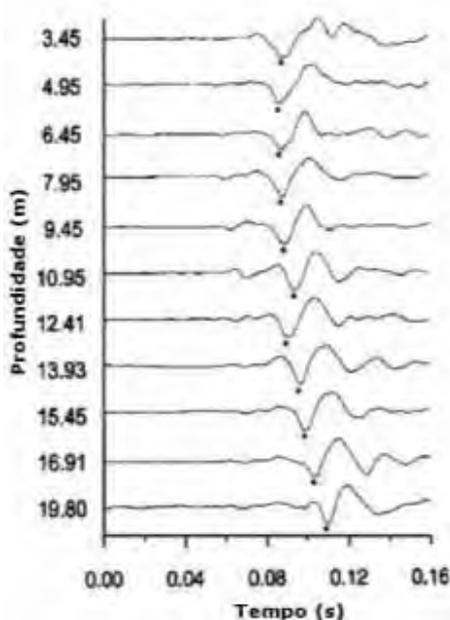


Figura 29 - Sinais típicos registrados por Bang & Kim (Bang & Kim, 2007).

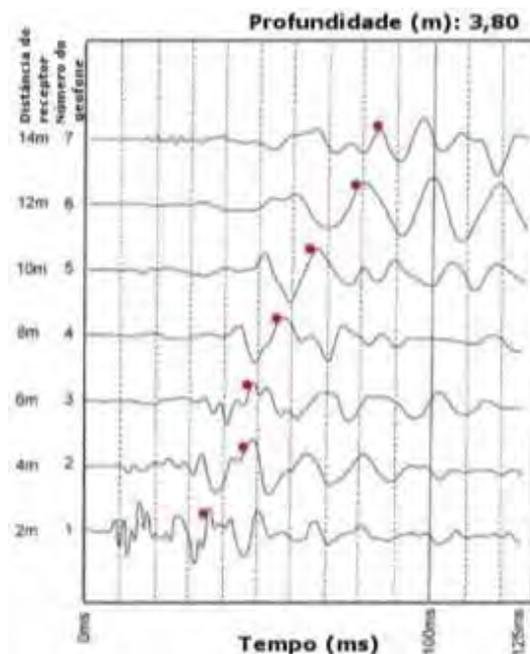


Figura 30 - Sinais típicos registrados por Akin *et al* (Akin *et al*, 2011).

3.8.4 **Determinação da velocidade da onda S**

Para a interpretação dos resultados de um ensaio S-SPT, conforme metodologia proposta por Bang & Kim (2007), assume-se que o local apresente camadas horizontais.

Dois métodos para a obtenção da diferença de tempos entre ondas podem ser utilizados, que são os correspondentes aos itens 3.6.1 e 3.6.3. Na utilização do primeiro, como é difícil a identificação da chegada exata da onda, é considerado o intervalo de pico a pico de ondas. Bang & Kim (2007) discutem a possibilidade da aplicação do método da correlação cruzada, que é confiável assim como o método da análise pico a pico, porém com a vantagem do cálculo ser automatizado sem a interferência de uma decisão subjetiva. Por outro lado, observa-se que a interpretação em seus estudos foi feita utilizando-se o método de análise de pico a pico de cada onda.

Independentemente da escolha do método para determinação dos tempos, são apresentados por Bang & Kim (2007) dois métodos para avaliar o perfil de V_S na camada de interesse no ensaio S-SPT. Os dois métodos consideram a lei de Snell, já que, como os receptores estão longe do furo de sondagem, esta lei não pode ser desconsiderada. Nesses casos é observada a premissa de que o local de ensaio apresenta camadas horizontais de espessura constantes e iguais ao intervalo em que são registrados os sinais (de um em um metro, mais tradicionalmente). Os métodos DTR (*delay time between serial receivers*) e DTS (*delay time between serial sources*) serão apresentados a seguir, detalhadamente.

a) Método DTR

No método DTR (*delay time between serial receivers*), calcula-se a velocidade das ondas S ou P através de dois receptores posicionados na superfície a diferentes distâncias do furo de sondagem. Na Figura 31 é apresentado o esquema seguido pelo método.

O cálculo tem início com a determinação do intervalo de tempo entre a detecção das ondas nos receptores. A velocidade de onda correspondente à primeira camada de solo, V_1 , é obtida através da Equação (10), ilustrada pela Figura 32.

$$V_1 = \frac{R_{1,f} - R_{1,n}}{DTR_1} \tag{10}$$

onde:

DTR_1 = diferença de tempo entre dois receptores em série;

$R_{1,f}; R_{1,n}$ = distância da fonte aos receptores;

índice n = receptor mais próximo (*near*);

índice f = receptor mais distante (*far*).

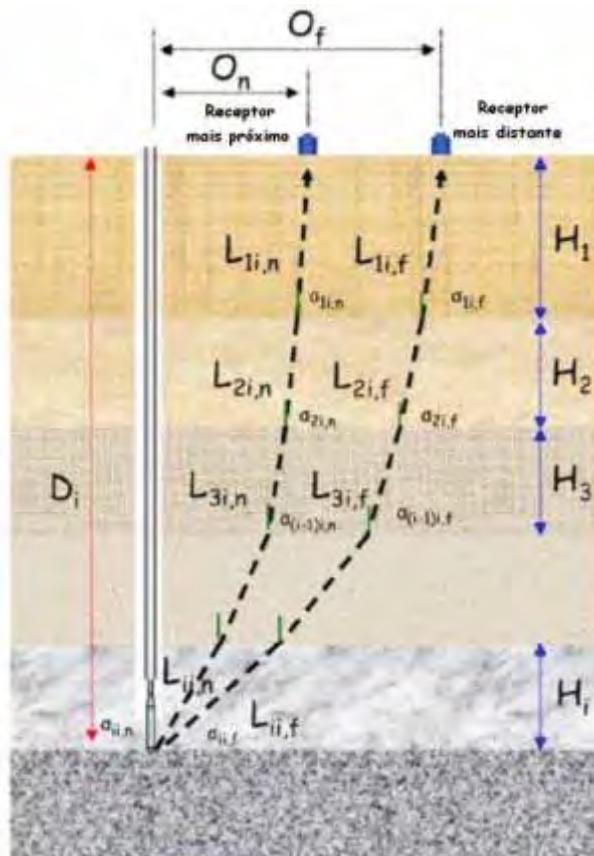


Figura 31 - Representação esquemática do método DTR (Bang & Kim, 2007).

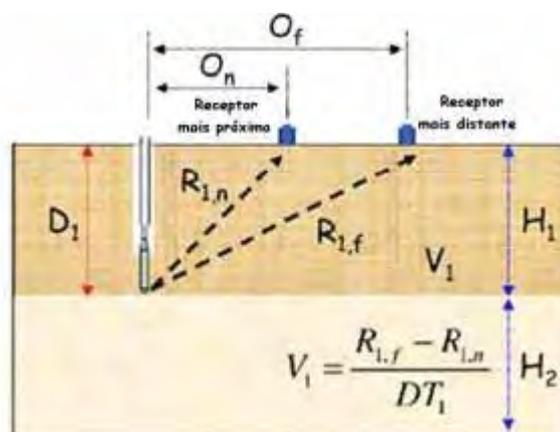


Figura 32 - Determinação do valor de V_s pelo método DTR (Bang & Kim, 2007).

Para determinação das velocidades de ondas nas demais camadas, deve-se primeiro determinar o caminho refratado das ondas, utilizando a Lei de Snell, porém, para isso, inicialmente supõe-se a velocidade da camada a ser calculada, e em um processo iterativo, ajusta-se esta, até que as equações se equilibrem.

Com isso, deve-se utilizar um algoritmo, e conseqüentemente um método numérico para o cálculo das velocidades. Assim, devem-se equilibrar as equações provenientes de contorno, que são retiradas da:

- Equação (11): proveniente da lei de Snell, a qual diz que a relação entre o seno do ângulo entre a vertical do caminho refratado e a velocidade de cada camada deve ser constante.

- Equação (12): proveniente da geométrica, a qual é conhecida à distância horizontal entre o furo de sondagem e a posição do geofone.

Obs.: Para facilitar o entendimento, nas equações abaixo, a notação utilizada é a mesma da Figura 31, supondo-se que o caminho a ser calculado é para o geofone mais distante (*far*).

$$\frac{\text{sen } \alpha_{i1,f}}{V_1} = \frac{\text{sen } \alpha_{i2,f}}{V_2} = \dots = \frac{\text{sen } \alpha_{ij,f}}{V_j} = \dots = \frac{\text{sen } \alpha_{ii,f}}{V_i} \quad (11)$$

onde:

i = índice correspondente a cada camada a ser calculada a velocidade;

V_j = Velocidade da camada de índice j ;

α_{ij} = ângulo de incidência da camada de índice j com a vertical quando calculada a velocidade da camada i ;

$$H_1 \cdot \tan \alpha_{i1,f} + \dots + H_j \cdot \tan \alpha_{ij,f} + \dots + H_i \cdot \tan \alpha_{ii,f} = O_f \quad (12)$$

onde:

H_j = Altura da camada de índice j ;

O_f = distância horizontal entre o furo de sondagem e o posicionamento do geofone;

Calculada a trajetória da onda para ambos os receptores (o mais próximo e o mais distante do furo de sondagem) com a velocidade da camada i que foi suposta,

podendo esta ser, por exemplo, a velocidade da camada anterior, dá-se sequência ao procedimento de cálculo da velocidade da camada i .

O comprimento de passagem da onda em cada camada é dada pela Equação (13).

$$L_{ij,f} = \frac{H_j}{\cos \alpha_{ij,f}} \quad (13)$$

onde:

$L_{ij,f}$ = comprimento de passagem da onda na camada j quando calculada a velocidade da camada i ;

α_{ij} = ângulo de incidência da camada de índice j com a vertical quando calculada a velocidade da camada i ;

Logo, a velocidade da camada i , dada pela Equação (14), se dá pela divisão de um comprimento por um tempo. O comprimento (numerador) é a diferença dos comprimentos de passagem da onda, desta última camada i , do receptor mais próximo e do receptor mais longe do furo de sondagem. O tempo em questão é calculado pela diferença do tempo registrado entre os dois receptores (mais perto e mais longe do furo de sondagem - DTR_i) subtraídos pela somatória que representa o tempo gasto na transmissão das ondas desde a penúltima camada de solo até a primeira, restando apenas neste denominador o tempo da última camada de solo.

$$V_i = \frac{L_{ii,f} - L_{ii,n}}{DTR_i - \left(\sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L_{ij,f}}{V_j} \right) - \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L_{ij,n}}{V_j} \right) \right)} \quad (14)$$

Calculada a velocidade da camada i , compara-se com a velocidade inicial suposta para a mesma. Se ela está dentro de uma tolerância imposta no método iterativo, então parte-se para o cálculo da próxima camada. Caso ela esteja fora desta tolerância, então são novamente calculadas as trajetórias considerando a lei de Snell a partir das equações (11) e (12), porém, desta vez, utilizando a velocidade obtida como entrada da velocidade da camada i . A nova velocidade é calculada pela Equação (14) verificada novamente com a anterior. Assim o processo se repete até que a tolerância seja alcançada.

b) Método DTS

Apresentada a parte mais difícil dos métodos propostos por Bang & Kim (2007), que se resume no cálculo da trajetória segundo a lei de Snell e o método iterativo até que o sistema se equilibre, apresenta-se agora o método DTS (*delay time between serial sources*), que também faz uso destas fases de cálculo.

Resumidamente, a diferença do método DTR para o DTS, é que o último, com um único receptor na superfície já é possível a determinação das velocidades de onda em cada camada, conforme esquematizado na Figura 33.

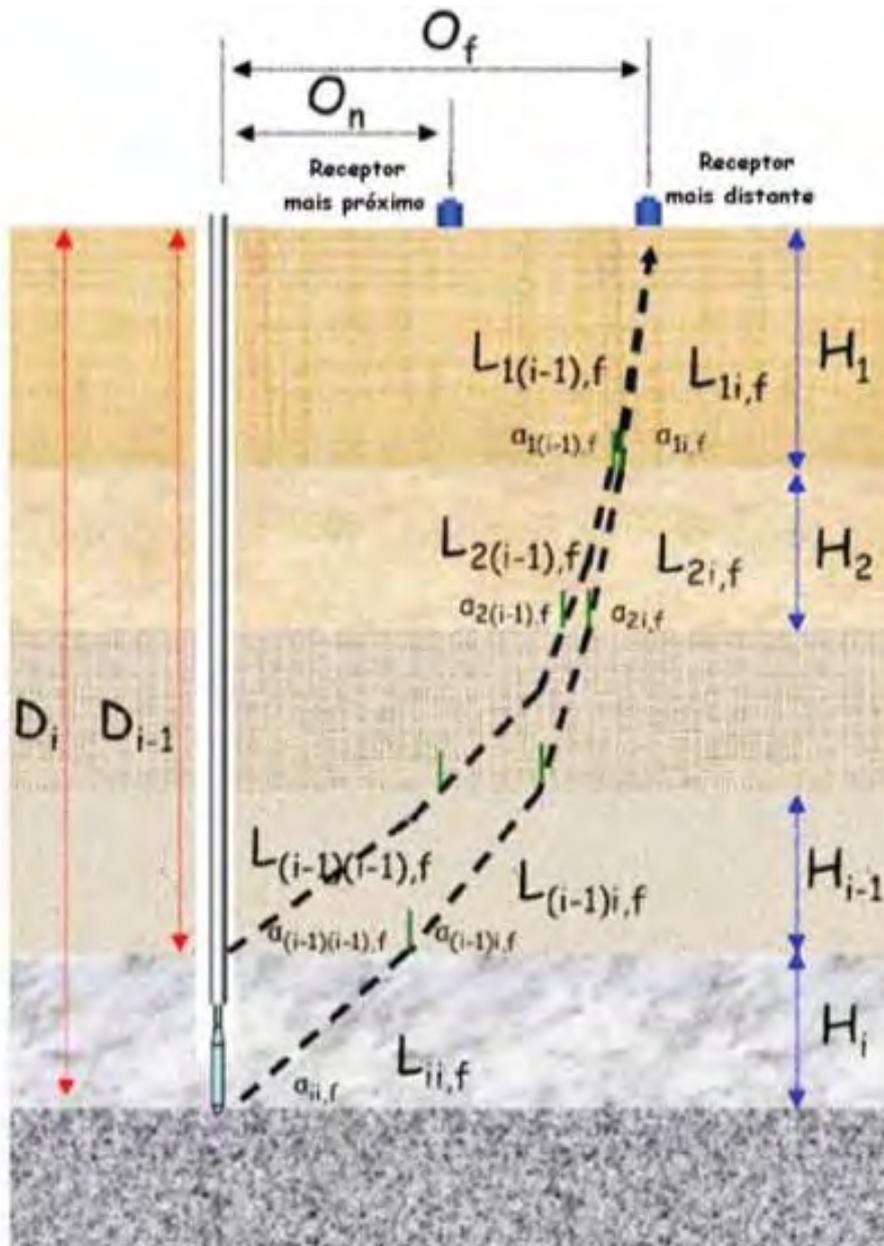


Figura 33 - Representação esquemática do método DTS (Bang & Kim, 2007).

Esse método assemelha-se ao método do intervalo para a determinação de V_s no ensaio *down-hole* SCPT.

Em Bang & Kim (2007), este método também foi aquele que forneceu os melhores resultados, sendo que a aplicação do DTR trouxe muita variação pelo fato desse ser mais sensível a pequenas falhas tanto na execução do ensaio tanto como no processo de análise.

Quanto aos cálculos empregados neste método, inicialmente deve-se calcular a trajetória da onda através do maciço, usando as Equações (11) e (12). Nota-se que para isso, novamente a velocidade da camada i é suposta, sendo ela, por exemplo, a velocidade da camada anterior já calculada ($i-1$).

Posteriormente são calculados novamente os comprimentos em que a onda passa por cada camada em sua trajetória usando a Equação (13). Finalmente, a velocidade (V_i) é calculada pelo quociente entre o comprimento do trajeto da onda na última camada ($L_{ii,f}$) e a diferença de tempo entre o tempo de chegada à profundidade i subtraído do tempo gasto para a onda percorrer as camadas anteriores, conforme a Equação (15).

$$V_i = \frac{L_{ii,f}}{T_{i,f} - \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{L_{ij,f}}{V_j} \right)} \quad (15)$$

onde:

V_i = Velocidade da camada de índice i , ou seja, da última camada;

$T_{i,f}$ = Tempo de chegada da onda;

Novamente, a exemplo do método DTR, é feita a verificação da velocidade da camada i calculada com a velocidade inicial suposta para a mesma. Se ela está dentro de uma tolerância imposta no método iterativo, então parte-se para o cálculo da próxima camada. Caso ela esteja fora desta tolerância, então são novamente calculadas as trajetórias considerando a lei de Snell a partir das equações (11) e (12). Porém, desta vez, utiliza-se a velocidade obtida como entrada da velocidade da camada i . A nova velocidade é calculada mais uma vez pela Equação (15) e comparada novamente com a anterior. Assim, o processo se repete até que a tolerância seja alcançada.

4 MATERIAIS E METODOLOGIA

4.1 Ensaio SPT

Os ensaios SPT foram realizados segundo o que preconiza a NBR 6484/01, com equipamento leve tradicional. Os equipamentos dos ensaios SPT empregados são do tipo manual, com tripé, martelo de 65 kg cilíndrico com pino-guia, coxim de madeira, cabeça de bater de 3,6 kg, corda de sisal, haste e amostrador padrão conforme a norma. Para ilustrar o equipamento é apresentado na Figura 34a, b e c, respectivamente, o tripé, martelo com coxim de madeira e amostrador bipartido com amostra de solo.



Figura 34 - Ilustração de equipamento SPT utilizado nos ensaios.

4.2 Penetrômetro utilizado nos ensaios SCPT e CPTU

Foi utilizado um sistema multifunção, da marca Pagani, que possui capacidade de cravação de 150 kN e que possui também martelo para cravação para o ensaio DPSH. Os ensaios SCPT e CPTU com esse equipamento foram utilizados para caracterização da área e para obtenção de um perfil de referência de V_s . Esse perfil de V_s de referência foi empregado para a validação do equipamento de S-SPT. A Figura 35 ilustra o equipamento durante a execução de um ensaio SCPT no campus da UNESP-Bauru.



Figura 35 - Penetrômetro multi-função durante ensaio SCPT.

O equipamento é ancorado ao solo por dois trados helicoidais de 4 m de comprimento cada. O nivelamento da máquina é efetuado através de três hastes de nivelção e verificado por um nível de bolha. A haste de nivelção traseira e posteriores podem ser apoiadas sobre as fontes sísmicas no caso da realização de ensaio SCPT. Detalhes sobre o equipamento e ensaios SCPT podem ser obtidos em Vitali (2011).

4.3 Geofones

Tanto para os ensaios *down-hole* (SCPT), quanto para os ensaios *up-hole* (S-SPT) foram utilizados geofones do modelo GS-20DH, fabricação da GeoSpace Technologies. O processo de fabricação da GeoSpace inclui a verificação de parâmetros de funcionamento com um sistema informatizado de testes automatizados. Algumas das

características mais importantes são descritas abaixo e a curva de resposta é apresentada na Figura 36:

- Frequência natural de 28 Hz;
- Resposta de 400 Hz;
- Alta frequência, alto rendimento;
- Grade digital projetada para uma vida longa e serviço confiável;
- Funciona em qualquer posição;
- De baixo custo, vida longa;
- Um ano de garantia;
- Dimensões: altura 3,35 cm; diâmetro 2,69 cm; peso 99 g; altura do terminal 0,16 cm.

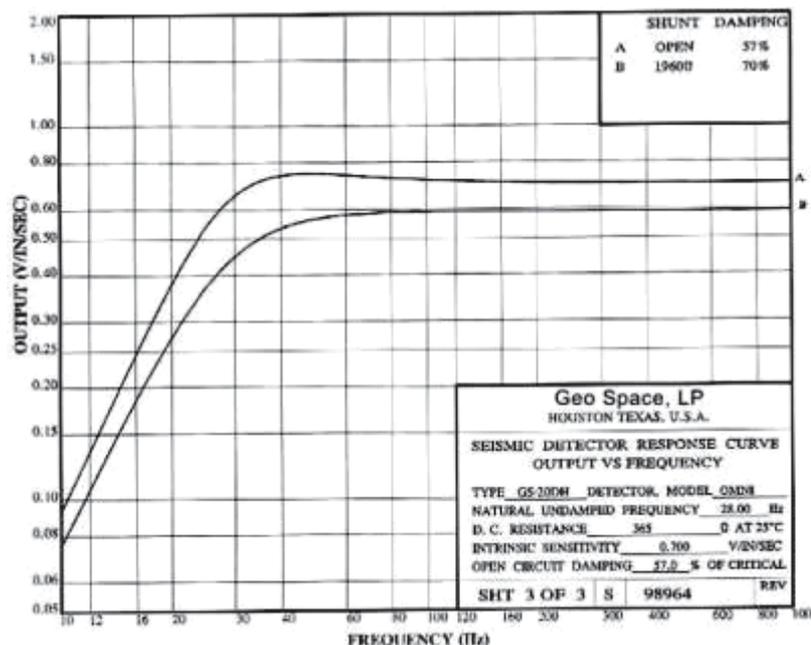


Figura 36 - Curva de resposta do geofone modelo GS-20DH (OYOGEO SPACE).

4.3.1 Geofones nos ensaios sísmicos up-hole

Para a captação dos sinais na superfície do terreno são utilizados até seis arranjos (como na última campanha realizada) de dois geofones inslados em caixas. Essas caixas também são de fabricação da GeoSpace, e seu modelo é o GS-3C. Com ela é possível orientar até três geofones para registros triaxiais (V/H1/H2), ou seja, um na direção vertical e dois ortogonais na horizontal. A fixação no solo é dada por até quatro ponteiros, as quais são rosqueadas no fundo dessas caixas e posteriormente são cravadas

na superfície. A caixa é constituída de resina termoplástica rígida e traz uma vedação de borracha de silicone, tornando-a impermeável e resistente.

A seguir é ilustrado o processo de montagem de uma destas caixas, com dois geofones. A primeira etapa consiste em fazer as ligações dos fios nos pólos dos geofones (Figura 37a). Logo após, são posicionados e encaixados os geofones nos lugares pré-estabelecidos no interior da caixa (Figura 37b), e então finalmente, são colocadas as borrachas de vedação da lateral e o apoio superior preto e a caixa (Figura 37c). A caixa é fechada e parafusada.

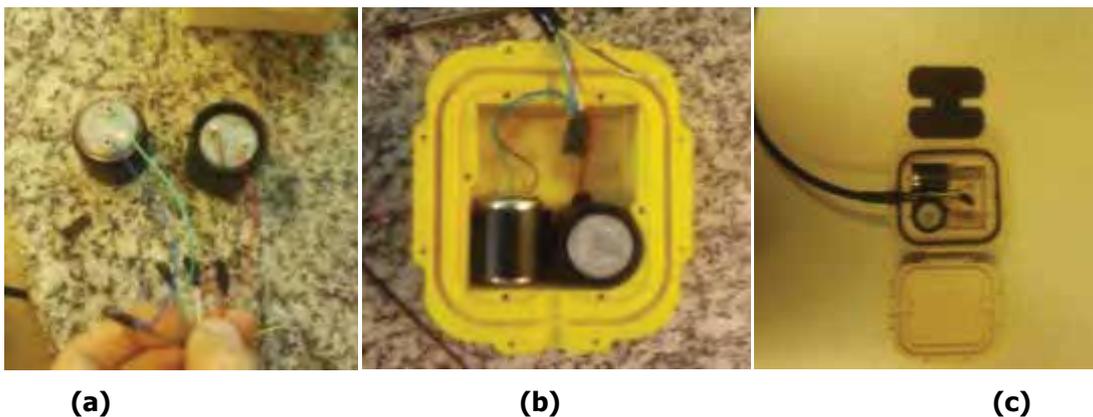


Figura 37 - Processo de montagem das caixas.

No total, foram utilizadas seis caixas com dois geofones (um vertical e um horizontal) para a realização da sísmica *up-hole*. Cada caixa em sua disposição final, conta com um cabo de 10 metros no qual o seu término possui um conector para a ligação no caixa do sistema de aquisição de dados.

4.3.2 Geofones nos ensaios SCPT

Para os ensaios de referência da área de estudo, foi utilizada uma ponteira desenvolvida por Vitali (2011) e um cone sísmico comercial da marca Vertek. Maiores informações sobre essa ponteira, metodologia de ensaio e resultados de ensaios podem ser encontrados em Vitali (2011), cuja ponteira é ilustrada na Figura 38.



Figura 38 - Ponteira com 3 geofones desenvolvida por Vitali (2011).

4.4 Fonte sísmica e trigger

4.4.1 Ensaios SPT com sísmica up-hole

O *trigger* é o dispositivo que indica o início de registro do sinal sísmico, podendo ser de contato (fechamento de circuito entre polo negativo e positivo) ou analógico, com o auxílio de um acelerômetro, por exemplo.

Nas pesquisas realizadas por Bang & Kim (2007), não foi especificado qual o *trigger* utilizado, contudo subentende-se que houve a utilização de um *trigger* analógico como na pesquisa de Ohta *et al* (1978) e a fonte utilizada também foi o próprio martelo do SPT.

Nesta pesquisa, foi utilizado como fonte, um martelo de mão de aço, de 2 kg, e um *trigger* digital (de contato) para os ensaios *up-hole*. Esse dispositivo dá início ao registro dos sinais com grande precisão e sem grandes transtornos para a execução dos ensaios sísmicos no SPT. O *trigger* é ativado quando um martelo de mão de aço de 2 kg atinge a cabeça de bater. Neste momento o circuito entre martelo e cabeça de bater é fechado e a onda é gerada. Ela se propaga pela haste até o amostrador do SPT. Este, por sua vez, transmite ao meio a onda que foi gerada.

A Figura 39 em (a) exemplifica o esquema da geração da onda e acionamento do *trigger*, em (b), no ensaio S-SPT.

