

MARCO AURELIO FLORES APAZA

**DETERMINAÇÃO DO $G_{MÁX}$ ATRAVÉS DO MÉTODO DE ANÁLISE
ESPECTRAL DE ONDAS SUPERFICIAIS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

CONSULTA
FD-5215
Ed.rev.

São Paulo
2009

OK

MARCO AURELIO FLORES APAZA

**DETERMINAÇÃO DO $G_{MÁX}$ ATRAVÉS DO MÉTODO DE ANÁLISE
ESPECTRAL DE ONDAS SUPERFICIAIS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Geotécnica

Orientador:
Prof. Doutor Marcos Massao Futai

São Paulo

2009

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 14 de maio de 2009.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Apaza, Marco Aurelio Flores

Determinação do $G_{máx}$ através do método de análise espectral de ondas superficiais / M.A.F. Apaza. -- ed.rev. -- São Paulo, 2009.

114 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1. Ondas sísmicas 2. Cisalhamento 3. Solos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica II. t.

Ao infinito amor dos meus pais, Aurélio e Ana.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Pai Aurélio e minha Mãe Ana, pelo exemplo que representam e por me incentivar sempre ao estudo;

Aos meus orientadores Prof. Dr. Carlos de Souza Pinto e Prof. Dr. Marcos Massao Futai, pela constante motivação, modo dedicado e paciente de ensinar; meus sinceros agradecimentos;

Ao Dr. José Maria de Camargo Barros e Dr. Rubens Sobrinho, do IPT, pela constante motivação, conselhos, apoio incondicional, incentivo e confiança na minha pessoa; meus sinceros agradecimentos;

Aos Dr. Glenn Rix e Donald Stokoe, pelas importantes contribuições e sugestões.

Aos meus irmãos, Roberto, Ana Maria, César, Juan e Katty Karina, pelo constante apoio.

À Patrícia, pelo imenso amor, compreensão e ajuda durante o mestrado, meu mais profundo agradecimento.

Aos meus amigos e colegas, Arturo, Alexei, Jorge e Raul, pelos bons momentos compartilhados durante o mestrado;

Ao Fernando Akira, Maurício Mijahi e Jorge Fujii, pela amizade e contribuições ao trabalho.

Ao IPT, pelos equipamentos que foram disponibilizados para a realização da presente dissertação.

Ao CAPES pela ajuda financeira durante o mestrado.

RESUMO

Esta dissertação apresenta o método de análise espectral de ondas superficiais (SASW) para a obtenção das variações do módulo cisalhante ($G_{m\acute{a}x}$) com a profundidade, no domínio das deformações muito pequenas (abaixo de 0,001%).

O SASW é um método sísmico "*in situ*", não destrutivo, baseado na geração e detecção de ondas Rayleigh e na natureza dispersiva desta onda. Pela aplicação de um impacto na superfície do solo e detecção da onda em vários pontos, através de dois receptores, é construída uma curva de dispersão (velocidade de fase versus comprimento de onda). Esta curva de dispersão é, então, invertida. A inversão é um processo analítico para a reconstrução do perfil de velocidade de onda de cisalhamento (V_s), partindo-se da curva de dispersão experimental de campo. O módulo de cisalhamento máximo de cada camada é facilmente obtido a partir do perfil de V_s .

No conteúdo teórico da dissertação discutem-se propriedades dinâmicas dos solos e descrevem-se as equações que dominam a propagação das ondas elásticas, tanto em meios homogêneos como em meios estratificados.

A metodologia desenvolvida para a obtenção das curvas de dispersão, através da realização de ensaios SASW, apresenta os resultados obtidos em ensaios realizados na Cidade Universitária em São Paulo, sendo esses resultados comparados com estimativas feitas a partir de correlações baseadas em ensaios SPT existentes. Essas comparações permitem concluir que a metodologia SASW é uma boa alternativa para a determinação do perfil de rigidez ($G_{m\acute{a}x}$) do solo, concordando com o nível de deformação envolvido nos ensaios.

São desenvolvidos estudos de sensibilidade do método para verificar a influência na mudança dos parâmetros assumidos (peso específico, coeficiente de Poisson e espessuras das camadas) no processo de redução de dados (inversão) sobre o perfil final de V_s , concluindo-se que o parâmetro que apresenta maior influência é o coeficiente de Poisson.

Palavras-chaves: Método SASW. Ondas Rayleigh, Velocidade de Onda de Cisalhamento, Análise Espectral, Módulo de Cisalhamento.

ABSTRACT

This dissertation presents the spectral-analysis-of-surface-waves (SASW) method as a tool for obtaining the variations in the modulus shear (G_{\max}) with depth in the field of very small strains (below 0,001%).

The SASW method is a nondestructive *in situ* seismic method, based on the generation and measurement of Rayleigh wave and on its dispersive characteristic nature. Throughout the implementation of an impact on the soil surface and the detection of the wave at various points by two receptors a dispersion curve is constructed (phase velocity versus wave-length). This dispersion curve is then inverted. Inversion is an analytical process for reconstructing the shear wave velocity profile from the experimental field. The shear modulus of each layer is readily obtained from the shear wave velocity profile.

The theoretical content of the dissertation presents dynamic properties of the soils and is described in the equations that dominate the propagation of elastic waves, both in homogeneous media and in stratified media.

The methodology developed to obtain the dispersion curves through the implementation of SASW test is defined, and results from tests carried out at the University Campus in São Paulo are presented and compared with values obtained from correlations based on SPT tests. These comparisons indicate that the SASW method is a good alternative to determine the profile of stiffness (G_{\max}) of the soil, agreeing with the level of deformation involved in the tests.

Studies on the method's sensitivity are developed to verify the influence on the changing of the parameters given (natural unit weight, Poisson coefficient and thickness of layers) in reduction of data (inversion) on the final profile of V_s . The conclusion is that the Poisson coefficient is the parameter with greater influence.

Keywords: SASW Method. Rayleigh waves, shear wave velocity, spectral analysis, shear modulus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Relação entre tensão e deformação de cisalhamento típica de materiais geotécnicos (Rosenbland, 2000).....	17
Figura 1.2 - Relação: Módulo de Cisalhamento versus deformação cisalhante (Rosenbland, 2000).....	18
Figura 1.3 - Métodos de campo usados recentemente para as medições das propriedades dinâmicas dos solos. V_S , ξ , G_S denotam velocidade de onda de cisalhamento, amortecimento do material e módulo de cisalhamento, respectivamente (Campanella, 1994).....	19
Figura 2.1 - Relação entre forças e deslocamentos, com tensões e deformações, num corpo e forma de descrevê-las.	25
Figura 2.2 - Classificação do problema dinâmico: (1) bombas ou explosões, (2) sismos, (3) cravação de estacas, vibrocompactação e cilindros vibradores, (4) tráfego, (5) fundações de máquinas: compressores e geradores elétricos, (6) estruturas temporárias ou permanentes, (7) parques de estacionamento, (8) ondas do mar (Ishihara, 1996).....	27
Figura 2.3 - Valores de γ_t^e e γ_t^v em função do índice de plasticidade (Vucetic, 1994).....	29
Figura 2.4 - Relação entre γ_t^v e as curva de G/G_0 e ξ em função da deformação cisalhante e do IP para solos saturados numa ação de cisalhamento não drenado (Vucetic, 1994).....	30
Figura 2.5 - Comportamento de solos saturados em ações de cisalhamento cíclicos (Vucetic, 1994).....	31
Figura 2.6 - (a) Comportamento não linear histerético ($\tau-\gamma$) de um solo submetido a uma solitação cíclica, (b) Curva básica, (c) Curva de redução do módulo (Kramer, 1996 e Ishihara, 1996).....	32
Figura 2.7 - Cubo elementar que atua com as tensões σ_{ij}	34
Figura 2.8 - Modos de propagação da onda de corpo e superfície (movimento da partícula) associados à propagação de ondas de corpo e superfície (Bolt, 1976).....	40
Figura 3.1 - Relação entre o coeficiente de Poisson (ν) e a velocidade de propagação de onda de compressão (V_p), cisalhamento (V_s) e Rayleigh (V_r) em um semi-espaço homogêneo (Richart et al., 1970).....	43
Figura 3.2 - Movimento de um ponto na superfície do semi-espaço devido a um impulso de curta duração na superfície produzido no terreno (Lamb, 1904) (a) movimento radial horizontal; (b) movimento vertical; (c) caminho da partícula das ondas Rayleigh.	44