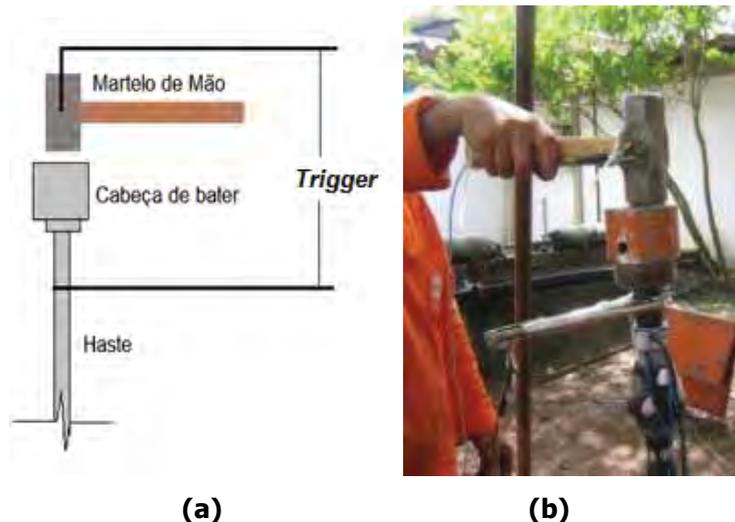


Figura 39 - Esquema de *trigger* e geração de ondas empregados nos ensaios S-SPT

Destaca-se que o tempo de registro pós *trigger* é posteriormente corrigido via programa de análise, descontando o tempo de viagem da onda da cabeça de bater até o amostrador, pois o objetivo é medir o tempo de propagação da onda desde a fonte até os geofones na superfície.

4.4.2 Ensaios SCPT

A fonte sísmica utilizada nos ensaios SCPT, desenvolvida por Vitali (2011), é composta de chapas de aço parafusadas em madeira maciça, com carga estática do equipamento de cravação e de dois martelos fixos pendurados em duas hastes que partem da própria fonte sísmica. Esse conjunto é ilustrado na Figura 40a. O *trigger* é ativado quando o martelo atinge a fonte sísmica provocando o fechamento do circuito. O detalhe de fechamento do circuito é ilustrado na Figura 40b.



Figura 40 - Fonte sísmica e detalhe do *trigger* utilizados nos ensaios SCPT.

4.5 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é da marca *National Instruments*, modelo NI-USB-6353. Seguem algumas especificações deste sistema:

- Entradas analógicas:
 - Canais: 32 em *single-ended channel* e 16 em *differential channel*;
 - Resolução: 16 bits;
 - Taxa de aquisição: 1.25 MS/s;

- Saídas analógicas:
 - Canais: 4;
 - Resolução: 16 bits;
- Taxa de atualização: 2.86 MS/s;
- *Trigger*: Analógico, Digital.

Com este sistema, empregando a aquisição diferencial, que é a mais indicada, pois elimina grande parte dos ruídos, podem ser instalados até 16 geofones, a uma taxa de aquisição de dados igual a 1.25 MS/s dividido pelo número de canais utilizados, portanto considerada alta, importante para uma melhor interpretação dos resultados e redução de erros.

Para facilitar o uso deste sistema em campo, confeccionou-se uma caixa que protege o sistema e possui os conectores ligando os cabos das caixas que contêm os geofones, além de saída para a alimentação elétrica, aterramento e conexão com o computador. Essa caixa é um dispositivo necessário, que diminui consideravelmente o tempo de conexão de todos os cabos no sistema de aquisição, além de protegê-lo para uso em campo. A Figura 41 ilustra a caixa utilizada.

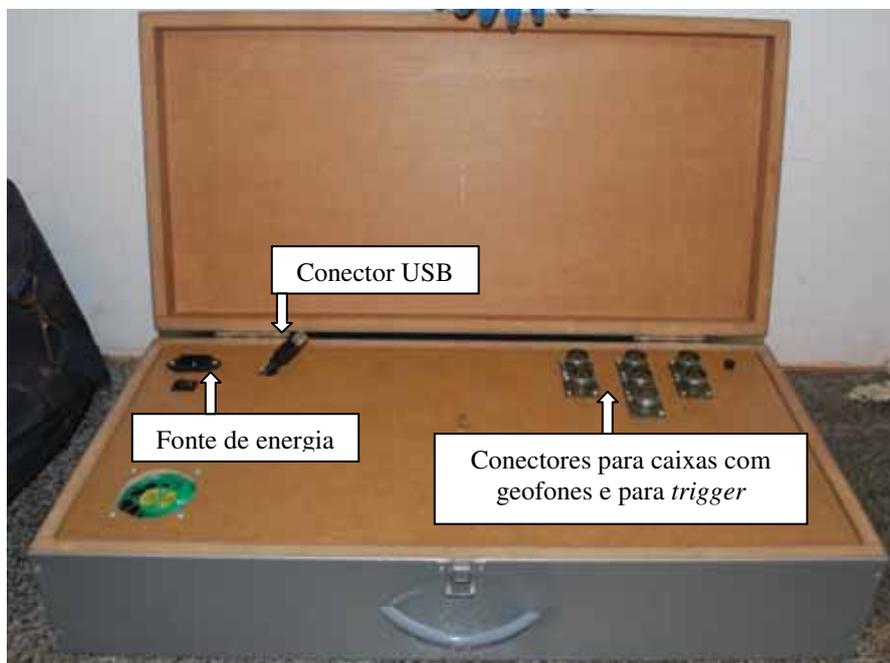


Figura 41 - Caixa confeccionada para acondicionamento do equipamento de aquisição de dados e seus conectores.

4.6 Softwares

Os softwares utilizados nos ensaios sísmicos *up-hole* para aquisição de sinais, tratamento e análise serão apresentados no Capítulo 5.

No caso dos ensaios SCPT, o software de aquisição e análise foi o mesmo apresentado em Pedrini *et al* (2010) ilustrado na Figura 42.

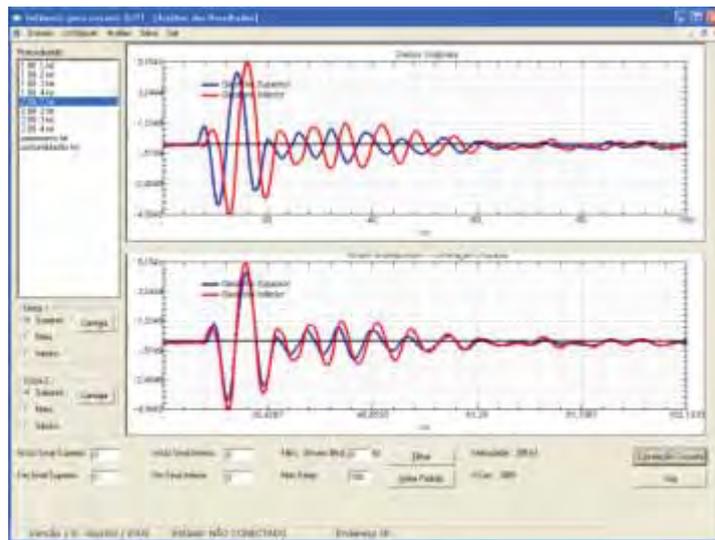


Figura 42 - Tela de análise de sinais sísmicos do SCPT (Pedrini *et al*, 2010).

4.7 Detalhamento da metodologia de execução do S-SPT

O equipamento empregado em campo, além daquele tradicional do SPT, consta de:

- Três a seis caixas compostas por dois geofones (vertical e horizontal);
- Martelo de mão, usado como fonte dos sinais sísmicos;
- Computador;
- Sistema de aquisição;
- Barra de aço com 1,30 m para aterramento do sistema;
- Cabos diversos para *trigger* e aterramento;

O computador e caixa com sistema de aquisição de dados devem ser dispostos adequadamente perto do local de ensaio. No sistema de aquisição, devem ser conectados os cabos USB (conexão com o computador), as caixas com os geofones, cabo de aterramento e energia elétrica e *trigger*. A barra de aço de 1,30m deve ser cravada no

solo com o martelo de mão e, em seguida, é ligado a ela o cabo do aterramento conforme ilustra a Figura 43.



Figura 43 - Barra de aço cravada no solo servindo para aterramento.

O aterramento empregado foi testado e comparado com aquele que se usa no sistema na ancoragem do equipamento de cravação Pagani, que alcança 3 metros de profundidade. A Figura 44 mostra, em registros sem filtros, o nível de ruído nos dois tipos de aterramento.

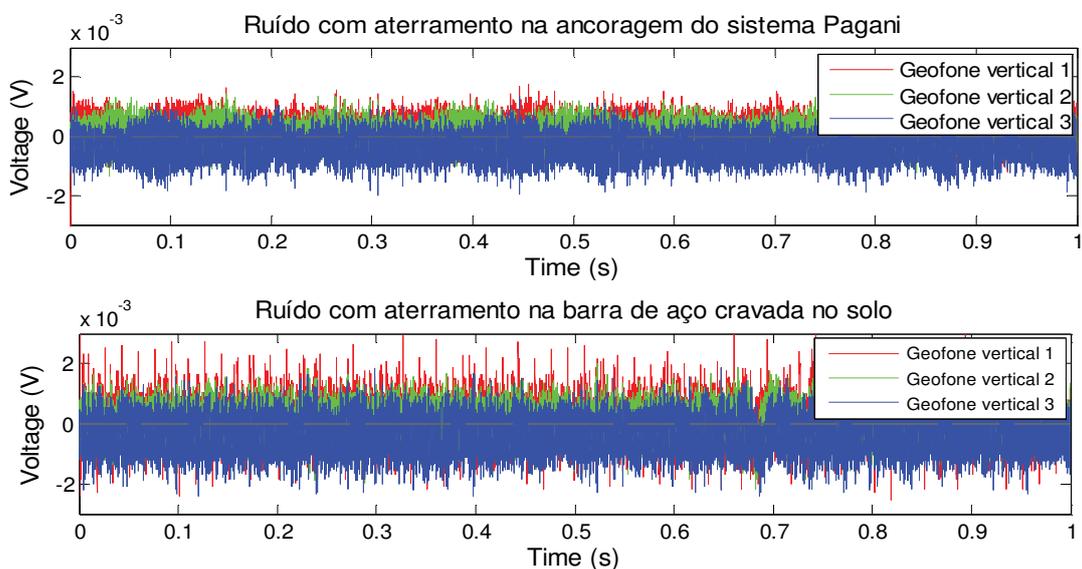


Figura 44 - Teste de eficácia do aterramento.

Analisando os resultados apresentados na Figura 44, pode-se considerar que o aterramento com a barra de aço foi satisfatório, pois o nível de ruído nos geofones era quase o mesmo do usado com o equipamento de cravação, sendo apenas um pouco superior no caso do emprego da barra de aço. Também foi avaliado o espectro de

frequências com o ruído (Figura 45). Notou-se que as frequências predominantes de ruído são altíssimas e completamente fora da faixa de frequência que o geofone garante resposta. Logo, o emprego de um filtro de frequências é desejável.

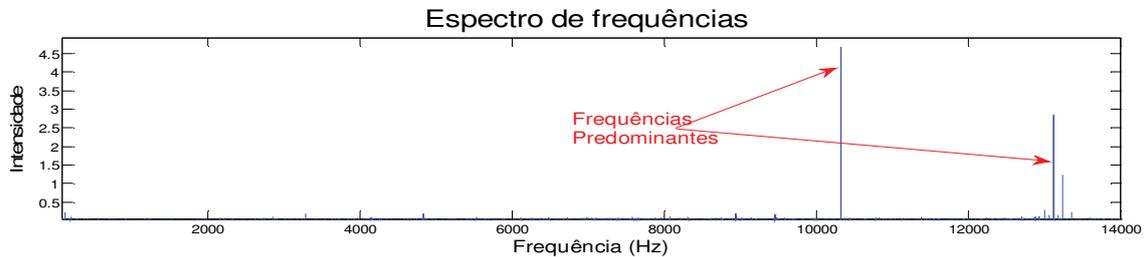


Figura 45 - Frequências predominantes do ruído.

O ruído é quase que totalmente eliminado empregando-se um filtro, por exemplo, do tipo passa-baixa de 1000 Hz. O emprego desse filtro é ilustrado pela Figura 46, na qual é feita uma comparação do sinal sem filtro com o sinal com o emprego do filtro.

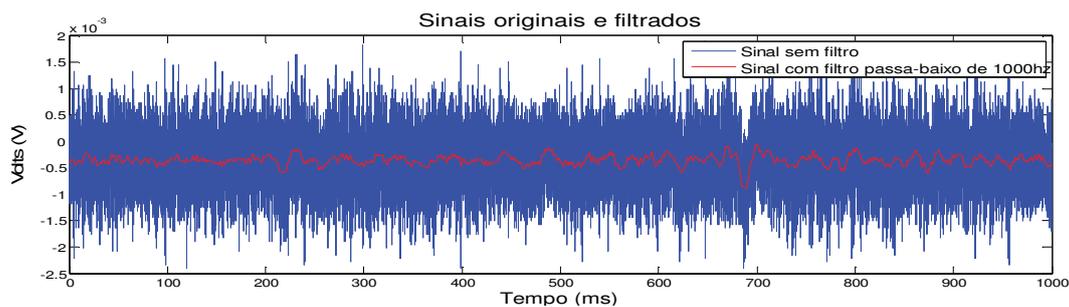


Figura 46 - Aplicação de filtro passa-baixa de 1000 Hz para eliminação de ruído.

A instalação das caixas no solo requer uma série de cuidados, para garantir uma melhor recepção e registros dos sinais sísmicos gerados. Após diversos testes em campo, constatou-se uma melhor solução, que é ilustrada no fluxograma (Figura 47).

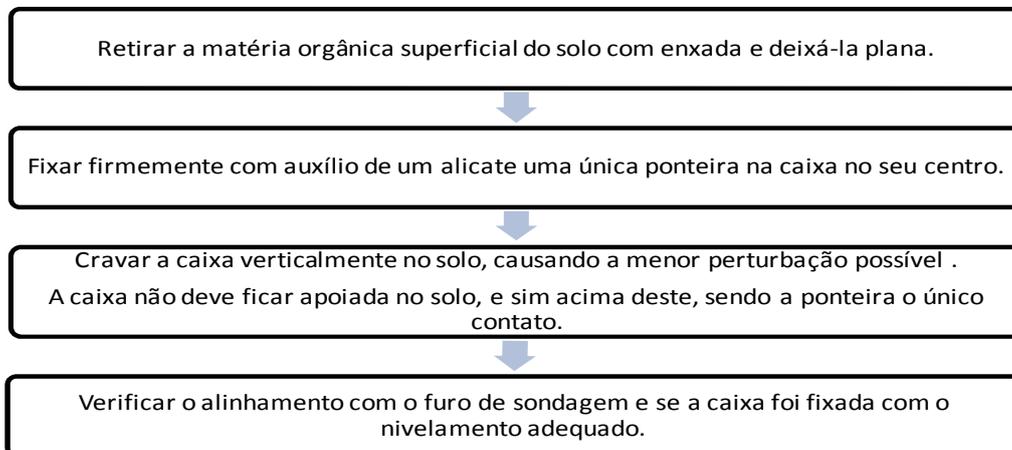


Figura 47 - Fluxograma de fixação das caixas com geofones.

Devido à grande importância do procedimento de instalação, visando garantir a qualidade dos registros sísmicos, o procedimento é ilustrado também pela Figura 48. Em (a) evidencia-se que a ponteira de fixação deve estar fortemente rosqueada junto à caixa que contem os geofones; em (b), é demonstrado que a caixa deve ser cravada quase que completamente no solo, porém com o contato dando-se unicamente pela ponteira de fixação, além de estar devidamente nivelada; e em (c) é observado o alinhamento a ser mantido da caixa para o furo de sondagem.

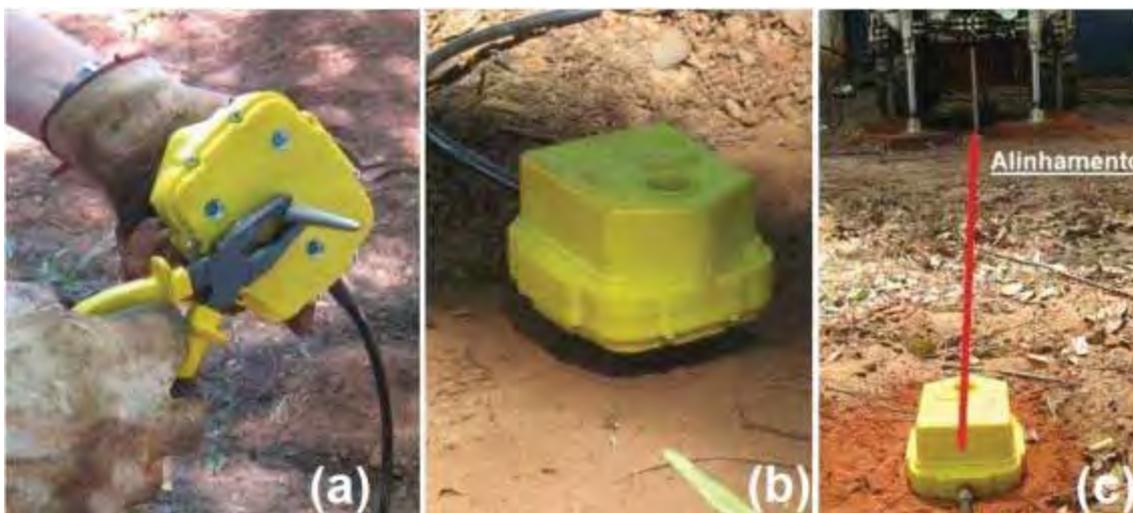


Figura 48 - Fixação das caixas no solo.

O espaçamento das caixas no solo variaram de 1,5 a 1,5 m até de 3 em 3 m. Após a correta instalação dos equipamentos, o ensaio SPT foi iniciado segundo o procedimento padrão que consta na norma da ABNT NBR 6484/01, escavando-se o primeiro metro e, em seguida, faz-se a cravação do amostrador padrão em 45 cm, contando-se o número de golpes a intervalos de 15 cm. Até este momento, não há nenhuma diferença no procedimento do ensaio sem a técnica sísmica *up-hole*. Quando o amostrador estiver completamente cravado no solo, iniciam-se os procedimentos para o registro das ondas sísmicas, conforme o fluxograma ilustrado na Figura 49.

Devem-se utilizar os procedimentos ilustrados na Figura 49 para todas as profundidades em que o SPT é executado e anotar cuidadosamente a profundidade do amostrador padrão para posterior cálculo das velocidades. O rigor no registro das profundidades é fundamental para garantir os valores de velocidades de propagação de ondas no solo.

A aquisição é feita utilizando-se um programa desenvolvido para essa finalidade específica e descrito no Capítulo 5. Para a análise dos sinais e cálculo de velocidades também é utilizado outro programa que será descrito com detalhes nesse mesmo capítulo.

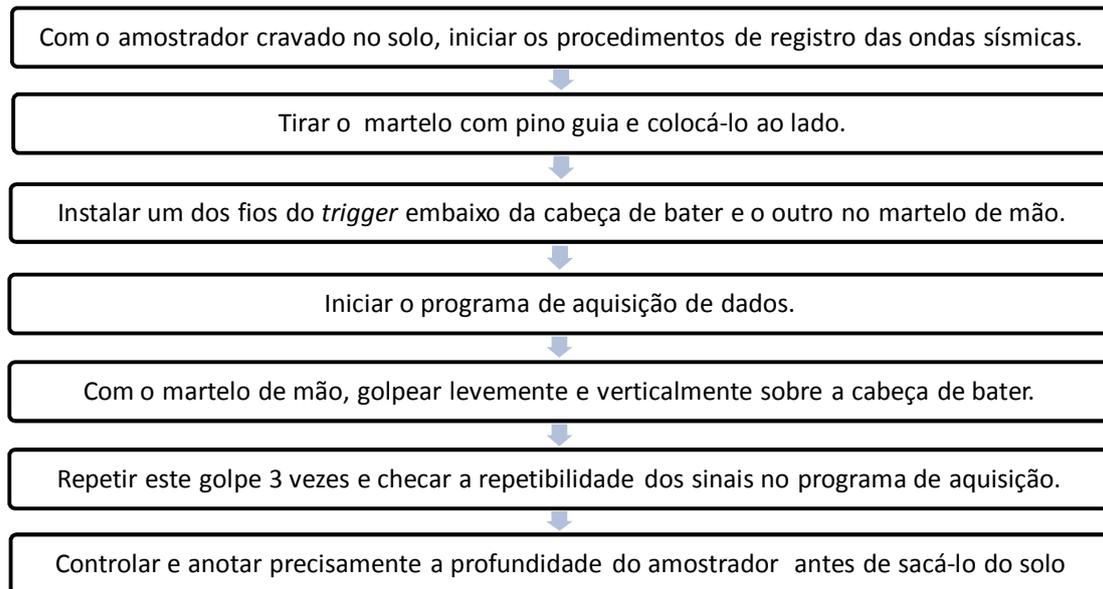


Figura 49 - Fluxograma dos procedimentos de execução do ensaio *up-hole* com o SPT.

5 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

5.1 Programa de aquisição

5.1.1 Introdução

O programa de aquisição de dados para utilização neste trabalho foi desenvolvido empregando a plataforma LabView 8.5. Com ele foi possível adquirir os dados captados pelos geofones utilizando-se das entradas analógicas, e salvá-los conforme o interesse, inclusive com variadas bandas de filtros.

Este programa, que conta com interface amigável, procura ser auto-explicativo para proporcionar uma rápida utilização com versatilidade. A tela inicial do programa é ilustrada pela Figura 50.

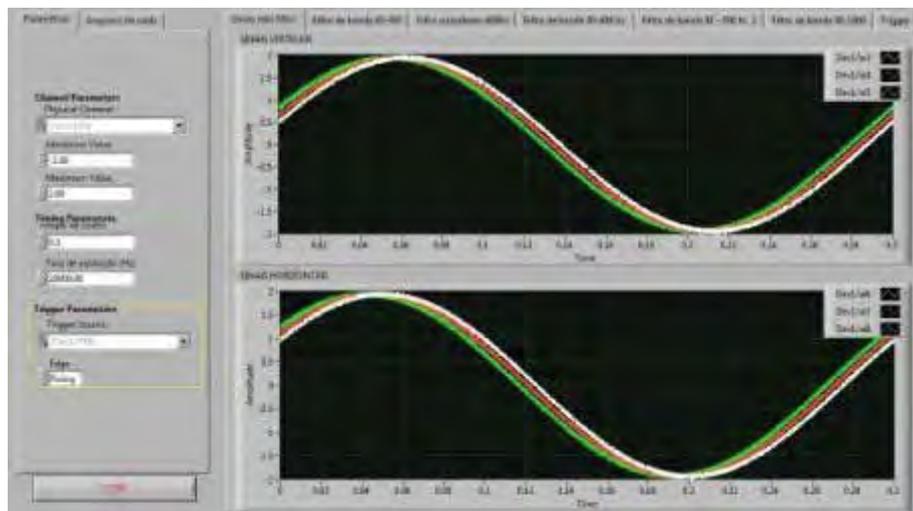


Figura 50 - Tela inicial do programa de aquisição de dados.

Como o sistema empregado (NI-USB-6353) possui 32 entradas analógicas, com a aquisição no modo diferencial pode-se utilizar até 16 geofones, já que neste tipo de aquisição são empregados dois canais para cada geofone. O intuito de utilizar dois canais por geofone é de que um dos canais anula parte do ruído presente. Em vários

testes realizados foi observado que, de fato, a aquisição ideal é através do modo diferencial, pois assim tem uma melhora significativa na qualidade do registro.

5.1.2 Parâmetros para a aquisição

Os parâmetros básicos para a aquisição, tais como os de configuração de filtro de frequências e nome dos arquivos de saída dentre outros, estão indicados no programa e são descritos a partir da Figura 51, na qual são apresentadas as abas para ajuste destes parâmetros.

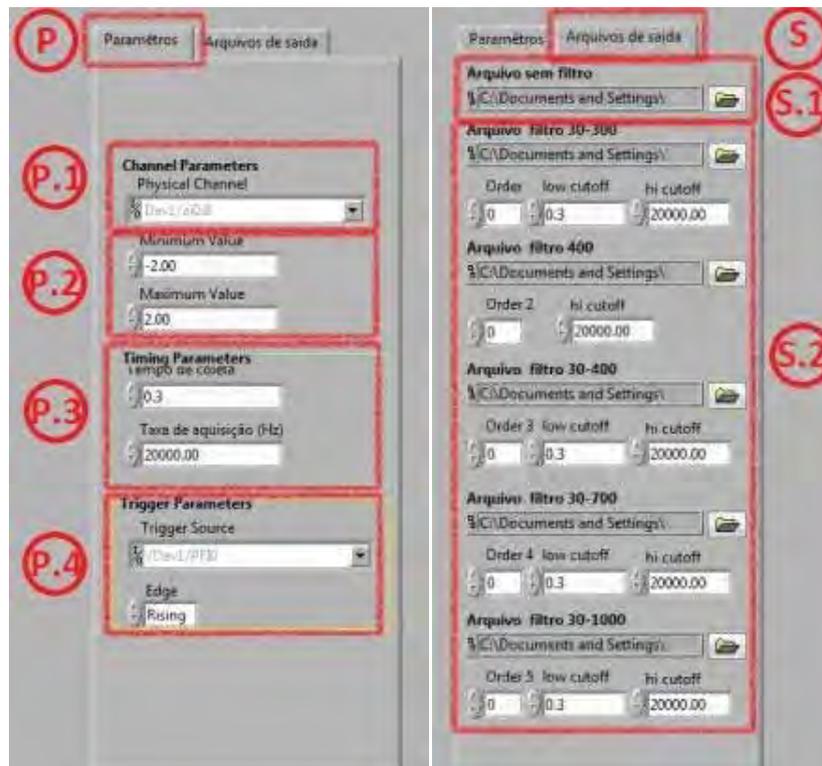


Figura 51 - Edição de parâmetros e arquivos de saída.