Figura 3.3 - Distribuição dos deslocamentos e de energia produzida no terreno pela vibração vertical de uma pequena placa circular rígida, colocada na superfície de um semi-espaço (Woods, 1968).....	45
Figura 3.4 - Distribuição da amplitude e do movimento da partícula em função da profundidade das ondas Rayleigh para um semi-espaço com um coeficiente de Poisson de 0.25 (Richart et al., 1970).....	46
Figura 3.5 - Modelo com camadas isotrópicas e homogêneas, com espessura, parâmetros elásticos e densidades constantes (Strobbia, 2003).....	47
Figura 3.7 - Dispersão geométrica em profundidade através de camadas (Rix, 1988).....	52
Figura 3.8 - Dispersão geométrica em profundidade através de camadas (Strobbia, 2003).....	53
Figura 3.9 - Comparação de curvas de dispersão típicas para diferentes tipos de materiais. (a) perfil não dispersivo (semi-espaço homogêneo), (b) normalmente dispersivo e (c) inversamente dispersivo (Rix, 1988).....	54
Figura 3.10 - Comparação de velocidades: (a) Velocidade de grupo e fase, U e V respectivamente. (b) Chegada de uma onda dispersiva em diferentes receptores (Sherif e Geldart, 1995).....	56
Figura 3.11 - Sinais gerados e recebidos nos ensaios de análise espectral de ondas superficiais.....	57
Figura 4.1 - Deformação superficial do semi-espaço elástico mediante uma carga vertical senoidal aplicada na superfície (Joh, 1996).....	61
Figura 4.2 - Determinação do comprimento de onda das ondas Rayleigh (Strobbia, 2003).....	62
Figura 4.3 - Determinação da velocidade de fase simplificada (Foti, 2000).....	62
Figura 4.4 - Configuração básica dos equipamentos para ensaio SASW.....	63
Figura 4.5 - Ilustração da Geometria de receptor de ponto meio comum (GPMC) usado nos ensaios iniciais SASW com dois receptores.....	66
Figura 4.6 - Ilustração da Geometria de fonte comum (GFC) usado nos ensaios iniciais SASW com dois receptores.....	67
Figura 4.7 - Fonte de impacto de tipo ativo (martelos) de 10kg, 20kg e 25kg utilizados no ensaio SASW.....	69
Figura 4.8 - Fotografia de um Geofone de 1Hz utilizado nos ensaios SASW modelo L-4C da Mark Products.....	71
Figura 4.9 - Fotografia de acelerômetro Wilcoxon Modelo 736.....	71
Figura 4.10 - Fotografia do Analisador Dinâmico de Sinais HP-35670A.....	72

Figura 4.11 - Registro dos sinais de tempo ($d=2m$), dos receptores orientados verticalmente do local SP-01.....	73
Figura 4.12 - Espectro de fase dobrada para espaçamentos entre receptores de 2m do local ensaiado SP-01 do Campo Experimental de Fundações da USP.....	74
Figura 4.13 - Ilustração da diferença entre a modelagem direta e análise de inversão.....	75
Figura 4.14 - Ilustração da diferença de fase entre dois sinais de tempo (Joh, 1996).....	77
Figura 4.15 - Comparação de fase dobrada e desdobrada determinada da avaliação do Espectro de Potência Cruzada do par de receptores para o local SP-01.....	80
Figura 4.16 - Ilustração do mascaramento de dados não desejados: (a) critério da função de coesão e; (b) fase dobrada.....	80
Figura 4.17 - Fluxograma de cálculo da curva de dispersão experimental.....	81
Figura 4.18 - Curva de dispersão de receptores separados 2m, gerados da fase dobrada, mostrada na Figura 4.16.....	82
Figura 4.19 - Curva de dispersão compacta de seis espaçamentos de receptores.....	83
Figura 4.20 - Ilustração da modelagem direta - Passo 1: (a) Assumir um perfil de V_s ; (b) Comparação da curva de dispersão teórica o perfil de V_s assumido com a curva de dispersão experimental composta.....	84
Figura 4.21 - Ilustração da modelagem direta - Passo 2: (a) Assumir um perfil de V_s ; (b) Comparação da curva de dispersão teórica o perfil de V_s assumido com a curva de dispersão experimental composta.....	85
Figura 4.22 - Ilustração da modelagem direta - Passo 3: (a) Assumir um perfil de V_s ; (b) Comparação da curva de dispersão teórica o perfil de V_s assumido com a curva de dispersão experimental composta.....	85
Figura 4.23 - Ilustração da modelagem direta - Passo 4: (a) Assumir um perfil de V_s ; (b) Comparação da curva de dispersão teórica o perfil de V_s assumido com a curva de dispersão experimental composta.....	86
Figura 4.24 - Ilustração da modelagem direta - Passo final: (a) Assumir um perfil de V_s ; (b) Comparação da curva de dispersão teórica o perfil de V_s assumido com a curva de dispersão experimental composta.....	86
Figura 4.25 - Comparações entre os perfis de V_s e as correspondentes curvas de dispersão teórica original, inferior e superior com a curva de dispersão experimental.....	88

Figura 5.1 - Conjunto de equipamentos de campo necessários para o ensaio SASW.....	90
Figura 5.2 - Croquis da locação dos ensaios no Campo Experimental de Fundações da USP (ABEF, 1989) modificado (Gomes, 2007).....	92
Figura 5.3 - Perfis de solo dos locais estudados SP-01 e SP-02 no Campo Experimental de Fundações da USP (ABEF, 1989) modificado (Gomes, 2007).....	93
Figura 5.4 – Local ensaiado SP-01: (a) Perfil de velocidade de onda cisalhamento e (b) Curva de dispersão teórica.....	94
Figura 5.5 – Local ensaiado SP-02: (a) Perfil de velocidade de onda cisalhamento e (b) Curva de dispersão teórica.....	95
Figura 5.6 - Perfis de velocidade dos locais: (a) SP-01 e (b) SP-02.....	97
Figura 5.7 - Perfis de $G_{m\acute{a}x}$ dos locais: (a) SP-01 e (b) SP-02.....	98
Figura 5.8 - Comparação da curva de dispersão teórica original e as duas novas curvas de dispersão teóricas com perfil de velocidade original e com valores de coeficiente de Poisson modificados ($\nu=0,20$ e $\nu=0,4$).....	101
Figura 5.9 - Comparação da curva de dispersão experimental e teórica com as duas novas curvas de dispersão teóricas (considerando a variação do coeficiente de Poisson).....	101
Figura 5.10 - Comparação dos perfis de V_s : (a) Perfil de V_s original e perfis de V_s determinados assumindo valores de coeficiente de Poisson mínimos e máximo; (b) Variação da relação entre V_s novo e V_s original.....	102
Figura 5.11 - Comparação das curvas de dispersão experimental de campo e teórico com as duas novas curvas de dispersão geradas usando pesos unitários modificados e o perfil de V_s original.....	103
Figura 5.12 - Variação da espessura da camada 3 no local SP-01: (a) Perfil de velocidade de onda de cisalhamento; (b) Curva de dispersão experimental e novas curvas de dispersão teóricas com variação das espessuras.....	104

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DOS SOLOS PARA DIFERENTES NÍVEIS DE DEFORMAÇÃO (ISHIHARA, 1996).....	28
TABELA 4.1 - CONFIGURAÇÃO E CRITÉRIO PARA FILTRAGEM DE DADOS PRÓXIMOS À SUPERFÍCIE.....	68
TABELA 4.2 - PARÂMETROS USADOS NO PERFIL FINAL PARA DESENVOLVER A CURVA DE DISPERSÃO TEÓRICA PARA O LOCAL SP-01.....	87
TABELA 4.3 - COMPARAÇÃO DO PERFIL DE V_s UTILIZADO PARA DETERMINAR OS LIMITES ORIGINAL SUPERIOR E INFERIOR DAS CURVAS DE DISPERSÃO TEÓRICA.	88
TABELA 4.4 - VALORES DO MÓDULO CISALHANTE DO LOCAL SP-01.....	95
TABELA 4.5 - VALORES DO MÓDULO CISALHANTE DO LOCAL SP-02.....	96

LISTA DE SIMBOLOS

σ_{ij}	Componente do tensor das tensões
ε_{ij}	Componentes do tensor de deformação
ν	Coefficiente de Poisson
ρ	Densidade de massa
γ_n	Peso específico natural
c'	Coesão efetiva
ϕ	Fase
N_{SPT}	Número de golpes do ensaio SPT
G, G_S	Módulo de cisalhamento
$G_{máx}, G_o$	Módulo de cisalhamento máximo
G_{sec}	Módulo de cisalhamento secante
G_{tan}	Módulo de cisalhamento tangente
V_p	Velocidade de onda de compressão
V_s	Velocidade de onda de cisalhamento
V_{SV}	Velocidade de onda de cisalhamento com polaridade vertical
V_{SH}	Velocidade de onda de cisalhamento com polaridade horizontal
V_r	Velocidade de onda Rayleigh ou de fase
U	Velocidade de grupo
ω	Freqüência angular
k	Número de onda
f_o	Freqüência
λ	Comprimento de onda
γ	Deformação cisalhante
ξ	Coefficiente de amortecimento
γ_i^e	Deformação linear limite
γ_i^v	Deformação limite sem variação volumétrica
τ_c	Tensão de cisalhamento

γ_c	Deformação de cisalhamento
C_{ijkl}	Componente de tensor
δ_{ij}	Delta de Kronecker
$\dot{\lambda}, \mu$	Constantes de Lamé
E	Módulo de elasticidade
K	Módulo de volumétrico
u	Vetor deslocamento
f_b	Força de corpo
φ, ψ	Potencial de dilatação e distorção
∇	Gradiente
$x(t), y(t)$	Sinais de tempo
G_{XX}, G_{YY}	Auto-espectro de potência
G_{XY}	Espectro de potência cruzado
H_X, H_Y	Função de transferência
$\gamma^2(f)$	Função de coerência

SUMARIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	17
1.1 Motivação	17
1.2 Ensaio “in situ” para a medição das propriedades dinâmicas dos solos	19
1.2.1 Ensaio em pequenas deformações	20
1.2.2 Ensaio com grandes deformações	20
1.2.3 Detecção das Ondas Superficiais através de Ensaio “in situ”	21
1.3 Objetivos	23
1.4 Organização da tese	23
 CAPÍTULO 2- PROPRIEDADES DINÂMICAS DOS SOLOS E PROPAGAÇÃO DE ONDAS	 25
2.1 Propriedades dinâmicas dos solos	25
2.2 Comportamento do solo sob solicitações dinâmicas	26
2.3 Comportamento Histerético do solo	31
2.4 Propagação de ondas	33
2.4.1 A lei de Hooke	34
2.4.2 Ondas	36
2.4.3 Equação da onda em um meio elástico linear	36
2.4.4 Ondas de corpo	37
 CAPÍTULO 3 - ONDAS RAYLEIGH.....	 41
3.1 Introdução	41
3.2 Propagação num semi-espaço homogêneo	41
3.3 Propagação num meio verticalmente heterogêneo	46
3.4 Dispersão das ondas de superfície	51
3.4.1 Propagação de ondas num semi-espaço elástico e meio estratificado	51
3.4.2 Modos de propagação	52
3.4.3 Dispersão Geométrica das ondas Rayleigh	52
3.4.4 Velocidade de fase e grupo das ondas Rayleigh	55
3.5 Análise espectral de ondas superficiais	56
3.5.1 Transformada de Fourier	57
3.5.2 Auto-espectro de potência	57
3.5.2 Espectro de Potência Cruzado	58
3.5.3 Função de Transferência	59
3.5.4 Coeficiente de coerência	59

CAPÍTULO 4 - MÉTODO SASW	60
4.1 Introdução	60
4.2 Vibração em regime estacionário	60
4.3. Metodologia SASW e procedimento de campo	62
4.3.1 Procedimento de campo	63
4.4 Configuração do ensaio nas medições SASW	65
4.5 Coleta de Dados	68
4.5.1 Fontes de ondas	68
4.5.2 Receptores	70
4.5.2.1 Geofones	70
4.5.2.2 Acelerômetros.....	71
4.5.3 Analisador dinâmico de sinais	72
4.6 Ferramentas de Análise	74
4.6.1 Capacidade do <i>WinSASW</i>	74
4.6.1.1 Modelagem Direta e Análise de inversão	75
4.6.1.2 Soluções 2D e 3D	75
4.6.1.3 Modo Fundamental e Superior	76
4.7 Processamento de dados	76
4.8 Análises de Dados	82
4.8.1 Curva de dispersão experimental compacta	82
4.8.2 Modelagem Direta	83
CAPÍTULO 5 – ENSAIOS REALIZADOS	89
5.1 Introdução	89
5.2 Configuração do ensaio SASW	89
5.3 Área estudada	91
5.4 Resultados Obtidos	94
5.5 Análise de sensibilidade	99
5.5.1 Coeficiente de Poisson	100
5.5.2 Peso específico natural	102
5.5.3 Espessuras das camadas	103
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	105
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	109

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A velocidade de onda de cisalhamento (V_s) é usada para caracterizar o subsolo, pois, está diretamente relacionado com uma propriedade fundamental dos geomateriais, o Módulo de Cisalhamento (G). O comportamento tensão- deformação dos solos não é linear, ou seja, o módulo G decresce com o aumento da tensão, como é mostrado na Figura 1.1. A declividade inicial da curva de tensão-deformação é o maior valor do módulo de cisalhamento e é designado como $G_{m\acute{a}x}$. Este valor é constante até uma deformação cisalhante de aproximadamente $10^{-3}\%$, como está apresentado na Figura 1.2.

As medições de velocidade de onda “*in situ*” são tipicamente executadas em níveis de deformação bem menores que o limite superior de deformação e, portanto, representam o módulo de cisalhamento em pequenas deformações.

As deformações geradas pela propagação da energia sísmica das ondas de corpo e superfície também são pequenas e, portanto, representam o limite superior do módulo de cisalhamento máximo ($G_{m\acute{a}x}$) (Matthews et al., 1996). De essa forma, o método de Análise Espectral de Ondas Superficiais (SASW) pode ser considerado um bom ensaio para estimar-se o perfil de velocidade do solo.

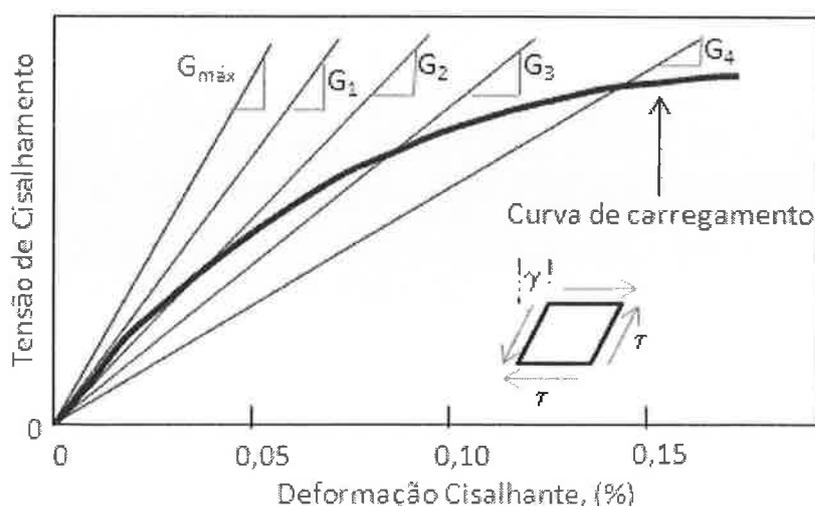


Figura 1.1 - Relação entre tensão e deformação de cisalhamento típica de materiais geotécnicos (Rosenbland, 2000).

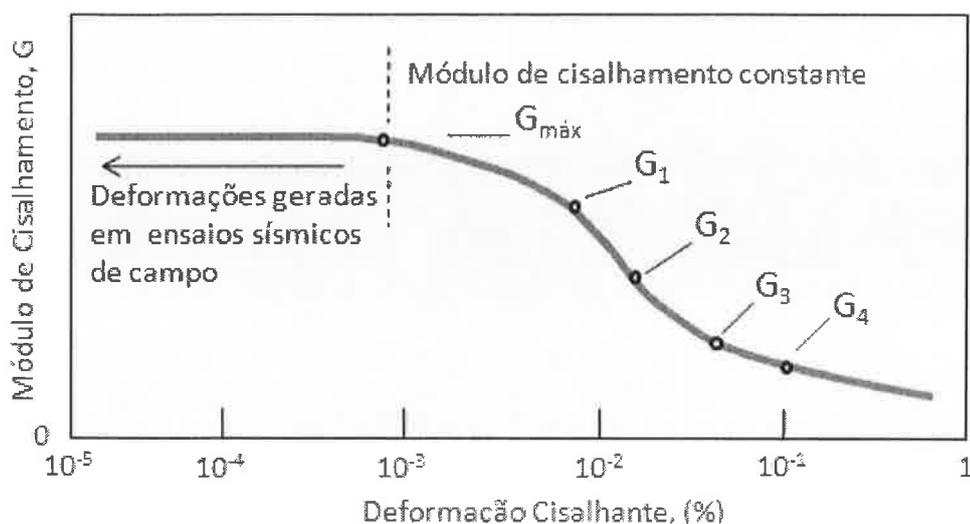


Figura 1.2 - Relação: Módulo de Cisalhamento versus deformação cisalhante (Rosenbland, 2000).

No que diz respeito a ensaios “*in situ*” e de laboratório, ambos os tipos são de grande importância e tanto suas vantagens como desvantagens são bem conhecidas. Entretanto, é importante destacar a possibilidade de ensaios em geomateriais no seu estado de não perturbação (particularmente importante na dificuldade de amostragem do solo) e a maior abrangência de aplicação como duas das principais vantagens dos ensaios “*in situ*”.

A rigidez e o amortecimento de solos estão fortemente relacionados com a magnitude das deformações envolvidas. Neste caso, merecem uma atenção especial os métodos sísmicos, baseados na propagação da onda, a partir dos quais os parâmetros possam ser obtidos com deformações muito pequenas.

Métodos sísmicos podem ser divididos em duas amplas categorias: ensaios invasivos e não invasivos. Os métodos invasivos requerem furos (*Cross-Hole*, *Down-Hole*, *P-S Suspension Logging*) ou a inserção de um instrumento no solo (cone sísmico) e os métodos não invasivos são conduzidos na superfície livre (ensaios de reflexão, refração e SASW). Em geral, estes últimos são afetados por um maior número de incertezas, mas apresentam algumas vantagens, como a possibilidade de ensaiar grandes áreas de solo e, além disso, maior custo-benefício.