Na aba parâmetros, indicado pelo item "P", tem-se: os canais que serão utilizados na aquisição de dados (item "P.1"); os mínimos e máximos valores em Volts que serão captados (item "P.2"); a quantidade de pontos a serem registrados pós-*trigger* (indiretamente fornecida pelo tempo de coleta e taxa/frequência de aquisição, respectivamente nas unidades de "segundos" e "Hz") (item "P.3"); e os parâmetros do *trigger* de contato, selecionando-se o canal digital utilizado e se o pico é de subida ou descida (item "P.4").

Já na aba de arquivos de saída (item "S"), tem-se: o caminho do diretório e nome do arquivo de saída para o sinal sem filtro (item "S.1") ou com filtro (item "S.2"). No

caso do item "S.2" (com utilização de filtro), deve ser incluída a configuração de cada filtro, sendo necessária a indicação da ordem do filtro e das frequências de corte inferior e superior.

5.1.3 Apresentação dos registros sísmicos

Na Figura 52 foram feitas três marcações ("A", "B" e "C"), que se referem à parte visual do programa, possibilitando a verificação dos sinais, ruído e amplitude de onda no tempo de aquisição. No item "A" da Figura 52, são dispostas várias abas que identificam os diferentes filtros, importantes para a verificação do sinal, principalmente na fase de testes. Estes filtros são configurados conforme descrito no item 5.1.2. Os itens "B" e "C" indicam *displays* que apresentam gráficos dos sinais verticais e horizontais obtidos, respectivamente. Conforme o usuário altere as abas (indicadas no item "A"), os itens "B" e "C" vão se ajustando conforme o filtro imposto. Nota-se que os sinais apresentados no display de "B" e "C", são identificados com uma legenda no canto superior direito, todos de cores diferentes, facilitando a identificação e solução de possíveis problemas elétricos que possam ocorrer com os sensores, cabos, conectores, etc. Para facilitar a visualização, os sinais do *display* superior são somente exibidos os sinais verticais, e no inferior, os horizontais.

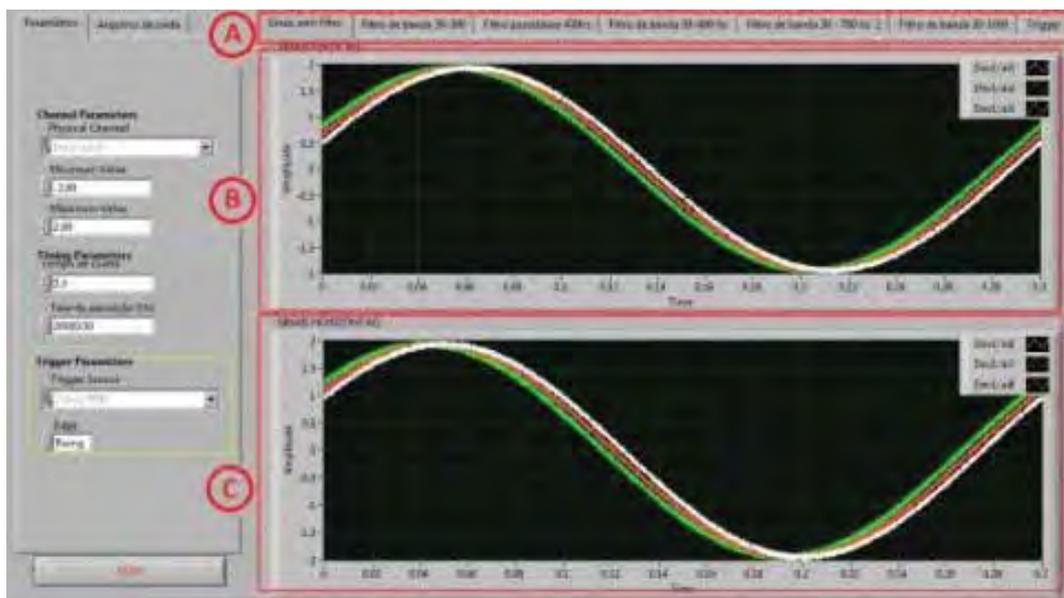


Figura 52 - Indicação de abas com diferentes filtros configurados e *displays* dos registros sísmicos pelos sensores verticais e horizontais.

5.1.4 Arquivo de saída de dados

Os arquivos são salvos em um arquivo de texto em colunas, sendo a primeira referente ao tempo de aquisição pós-trigger, e as demais contendo os respectivos valores lidos nos sensores que estão ligados ao sistema de aquisição. A estrutura do arquivo de dados é ilustrada na Figura 54. Ressalta-se que se utilizadas 6 caixas, são gerados dois arquivos deste (1 para as 3 primeiras caixas e outro para as 3 restantes) para cada golpe registrado para que possam ser compatíveis com o programa de análise.

The image shows a screenshot of a text-based data file. The first row contains headers: 'tempo', 'signal1', 'signal2', 'signal3', 'signal4', 'signal5', 'signal6', 'signal7', 'signal8', and 'signal9'. The subsequent rows contain numerical data values for each column, representing time and sensor readings. The data is organized in a grid format with approximately 30 rows and 10 columns.

Figura 53 - Estrutura do arquivo de dados.

É interessante ressaltar que o *trigger* pode ser acionado diversas vezes após a execução, sem necessidade de alteração de nome do arquivo, pois há um registro automático do nome do arquivo, que vai acrescentando um número no final de cada arquivo de saída. Portanto, em um ensaio SPT, podem-se registrar os sinais sísmicos dos diversos golpes seguidos do ensaio, sem necessidade de pausa para modificar o nome do arquivo.

5.2 Programa de processamento e análise de sinais

5.2.1 Considerações iniciais

Este programa é uma ferramenta necessária, desenvolvida devido à complexibilidade que envolve a análise dos registros sísmicos do ensaio S-SPT. A plataforma escolhida para o desenvolvimento do programa foi o Matlab, pois possui algumas facilidades para trabalhar com grande quantidade de vetores de forma rápida e eficiente. Procurou-se englobar uma série de funcionalidades de processamento de sinal que se julgaram necessárias.

O objetivo principal do programa é fornecer, de modo simples e funcional, uma ferramenta para a identificação e determinação do tempo de chegada das ondas S e P ou, ainda, determinar a defasagem de tempo entre ondas subsequentes. A identificação e determinação destes tempos de chegada e defasagem entre eles em ondas subsequentes são peças fundamentais para a correta determinação da velocidade.

O programa de análise e processamento de sinais foi elaborado para trabalhar com os dados conforme a estrutura de formatação dos arquivos gerados pelo programa de aquisição, como mostra a Figura 53. Deste modo, para cada golpe carregado, tem-se na verdade até nove sinais de geofones. Este número de sinais foi escolhido pelo fato de se utilizar três caixas com configuração triaxial (com até três geofones). Foi imposta uma quantidade máxima de golpes a serem carregados pelo programa e analisados, em número de 30, admitindo ensaios para caracterização de 30 metros, por exemplo.

Ressalta-se que, neste item, somente serão mostradas as funcionalidades do programa, sem sugestões de análise de filtro, interpretação, e como a identificação das ondas deve ser feita. Isso somente será abordado posteriormente, no capítulo 7, na parte destinada a resultados e discussão.

A estrutura básica do programa é indicada pela sequência apresentada pelas letras da Figura 54, que mostra a tela de análise, onde:

- A = Carregamento dos sinais;
- B = Visualização dos sinais gravados;
- C = Filtragem de sinal;
- D = Adicionar ondas no banco de dados;
- E = Análise da correlação cruzada;

- F = Configuração para apresentação de perfis;
- G = Ferramenta para visualizar perfil de ondas;
- H = Ferramenta para visualizar perfil das raízes médias dos sinais;
- I = Preenchimento dos tempos de chegada;
- J = Exportação dos dados e janela para cálculo de velocidades

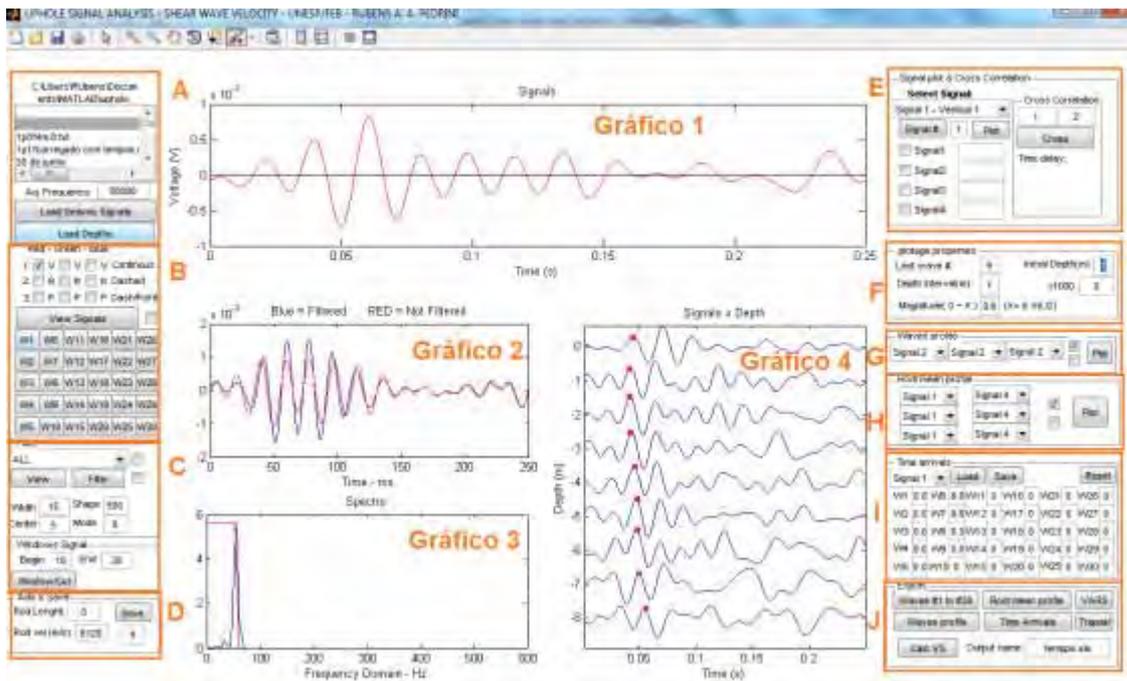


Figura 54 - Programa de análise dos registros.

5.2.2 Carregamento e visualização dos arquivos de dados

No item "A", é indicada uma lista contendo o caminho até o arquivo de dados a ser carregado pelo programa, e, mais abaixo, a frequência de aquisição em que este dado foi adquirido. Para carregar as ondas registradas pelo golpe, basta apenas clicar no botão "Load Seismic Signals". Feito isto, já são exibidas as ondas do golpe no "Gráfico 1". Também neste item "A" há um botão "Load depths", que deve ser utilizado para carregar as profundidades de todas as ondas.

O item "B" é utilizado para visualização dos sinais carregados e salvos. Na parte superior deste item constam 9 *checkbox*, sendo a primeira linha destinada aos 3 sinais verticais, a segunda para os 3 horizontais 1 (sentido radial) e a terceira para os 3 horizontais 2 (perpendicular ao radial), cabendo ao usuário selecionar quais serão

apresentados no "Gráfico 1". O botão "View Signal" é aquele que efetivamente plota os sinais no "Gráfico 1" e ao lado dele, há outro *checkbox*, caso se queira plotar este gráfico em uma nova janela, para impressão do sinal. A Figura 55, exemplifica, em (a), 3 sinais de um golpe carregados na própria tela de análise e, em (b), os mesmos sinais em uma tela separada, já com escala modificada, utilizada para impressão. Observa-se que mesmo sem plotar em uma janela separada, é possível a alteração da escala, *zoom*, etc., através da barra de ferramentas que é mostrada na parte superior da tela representada na Figura 54. Os botões de "W1" até "W30" representam o banco de ondas salvas. Assim para visualizar novamente estes golpes basta clicar nestes botões.

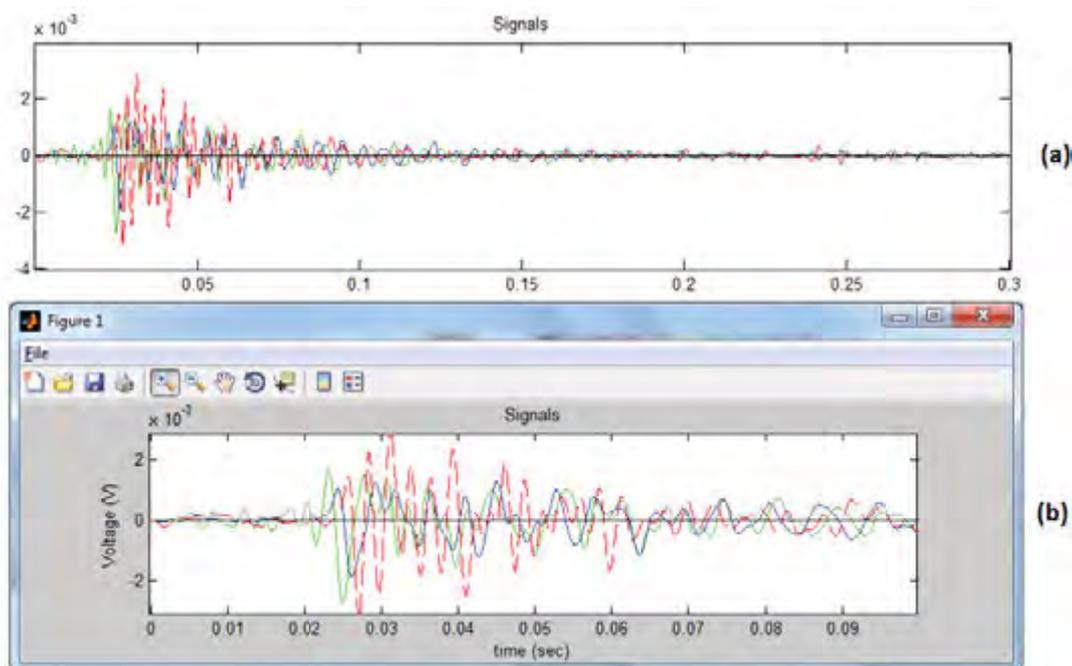


Figura 55 - Visualização de sinais.

5.2.3 Processamento de sinais

No Item C da Figura 54, melhor visualizado na Figura 56, é facultado ao usuário empregar ainda um tratamento diferencial das ondas, podendo submetê-las a um filtro de banda desejado ou trabalhar somente com um período da onda ou um trecho do sinal, eliminando parte da onda que não interesse. Esse filtro de banda criado por O'Haver (2008), disponível em seu *site*, foi modificado e ajustado para inserção dos parâmetros, tais como largura da banda do filtro, centro da banda, etc.

Para tanto, o usuário deve escolher com qual sinal quer trabalhar, ou até mesmo selecionar todos os 9 sinais e aplicar um mesmo filtro para todos. Os parâmetros de

aplicação do filtro (comprimento do filtro em Hz, localização do centro de banda, entre outros) também devem ser colocados e, no caso de selecionar parte do sinal (janela do sinal, conforme sugere Stewart (1992), mostrada na Figura 16), deve ainda ajustar o início e fim do sinal, nos respectivos campos em milissegundos.

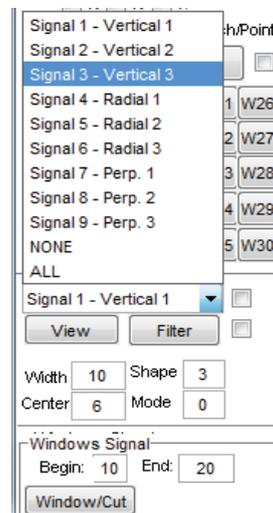


Figura 56 - Aplicação de filtro.

Quando o usuário utiliza esses recursos, no "Gráfico 2" da Figura 54, é apresentado o sinal original e o sinal depois dos ajustes feitos. No "Gráfico 3" da Figura 54, é apresentado o espectro do sinal e o alcance do filtro de banda utilizado no tratamento do sinal. A Figura 57 mostra o "Gráfico 2" e o "Gráfico 3" de um sinal quando aplicado um filtro de banda. Na Figura 58 tem-se representada uma seleção de sinal, que é exibida pelo "Gráfico 2". É interessante ressaltar que para todos esses gráficos há a possibilidade da plotagem isolada para impressão.

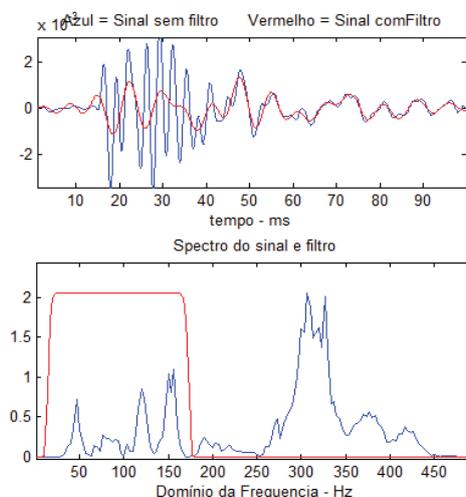


Figura 57 - Aplicação de filtro de banda - 10 Hz a 180 Hz.

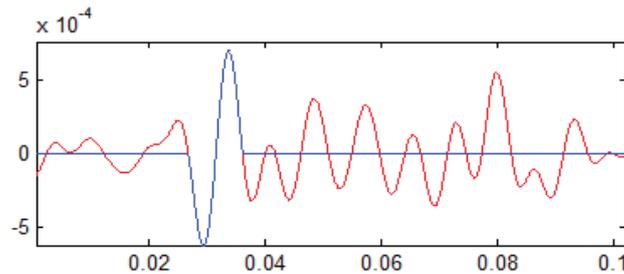


Figura 58 - Seleção de 1 período do sinal.

Observa-se que este recurso de filtro é apenas uma função a mais que o programa possui, sendo que na própria aquisição, o usuário já pode gravar os sinais com filtros aplicados, como foi explicado no item 5.1. Já a ferramenta de seleção é interessante para aplicação do método da correlação cruzada, para determinação da defasagem de tempos entre as ondas, como será mostrado mais adiante.

5.2.4 Adicionando registros no banco de dados

Seguindo com a descrição do programa, no item "D" (Figura 54), o usuário deve salvar o sinal que carregou e/ou tratou no banco de dados do programa (W1 até W30, que são as matrizes de 9 colunas, uma para cada geofone). Para melhor entendimento, o item "D" é ampliado na Figura 59. Foi implementado um algoritmo para corrigir o adiantamento do início da gravação do sinal causado pelo *trigger* (que está logo abaixo da cabeça de bater). Como foi visto, a efetiva geração do sinal se dá posteriormente pelo amostrador do SPT, após a propagação da onda pelas hastes até chegar à profundidade que está sendo realizado o ensaio. A correção se dá pelo atraso da onda em função da quantidade de metros de hastes e da velocidade que a onda se propaga na haste. Portanto, conforme é ilustrado na Figura 59, o usuário deve colocar no campo "Rod Length" o comprimento total de hastes (em metros), e no campo "Rod Vel." a velocidade de propagação (em metros/segundo). No campo abaixo do botão "Save", deve-se colocar em qual onda deseja-se salvar o golpe, lembrando que esse número varia de 1 a 30 (de W1 até W30).

A interface de usuário para adicionar e salvar um sinal, contendo os seguintes campos e botões:

- Título: Add & Save
- Campo "Rod Length:" com o valor 2 e um botão "Save" ao lado.
- Campo "Rod vel.(m/s):" com o valor 5120 e um campo de entrada com o valor 1.

Figura 59 - Adicionando um sinal.

5.2.5 Visualização e aplicação do método da correlação cruzada

Para o item "E" tem-se a opção de carregar até quatro sinais de diferentes golpes e ondas subjacentes, recurso que permite visualizar sinais sobrepostos para melhor análise e, ainda, aplicar o método da correlação cruzada.

A Figura 60 (que representa o item "E" em detalhe) mostra que o usuário primeiramente deve selecionar o sinal (de 1 a 9) da última onda que foi carregada (W1 até W30), aquela que se deseja trabalhar e depois pode incluir este sinal nos campos abaixo, de 1 a 4. Neste exemplo, o usuário selecionou o sinal 4 das ondas 12 e 13 (W12 e W13), adicionando os mesmos em *Signal 1* e *Signal 2*.

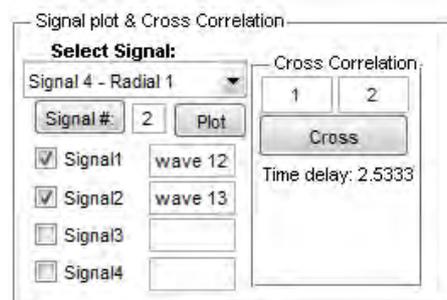


Figura 60 - Aplicação do método da correlação cruzada.

Do lado direito da Figura 60 também foram selecionados 1 e 2, que contêm os sinais carregados previamente e aplicou-se o método da correlação cruzada. Feito isso, automaticamente é apresentado o "*time delay*", em milissegundos, que representa o atraso da onda 2 em relação à onda 1. Além disso, também é aberta uma nova janela, com os sinais plotados separadamente e com os sinais sobrepostos (Figura 61). É importante frisar que nesse tipo de análise é recomendado que se trabalhe com sinais em janela conforme sugerem Stewart (1992) e Vitali (2011).

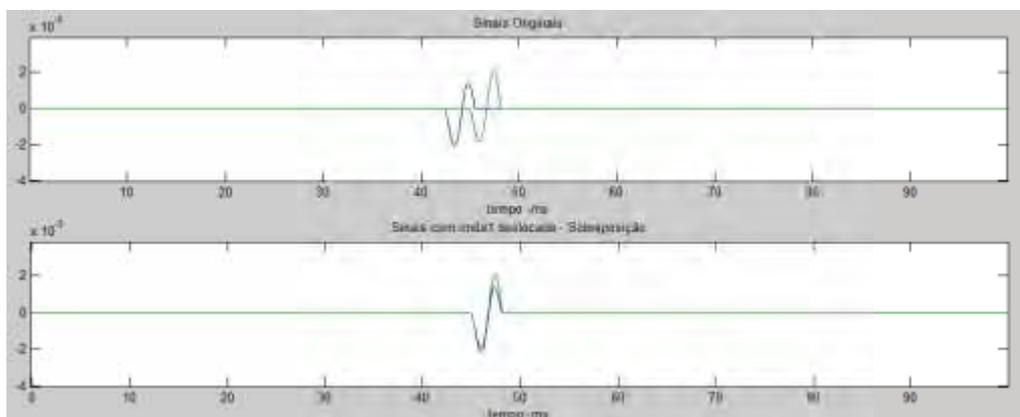


Figura 61 - Sinais separados e sobrepostos após aplicação do método da correlação cruzada.

5.2.6 Configuração para visualização dos perfis das ondas

São apresentados, abaixo, os recursos do programa destinado à visualização de um perfil de múltiplas ondas carregadas (W1 até W30). Para isso, necessariamente deve-se fazer o ajuste de vários parâmetros, por meio do item "F" representado na Figura 54, e ampliado pela Figura 62.

plotage properties			
Last wave #:	15	Inicial Depth(m):	2
Depth Interval(m):	1	x1000	0
Magnitude(0 ~ X)	0.6	(X= cl. int./2)	

Figura 62 - Propriedades para plotagem de perfil de ondas.

A descrição de cada campo é feita a seguir:

- "Lastwave" representa a última onda carregada (de W1 até W30);
- "Inicial Depth" representa em qual profundidade o ensaio foi iniciado, ou seja, qual a profundidade de onda é representada em W1;
- "Depth Interval" é a distância a qual os registros foram espaçados. Aproximadamente de 1 em 1 no caso de realização de SPT convencional.
- "Magnitude" é um recurso criado para normalizar a amplitude do sinal para a escala gráfica desejada. Assim todas as ondas ficam com a mesma amplitude possibilitando uma melhor visualização delas.

5.2.7 Ferramentas para identificação do tempo de chegada

Após o preenchimento de todos os parâmetros são descritas outras funcionalidades do programa, como a visualização do perfil das ondas, que tem como principal objetivo facilitar a identificação das ondas S em todos os sinais através da visualização do conjunto todo dos registros em todas as profundidades.

A determinação do tempo de chegada depende da interpretação do usuário. O programa procurou ser aberto de tal forma que o usuário possa fazê-la de maneiras distintas, a sua escolha. A determinação, geralmente é feita a partir da observação de um perfil de ondas, de um ponto de referência dos registros (de máximo ou mínimo), ou também conforme foi sugerido por Bang & Kim (2007), pela observação de um perfil feito a partir da raiz média dos quadrados dos sinais horizontais e verticais.

5.2.8 Perfil de ondas simples

No item "G" da Figura 54, são dispostos 3 *combobox*, cada um com a lista dos 9 sinais, sendo necessária a escolha de um destes. Como são 3 *combobox*, então pode-se escolher até 3 sinais diferentes para serem plotados em conjunto em um mesmo perfil. A Figura 63 ilustra a configuração para a representação do perfil de ondas apenas do sinal 2. Nota-se que o *checkbox* superior está marcado, isto faz com que o sinal sofra o ajuste de escala, configurado no item "F". O *checkbox* inferior é uma bandeira que indica se os dados devem ser representados no "Gráfico 4" (indicado na Figura 54) ou em uma janela separada, sendo que, para essa última opção, o *checkbox* deve estar marcado.



Figura 63 - Perfil de ondas.

Os resultados de um perfil com 3 sinais verticais simultaneamente visualizados e um perfil de apenas um desses sinais verticais visualizado são apresentados em (a) e (b) da Figura 64, respectivamente.