Desde a sua introdução, em meados dos anos oitenta, o método SASW tem alcançado um papel muito importante nos ensaios *"in situ"* para a determinação do módulo de cisalhamento máximo em deformações muito pequenas.

1.2 Ensaios *"in situ"* para a medição das propriedades dinâmicas dos solos

Muitos métodos de ensaios de campo e laboratório podem ser realizados com a finalidade de avaliar as propriedades dinâmicas dos solos, incluindo-se o SASW. Esse método é utilizado nesta dissertação para avaliação da velocidade de onda de cisalhamento. A Figura 1.3 apresenta os métodos de campo disponíveis, usados nas estimativas das propriedades dinâmicas na Geotecnia.

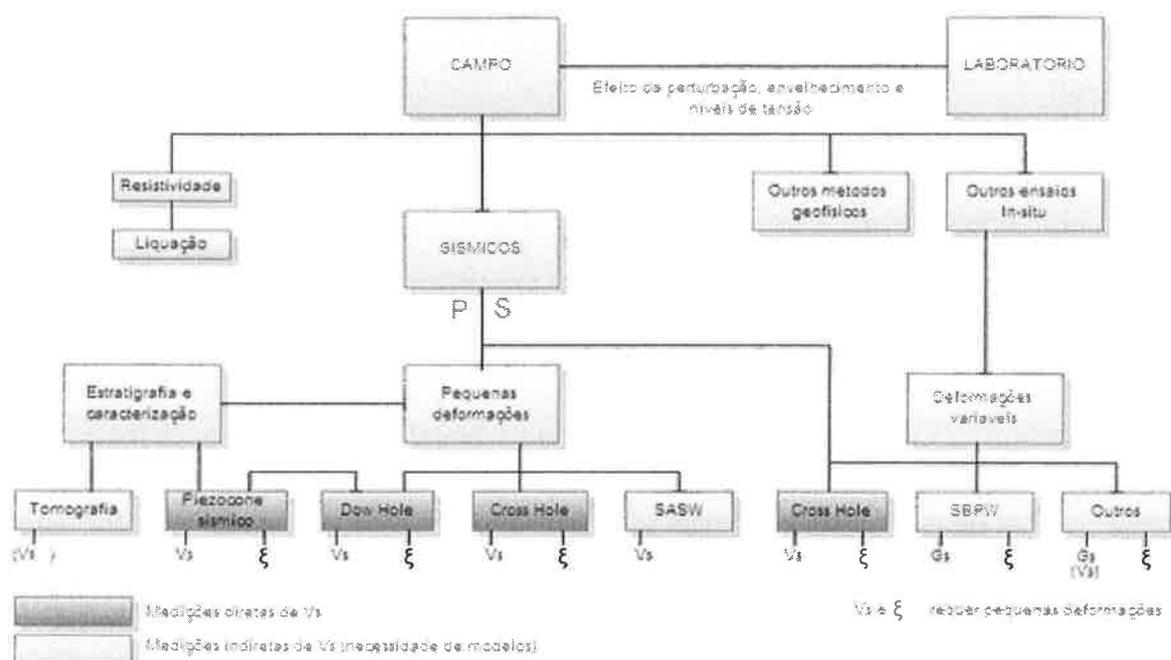


Figura 1.3 - Métodos de campo usados recentemente para as medições das propriedades dinâmicas dos solos. V_s , ξ , G_s denotam velocidade de onda de cisalhamento, amortecimento do material e módulo de cisalhamento, respectivamente (Campanella, 1994).

Ensaios *"in situ"* podem ser executados na superfície do terreno, tais como o SASW, em furos ou com a penetração de uma sonda no solo. Ensaios na superfície usualmente necessitam de outros procedimentos para determinar as propriedades dinâmicas dos solos enquanto que, em outros ensaios *"in situ"*, as propriedades do solo podem ser quantificadas diretamente. Por exemplo, no caso do ensaio SASW, a velocidade de onda de cisalhamento é determinada indiretamente, usando-se um

procedimento de inversão. Algumas das vantagens dos ensaios “*in situ*” podem ser resumidas abaixo (Kramer, 1996):

1. A amostragem não é requerida para os ensaios “*in situ*”. Estes podem preservar as características do material, permitindo a reprodução de ensaio quantas vezes forem necessárias.
2. Os resultados de ensaios “*in situ*” usualmente são baseados em um grande volume de solo, evitando os efeitos de uma amostragem destrutiva (não representativa) e considerando-se ensaios de características não pontuais.
3. Os tipos de deformações causadas no solo por ensaios “*in situ*” são geralmente resultados da mesma propagação da onda.

1.2.1 Ensaios em pequenas deformações

Ensaio com pequenas deformações normalmente operam em um nível de deformação menor que $10^{-3}\%$, implicando um módulo de cisalhamento constante ($G_{m\acute{a}x}$) e, nestes níveis de deformação, o comportamento tensão-deformação do solo é assumido como linear. Além disso, apresenta-se como o domínio com maior interesse para o dimensionamento de estruturas. Portanto, ensaios com pequenas deformações podem resultar numa adequada avaliação das propriedades dos solos, tais como a velocidade de onda de cisalhamento ou módulo de cisalhamento, sendo estas propriedades aplicadas em engenharia geotécnica. Segundo Kramer (1996), variedades de ensaios com pequenas deformações são: ensaio de reflexão sísmica, refração sísmica, *Crosshole*, *Downhole*, cone sísmico e SASW.

1.2.2 Ensaios com grandes deformações

Os ensaios com grandes deformações, relacionados a seguir, são comumente utilizados em engenharia geotécnica: ensaio de penetração *standard* (SPT), ensaio de penetração do cone e do piezocone (CPT e CPTU), ensaio de dilatômetro plano (DMT) e ensaio pressiométrico (PMT). Estes ensaios, na maioria das vezes, são usados para avaliações das características dos solos com grandes deformações, tais como tensões, e os seus resultados são comumente relacionados com as

propriedades dos solos em pequenas deformações. Outros ensaios “*in situ*” estão sendo desenvolvidos (e.g. geotomografia) com algumas variações às descritas acima.

1.2.3 Detecção das Ondas Superficiais através de Ensaio “*in situ*”

Sendo as ondas superficiais facilmente detectadas por receptores na superfície livre, as ondas Rayleigh podem ser consideradas uma boa opção para os ensaios não invasivos nas investigações de solos. O ensaio SASW é um método para a caracterização de solos usando-se a propriedade de dispersão das ondas Rayleigh e este método não necessita de furos no solo, portanto, é classificado como um método não invasivo, tornando-o uma ferramenta prática e econômica para a engenharia. Além disso, comparando-se a outros métodos não invasivos (e.g. reflexão e refração), o SASW fornece uma boa resolução e maior flexibilidade para meios próximos à superfície.

As recentes inovações em tecnologia de geração e recepção de sinais, juntamente com o uso de avançados computadores e softwares, têm apresentado um efeito positivo no desenvolvimento da metodologia SASW.

Foti (2000) faz uma listagem das aplicações do ensaio SASW:

- Caracterização de Pavimento: Uma das primeiras aplicações do método (Heisey et al., 1982; Nazarian e Stokoe, 1985; Al-Hunaidi, 1992).
- Caracterização de Aterro Sanitário: O uso de métodos não destrutivos para obter os parâmetros mecânicos é uma grande vantagem devido à dificuldade e perigo associado à coleta de amostras e realização de furos (Rix et al., 1998; Luke, 1994).
- Identificação “*Offshore*”: Estudos teóricos e experimentais estão sendo efetuados para avaliar a possibilidade de aplicação dos ensaios no fundo do mar (Manesh, 1991; Luke, 1994).

- Melhoria do solo: A repetição dos ensaios antes e depois pode mostrar a efetividade do melhoramento sem a necessidade do processo de inversão (Andrus et al., 1998).
- Solos em regiões geladas: Aplicações similares ao melhoramento do solo, ensaios realizados em diferentes períodos do ano, podem fornecer importantes dados acerca da variação sazonal do módulo de cisalhamento em regiões frias, causadas por ciclos de gelo (Alkire, 1992).
- Detecção de obstáculos enterrados: Uma interessante aplicação, neste caso, estuda os efeitos produzidos por estes obstáculos na propagação da onda (Gugunski et al., 1996; Gugunski et al., 1998).
- Furos com SASW: Uma nova metodologia usando conjuntamente SASW e *Boreholes* (Kalinski et al., 1999).

O procedimento geral do ensaio SASW é descrito a seguir:

1. Geração de um movimento vertical principal usando qualquer fonte impulsiva (*hammer*) ou contínua (*shaker*).
2. Medição dos sinais através de geofones ou acelerômetros, localizados na superfície do solo e com uma configuração específica.
3. Registros dos sinais recebidos pelo analisador de espectros, sismógrafo ou um computador controlado por um programa, usando um software específico.
4. Análise espectral das séries de dados temporais, registradas para a elaboração da curva de dispersão, ou seja, curva de variação de velocidade de fase (velocidade de ondas Rayleigh) com a frequência (ou comprimento de onda).
5. Inversão da curva de dispersão a fim de estimar os perfis de velocidade de onda de cisalhamento.