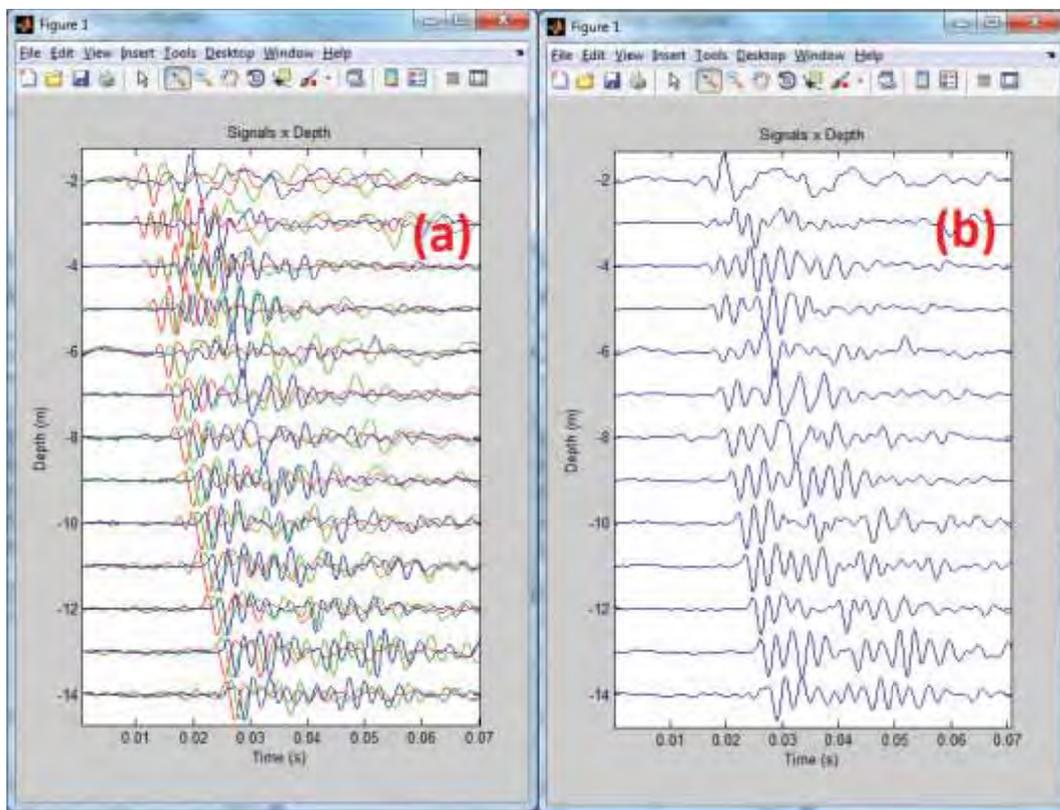


Figura 64 - Apresentação de perfil de ondas pela profundidade.

5.2.9 Perfil de ondas pela raiz média dos quadrados dos sinais

Conforme sugerido por Bang & Kim (2007), foi inserido também uma função para apresentação em perfil da raiz média dos quadrados dos sinais verticais e horizontais (*root mean profile*). Esse recurso é representado pela Figura 54, em seu item "H" e ampliado na Figura 65.

Da mesma forma do item "G", pode-se plotar até 3 sinais simultaneamente. Porém observa-se que há 6 *combobox* para a escolha de sinais na Figura 65, isto porque dessa vez cada sinal é formado pelos sinais correspondentes à componente vertical e pela componente horizontal. Os *checkbox*, ao lado do botão "Plot", têm a mesma função de visualização dos *checkbox* descritos no item "G". São apresentados, a seguir, na Figura 66, dois perfis confeccionados utilizando essa ferramenta, um com 3 sinais compostos, em (a), e outro apenas com 1 sinal composto, em (b).

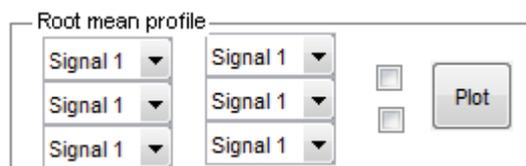


Figura 65 - Análise da soma das raízes dos quadrados dos sinais verticais e horizontais.

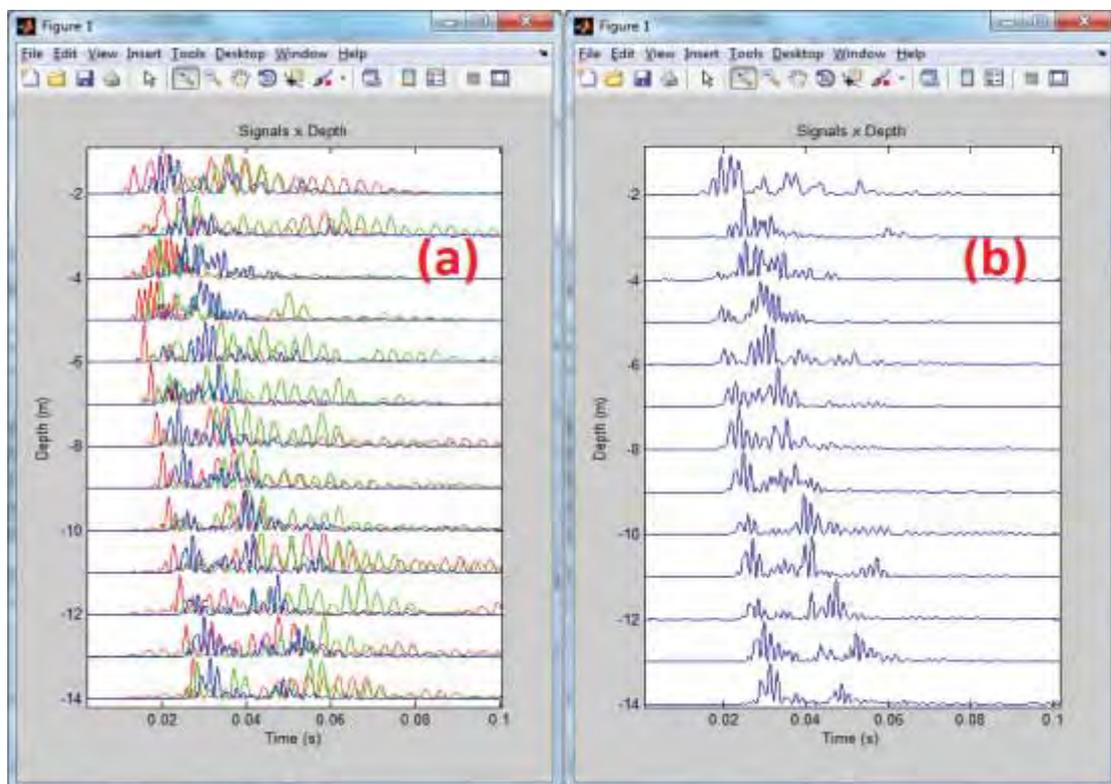
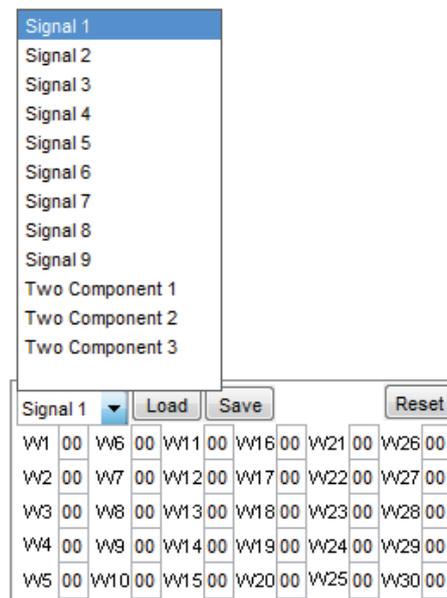


Figura 66 - Apresentação do perfil de ondas utilizando-se o recurso proposto.

5.2.10 Preenchimento dos tempos de chegada

Com o uso das ferramentas de identificação do tempo de chegada das ondas apresentadas e com o auxílio do zoom, é fornecida ao usuário, pelo item "I", uma tabela de dados, conforme a Figura 67. Nessa tabela, pode-se cadastrar todos os tempos de chegada ou os tempos calculados pelo método da correlação cruzada, de todos os sinais (de 1 a 9) ou, ainda, a partir do perfil formado pelas duas componentes. Cadastrando-se todos esses dados, como será explicado no próximo item "J" da Figura 54, pode-se exportá-los para um arquivo do aplicativo Microsoft Excel.



The image shows a software interface. At the top, there is a dropdown menu with the following options: Signal 1 (highlighted), Signal 2, Signal 3, Signal 4, Signal 5, Signal 6, Signal 7, Signal 8, Signal 9, Two Component 1, Two Component 2, and Two Component 3. Below the menu is a table with columns labeled 'Signal 1', 'Load', 'Save', and 'Reset'. The table contains five rows of data, each representing a signal (W1 to W5) and its arrival times (W6 to W30) in a grid format.

Signal 1	Load	Save	Reset
W1 00	W6 00	W11 00	W16 00
W2 00	W7 00	W12 00	W17 00
W3 00	W8 00	W13 00	W18 00
W4 00	W9 00	W14 00	W19 00
W5 00	W10 00	W15 00	W20 00

Figura 67 - Tabela de tempos de chegada.

5.2.11 Exportação dos dados

No item "J" da Figura 54, ampliado na Figura 68, há a possibilidade da exportação de todos os sinais, dados e resultados fornecidos pelo programa em formato do aplicativo Microsoft Excel.

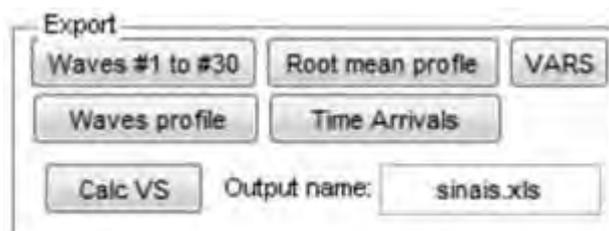


Figura 68 - Quadro para exportação dos dados.

O botão "Waves #1 to #30", exporta os 9 sinais de cada golpe, em diferentes abas criadas em um arquivo do tipo ".xls". Os botões "Root mean profile", "Waves profile" e "Time arrivals" também funcionam de maneira semelhante.

Atenta-se que o Botão "VARs", é uma exceção a estes botões, já que ele exporta todas as variáveis utilizadas no programa, em um arquivo do próprio MatLab, de extensão ".m", o qual possibilita que mesmo fechando o programa, essas variáveis possam ser recarregadas novamente, para dar continuidade à análise dos sinais.

O botão "Calc VS" iniciará o módulo de cálculo de velocidades, que contem os métodos do intervalo e DTS (*delay time between serial sources*), além de possibilitar a visualização das velocidades calculadas.

5.3 Módulo de cálculo de velocidades

O módulo de cálculo das velocidades (Figura 69) é de fácil e rápida utilização e há a possibilidade de comparação entre os diferentes métodos de cálculo.

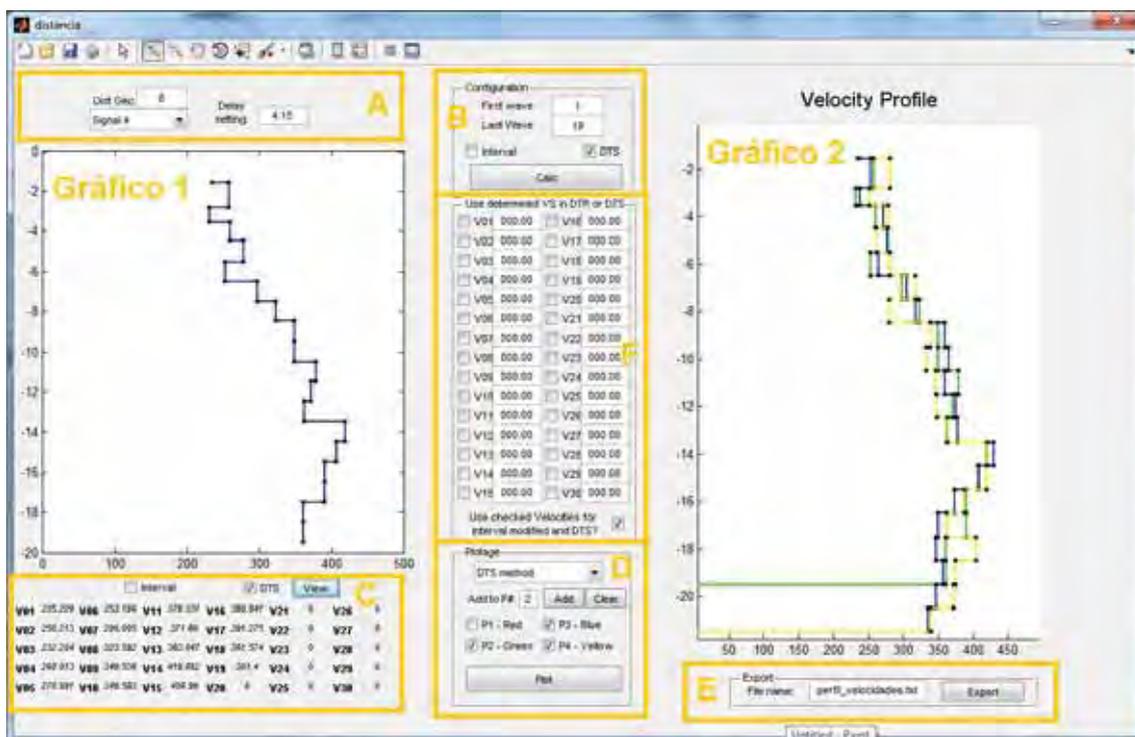


Figura 69 - Módulo de análise

Preenchidos os tempos e as profundidades, nas quais cada onda foi gerada, o processo de cálculo de todas as velocidades do perfil torna-se automático.

Para o cálculo de velocidades foram implementados dois métodos:

- Método do intervalo: método descrito em Kim *et al.* (2004) que é o mais simples. Similar ao método DTS, porém considera retilíneo o caminho percorrido pelas ondas.
- Método DTS (*delay time between serial sources*): método descrito em Bang & Kim (2007) que considera o caminho refratado da lei de Snell e que fornece os melhores resultados, conforme os mesmos autores.

Para os dois últimos métodos, foi criado um algoritmo com o método número Newton Rhapsom para resolução do sistema que define a trajetória da onda segundo a Lei de Snell. A tolerância para tal método, quando calculada a geometria, foi de 0,1cm no caso da Equação (12), e, no caso da velocidade, a tolerância foi de 0.01m/s ou o máximo de 10 iterações até que o processo iterativo terminasse, o que é muito difícil de ocorrer, já que na maioria dos casos, apenas com 3 iterações, já há a convergência para o resultado.

De forma resumida, o módulo de cálculo funciona da seguinte maneira: no item "A" da Figura 69 o usuário tem um campo ("Dist Geo") para preencher a distância horizontal do geofone até o furo de sondagem e um *combobox* para escolher os tempos dos sinais que foram cadastrados.

Assim, cabe ao usuário, no item identificado pela letra "B", configurar até qual onda ele utilizará no cálculo e quais os métodos que ele vai querer utilizar. Após isto, basta clicar no botão "Calc" que, logo em seguida, no "Gráfico 1", serão exibidos os resultados. Se o usuário quiser ver os valores numéricos, então ele deve, na indicação do item "C", selecionar o método através do qual foram calculadas as velocidades e clicar no botão "View".

Para a visualização de múltiplos perfis, pode-se adicionar até 4 deles no quadro indicado pela letra "D". Feita a seleção, e clicando-se no botão "Plot", no "Gráfico 2", será exibida a combinação para comparação entre as diferentes velocidades calculadas.

Em "F" foi implementado uma funcionalidade que permite, caso seja de difícil identificação o tempo de chegada das ondas mais rasas, ao usuário impor velocidades para aquelas camadas. Isso acontece geralmente para sensores instalados longe do furo de sondagem. Assim aconselha-se a determinação das velocidades mais rasas através de sensores mais próximos (melhor caracterização da onda S) e posterior utilização dessas velocidades nos mais afastados (melhor caracterização das ondas mais profundas).

6 ÁREA EXPERIMENTAL

A área onde foi realizada a parte experimental desta pesquisa, com o objetivo de desenvolver os equipamentos e a metodologia de execução e interpretação dos resultados, localiza-se dentro do campus da Unesp de Bauru. A escolha por essa área se deve à facilidade de acesso e maior homogeneidade do solo que ocorre no local, o que a torna favorável para a finalidade deste trabalho.

Segundo o IPT (1989) *apud* De Mio (2005) esta área está localizada sobre os arenitos do Grupo Bauru, com predominância da Formação Marília nos interflúvios e da Formação Adamantina nos vales e porções mais baixas do terreno.

São apresentados ensaios de campo e laboratório para a caracterização desta área, conforme identificados na Figura 70. Nessa mesma figura também estão inclusas as locações do ensaio S-SPT e SCPT executados e discutidos neste trabalho.

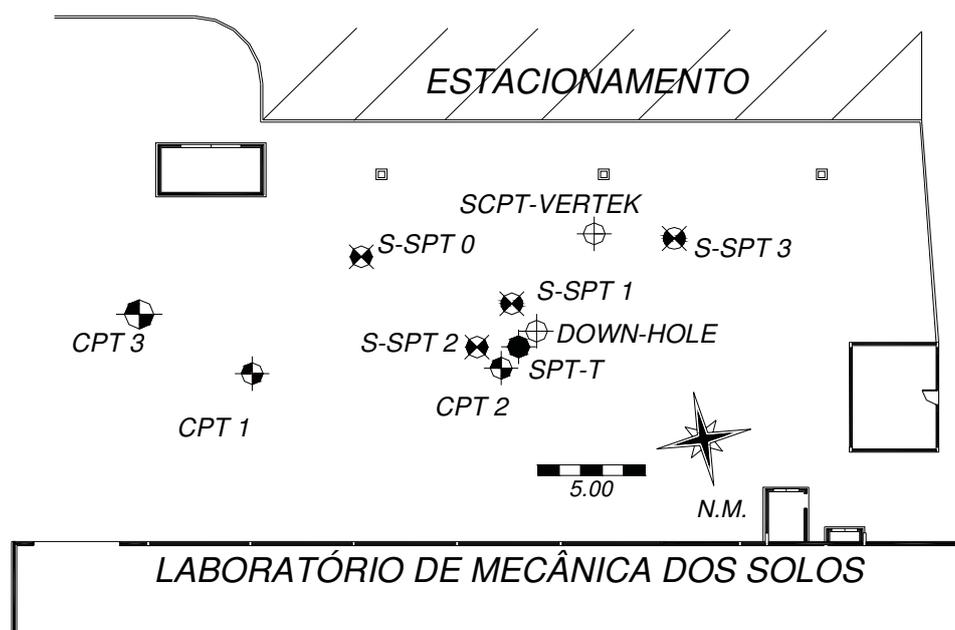


Figura 70 - Posição dos ensaios realizados

6.1 Caracterização da área experimental

Na Figura 71 são apresentados os resultados de laboratório de caracterização da área experimental por Avesani (2009), referentes ao ensaio SPT-T indicado na Figura 70. Foram feitos ensaios de granulometria (com e sem defloculante), azul de metileno, e de umidade. Observa-se que a fração predominante da granulometria é de areia média e fina (que somam aproximadamente 70% do total), com pouco silte e argila em todo o perfil de subsolo da área. Do ensaio de azul de metileno, percebe-se que, quanto à fração fina, a atividade dos argilos minerais presentes pelo índice CA (de acordo com Fabbri, 1994), variam de baixa atividade ($CA < 11$) a ativos ($11 < CA < 80$). O valor de azul (Vb) do solo, segundo Pejon (1992), indica como limite de solo comportamento laterítico o valor de 1,5 para Vb. Portanto, até 25 metros, o solo apresenta um comportamento laterítico.

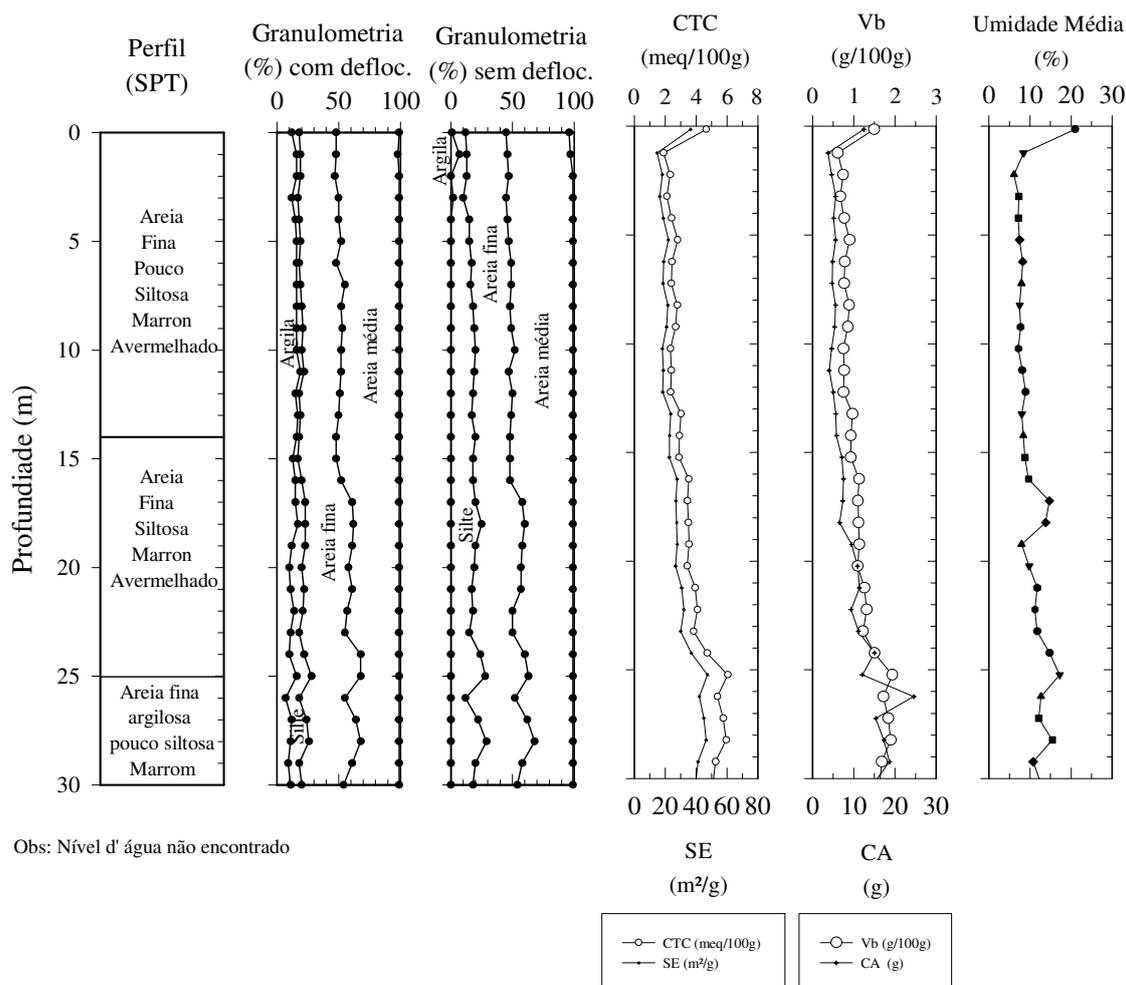


Figura 71 - Ensaio de laboratório de caracterização (adaptado de Avesani, 2009).

Os ensaios de campo de caracterização são apresentados na Figura 72. Estes constam de um ensaio SPT-T (Avesani, 2009), o ensaio S-SPT3 cujos valores de N_{SPT} são apresentados, três ensaios CPT, e os valores de V_S de referência da área de estudo, sendo um dos perfis determinado com a ponteira desenvolvida por Vitali (2011) e, o outro, com o cone sísmico da marca Vertek.

Do ensaio SPT, nota-se que os valores do N_{SPT} para os dez primeiros metros seguem uma tendência quase linear, correspondente à sua profundidade (a cada metro o N_{SPT} aumenta 1) e a partir disso é constante até aproximadamente 16 m e depois volta a subir gradativamente.

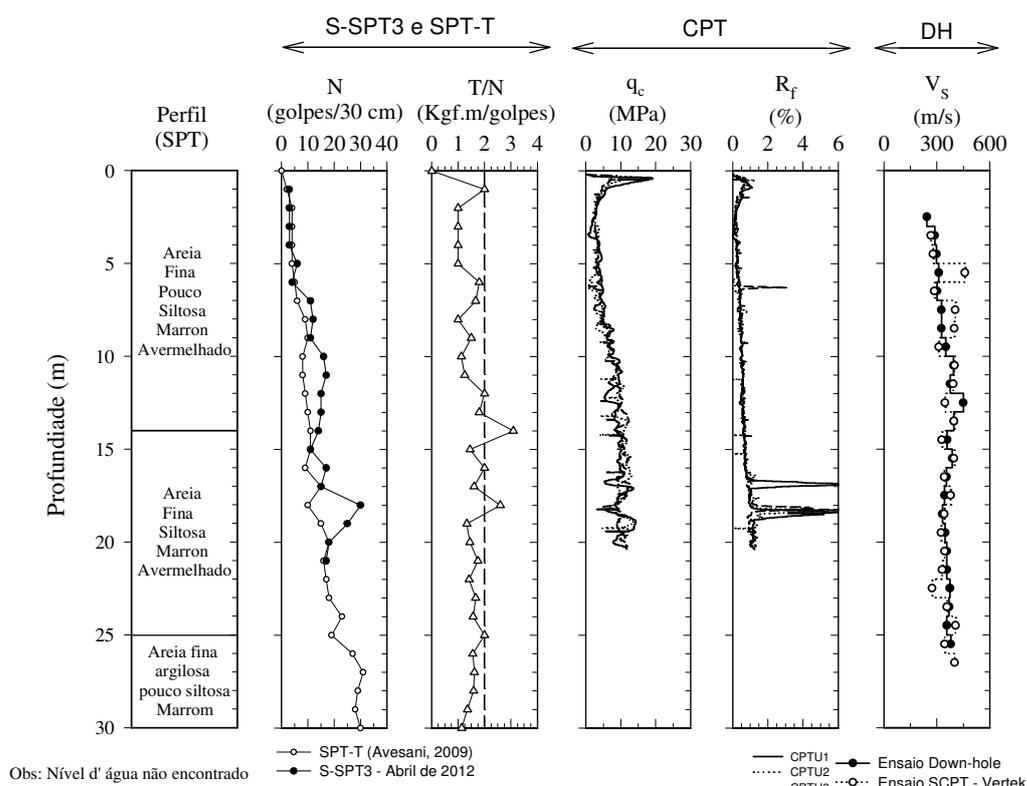


Figura 72 - Ensaios de campo de caracterização.

Dos resultados dos ensaios CPT, nota-se que a área experimental é bastante homogênea em sua extensão, tendo os 3 ensaios fornecido resultados muito próximos. A interpretação através do ábaco de Robertson *et al* (1986) indica que o solo da área experimental tem comportamento de areia a areia siltosa (número 8) e areia (número 9). Também é possível observar que q_c varia quase que proporcionalmente ao N_{SPT} conforme a profundidade do ensaio, assim como R_f devido principalmente ao acréscimo de q_c . Nas profundidades de 17 e 18 metros, também há alguns picos de R_f , o que sugere uma pequena camada de material mais fino naquelas profundidades.

Os ensaios de cone sísmico têm como finalidade nesta pesquisa, definir um perfil de velocidades de ondas cisalhantes (V_S) de referência para serem comparados com os resultados obtidos nos ensaios S-SPT em desenvolvimento. O sistema empregado nos ensaios de cone sísmico (*down-hole*) foi desenvolvido e validado por Vitali (2011), portanto pode ser empregado para determinar o perfil de referência. Aliado a esse sistema desenvolvido, também foi realizado um ensaio com um cone sísmico da marca Vertek, que gerou mais um perfil de referência para posterior comparação com os resultados provenientes dos ensaios S-SPT. Desses resultados apresentados na Figura 72, houve maior variação na utilização do SCPT, mas mesmo assim, os resultados se encontram com a mesma tendência de perfil para as velocidades de ondas S.

6.2 Ensaios realizados

6.2.1 S-SPT

Foram realizadas três campanhas com quatro ensaios. Na primeira, foi apenas realizado um teste em uma profundidade (S-SPT 0). Em uma segunda campanha foram realizados dois ensaios: S-SPT 1 e S-SPT 2. Na terceira e última foi realizado o ensaio S-SPT 3, o qual chegou até a profundidade de 21 m. Todos os ensaios foram executados nas localizações definidas na Figura 70.

No ensaio S-SPT 0 não houve a possibilidade de determinação de um perfil de V_S , pois foram registrados sinais sísmicos para apenas uma profundidade (4 m). Esse ensaio foi utilizado para uma análise qualitativa dos sinais produzidos. Além disto, esse teste possibilitou que fossem feitas algumas análises dos sinais obtidos e bem como estabelecer uma metodologia inicial para a execução dos ensaios S-SPT. Esse primeiro teste foi importante no sentido de registrarem-se sinais do amostrador do SPT, além de permitir o aperfeiçoamento do *hardware* e *software* desenvolvidos, metodologia de execução e a realização de várias análises, apresentadas no Capítulo 7.

Mais três ensaios (S-SPT 1, 2 e 3) foram realizados e assim determinaram-se os perfis de velocidades de ondas S a partir da técnica desenvolvida neste trabalho. As configurações de posicionamento para a execução do ensaio foram:

S-SPT 1: Profundidade do amostrador SPT nas profundidades de (metros):

- 2,62 / 4,39 / 6,38 / 8,38 / 9,39 / 10,28 / 11,67 / 12,55 / 13,82 / 15,18

- Posição 1: Primeira caixa a 1,3 m do furo de sondagem;
- Posição 2: Segunda caixa a 2,8 m do furo de sondagem;
- Posição 3: Terceira caixa a 4,9 m do furo de sondagem.

S-SPT 2: Profundidade do amostrador SPT nas profundidades de (metros):

- 2,62 / 4,62 / 6,62 / 8,59 / 9,42 / 10,8 / 11,46 / 12,53 / 16,46

- Caixas - Arranjo 1:
 - Posição 1: Primeira caixa a 4,5 m do furo de sondagem;
 - Posição 2: Segunda caixa a 6,0 m do furo de sondagem;
 - Posição 3: Terceira caixa a 7,5 m do furo de sondagem.
- Caixas - Arranjo 2:
 - Posição 4: Primeira caixa a 9,0 m do furo de sondagem;
 - Posição 5: Segunda caixa a 10,5m do furo de sondagem;
 - Posição 6: Terceira caixa a 12,0m do furo de sondagem.

Obs.: No ensaio S-SPT 2 foram utilizadas duas configurações para cada profundidade que foi realizado o SPT, pelo motivo de ter-se apenas três caixas com geofones, e da necessidade de fazer o registro em várias posições para ter-se uma melhor análise e discussão dos resultados.

S-SPT 3: Profundidade do amostrador SPT nas profundidades de (metros):

- 1,56 / 2,82 / 3,55 / 4,48 / 5,51 / 6,50 / 7,52 / 8,47 / 9,49 / 10,49 / 11,49 / 12,50 / 13,50 / 14,49 / 15,50 / 16,50 / 17,51 / 18,50 / 19,49 / 20,49 / 21,45

- Caixas:
 - Posição 1: Primeira caixa a 2,0 m do furo de sondagem;
 - Posição 2: Segunda caixa a 4,0 m do furo de sondagem;
 - Posição 3: Terceira caixa a 6,0 m do furo de sondagem.
 - Posição 4: Primeira caixa a 8,0 m do furo de sondagem;
 - Posição 5: Segunda caixa a 10,0 m do furo de sondagem;
 - Posição 6: Terceira caixa a 12,0 m do furo de sondagem.

Obs.: No ensaio S-SPT 3, já haviam 6 caixas adquiridas e devidamente montadas para realização do ensaio sem a necessidade de remoção e instalação dos arranjos para registros em posições diferentes, diferentemente do ocorrido no ensaio S-SPT 2.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo de resultados e discussão é dividido em 5 subtópicos, sendo que os dois primeiros, itens 7.1 e 7.2, concentram as análises qualitativas dos registros sísmicos efetuados nos ensaios S-SPT 0, 1 e 2.

O item 7.3 apresenta os resultados dos ensaios S-SPT 1 e 2, comparando-os com os resultados de referência da área de estudo. Com esses resultados, finalmente foi possível refinar a metodologia de execução e análise. A metodologia foi sintetizada em dois fluxogramas que são apresentados no item 7.4.

Com a metodologia definida foi realizada uma nova campanha (S-SPT 3), apresentada no item 7.5, executada até a profundidade de 21m na qual foi possível, mais uma vez, definir um perfil de velocidades de onda S em conjunto com o ensaio SPT. Assim, pode-se validar sistema e metodologias para realização deste ensaio, alcançando os objetivos definidos no início desta pesquisa.

7.1 Análise qualitativa dos registros no Ensaio S-SPT 0

O ensaio S-SPT 0 foi realizado, para apenas uma profundidade, para uma análise qualitativa dos registros e configuração de posicionamento dos sensores, que é a apresentada na Figura 73.

Foram feitas análises de registros sísmicos produzidos pelo amostrador do ensaio SPT, através do golpe gerado pelo próprio martelo do SPT e também quando o golpe era gerado com um martelo de mão que atingia a cabeça de bater. Observou-se que a qualidade do sinal era melhor quando se empregava o martelo de mão.

Outra análise feita foi quanto à variação da qualidade do sinal à medida que o amostrador era cravado no solo. Foram registrados os sinais em 3 profundidades de penetração do amostrador (15, 38 e 45 cm) e comparados.

Ressalta-se que neste teste não haviam sido feitas análises de filtros de frequência, e que o filtro que estava sendo usado para a análise era um de passa-baixa de 1000 Hz. Assim, as indicações de Onda S e onda P foram feitas levando em consideração que houve uma mudança de padrão no registro da onda, com diferente intensidade e amplitude. Porém sem a análise de um perfil de ondas em função da profundidade é difícil afirmar que as mesmas indicações estejam corretas. A análise dos ensaios S-SPT 1 e SPT-2 discutem melhor a identificação de cada onda.

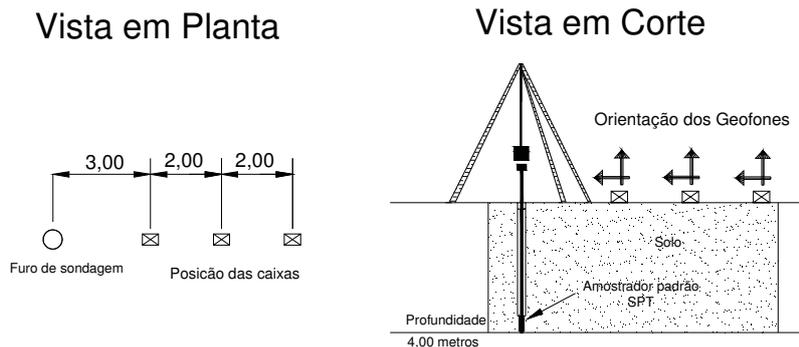


Figura 73 - Localização das caixas e orientação dos geofones (no ensaio S-SPT).

7.1.1 Sinal gerado com o próprio golpe do martelo SPT

São apresentados, na Figura 74, os registros de sinais verticais gerados no último golpe para completarem os 45 cm de penetração do amostrador no S-SPT0. Na Figura 75 são apresentados os registros através de golpe de martelo de mão de 2 kg.

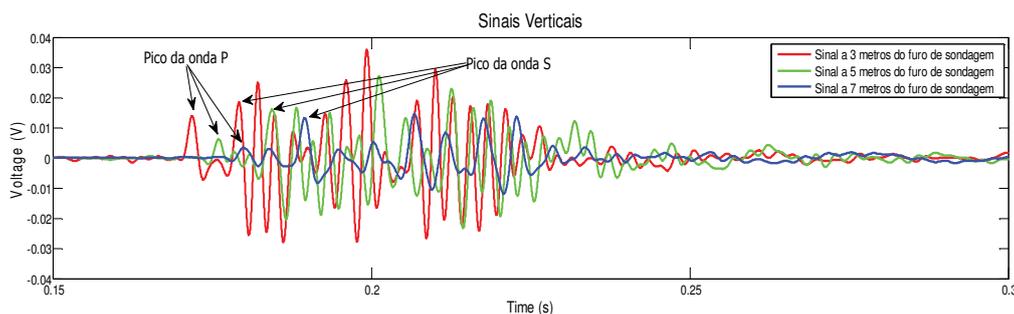


Figura 74 - Sinais gerados com golpe do próprio martelo do SPT.

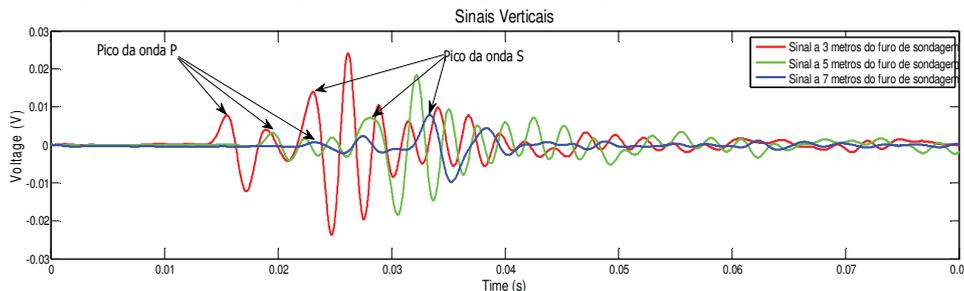


Figura 75 - Sinais gerados com golpe de martelo de mão de 2 kg.

Os aspectos a serem destacados na comparação destes registros são:

(A). No caso do próprio martelo do SPT:

- Os sinais apresentaram muitas oscilações e períodos, provavelmente devido à grande energia e movimentação que o amostrador impõe ao solo enquanto é cravado;
- Houve grande dificuldade para adaptação de um *trigger* eficiente quando se utilizou o próprio golpe do SPT. Nota-se que os tempos de chegada das ondas estão fora do que era esperado (observada a Figura 74, na qual o registro inicial se deu com aproximadamente 100 ms devido a esse *trigger* inadequado);
- Há imprecisão quanto à determinação da profundidade exata de geração do sinal, já que o amostrador movimenta-se com a cravação.

(B). No caso do martelo de mão de 2 kg:

- Os sinais gerados com o martelo de mão não apresentam tantas oscilações e períodos como aqueles gerados pelo martelo do SPT;
- Como a energia empregada no golpe com o martelo de mão é muito pequena, praticamente não há deslocamento da posição do amostrador no solo, e logo se determina a profundidade exata em que o amostrador está estacionado. A determinação dessa profundidade é importante para o cálculo da velocidade.
- O *trigger* de contato (Figura 39), acionado quando o circuito era fechado, mostrou-se preciso, com excelente repetibilidade.

A qualidade do sinal registrado através do golpe gerado com o martelo de mão (Figura 75) se mostrou superior àquela do martelo do SPT. Esses sinais são mais limpos e, portanto sua interpretação se torna mais simples. A partir de então se utilizou apenas do martelo de mão para realização dos registros nos ensaios S-SPT.

7.1.2 Variação dos registros com parte cravada do amostrador

Estes testes foram feitos para verificar qualitativamente se existe de fato variação do sinal registrado na medida em que o amostrador do SPT é cravado. Logo, os registros que serão mostrados adiante, foram obtidos com o martelo de mão e as "profundidades de cravação" do amostrador variaram e foram de 15, 38 e 45 cm do amostrador cravado no solo.

Na Figura 76 são apresentados para cada caixa (distantes de 3, 5 e 7 metros do furo de sondagem), os sinais dos geofones horizontais, separadamente. Os três sinais das diferentes "profundidades de cravação" do amostrador estão sobrepostos, conforme a legenda indica em cada figura.

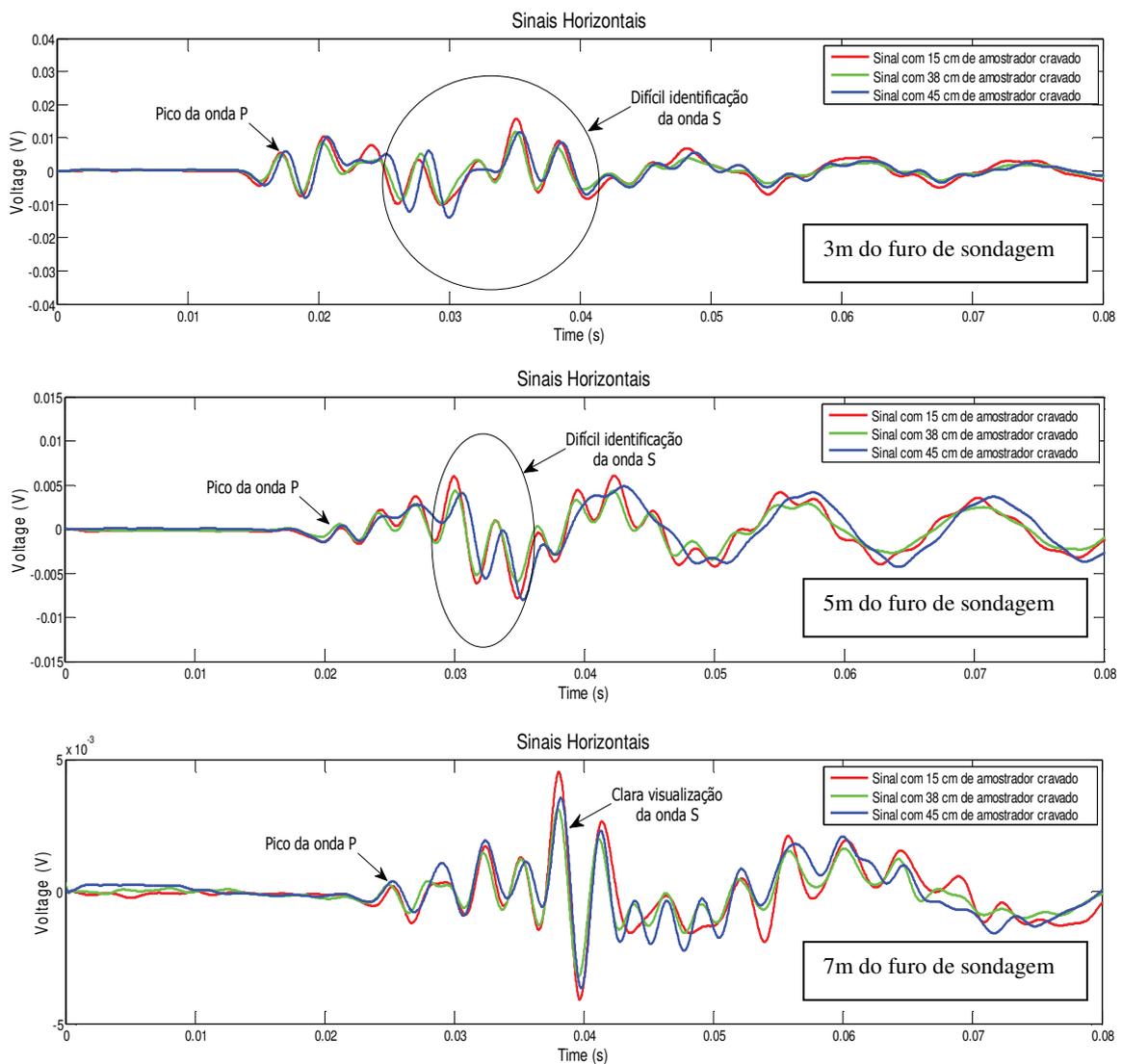


Figura 76 - Variação dos sinais com profundidade do amostrador SPT.

A análise desses resultados leva a destacar os seguintes aspectos:

- Em todas as distâncias analisadas (3, 5 e 7 m), foi observado que não há grande diferença qualitativa independentemente da profundidade na qual o amostrador está cravado no solo (15, 38 e 45 cm);
- A sobreposição dos sinais, além de confirmar a afirmação anterior, também mostra a eficiência do *trigger*, já que se trata de golpes distintos, variando apenas a profundidade do amostrador;
- Devido à profundidade que se encontrava o amostrador padrão ser relativamente rasa (4 m), observa-se que quanto maior a distância das caixas do furo de sondagem, a componente horizontal registra melhor a onda S, confirmando o que foi mostrado por Bang & Kim (2007);

7.2 Análises dos perfis de ondas S nos ensaios S-SPT 1 e 2

As análises dos ensaios S-SPT 1 e 2 são descritas a seguir e compõem-se de:

- Análise da aplicação de diferentes filtros de frequência;
- Análise dos perfis de registros das ondas para a determinação de um ponto em comum evidenciado pela análise conjunta dos registros.
- Análise para a determinação do tempo de chegada através do método do cruzamento e da primeira chegada.

7.2.1 Quanto aos filtros de frequência

Como foi mostrado no capítulo referente aos materiais, os geofones utilizados nesta pesquisa, possuem frequência de espúrio igual a 400 Hz, ou seja, para frequências maiores do que esta, o fabricante não garante o registro com precisão. Foram feitas análises variando o filtro de frequência na tentativa de verificar qual filtro é o ideal para se evidenciar as ondas S nos registros. Assim, nesta análise, apresenta-se os perfis de registros feitos pelos geofones localizados a 7,5 m do furo de sondagem no ensaio S-SPT . Foram utilizados três frequências de corte com filtro digital do tipo passa-baixa:

- 400 Hz, pelo limite de resposta do geofone (Figura 77);
- 120 Hz, indicado por Campanella & Stewart (1992) (Figura 78);
- 80 Hz (Figura 79).

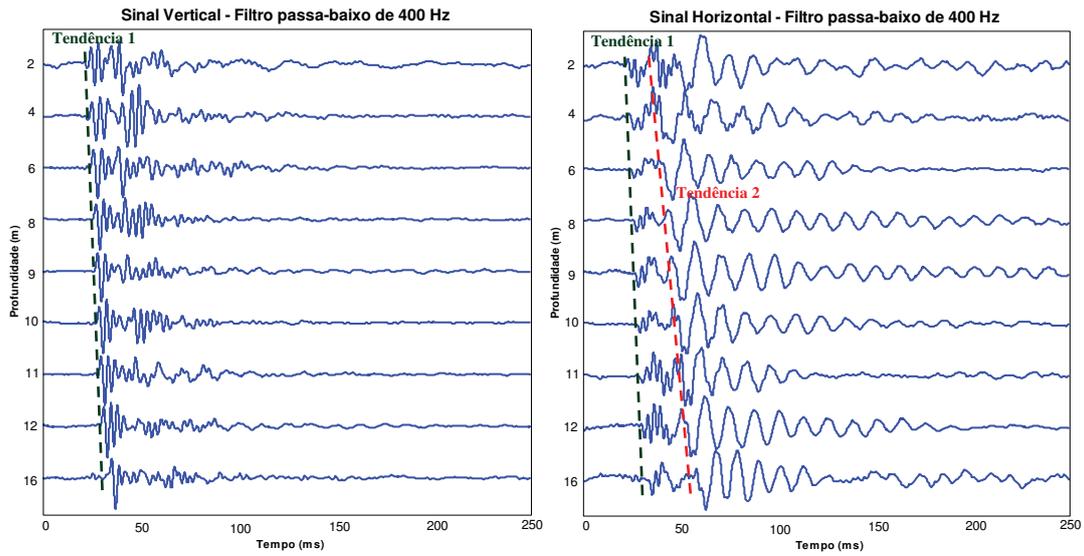


Figura 77 - Perfil de ondas a 7,5m do furo de sondagem - Filtro de 400 Hz.

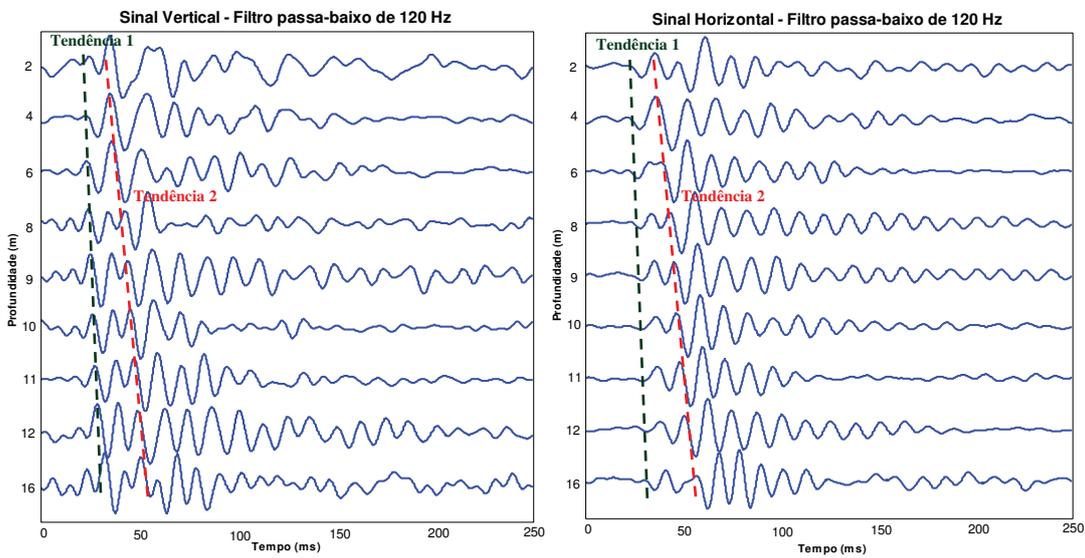


Figura 78 - Perfil de ondas a 7,5m do furo de sondagem - Filtro de 120 Hz.

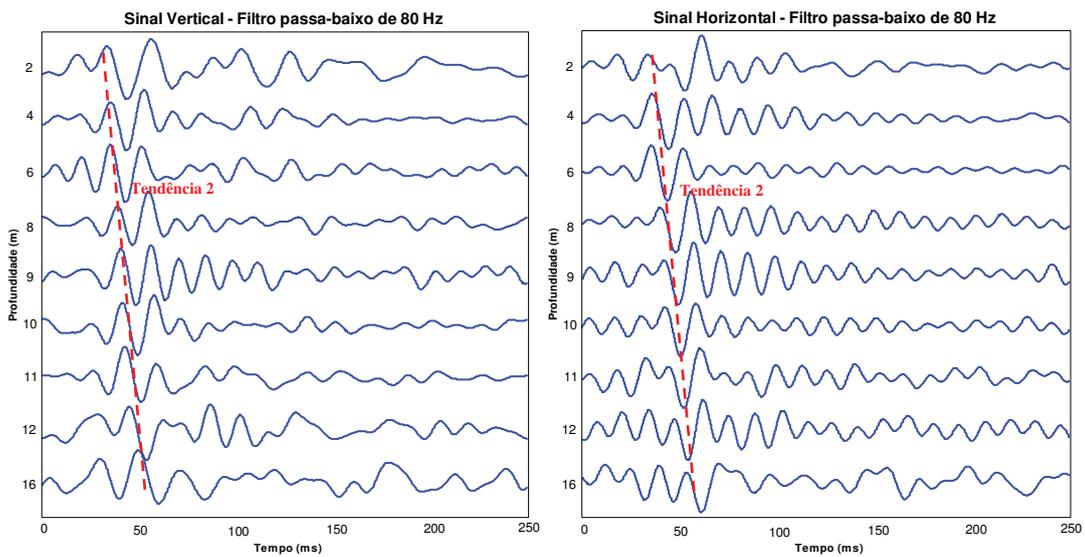


Figura 79 - Perfil de ondas a 7,5m do furo de sondagem - Filtro de 80 Hz.

Para os registros com aplicação de filtro de frequência passa-baixa de 400 Hz (Figura 77), destaca-se que no perfil de sinais verticais identifica-se claramente a tendência (tendência 1) de primeira chegada de ondas, porém, observa-se somente um tipo de onda. Observando-se o registro dos sinais horizontais nota-se que ainda há essa mesma tendência (tendência 1) como uma primeira chegada de onda. Porém, diferentemente do registro pelos geofones posicionados na vertical, há também a indicação de outra tendência (tendência 2) de chegada de ondas, um pouco depois e espaçando-se da primeira tendência de chegada com o aumento da profundidade do ensaio. Com isso acredita-se que a tendência 1 refere-se à chegada das ondas P, ao passo que a tendência 2 corresponde à chegada das ondas S. Conclui-se desta figura que: (a): para os registros na direção vertical predomina a componente referente às ondas P e sua identificação é clara e precisa; e (b): para os registros da direção horizontal predominam os registros de ondas S, porém persistem também os registros das ondas P.