1.3 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo principal avaliar a viabilidade de se utilizar o ensaio SASW, para determinar o Módulo de Cisalhamento Máximo ($G_{máx}$), através da velocidade de onda de cisalhamento (V_s). Como objetivos secundários: (1) apresentar e desenvolver o Método de Análise Espectral de Ondas Superficiais (SASW), através dos três passos fundamentais do método: a aquisição, o processamento e a inversão dos dados, usando-se as propriedades de dispersão das ondas Rayleigh (verificando-se a fidelidade e a precisão da técnica do ensaio SASW). (2) Efetuar ensaios no Campo Experimental de Fundações da USP, realizando comparações com outros ensaios executados neste local, com a finalidade de analisar os resultados encontrados. (3) Finalmente, realizar uma análise de sensibilidade dos parâmetros envolvidos no método SASW, avaliando assim os seus efeitos nesta metodologia.

1.4 Organização da tese

No Capítulo 2, são apresentadas as propriedades dinâmicas dos solos, modelos de comportamento elástico linear, e a caracterização de ondas.

No Capítulo 3, enfoca-se nos aspectos teóricos fundamentais sobre as ondas Rayleigh, além de apresentar tópicos de análise espectral de sinais.

No Capítulo 4, é apresentado o Método de Análise Espectral de Ondas Superficiais, apresentando aspectos históricos e práticos da metodologia de ensaio, equipamentos usados, procedimentos de campo e coleta de informação. No que diz respeito ao processamento e análise de dados, para a obtenção da curva de dispersão teórica, é utilizado um ensaio executado no local denominado SP-01 do Campo Experimental de Fundações da USP.

No Capítulo 5, discorrem-se e discutem-se os resultados obtidos no local estudado, apresentando-se sugestões no que diz respeito ao ensaio de campo e tratamento de dados. Também é apresentado o estudo de sensibilidade, avaliando-se os efeitos que são produzidos na curva de dispersão teórica e perfil de velocidade de onda de

cisalhamento (V_s), a variação do coeficiente de Poisson (ν), densidade (ρ) e espessura das camadas, parâmetros cruciais do método SASW.

Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões, recomendações e planos para futuras pesquisas.

As referências bibliográficas estão apresentadas na parte final da dissertação.

CAPÍTULO 2- PROPRIEDADES DINÂMICAS DOS SOLOS E PROPAGAÇÃO DE ONDAS

2.1 Propriedades dinâmicas dos solos

O estudo do comportamento dos solos é abordado através das tensões e deformações que se estabelecem numa massa de solo, dependentes das propriedades do material que o constitui (Figura 2.1).

As tensões e as deformações se relacionam através de leis constitutivas. Uma lei constitutiva é uma correspondência funcional entre as causas e os efeitos dos processos físicos manifestados pelo material, definindo a relação entre os estímulos externos e a sua resposta, isto é, entre as tensões impostas e as deformações resultantes (Nagarj e Miura, 2001).

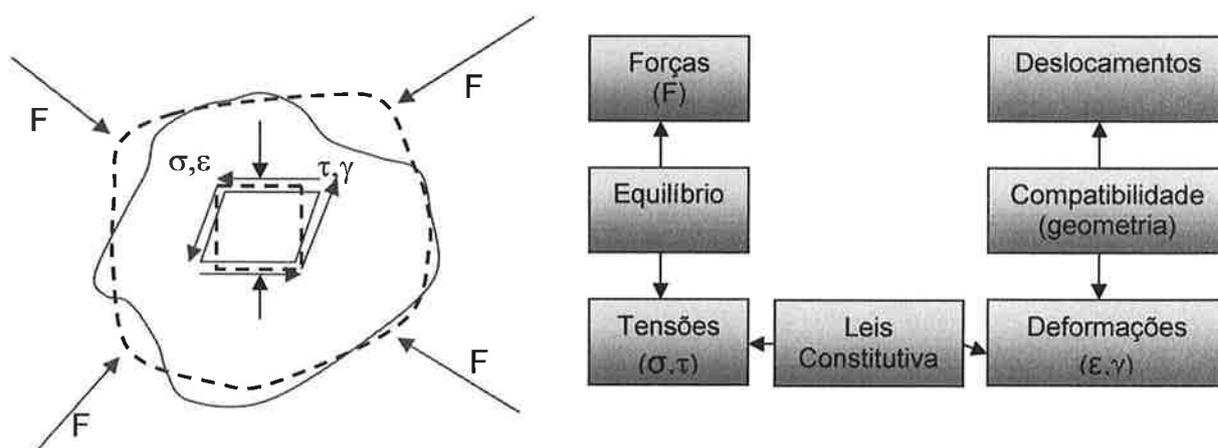


Figura 2.1 - Relação entre forças e deslocamentos, com tensões e deformações, num corpo e forma de descrevê-las.

A escolha da lei adequada a uma determinada situação depende do grau de precisão que se necessita na simulação do comportamento real do solo. O aumento no grau de precisão, por menor que seja, reflete-se numa maior complexidade das relações, isto é, num cálculo mais difícil, exigindo a determinação de um maior número de parâmetros. Este aumento no detalhe nem sempre é justificado pelo objetivo do trabalho.

Nos problemas estáticos abordados pela Mecânica dos Solos clássica, entre as questões fundamentais, encontram-se a avaliação do grau de segurança das fundações à ruptura e a determinação dos recalques dos solos. Classicamente, no domínio estático, caracteriza-se o comportamento dos solos sujeitos a deformações superiores a $10^{-3}\%$ (Ishihara, 1996).

No entanto, a caracterização dos solos no domínio das pequenas a médias deformações ($<10^{-4}\%$), tem-se provado ser o domínio com maior interesse para o dimensionamento de estruturas, até no designado domínio estático (Tatsuoka, 2000; Nagaraj e Muira, 2001).

Apesar do termo “propriedades dinâmicas dos solos” estar sendo “vulgarizado”, não são as propriedades que são dinâmicas, mas sim o estado do solo em movimento, provocado por solicitações cíclicas.

Neste capítulo serão abordados o comportamento dos solos sob solicitações dinâmicas, dando especial atenção à caracterização do solo no domínio das muito pequenas deformações, assim como à propagação de ondas elásticas, aos métodos que determinam os principais parâmetros usados para definir o comportamento dos solos neste domínio e às propriedades dos solos que as influenciam.

2.2 Comportamento do solo sob solicitações dinâmicas

O comportamento mecânico dos solos é controlado por fatores como o índice de vazios, a tensão de confinamento, o teor de umidade, etc. Existem outros fatores que contribuem para a resposta dos solos, como a história das tensões, os níveis de deformação cisalhante e a temperatura. No entanto, não são estes fatores os que diferenciam a resposta estática ou dinâmica do solo, mas sim os fatores que dependem e derivam do próprio fenômeno dinâmico, isto é, que derivam do impulso, da vibração ou da onda (Figura 2.2). A velocidade com que a carga é aplicada (efeito da velocidade) e o número de ciclos de carregamento (N) (efeito de repetição) são determinantes no comportamento dos solos sob solicitações dinâmicas (Ishihara, 1996).

As características de deformação de um solo depende muito da magnitude das deformações cisalhantes (γ) aplicadas (Ishihara, 1996). Para muito pequenas deformações, a deformação cisalhante exibida pela maioria dos solos é puramente elástica e recuperável (tabela 2.1). A modelagem do comportamento do solo nesta gama de deformações pode ser efetuada através da utilização de um modelo linear elástico, sendo que o módulo cisalhante é o parâmetro mais importante e se mantém aproximadamente constante. Ele é designado por módulo cisalhante máximo $G_{m\acute{a}x}$.

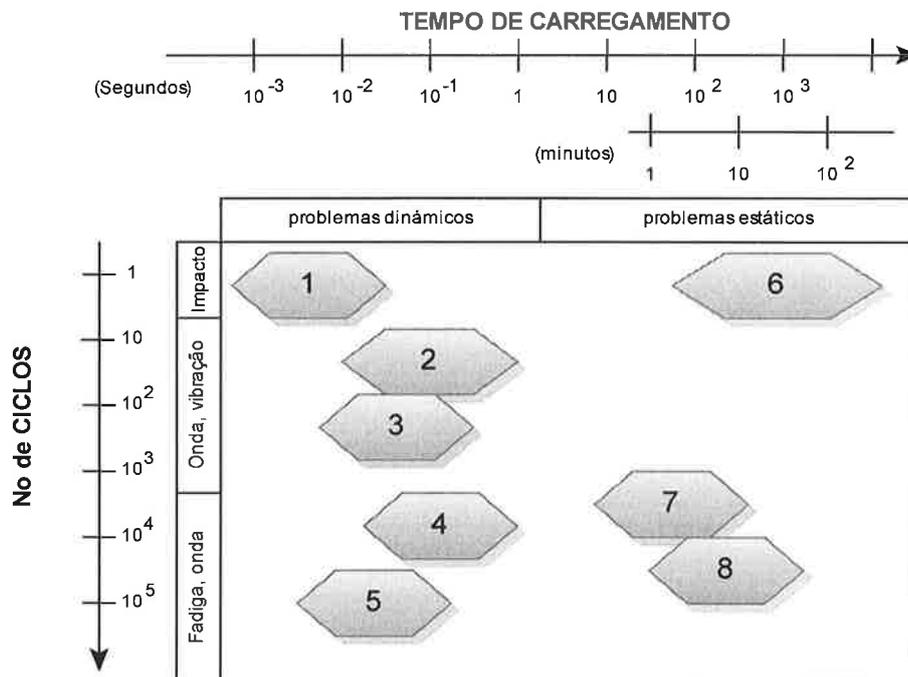


Figura 2.2 - Classificação do problema dinâmico: (1) bombas ou explosões, (2) sismos, (3) cravação de estacas, vibro-compactação e cilindros vibradores, (4) tráfego, (5) fundações de máquinas: compressores e geradores elétricos, (6) estruturas temporárias ou permanentes, (7) parques de estacionamento, (8) ondas do mar (Ishihara, 1996).