Para uma segunda análise foi elaborada a Figura 78, com a aplicação de um filtro passa-baixa com frequência de corte de 120 Hz, recomendado por Campanella & Stewart (1992) para ensaios down-hole. Nota-se nos registros verticais que a tendência 1 (de chegada das ondas P) ficou bastante prejudicada. O mesmo acontece para essa mesma tendência quando se analisam os registros horizontais. Já quanto à tendência 2 (de chegada de ondas S), que é a tendência primordial para o desenvolvimento deste trabalho, verifica-se no registro horizontal que há uma grande clareza da sua chegada, com amplitude preponderante em comparação ao restante do registro de cada onda. No sinal registrado pelo geofone vertical é possível a sua identificação também, com certa subjetividade, com qualidade bem inferior àquela verificada no registro horizontal. Conclui-se desta figura que: (a): Os sinais referentes às ondas P foram bastante minimizados, o que era esperado devido à alta frequência predominante nestas ondas que foram descartadas pelo filtro; e (b): para os registros da direção horizontal há clara identificação da chegada das ondas S, destacando-se em todos os registros.

Tentou-se diminuir ainda mais a seleção do filtro ao montar a Figura 79 com filtro passa-baixa de 80 Hz. A análise desta figura mostra que, apesar de se observar a chegada da segunda tendência nos sinais verticais e horizontais, há uma distorção nos sinais e perda de clareza e amplitude, descaracterizando um pouco a onda S. Assim, não se recomenda a utilização deste filtro. Desta forma, o mais adequado foi aquele proposto por Campanella & Stewart (1992), de 120 Hz.

7.2.2 **Posicionamento dos geofones e identificação de ponto de referência no perfil de registros de ondas**

A discussão deste ítem volta ao ponto de como devem ser dispostos os geofones na execução de um ensaio S-SPT. Logo, a análise deste item é sobre o posicionamento dos geofones na superfície para ter-se um registro adequado de ondas S.

Os sinais apresentados nas análises a seguir são de registros filtrados com filtro digital do tipo passa-baixa de 120 Hz, seguindo Campanella & Stewart (1992), que se mostrou eficaz conforme a análise descrita no item anterior.

Aproveitou-se desse item também para a determinação de um ponto de referência do perfil de registros. Estabeleceu-se, para este trabalho, que o ponto de referência deve ser o de mínimo no pulso principal de cada onda.

(A) Ensaio S-SPT 1:

São apresentados na Figura 80, Figura 81, e Figura 82 os sinais registrados na direção horizontal e vertical do ensaio S-SPT 1. Salienta-se que esses geofones foram posicionados aos pares a uma distância de 1,3 m, 2,9 m e 4,9 m respectivamente.

Analisando-se as Figuras (indicações do ponto de referência e os comentários indicados nas mesmas) é possível notar que o registro de ondas P é indiferente nessa variação de distância de 1,3 m a 4,9 m do furo de sondagem. Quanto às ondas S, objetivo principal do trabalho, verifica-se: para pequenas profundidades, a localização dos sensores foi indiferente para a identificação, porém à medida que a profundidade é incrementada, a sua identificação é mais clara para os geofones mais distantes do furo de sondagem.

Resumidamente, da observação dos perfis do ensaio S-SPT 1, tem-se:

- Ondas P: Os geofones verticais registraram as ondas P em todas as posições; os sinais mais claros foram verificados pelo geofone vertical na posição de 1,3 m; os geofones horizontais não registraram as ondas P;
- Ondas S: Os geofones horizontais registraram as ondas S, verificando-se que em profundidades menores, os mais próximos do furo de sondagem caracterizaram melhor a onda S, enquanto que, em profundidades maiores de ensaio, os mais distantes registravam melhor as ondas S. Os geofones verticais não registraram as ondas S.

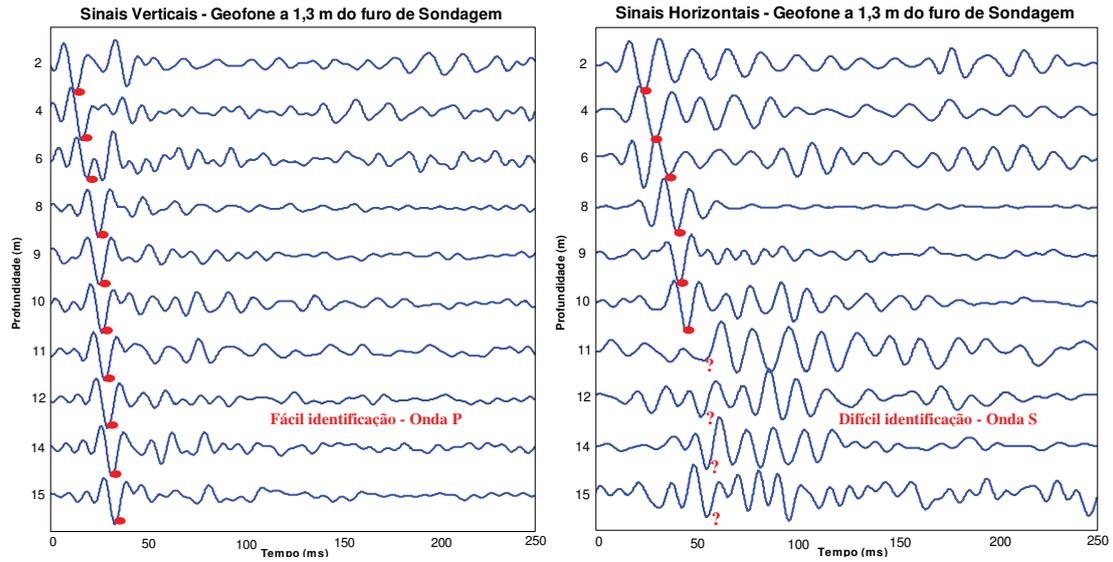


Figura 80 - Perfil de ondas S-SPT1 - 1,3 m do furo de sondagem.

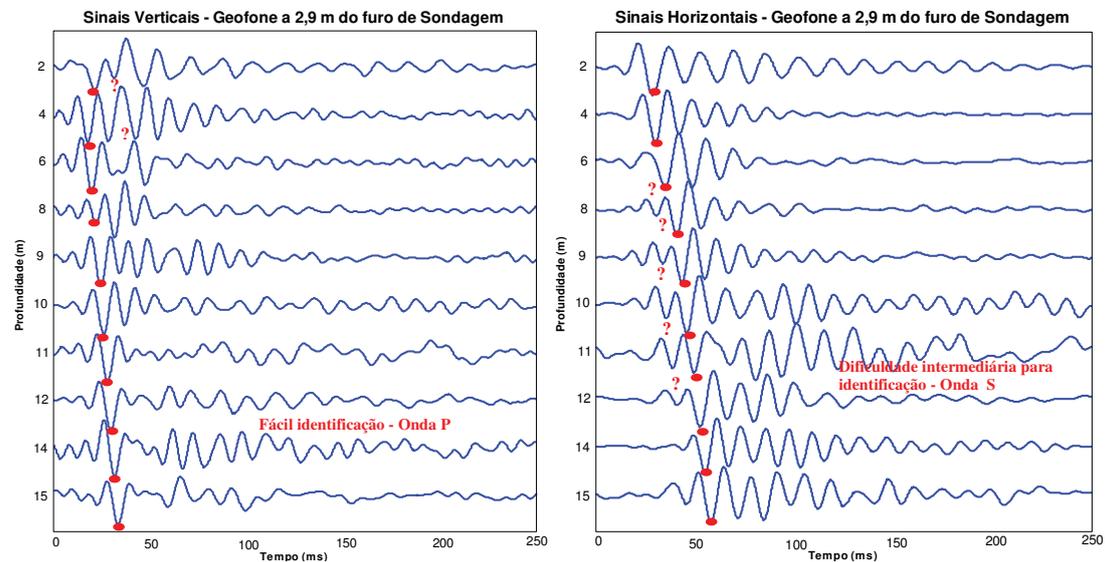


Figura 81 - Perfil de ondas S-SPT1 - 2,9 m do furo de sondagem.

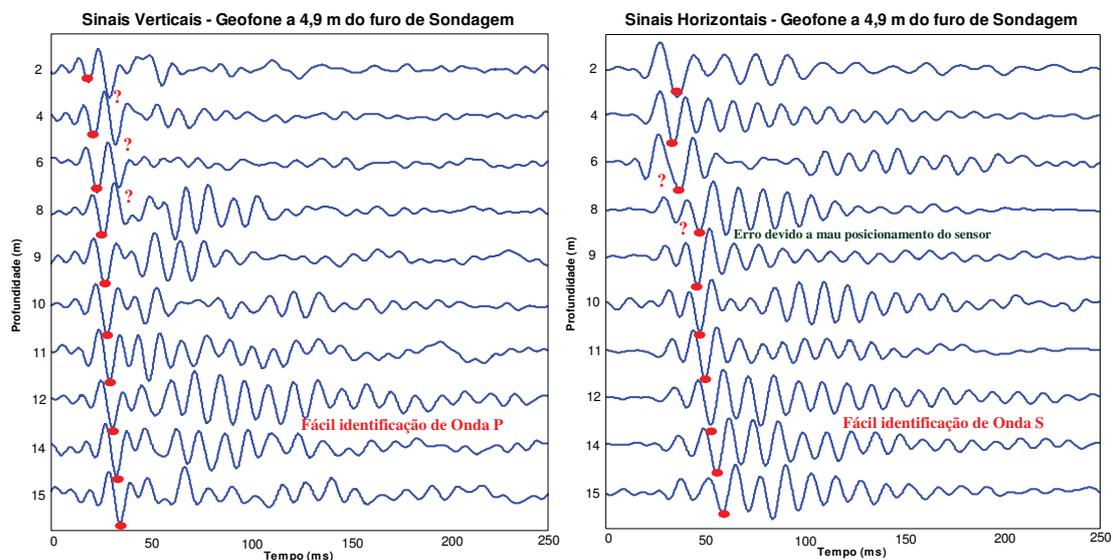


Figura 82 - Perfil de ondas S-SPT1 - 4,9 m do furo de sondagem.

(B) Ensaio S-SPT 2:

Parte-se agora para a análise do ensaio S-SPT2, o qual foi realizado com sensores em posições que distam de 4,5 m / 6,0m / 7,5m / 9,0 m / 10,5 m e 12,0 m do furo de sondagem. São analisados os perfis de ondas registrados a 4,5 m / 7,5 m e 10,5 do furo de sondagem, respectivamente na Figura 83, Figura 84 e Figura 85.

Como nesse ensaio foi possível fazer uma análise com intervalos maiores (de três em três metros), é mais fácil visualizar os efeitos advindos do posicionamento dos geofones e discutir melhor os resultados.

Da análise das figuras, quanto aos registros de ondas P, pode-se destacar sucintamente que:

- Igualmente à análise do ensaio S-SPT1, os sinais referentes às ondas P foram preponderantemente registrados pelos geofones verticais;
- É possível notar que, conforme o posicionamento, quanto mais longe do furo de sondagem, a amplitude da onda P é menor, principalmente nas ondas geradas em profundidades mais rasas;
- Percebe-se que, para profundidades maiores, há também o registro de ondas P nos geofones horizontais, principalmente naqueles mais próximos ao furo de sondagem.

A respeito do registro de ondas S percebe-se que:

- Foram preponderantemente registradas pelos geofones horizontais;
- Para profundidades menores, há a indicação que o seu registro dá-se melhor pelos geofones mais próximos ao furo de sondagem, e vice-versa.
- Nas distâncias de posicionamento igual a 7,5 e 10,5 m, é possível notar que há indicação de registro de onda S nos geofones verticais, porém com menor amplitude e qualidade inferior do que àqueles registros dos geofones horizontais.

Pela análise exposta, nota-se que a distribuição das caixas com geofones depende da profundidade final que o ensaio atingirá. A necessidade de maior distância entre os geofones está relacionada diretamente à profundidade do ensaio a ser realizado. Além disso, da análise proposta, fica clara a identificação de um ponto de referência, como sendo aquele de mínimo. Porém, o método de cálculo utiliza-se do tempo de chegada, e não do tempo de referência. Esse assunto é explorado no próximo tópico.

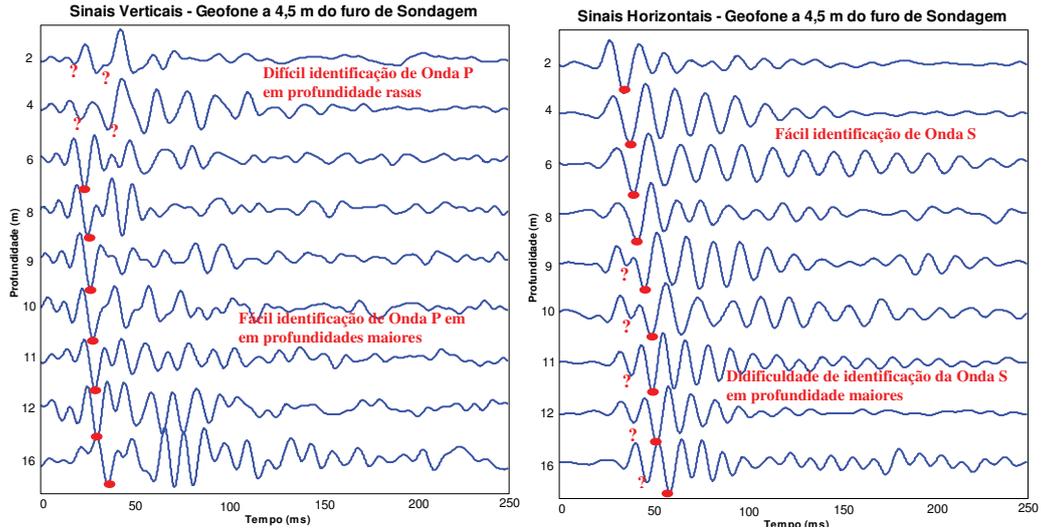


Figura 83 - Perfil de ondas S-SPT2 - 4,5 m do furo de sondagem.

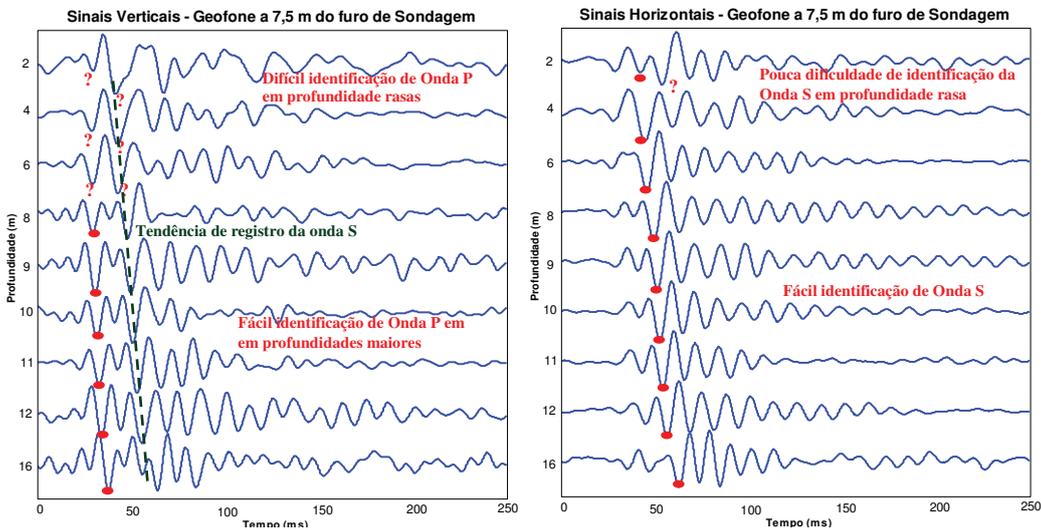


Figura 84 - Perfil de ondas S-SPT2 - 7,5 m do furo de sondagem.

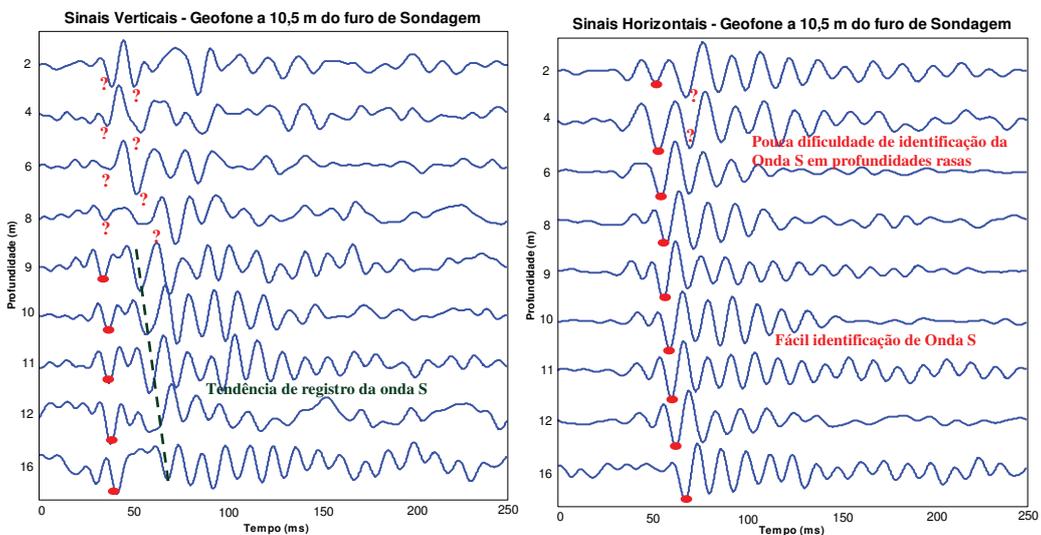


Figura 85 - Perfil de ondas S-SPT2 - 10,5 m do furo de sondagem.

7.2.3 Da determinação do tempo de chegada

Como foi visto no capítulo de revisão da literatura, para o cálculo da velocidade de ondas pelo método DTS (*delay time between serial sources* - tempo de atraso entre fontes em série), proposto por Bang & Kim (2007), que apresentou os melhores resultados e que também é utilizado neste trabalho, são necessários os tempos de chegada.

Até a etapa anterior havia sido identificado um tempo de referência para cada registro do perfil de registro e não o tempo de chegada precisamente. O tempo de chegada é de difícil determinação e há uma alternativa para sua determinação com a aplicação do método *cross-over*. Esse método, como foi visto no capítulo de revisão da literatura, é aquele no qual são registrados dois sinais com polaridades diferentes, ou seja, com 2 golpes de direções contrárias. Através do cruzamento destes dois registros, é possível determinar o momento de chegada da onda.

No entanto, para o ensaio S-SPT, é inviabilizado o uso deste método para todos os golpes, pois demandaria muito mais tempo na sua execução e há certa dificuldade para golpear a cabeça de bater no sentido de baixo para cima. Mesmo assim esse registro foi feito para algumas profundidades neste trabalho. É ilustrado na Figura 86a e b como é o golpe no sentido normal (de cima para baixo) e no sentido contrário, respectivamente.



Figura 86 - Golpes aplicados no sentido normal e no sentido inverso.

A Figura 87, mostra esses registros com polaridade invertida para uma onda gerada a 6 m de profundidade, captada por um geofone horizontal. Conforme a indicação, identifica-se o cruzamento das ondas e, portanto, é ali considerado o ponto de chegada da onda S.

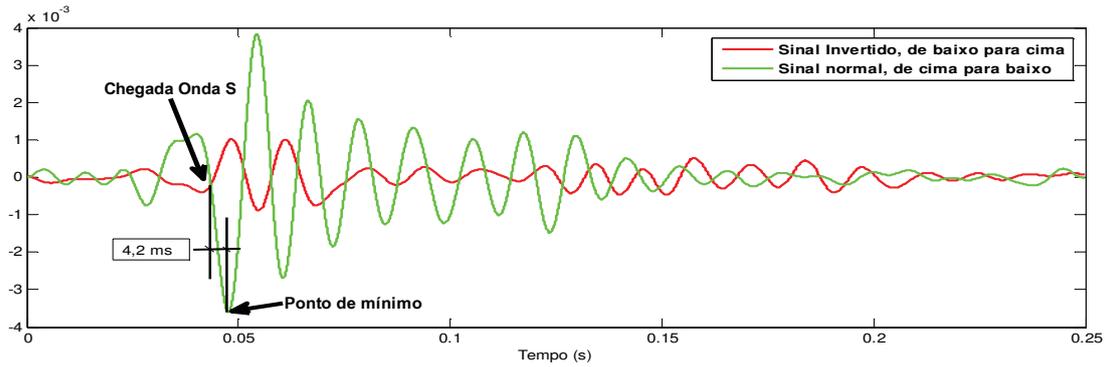


Figura 87 - Método cross-over.

Para facilitar a determinação do ponto de chegada para todos os registros do perfil, essa determinação se dá indiretamente. Com isso, deve-se primeiramente buscar um ponto de referência no perfil, que foi adotado como ponto de mínimo, já visto na análise anterior (esse ponto encontra-se também indicado na Figura 87). A partir deste, subtrai-se o tempo até o cruzamento das ondas, que é aproximadamente igual a 1/4 do período da onda. Foram feitas algumas análises para ver o quanto em tempo (ms) representa esse 1/4 de período. Assim, primeiramente determinaram-se as frequências predominantes do pulso principal de onda S, a exemplo do que foi feito por Stewart (1992), ilustrado na Figura 16. A Figura 88 mostra alguns espectros de frequência da onda em janela. Da análise, tem-se como frequência predominante nos ensaios, SPT-1 e SPT-2, a frequência de aproximadamente 61 Hz, que fazendo a conta do quanto 1/4 de período representa, chega-se a um tempo próximo de 4,2 ms. Portanto, esse tempo deve ser subtraído daquele encontrado pelo ponto de referência (o de mínimo).

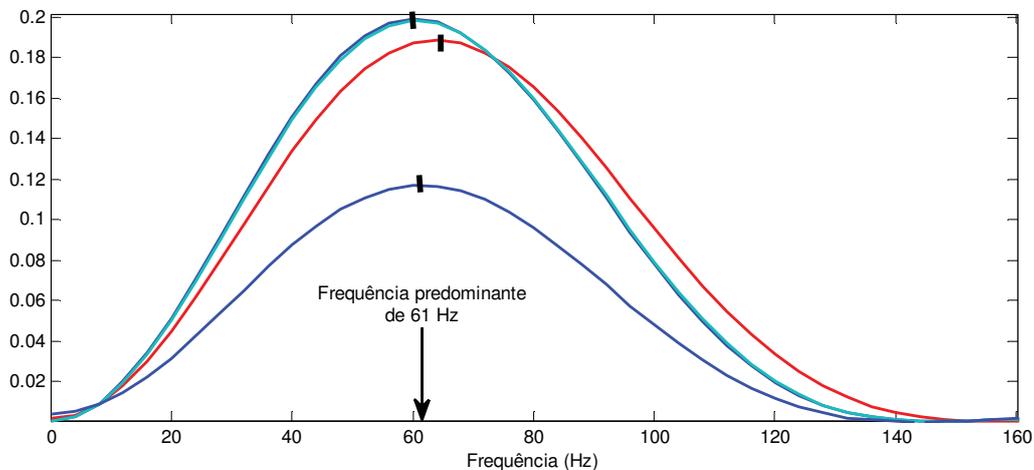


Figura 88 - Espectro de frequências.

7.3 Primeiros perfis de V_s definidos pelo S-SPT para validação do sistema e das metodologia

São apresentados neste ítem os perfis de V_s obtidos nos ensaios S-SPT1 e S-SPT2, calculados pelo o método DTS (Bang & Kim, 2007), com a finalidade de validar o sistema e interpretação dos resultados.

7.3.1 *Método de cálculo e consideração da Lei de Snell*

Cabe lembrar que o método DTS (*delay time between serial sources* - tempo de atraso entre fontes em série) utiliza o caminho fornecido pela Lei de Snell, e, portanto, foi verificado se o software estava realmente considerando este caminho. É relevante ilustrar esse caminho, considerando a lei de Snell, e fazer algumas observações.

A Figura 89, para o ensaio S-SPT2, ilustra esse caminho considerando a lei de Snell, sendo este influenciado pela distância entre os receptores e o furo de sondagem. Nos itens A, B e C desta figura, são apresentados três caminhos, com os receptores posicionados a 6,0 m, 9,0 m e 12,0 m, respectivamente. Estes caminhos foram confeccionados, através do método implementado para o DTS e, conseqüentemente, utilizando as velocidades calculadas de cada camada pelo mesmo método.

Já a Figura 90, mostra como seriam esses mesmos caminhos, se a lei de Snell fosse desconsiderada. Nota-se que há uma grande diferença se for utilizado esse caminho retilíneo, que é o caso, por exemplo, do método do intervalo. Para efeitos de comparação entre o caminho calculado utilizando a lei de Snell, e aquele sem sua utilização, a Figura 91 é apresentada. Essa figura mostra nitidamente, como já era de se esperar, que quanto mais longe os receptores estão posicionados, maior é a influência do caminho considerando a lei de Snell. Ou seja, se as distâncias entre furo de sondagem e receptor são muito pequenas, como é o caso geralmente aplicado nos ensaios do tipo *down-hole* com o cone sísmico, o método do intervalo poderia ser aplicado sem grande perda de precisão para a determinação das velocidades de ondas S. Porém, para grandes distâncias como é o caso do S-SPT, o método do intervalo não é recomendado.

Portanto, verifica-se a observação feita por Bang & Kim (2007) sobre a aplicação da lei de Snell, a qual não deverá ser omitida para os cálculos quando os receptores estiverem distantes do furo de sondagem.