Na gama intermediária de deformações, o comportamento dos solos é elasto-plástico e produz deformações permanentes e irrecuperáveis (tabela 2.1). Neste intervalo, com o aumento da deformação ocorre uma diminuição do módulo de cisalhamento secante G_{sec} e dissipação de energia durante os ciclos de aplicação de carga. Esta dissipação energética é essencialmente de natureza "histerética", sendo o coeficiente de amortecimento ξ , usado para modelar a capacidade de absorção da energia do solo. Como os níveis de deformação ainda não são suficientemente elevados para provocar alterações nas propriedades dos solos, o módulo cisalhante e o amortecimento não sofrem grandes alterações com a aplicação progressiva dos

ciclos de carga. Este tipo de comportamento é designado por tipo histerético não degradado e pode ser representado por modelo baseado na teoria linear visco-elástico (método linear-equivalente). Os parâmetros dos solos representativos deste intervalo de deformações são os módulos de deformação cisalhante e o coeficiente de amortecimento, expressos em função da deformação.

O comportamento do solo, mesmo quando sujeito a pequenas deformações, pode ser fortemente não linear (Puzrin e Burland, 1998; Tatsuoka, 2000).

Quando as deformações impostas ao solo são elevadas, este tende à ruptura (tabela 2.1). Aqui as propriedades do solo alteram-se consideravelmente, não só com o aumento da deformação, mas também com a progressão dos ciclos. A maneira como o módulo cisalhante e o amortecimento variam com os ciclos, dependem da variação da tensão efetiva de confinamento durante a história irregular de aplicação das tensões. Assim, é necessário definir uma lei constitutiva em que as relações $\tau-\gamma$ possam ser especificadas em cada ciclo de carga, descarga e recarga, tendo em conta a variação das tensões dentro da massa de solo. Neste caso, para a análise da resposta de um solo é necessário usar um procedimento numérico que envolva a integração passo a passo no tempo.

Tabela 2.1 - Modelagem do comportamento dos solos para diferentes níveis de deformação (Ishihara, 1996).

Deformação cisalhante		10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	
		pequena		média		grande	ruptura	
Fenómeno		Propagação de ondas, vibração			Trincas, recalques diferenciais		Escorregamentos, compactação, liquefação	
Características mecânicas	Elástico	—————→						
	Elasto-plástico		—————→					
	Ruptura						—————→	
Efeito da repetição da carga					—————→			
Efeito da velocidade da carga					—————→			
Constantes		Módulo de cisalhamento, coeficiente de poisson, amortecimento					Ângulo de atrito interno, coesão	
Modelo		Linear elástico		Visco-elástico			Elasto-plástico	
Método de análise		Linear		Linear equivalente			Integração passo a passo	

Os limites de deformação, a partir dos quais se dá uma alteração no comportamento do solo, foram estudados em detalhe por Vucetic (1994), com base em vários

trabalhos efetuados por outros autores, com diferentes tipos de solos e sob várias condições de ensaio:

- A deformação linear limite γ_t^e , é o valor abaixo do qual o solo tem um comportamento linear elástico;
- A deformação limite sem variação volumétrica, γ_t^v , corresponde ao valor limite acima do qual ocorre uma alteração permanente da microestrutura do solo e da sua rigidez. Em solos completamente saturados e em condições não drenadas, desenvolve-se uma acumulação de pressão intersticial. Em solos secos ou parcialmente saturados e condições drenadas, ocorre uma alteração permanente de volume.

Segundo Vucetic (1994), estes valores dependem essencialmente da natureza do solo, sendo correlacionáveis com o índice de plasticidade IP. Ambos os limites aumentam com o valor de IP, apresentando curvas médias paralelas entre si, separadas de um ciclo logarítmico e meio (Figura 2.3).

No entanto, esse autor definiu o limite γ_t^e de forma arbitrária, correspondendo ao valor para o qual $G/G_0=0,99$.

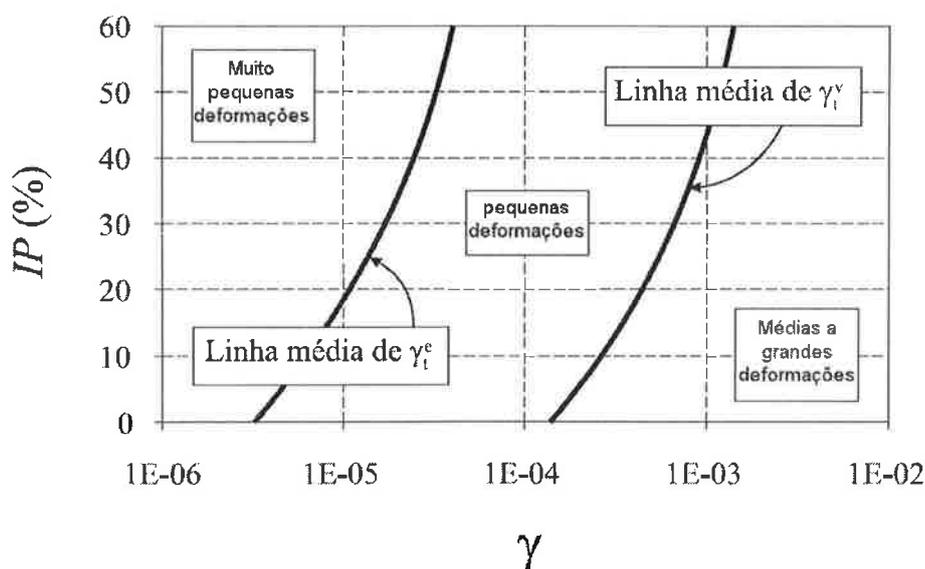


Figura 2.3 - Valores de γ_t^e e γ_t^v em função do índice de plasticidade (Vucetic, 1994).

Na Figura 2.4 são apresentadas as curvas de G/G_o e ξ em função da deformação cisalhante para materiais com diferentes valores de IP, em intervalos amplos de razão de sobreadensamento (OCR) e no primeiro ciclo de carregamento. Nesta figura é possível observar que a gama de valores de γ_t^v aumenta com IP, particularmente na curva de redução de G . Para Vucetic (1994), independentemente do tipo de solo, dá-se sempre uma redução do módulo da mesma quantidade ($\approx 35\%$) antes de ser atingido γ_t^v (isto é, para $G/G_o \approx 0.65$). Segundo este autor, o valor de γ_t^v , além de aumentar com o IP, aumenta com a diminuição da dimensão das partículas do solo e será maior em solos não saturados do que em solos secos ou completamente saturados.

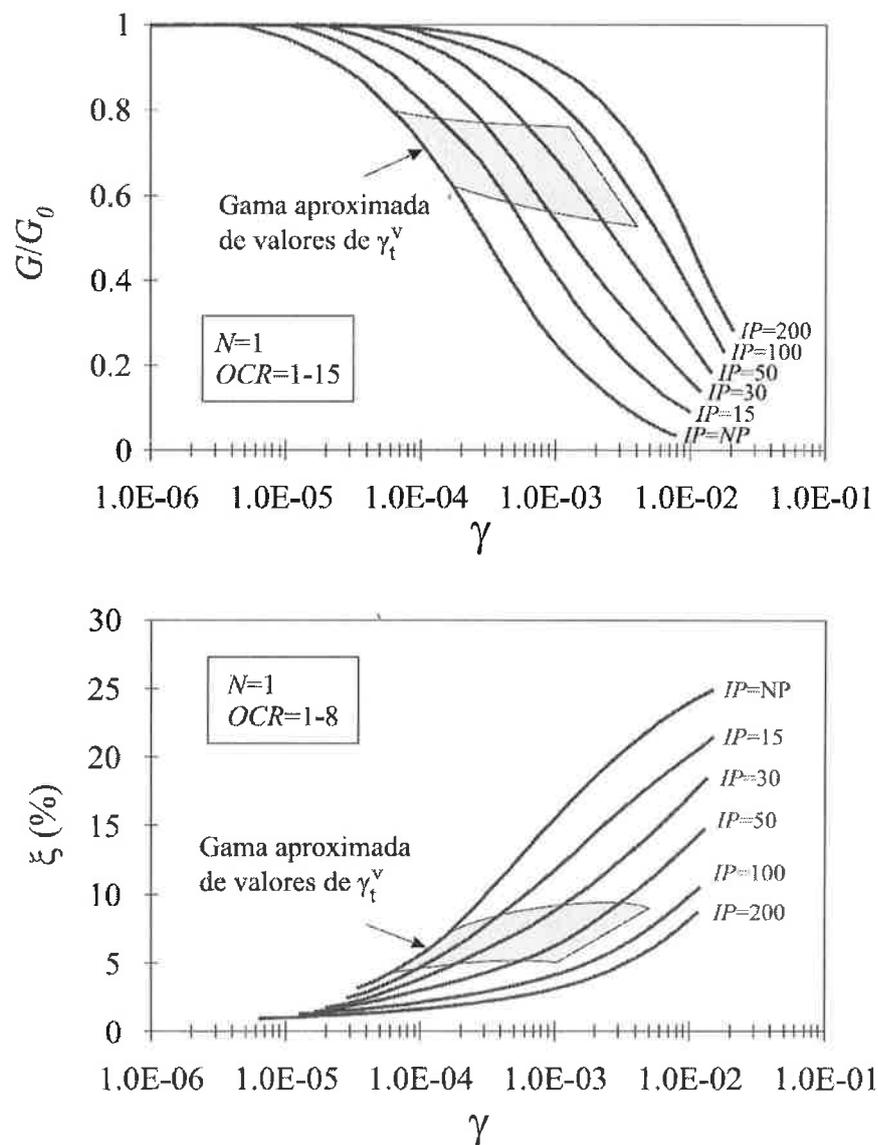


Figura 2.4 - Relação entre γ_t^v e as curva de G/G_o e ξ em função da deformação cisalhante e do IP para solos saturados numa ação de cisalhamento não drenado (Vucetic, 1994).

O comportamento dos solos sob ações de cisalhamento cíclico, segundo o mesmo autor, pode ser sistematizado usando a Figura 2.5. Aqui são apresentadas as curvas simplificadas de $G/G_0-\gamma$ e $\xi-\gamma$, evidenciando os diferentes tipos de comportamentos limitados por γ_t^e e γ_t^v . Estas linhas separam diferentes níveis de deformação, cuja nomenclatura, proposta por Vucetic (1994), é apresentada nas Figuras 2.3 e 2.5. No entanto, existem outras nomenclaturas como a proposta por Ishihara (1996) que pode ser observada na tabela 2.1.

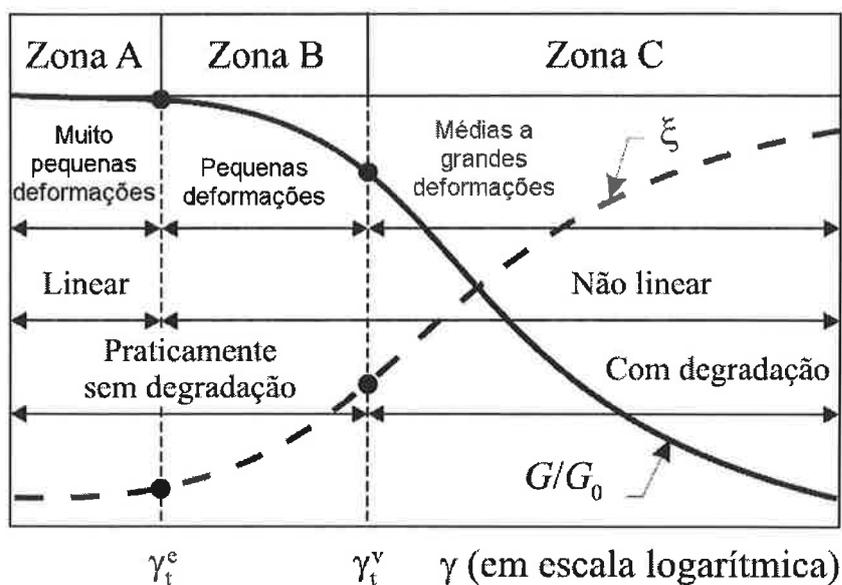


Figura 2.5 - Comportamento de solos saturados em ações de cisalhamento cíclicos (Vucetic, 1994).

2.3 Comportamento Histerético do solo

O comportamento de um solo sujeito a solicitações cíclicas pode ser aproximado a um comportamento histerético, isto é, que não depende da frequência da excitação (Hardin e Drnevich, 1972; Kramer, 1996; Ishihara, 1996).

A laçada de histerese (Figura 2.6a), que representa o comportamento do solo, pode ser descrita pelo percurso da curva ou por parâmetros que descrevam a sua forma.

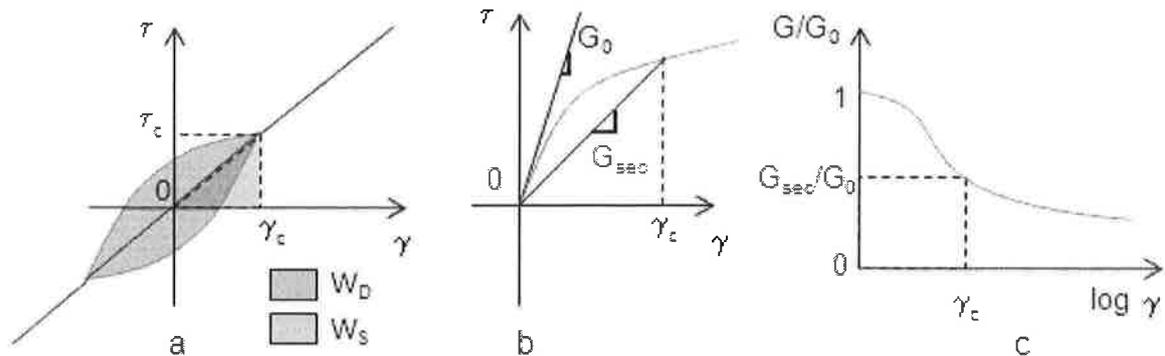


Figura 2.6 - (a) Comportamento não linear histerético (τ - γ) de um solo submetido a uma solitação cíclica, (b) Curva básica, (c) Curva de redução do módulo (Kramer, 1996 e Ishihara, 1996).

A declividade da curva básica depende da rigidez do solo e pode ser descrita em qualquer ponto da solitação pelo módulo de cisalhamento tangente G_{tan} . Este módulo varia ao longo de todo o ciclo de carga, mas o seu valor médio corresponde à inclinação “geral” da curva básica (*skeleton curve* ou *backbone curve* em inglês) e é representado pelo módulo de cisalhamento secante (G_{sec} ou simplesmente G):

$$G = \tau_c / \gamma_c \quad (2.1)$$

Onde τ_c e γ_c são, respectivamente, as amplitudes da tensão de cisalhamento e da deformação num determinado ponto da curva básica (Figura 2.6b).

A curva básica tem sua máxima inclinação na origem (ponto O) e esta inclinação define o módulo de cisalhamento máximo $G_{m\acute{a}x}$.

A curva básica (Figura 2.6b), construída pelos pontos correspondentes às extremidades das curvas histeréticas para diferentes níveis de deformação, representa a evolução de G em função da deformação. Esta evolução é também freqüentemente representada pela curva de redução do módulo (Figura 2.6c), em que o valor de G é normalizado relativamente ao seu valor máximo (G/G_0).

Além da declividade, a curva histerética é também descrita pela sua área, que é usada como medida da dissipação da energia e pode ser descrita pelo coeficiente de amortecimento (ξ):

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_S} \quad (2.2)$$

Onde W_D é a área da laçada de histerese (energia dissipada), W_S a energia de deformação elástica associada à máxima deformação (Figura 2.6a).

Apesar da não existência de dissipação de energia histerética abaixo de γ_c^o , na teoria, evidências experimentais indicam que mesmo para níveis de deformação de energia muito baixos, o valor de ξ nunca é nulo e pode desempenhar um papel importante no comportamento dos solos perante sismos (Kramer, 1996; Ishihara, 1996).

Quanto maior o nível de deformação aplicado maior é a área da curva básica que representa o comportamento do solo, isto é, o amortecimento aumenta como o aumento dos níveis de deformação. É comum representar a evolução de ξ em função da deformação cisalhante em curvas como as apresentadas nas Figuras 2.4 e 2.5.

Através da análise da curva básica e da laçada de histerese pode-se verificar se o comportamento do solo é linear ou não linear. Caso o solo apresente um comportamento linear, a curva básica é uma linha reta e a laçada de histerese apresenta extremidades arredondadas. O caso apresentado na Figura 2.6 representa um exemplo de não-linearidade.

2.4 Propagação de ondas

Os fundamentos teóricos da propagação de ondas sísmicas em um meio sólido e, particularmente, em solos são apresentados a seguir. Também são apresentadas as leis matemáticas que regem a propagação das ondas. Além disso, são descritos os diferentes tipos de ondas habitualmente utilizadas em geofísica. Muitos livros apresentam a teoria de propagação de ondas, podendo ser consultados para ampliar tais conceitos (Aki e Richard, 1980; Richard et al., 1970; Shearer, 1999).