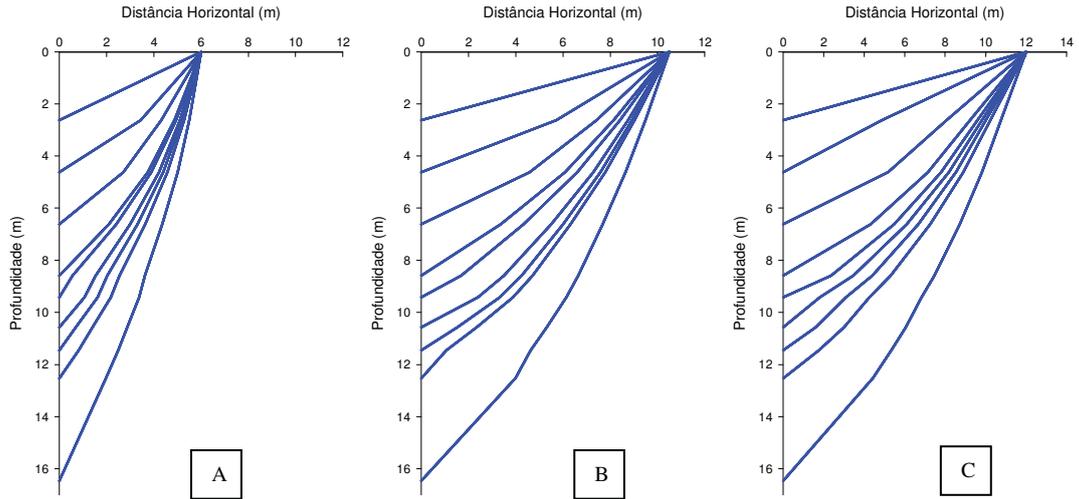


Figura 89 - Caminhos segundo a lei de Snell.

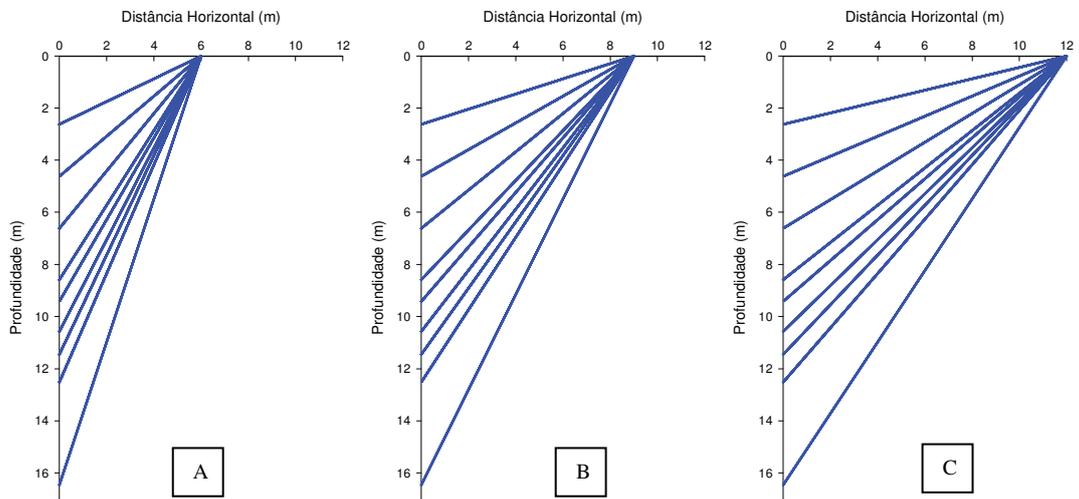


Figura 90 - Caminhos sem aplicação da lei de Snell.

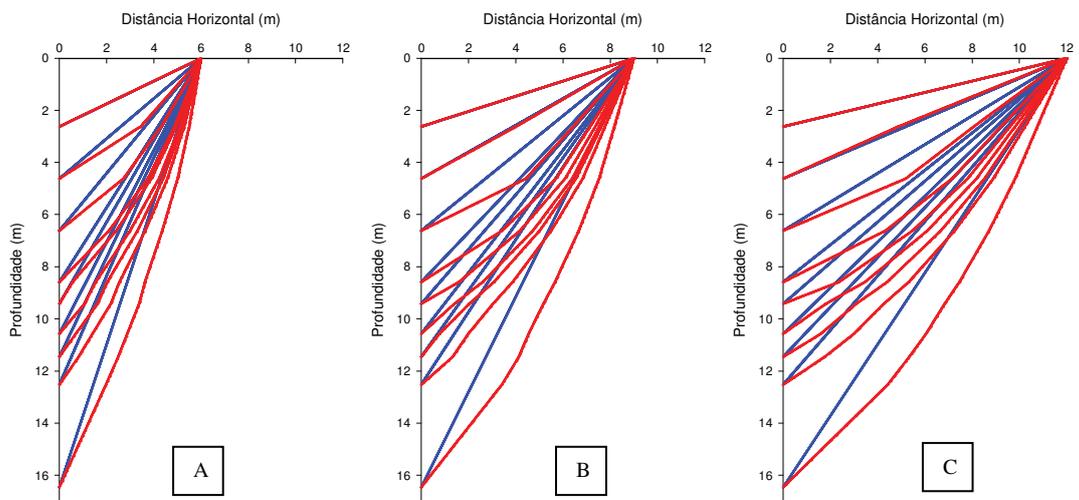


Figura 91 - Caminhos sobrepostos.

7.3.2 Resultados do ensaio S-SPT 1

Os resultados obtidos no ensaio S-SPT1 (Figura 92) foram calculados através dos tempos adquiridos dos receptores horizontais das posições 1, 2 e 3, posicionados a 1,3 m / 2,9 m / 4,9 m do furo de sondagem, respectivamente.

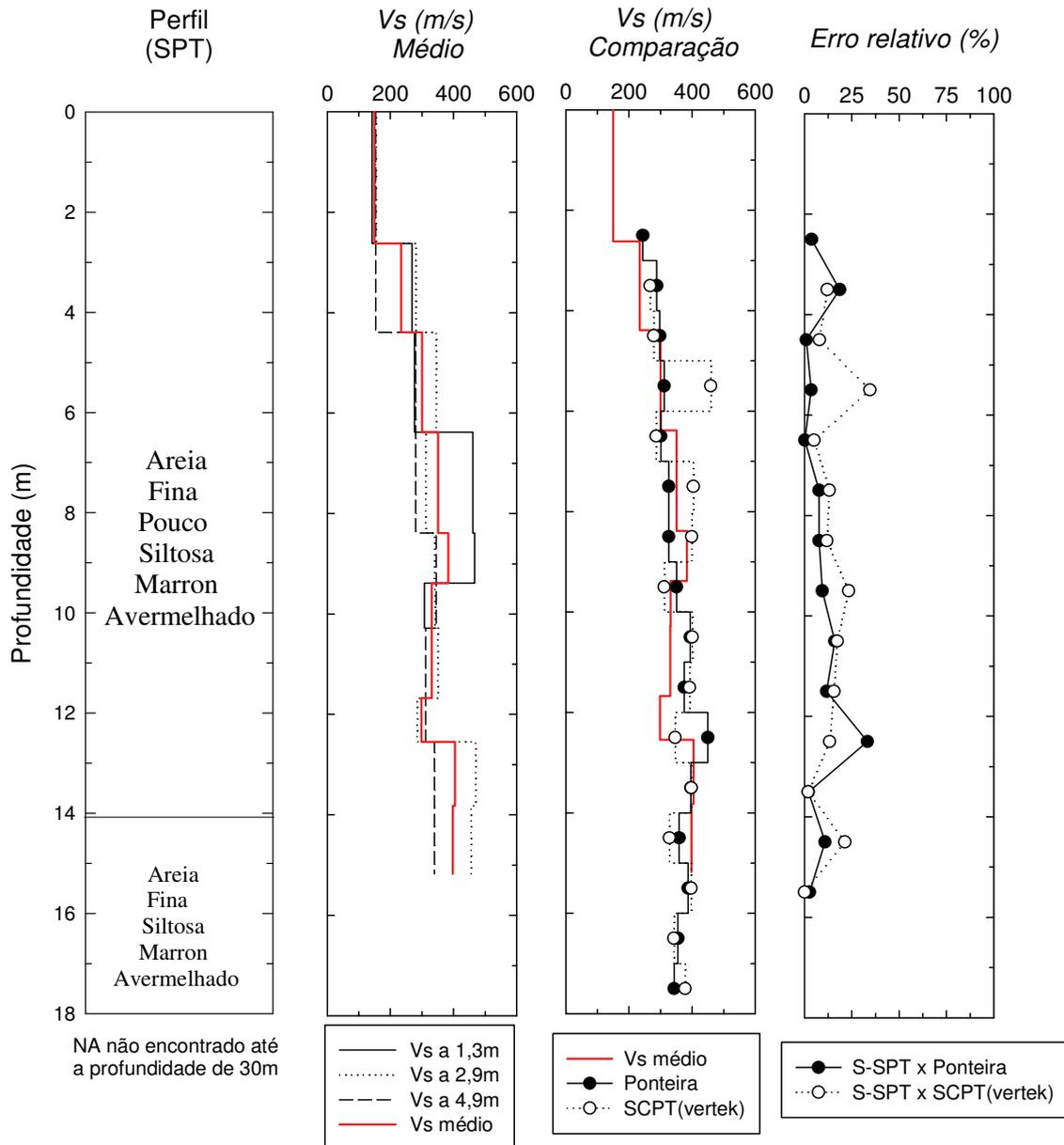


Figura 92 - Resultados do ensaio S-SPT 1 e comparações.

Algumas considerações sobre esses resultados são apresentadas a seguir:

- Para o perfil de V_s obtido a 1,3 m (posição 1) do furo de sondagem, devido à falta de qualidade dos registros para profundidades maiores,

pôde-se apenas calcular V_S até a profundidade de 10 m onde os registros ainda eram claros (ver Figura 80 - Registros sísmicos),

- Nas posições 2 e 3 (2,8 e 4,9 m), a qualidade de registro se apresentava em melhores condições. Assim foi possível calcular o perfil de velocidades até a profundidade final do ensaio.
- Verifica-se que os perfis de V_S calculados nas posições 1, 2 e 3 seguem uma mesma linha de tendências, porém há uma pequena discrepância entre eles, principalmente na posição 1, em relação às demais;
- Quanto à escolha do perfil de V_S : Conforme recomendação de Bang & Kim (2007), os valores a serem assumidos em um ensaio S-SPT podem ser, por exemplo, iguais à média dos perfis calculados. A restrição para isso é que não haja nenhum perfil com discrepância acentuada. Como não houve discrepância acentuada entre os perfis obtidos na posição 1, 2 e 3, é apresentada como resultado do ensaio S-SPT 1 a média das 3 posições.
- Ao comparar-se o perfil de V_S do resultado do S-SPT 1 aos perfis de referência dos ensaios *down-hole* percebe-se que a evolução do perfil é bastante similar, e que o erro relativo médio encontra-se na faixa de 9 %.

7.3.3 Resultados do ensaio S-SPT 2

Os resultados, obtidos no ensaio S-SPT 2 (Figura 93), foram calculados através dos tempos adquiridos dos receptores horizontais nas posições 1, 2, 3 (no arranjo 1) e 4, 5 e 6 (no arranjo 2) posicionados a 4,5 m / 6,0 m / 7,5 m / 9,0 m / 10,5 m / 12,0 m do furo de sondagem, respectivamente.

Observa-se que, neste ensaio, a cada profundidade que era efetuado o registro das ondas sísmicas, as caixas com sensores eram trocadas de lugar (pois haviam apenas 3 caixas). Isso é um fator que poderia afetar um pouco os resultados, pois a instalação dos sensores é fundamental para a qualidade do registro sísmico. O correto seria ter 6 caixas para a realização do ensaio, que ficassem fixas do começo ao fim do ensaio, a exemplo do que aconteceu no S-SPT 3, onde foram adquiridas mais 3 caixas com geofones.

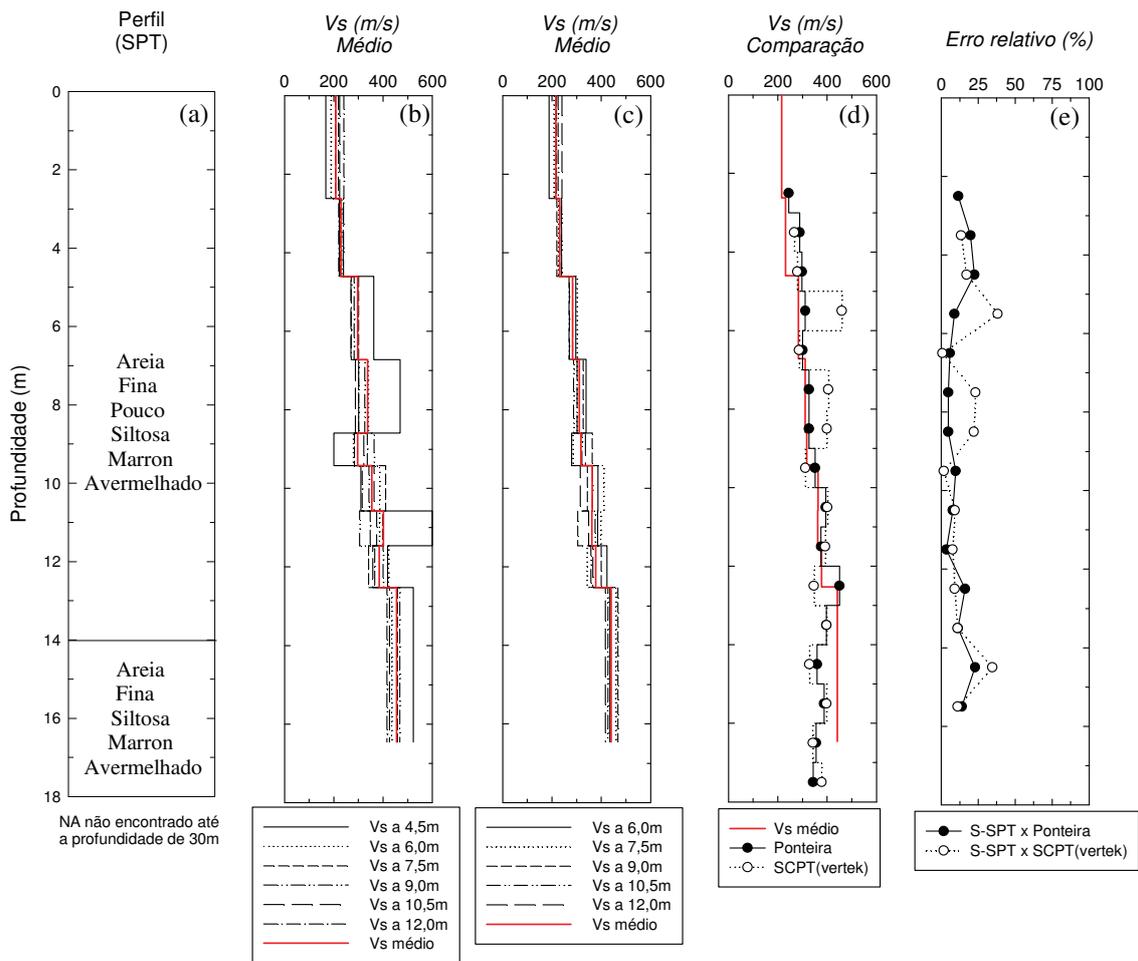


Figura 93 - Resultados do ensaio S-SPT 2 e comparações .

Algumas considerações sobre esses resultados são apresentadas a seguir:

- No gráfico em que são apresentados todos os perfis de V_s calculados, nota-se que somente o da posição a 4,5 m distante do furo de sondagem (o mais próximo) encontra-se um pouco fora dos demais;
- No perfil de V_s obtido a 4,5 m do furo de sondagem, observa-se grande variação de velocidades quando comparado aos perfis calculados nas outras posições. Esse fato pode estar associado à instalação incorreta da caixa com os geofones naquele lugar, na mudança da posição 4 para a 1, cumulativamente à característica daquele local com a presença de muita brita que dificultava a instalação;
- Nas posições a 2, 3, 4, 5 e 6, conforme a Figura 93, em (c), que para a determinação do perfil médio de V_s , foi eliminado aquele da posição 1,

e, observou-se que os perfis de velocidades de onda S das demais posições mostraram-se muito próximos.

- Quanto à escolha do perfil de V_S foi seguida, mais uma vez, a recomendação de Bang & Kim (2007), retirando do cálculo da média o perfil calculado na posição 1. Assim plota-se o perfil V_S do S-SPT 2, comparando-o com os demais perfis de V_S de referência.
- Ao comparar-se o perfil de V_S do resultado do S-SPT 2 aos perfis de referência percebe-se que a evolução do perfil é bastante similar aos de referência, e que o erro relativo médio encontra-se na faixa de 10 %.

7.4 Síntese da metodologia de execução e análise para a realização de ensaios S-SPT

Esse sub-tópico tem por objetivo apresentar, objetivamente, através de um fluxograma, a metodologia a ser seguida na realização de ensaios S-SPT que foi determinada a partir dos ensaios S-SPT 1 e S-SPT 2. O fluxograma, representado na Figura 94, indica os passos a serem executados durante a instalação do equipamento em campo e os procedimentos utilizados na execução do ensaio.

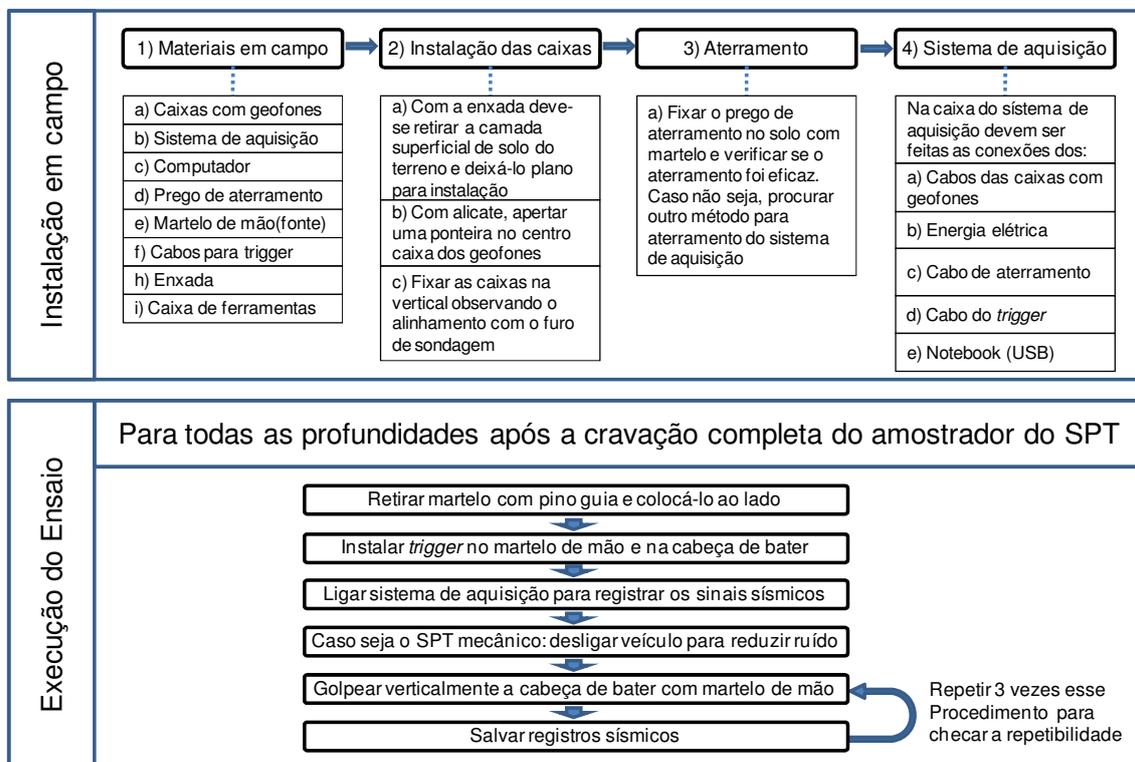


Figura 94 - Síntese da metodologia de execução desenvolvida.

A análise é realizada com utilização, quase exclusiva, do software de análise desenvolvido em Matlab apresentado no Capítulo 5. Seguem, no fluxograma da Figura 95, os procedimentos a serem seguidos para análise.

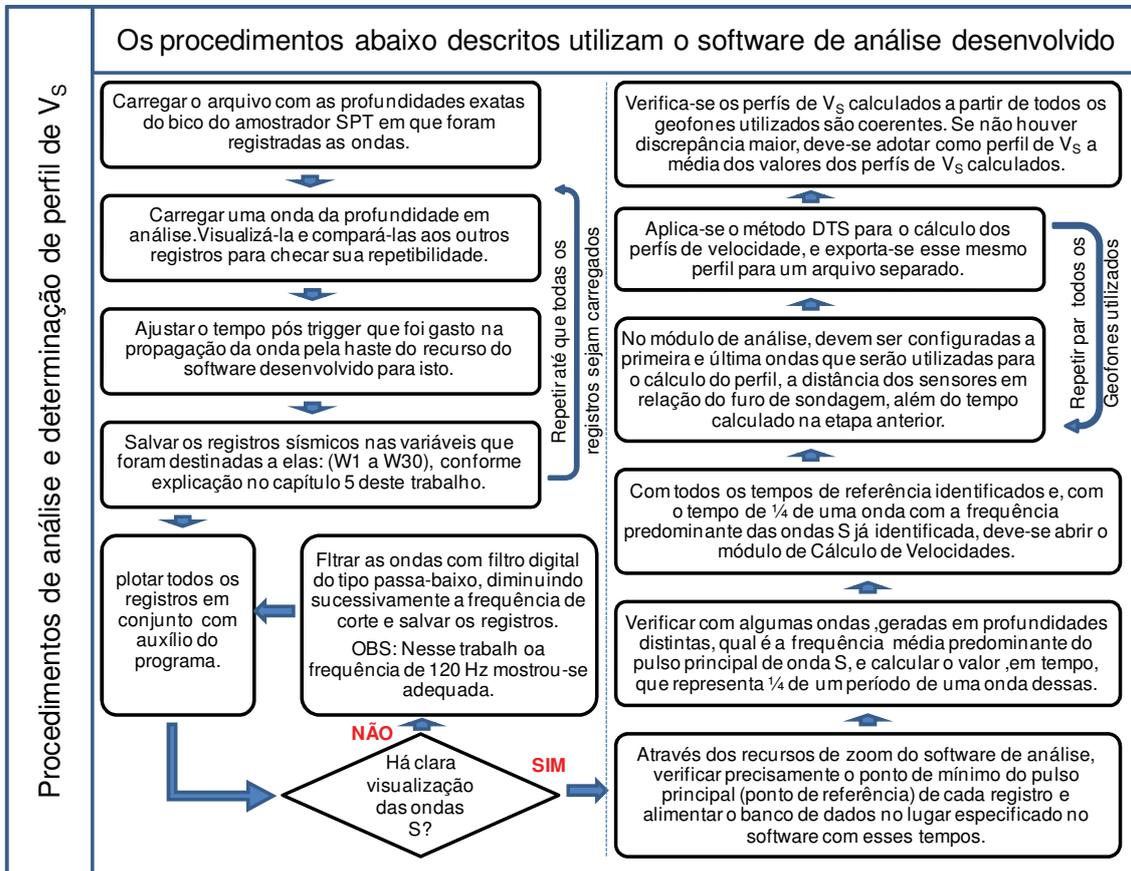


Figura 95 - Síntese da metodologia de análise desenvolvida.

7.5 Campanha para validação do sistema (ensaio S-SPT 3).

O S-SPT 3 foi realizado no campo experimental conforme indicado na Figura 70. Os valores de N_{SPT} deste ensaio também foram apresentados no capítulo referente à caracterização da área de estudo, conforme Figura 72. Assim, neste item serão discutidos apenas os resultados da parte sísmica do ensaio.

Para este ensaio, como descrito no início deste capítulo, já tinham sido adquiridas 6 caixas com 2 geofones (um vertical e outro horizontal), as quais foram espaçadas de 2 em 2 metros a partir de 2 metros distante do furo de sondagem. Assim, não foi necessário remanejar caixas em arranjos conforme feito no ensaio S-SPT 2. Isso deu mais agilidade na execução dos ensaios e levou a uma melhora significativa na qualidade dos registros de ondas, já que, uma vez instaladas, as caixas não eram mais movimentadas. Ressalta-se que esse fator é importante para registros homogêneos e possíveis distorções nos sinais captados.

Na análise dos registros sísmicos foi empregada a metodologia descrita no ítem 7.4, na qual percebeu-se mais uma vez que os registros feitos pelos geofones posicionados horizontalmente permitiram uma melhor caracterização da onda S. Acredita-se que isso se deve ao fato da onda S, à medida que sofre refração nas camadas em que se propaga, muda sua inclinação, sendo assim melhor registrada pelo geofone na posição horizontal.

Os sinais registrados pelas caixas a 2 e 4 metros do furo de sondagem mostraram-se, para identificação de ondas S, de baixa qualidade. Somente foi possível sua identificação para profundidades rasas, porém mesmo assim com bastante ruído, repetindo-se o ocorrido no S-SPT 1. A partir da caixa localizada a 6 m distante do furo de sondagem a visualização das ondas S se tornou mais fácil, até a profundidade de 19 m, o que permitiu o cálculo do perfil de velocidades de ondas S. Até 19 m também foi a profundidade em que foi possível efetuar-se o cálculo das ondas registradas pelo geofone localizado à 8 m do furo de sondagem. Naquele localizado à 10 m distante do furo de sondagem foi possível a identificação clara até a profundidade final do ensaio (21 m) e assim também foi possível o cálculo e definição do perfil de V_s . A Figura 96 apresenta o perfil de ondas, registradas por esse geofone à 10 m, com a identificação dos pontos de referência.

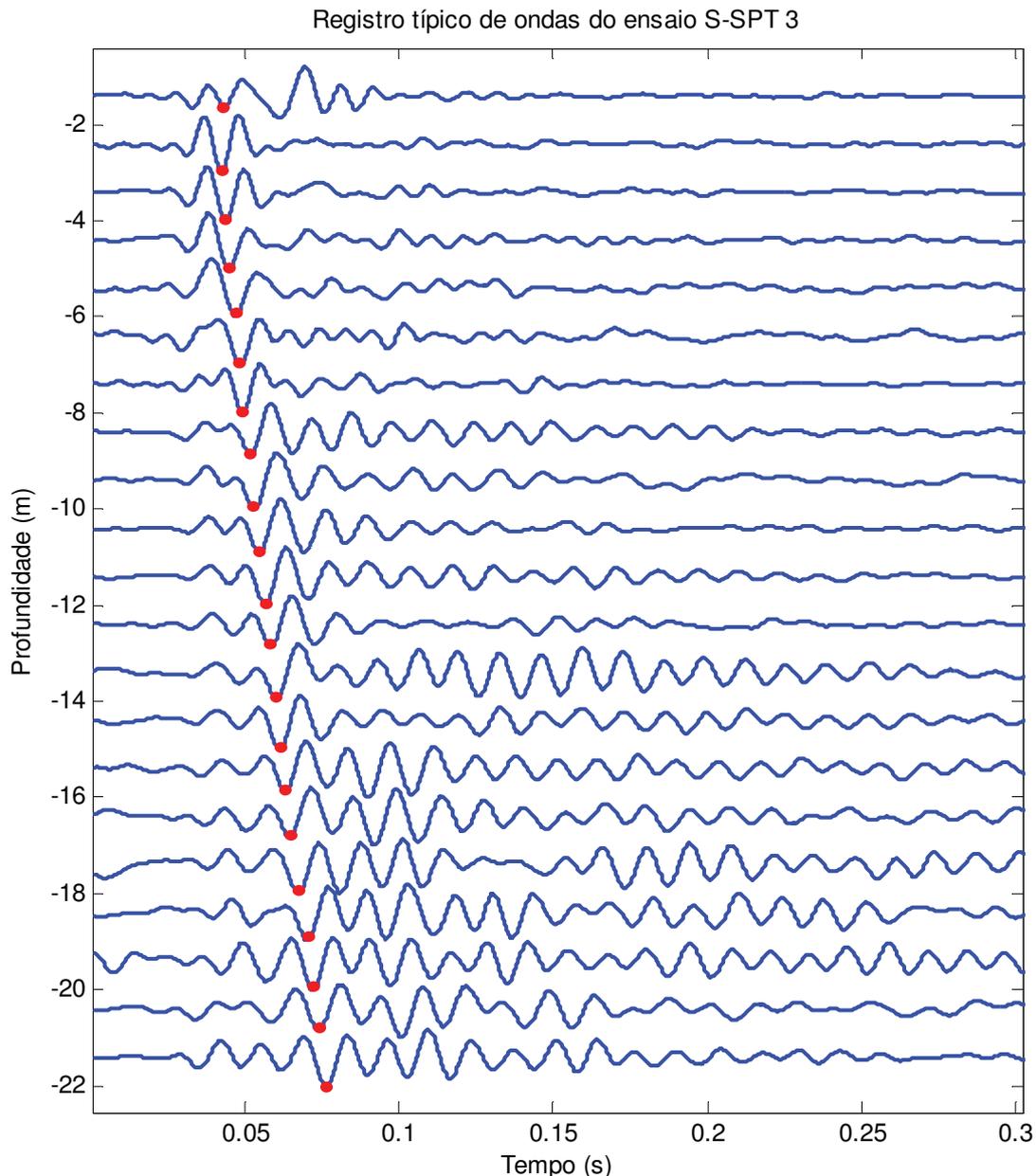


Figura 96 - Registros pelo geofone horizontal a 10 m do furo de sondagem.

Cabe ressaltar que, para a posição de 12 m do receptor, a não identificação muito clara das 5 primeiras ondas pelo geofone instalado horizontalmente deve-se à baixa profundidade do amostrador e à grande distância do geofone em relação ao furo de sondagem (a exemplo do estudo apresentado por Bang & Kim (2007), cuja Figura 26 ilustra o ocorrido neste caso). Assim, optou-se, para essas 5 primeiras ondas, usar o recurso do software de cálculo descrito em 5.3, em "F", sendo que as velocidades destas 5 camadas foram impostas, e iguais às médias daquelas calculadas através dos geofones posicionados à 6, 8 e 10 metros distante do furo de sondagem. A Figura 97 ilustra o registro das ondas registradas à 12 m do furo de sondagem e a aplicação do recurso do software para cálculo nessa situação.

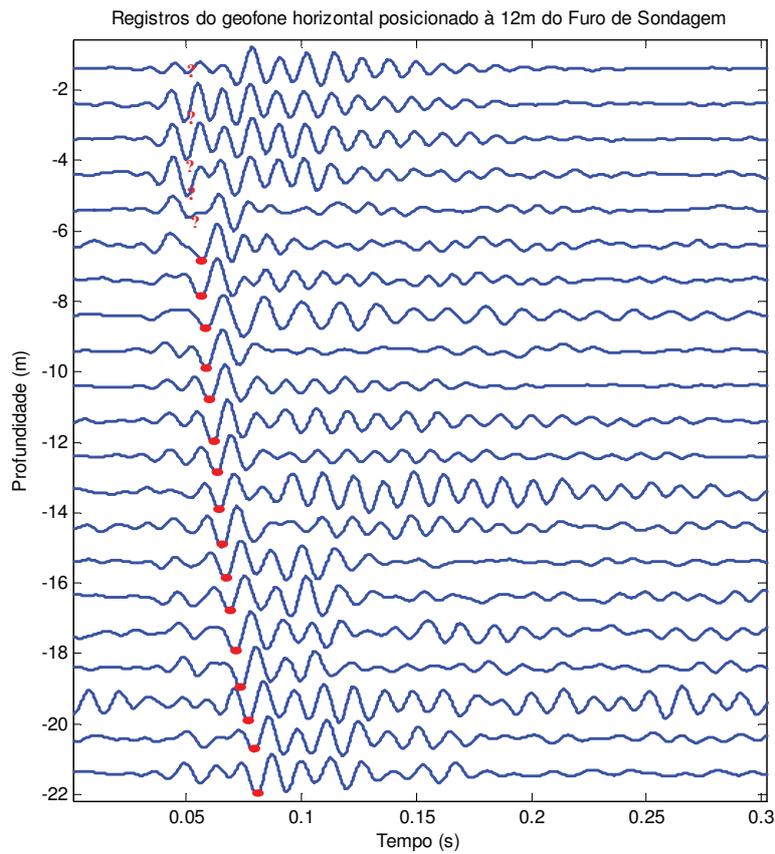


Figura 97 - Registros à 12 m do furo de sondagem.

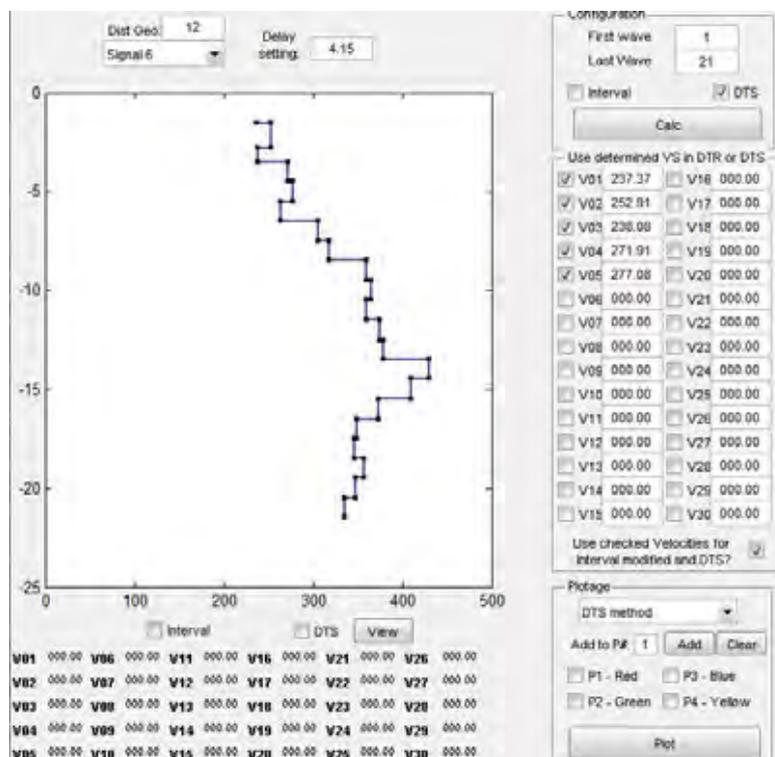


Figura 98 - Cálculo do perfil de velocidades para o geofone posicionado à 12 m do furo de sondagem pelo método DTS.

São apresentados a seguir, na Figura 99, os resultados obtidos no ensaio S-SPT 3, cujos geofones utilizados para o cálculo do perfil de V_s são aqueles apresentados em (b). Nota-se que não há grande diferença do perfil de velocidades de onda cisalhante, assim não foi excluído nenhum destes perfis para o cálculo do perfil médio. O perfil médio é apresentado também em (c) da mesma figura, desta vez comparado com os perfis dos ensaios SCPT (vertek) e da ponteira de Vitali (2011). Nota-se que os resultados se aproximam dos perfis de referência, principalmente da ponteira sísmica. Os erros relativos a ambas as comparações são apresentados em (d), juntamente com as médias indicadas em cada caso. Para a comparação entre S-SPT 3 vs SCPT (vertek) o erro relativo médio foi de 10,94 %, e, para S-SPT 3 vs Ponteira sísmica, o erro relativo médio foi de 6,26 %.

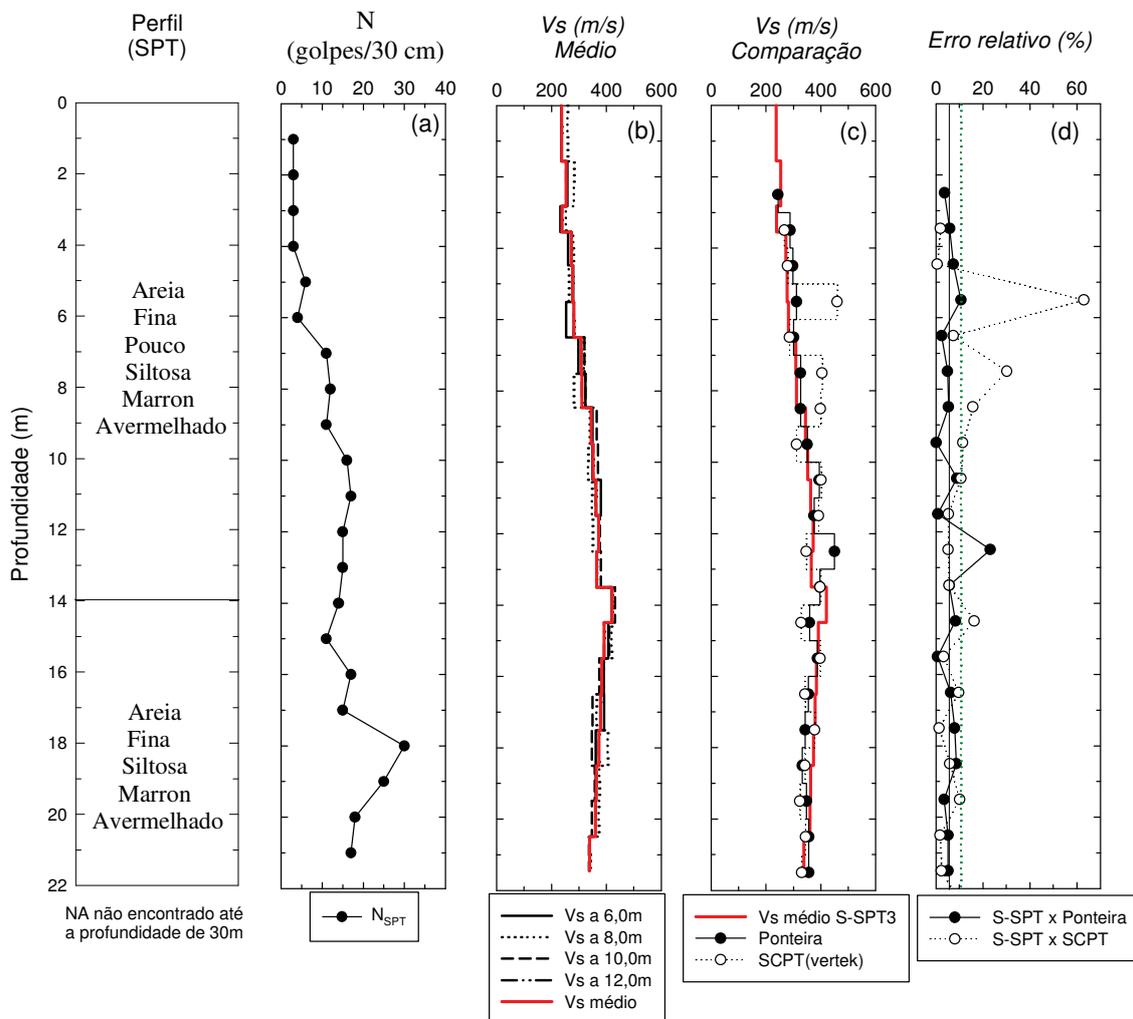


Figura 99 - Resultados do ensaio S-SPT 3 e comparações.

8 CONCLUSÕES

8.1 Sistema de Ensaio

Os perfis de V_S determinados nos ensaios S-SPT 1, 2 e 3, não mostraram grandes diferenças daqueles determinados nos ensaios *down-hole* (perfis de referência). Conclui-se assim que os resultados obtidos com a sistema e metodologia desenvolvida a partir daquela proposta por Bang & Kim (2007) foram satisfatórios.

Assim, considera-se a técnica híbrida de ensaio S-SPT muito interessante, uma vez que fornece pelo menos mais um parâmetro com um baixo custo adicional ao ensaio SPT convencional, que é o mais utilizado no Brasil.

8.2 Metodologia para interpretação

Os resultados dos ensaios S-SPT 2 e 3 indicaram que os geofones posicionados a partir de 4,0 ou 6,0 m do furo de sondagem e espaçados de 2 em 2 m são as distâncias mais indicadas. Portanto, reafirma-se a recomendação de Bang & Kim (2007), que indicam que os geofones devem estar espaçados de 2 em 2 ou de 3 em 3 m.

Observou-se que, conforme aumenta a profundidade, os sinais são melhor captados pelos sensores mais distantes. Portanto, em ensaios que atingem profundidades de até 30 m, por exemplo, recomenda-se que os sensores sejam posicionados a distâncias maiores que 12 m do furo de sondagem. As distâncias ideais para a instalação destes sensores, também depende do tipo de estratigrafia do local, a qual interfere na propagação das ondas. Daí, destaca-se, mais uma vez, a importância de se trabalhar com diversos sensores instalados em posições diferentes em relação ao furo de sondagem.

A definição do número de caixas também é importante, devendo haver pelo menos 3 caixas com sensores, para maior confiabilidade nos resultados. Evidentemente,

uma maior quantidade de caixas, por exemplo as 6 utilizadas no ensaio S-SPT 3, garantem maior segurança e consistência nos resultados.

A aplicação de filtros de frequência passa-baixa de 120 Hz, recomendado por Campanella & Stewart (1992) para a técnica *down-hole*, também forneceu bons resultados para a técnica *up-hole* em conjunto do SPT. Deve-se considerar que esse fator pode variar e deve ser reavaliado de ensaio para ensaio, procurando sempre destacar as ondas S na visualização do conjunto dos registros de todas as profundidades.

Assim, quanto às metodologias de execução e análise, recomenda-se na realização de ensaios sísmicos *up-hole* em conjunto com o ensaio SPT a utilização dos fluxogramas apresentados, que sintetizam os principais procedimentos a serem seguidos.

8.3 Sugestões para continuidade da pesquisa

Sugerem-se os seguintes tópicos para a continuidade dessa pesquisa:

- Utilizar o sistema desenvolvido e a metodologia de análise em outros campos experimentais, para comparar os resultados obtidos com diferentes técnicas para a determinação de perfis de V_S e cálculo do módulo G_0 .
- Utilizar o sistema para a determinação da velocidade de propagação de ondas P, comparando-as com perfis de referência existentes em campos experimentais brasileiros. E assim, calcular o módulo de Young (E_0) e o coeficiente de Poisson dos solos. Ressalta-se que nos registros deste trabalho é facilmente identificada a chegada das ondas P. Porém como não havia perfil de velocidade de referência na área experimental, não foram definidos os perfis de velocidades para ondas P.
- Avaliar a possibilidade de utilizar a razão G_0/N para caracterização de solos tropicais, em especial para uma melhor definição dos horizontes de solos colapsíveis.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6484 (2001): Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT - Método de Ensaio, CB-02, Rio de Janeiro. 17 p.

AKIN, M., KRAMER, S.L. & TOPAL, T., (2011): Empirical correlations of shear wave velocity (V_s) and penetration resistance (SPT-N) for different soils in an earthquake-prone area (Erbaa-Turkey). *Engineering Geology* 119 (2011) 1–17.

AOKI, N. & CINTRA, J. C. A. (2000): The application of energy conservation Hamilton's principle to the determination of energy efficiency in SPT tests. In: PROCEEDINGS OF THE SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF STRESS-WAVE THEORY TO PILES, São Paulo. Anais. p. 457-460.

AVESANI, F. P. B. (2009): Ensaio de campo e laboratório na investigação de um perfil de solo arenoso do campo experimental da Unesp-Bauru. Relatório de Iniciação Científica (bolsista TT-1 FAPESP).

BANG, E. S. & KIM, D.S. (2007): Evaluation of shear wave velocity profile using SPT based up-hole method, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 27, p. 741–758.

BARROS, J. M. C. (1997): Módulo de cisalhamento dinâmico de solos tropicais, Tese de doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 437 P.

BEER, Ferdinand & RUSSEL, Jr.,(1995): Resistência dos materiais, editora MCGRAW-HILL LTDA

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

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

- CAVALCANTE, E.H. (2002): Investigação Teórico-experimental sobre o SPT, Tese Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 430 p.
- CAVALCANTE, E. H. ; DANZIGER, Fernando Artur Brasil ; DANZIGER, Bernadete Ragoni (2006): O SPT e Alguns Desvios da Norma Praticados no Brasil. In: XIII COBRAMSEG, 2006. Curitiba. v. 2. p. 583-588.
- CERQUEIRA, E. O., POPPI, R. J.& KUBOTA, L. T. (2000): Utilização de filtro de transformada de Fourier para a minimização de ruídos em sinais analíticos
Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422000000500019>. Acesso em 04 de Outubro de 2010.
- CHEN, Yunmin, KE, Han and CHEN, Rengeng (2005): Correlation of Shear Wave Velocity with Liquefaction Resistance Based on Laboratory Tests, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(6): 461–469.
- DAVIES, M. P. & CAMPANELLA, R. G. (1995): Piezocone technology: Down-hole geophysics for the geoenvironmental characterization of soil, *Proceedings of SAGEEP 95*, Orlando.
- DE MIO, G. (2005): Condicionantes geológicas na interpretação de ensaios de piezocone para identificação estratigráfica na investigação geotécnica e geoambiental. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São paulo, São Carlos.
- DÉCOURT, L. & QUARESMA FILHO, A.R. (1994): Practical applications of Standart Penetration Tests complemented by torque measurements, SPT- T; Present stage and future trends. *Proc. of XIII ICSMFE*, Vol. 1, New Delli, pp. 143-416.
- FABBRI, G. T. P. (1994): Caracterização da Fração Fina de Solos Tropicais Através da Adsorção de Azul de Metileno. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos.
- GIACHETI, H. L. & CARVALHO, D. (1994): Estimativa do módulo de cisalhamento de dois solos tropicais típicos a partir de resultados de ensaios de penetração, *X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*, Foz do Iguaçu, vol.2, p. 467-474.
- GIACHETI, H. L.; FERREIRA, C. V. & CARVALHO, D. (1999): In-Situ Testing Methods for Characterization of Brazilian Tropical Soils. In: *XI Panamerican Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, ABMS, Foz do Iguaçu/PR/Brazil, v. 1. p. 307-314.

- GIACHETI, H. L. (2001): 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.
- GIACHETI, H. L. (2005): Implantação e desenvolvimento do ensaio de piezocone sísmico para investigação de solos tropicais. Relatório final de pesquisa. Processo nº03/05024-3. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.
- GIACHETI, H. L., DE MIO, G. de, DOURADO, J. C. & MALAGUTTI, F. W., (2006): Comparação entre Resultados de Ensaios Sísmicos Down-Hole e Cross-Hole no Campo Experimental da Unesp de Bauru. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG, Curitiba.
- GIACHETI, H. L. & DE MIO, G. de (2008): Seismic cone penetration tests on tropical soils and the ratio G_0/q_c . In: The 3 International Conference on Site Characterization, ISC'3., Taipei - Taiwan.: Taylor & Francis Group. v. 1. p. 1289-1295.
- GREENHOUSE, J., GUDJURGIS, P.& SLAINE, D. (1995): Applications of surface geophysics to environmental investigations. Reference Notes for an EEGS Short Course, 173p.
- HANUMANTHARAO, C & RAMANA, CV (2008): Dynamic soil properties for microzonation of Delhi, India, Journal of Earth System Science, Vol.117 Issue. pp.719-730
- KARL, L., HAEGEMAN, W. & DEGRANDE, G. (2006): Determination of the material damping ratio and the shear wave velocity with the Seismic Cone Penetration Test. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v. 26, PP.1111–1126.
- KEAREY, P. (2009): Geofísica de exploração, Michael Brooks, Ian Hill. Tradução: Maria Cristina Moreira Coelho. - São Paulo: Oficina de Textos.
- KIM, D.S., BANG, E. S. & KIM, W.C. (2004): Evaluation of various down-hole data reduction methods for obtaining reliable VS profiles. Geotechnical Testing Journal, v. 27, n. 6, pp.585-597.
- LUNA, R.& JADI, H. (2000): Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods, Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure, St. Louis, MO, December.
- MAYNE, P. W. (2000): Enhanced Geotechnical Site Characterization by Seismic Piezocone Penetration Tests. Invited Lecture, Fourth International Geotechnical Conference, Cairo University, January 2000, p. 95-120.

- MONDELLI, G. (2004): Investigação geoambiental em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos utilizando a tecnologia do piezocone. Dissertação (Mestrado) – EESC, USP, São Carlos.
- MONDELLI, G. (2008): Integração de diferentes técnicas de investigação para avaliação da poluição e contaminação de uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos. Tese (Doutorado) – EESC, USP, São Carlos.
- NEVES, L. F. S. (2004): Metodologia para a determinação da eficiência do ensaio SPT através de prova de carga estática sobre o amostrador padrão. Dissertação (Mestrado) – EESC, USP, São Carlos.
- O'HAVER, T. C. (2008): Interactive Fourier Filter (version 2, May, 2008): <<http://terpconnect.umd.edu/~toh/spectrum/InteractiveFourierFilter.htm>> acesso em 19 de Abril de 2011.
- OHTA, Y., GOTO, N., KAGAMI, H. & SHIONO, K. (1978): Shear wave velocity measurement during a standard penetration test. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 6: 43–50.
- OYOGEOSPACE. GS-20DH Seismic Detector Response Curve Output vs. Frequency Chart. Disponível em: <<http://www.oyogeospace.com/geophones-gs-20dh/>>. Acesso em: 28 de Abril de 2012.
- PEDRINI, R. A. A., VITALI, O. M.P. & GIACHETI, H. L. (2010): Software para Análise de Registros Sísmicos em Ensaio Down-hole com o Piezocone, Cobramseg 2010, Gramado-RS, CD-ROM.
- PEIXOTO, A.S.P. (2001): Estudo do Ensaio SPT-T e sua Aplicação na Prática de Engenharia de Fundações, Tese Doutorado, Feagri, Unicamp, Campinas, 468 p.
- PEJON, O. J. (1992): Mapeamento Geotécnico Regional da Folha de Piracicaba (Esc. 1:100.000): Estudo de Aspectos Metodológicos, de Caracterização e de Apresentação de Atributos. Tese de Doutorado, São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- QUISPE, E. M. (2008): Análise dinâmica de um aterro reforçado com geossintéticos. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil - PUC - Rio de Janeiro, 134 f.
- RANZINE, S. M. T. (1988): SPT-f; Solos e Rochas , vol 11, nº único
- REYNOLDS, J.M. (1997): An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, Wiley, New York, 896 p.

- ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R. G.; GILLESPIE, D. & GREIG J. (1986): Use of piezometer cone data, Proc. In-Situ-86, ASCE Specialty Conference, p. 1263-1280.
- SANCIO R. B. & BRAY J. D. (2010): An Assessment of the Effect of Rod Length on SPT Energy Calculations Based on Measured Field Data. Geotechnical Testing Journal, Vol. 28, No. 1
- SCHEFFER, L. (2005): Desenvolvimento e aplicação do cone sísmico. Dissertação de mestrado. Departamento de engenharia civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- SCHNAID, F. (2000): Ensaios de Campo e suas aplicações à engenharia de fundações. Ed. Oficina de textos. São Paulo. 189 p.
- SCHNAID, F.; CONSOLI, N. C. & AVERBECK, J. H. (1998): Aspects of cone penetration in natural weakly-cemented deposits, Geotechnical Site Characterization, Atlanta, vol. 2. p. 1159-1163.
- SCHNEIDER, J.A., HOYOS, L., Jr., MAYNE, P.W., MACARI, E.J., & RIX, G.J. (1999): Field and laboratory measurements of dynamic shear modulus of Piedmont residual soils, Behavioral Characteristics of Residual Soils, GSP 92, ASCE, Reston, VA, pp. 12-25.
- SHARMA, P. V. (1997): Environmental and engineering geophysics. Cambridge: Cambridge University Press. 775p.
- STROUD, M. A.(1988): The standard penetration test –its application and interpretation”. Penetration testing in U.K. Proc. of the Geotech. Conf., Inst. of Civil Engineers, Birmingham, July, pp.22-49, Thomas Telford, London.
- VITALI, O. M. P. (2009): Um novo sistema para realização de ensaios sísmicos down-hole, Relatório de Pesquisa, Iniciação Científica, PIBIC-CNPq.
- VITALI, O. M. P (2011): Desenvolvimento de um sistema para realização de ensaios sísmicos down-hole em conjunto com o CPT. Dissertação de mestrado. EESC-USP. São Carlos.