2.4.1 A lei de Hooke

A propagação das ondas sísmicas depende das tensões e das deformações que caracterizam um material sólido. Estas tensões e deformações estão relacionadas por uma lei constitutiva conhecida como lei de Hooke, descrevendo a relação tensão deformação para um material elástico.

Considerando-se um cubo elementar, mostrado na Figura 2.7, sobre um sistema de coordenadas cartesianas (x,y,z) , o deslocamento de um ponto P neste sistema, com o efeito de uma deformação, é determinado por $u = (t,v,w)$, onde t,v e w são os deslocamentos nas direções x,y e z , respectivamente.

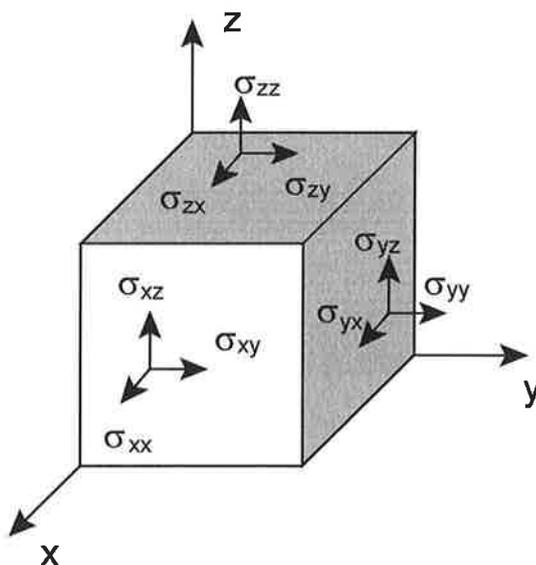


Figura 2.7 - Cubo elementar que atua com as tensões σ_{ij} .

O tensor de tensões define as tensões sofridas pelas faces do cubo, sendo constituído por 9 elementos σ_{ij} , onde i indica a orientação da face do cubo, perpendicular ao eixo i ($i=x,y,z$) e j corresponde ao eixo onde a tensão é projetada ($j=x,y,z$).

O tensor de deformações está constituído por dois elementos ε_{ij} entre os quais existem deformações em compressão ε_{ii} e deformações de cisalhamento ε_{ij} ($i \neq j$). As deformações estão relacionadas com os deslocamentos através da relação:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial_j} + \frac{\partial u_j}{\partial_i} \right] = \varepsilon_{ji} \quad (2.3)$$

Onde u_i representa o deslocamento do u na direção i

Para um material perfeitamente elástico o tensor de tensões e o tensor de deformações estão relacionados por:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad (2.4)$$

C_{ijkl} é um tensor de constantes elásticas de quarta ordem com 81 componentes. Considerando a simetria do tensor de tensões, tensor de deformações e a existência de um potencial elástico, o número de constantes independentes, que define o tensor C_{ijkl} se reduz de 81 a 21.

Se a hipótese de completa isotropia é assumida, o número de constantes independentes é reduzido a 2 e a equação 2.4, anterior, pode ser reescrita como:

A lei de Hooke, para um material linear elástico isotrópico, é definida (substituindo a equação 2.3 em 2.4) como:

$$\sigma_{ij} = \dot{\lambda} \delta_{ij} \left[\sum_{k=x,y,z} \frac{\partial u_k}{\partial_k} \right] + 2\mu \varepsilon_{ij} = \dot{\lambda} \delta_{ij} \left[\sum_{k=x,y,z} \frac{\partial u_k}{\partial_k} \right] + \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial_j} + \frac{\partial u_j}{\partial_i} \right] \quad (2.5)$$

Onde δ_{ij} é o delta de Kronecker e as duas constantes elásticas são $\dot{\lambda}$ e μ (conhecidas como parâmetros de Lamé).

As equações seguintes mostram as relações entre os parâmetros do solo mais usados:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.6)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2.7)$$

$$\dot{\lambda} = K - \frac{2}{3}G = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2.8)$$

Onde:

E é o módulo de Young,

ν é o coeficiente de Poisson,

K é o módulo Volumétrico e,

G é o módulo de cisalhamento

2.4.2 Ondas

Uma onda é definida como uma perturbação que se propaga por um meio carregando energia (Doyle, 1995). Muitas técnicas para caracterização de solos em níveis de deformações muito pequenas são baseadas em medições de movimento de partículas associadas à propagação de ondas. Isto é possível devido à forte ligação existente entre as características de propagação de onda e os parâmetros mecânicos do material.

2.4.3 Equação da onda em um meio elástico linear

Em muito pequenas deformações onde o solo não mostre qualquer degradação da rigidez com o nível de deformação, o modelo elástico linear é considerado como uma boa aproximação destes comportamentos. Além disso, a simplicidade do modelo elástico pode ser aproveitada para esclarecer a relação entre propagação de onda e rigidez do meio.

Durante a propagação de uma frente de ondas no solo, as partículas sofrem tensões, originando deformações elásticas de baixas amplitudes. A teoria da

elasticidade implica um equilíbrio estático entre as tensões, as deformações e os deslocamentos. Embora a propagação de uma onda sísmica seja um fenômeno dinâmico, a variável tempo deve ser considerada.

A equação de equilíbrio dinâmico para um meio elástico, homogêneo, isotrópico, na direção do eixo x , é descrita como:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + f_x \quad (2.9)$$

Onde f_x é a força de corpo agindo segundo o eixo x . A equação 2.9 é chamada de equação de movimento segundo a direção do eixo x . Esta expressão pode ser definida da mesma maneira na direção y e z . Substituindo-se 2.5 em 2.9, uma relação é determinada de forma a intervir nos gradientes e nos parâmetros de Lamé. Abaixo é apresentada numa forma vetorial, sendo:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot u) + \mu \nabla^2 u + f_b \quad (2.10)$$

Onde ∇ representa o gradiente. A equação 2.10 representa a equação da onda para um meio homogêneo, isotrópico e elástico. Esta equação é a base em sísmica, pois, ela governa a propagação de ondas em solos e a sua resolução determina as características das ondas que se propagam em um meio.

2.4.4 Ondas de corpo

O teorema de decomposição de Helmholtz expressa o deslocamento u em termos de potencial:

$$u = \overline{\text{grad}} \varphi + \overline{\text{rot}} \psi \quad (2.11)$$

Estes potenciais definem duas soluções da equação 2.10, que corresponde às ondas de corpo que se propagam em um meio infinito, homogêneo e isotrópico:

- φ é o potencial de dilatação. Ele não gera deslocamentos por cisalhamento. Eles atuam como ondas de compressão V_p (também conhecidas como ondas longitudinais ou primárias, pois elas constituem os primeiros dados sísmicos a serem registrados). O deslocamento das partículas é paralelo à direção da propagação, conforme mostra a Figura 2.8. A velocidade de propagação V_p é dada por:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.12)$$

- ψ é o potencial de distorção. Ela não gera mudanças de volume. Eles atuam como ondas de cisalhamento V_s (também nomeadas secundárias, pois elas constituem os segundos dados sísmicos a serem registrados). A velocidade de propagação V_s é dada por:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.13)$$

O deslocamento das partículas é perpendicular à direção da propagação da onda (Figura 2.8). As ondas de cisalhamento V_{SV} se mobilizam num plano vertical (ondas com polaridade vertical) e as ondas de cisalhamento V_{SH} se mobilizam num plano horizontal (ondas com polaridade horizontal).

Num meio líquido somente a onda V_p pode se propagar porque os líquidos não suportam tensões de cisalhamento.

Outros parâmetros que caracterizam uma onda são:

- O comprimento de onda λ é a distância medida ao longo da direção de propagação entre dois pontos de igual fase e está relacionada com o número de onda por: $\lambda = 2\pi/k$.

- O número de onda corresponde a: $\kappa = 2\pi/\lambda$. A frequência angular ω é relacionada com o período T e a frequência f_0 pela relação: $\omega = 2\pi f_0$ ou $\omega = 2\pi/T$.

A razão entre as duas velocidades de onda pode ser expressa unicamente como uma função da relação de Poisson:

$$\frac{V_S}{V_P} = \sqrt{\frac{\mu}{\lambda + 2\mu}} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad (2.14)$$

Então, para um meio real $0 \leq \nu \leq 0,5$, as ondas longitudinais propagam-se bem mais rápido que as ondas secundárias ou de cisalhamento ($V_P > V_S$) justificando os nomes de ondas primárias e secundárias.

As ondas citadas acima são freqüentemente chamadas ondas de corpo, porque elas percorrem no interior do meio. Em contraste com as ondas superficiais, que percorrem em uma zona muito próxima da superfície livre do semi-espaco. Estas são essencialmente de dois tipos diferentes: Ondas Rayleigh (que serão tratadas no Capítulo 3) e Ondas Love. A representação do movimento da partícula associada à propagação das ondas de corpo e superfície é mostrada na Figura 2.8.

A velocidade de propagação de ondas V_S e V_P se relacionam com os parâmetros elásticos e a densidade dos materiais da seguinte maneira:

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.15)$$

$$V_P = \sqrt{\frac{E \cdot (1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{K + (4/3)G}{\rho}} \quad (2.16)$$

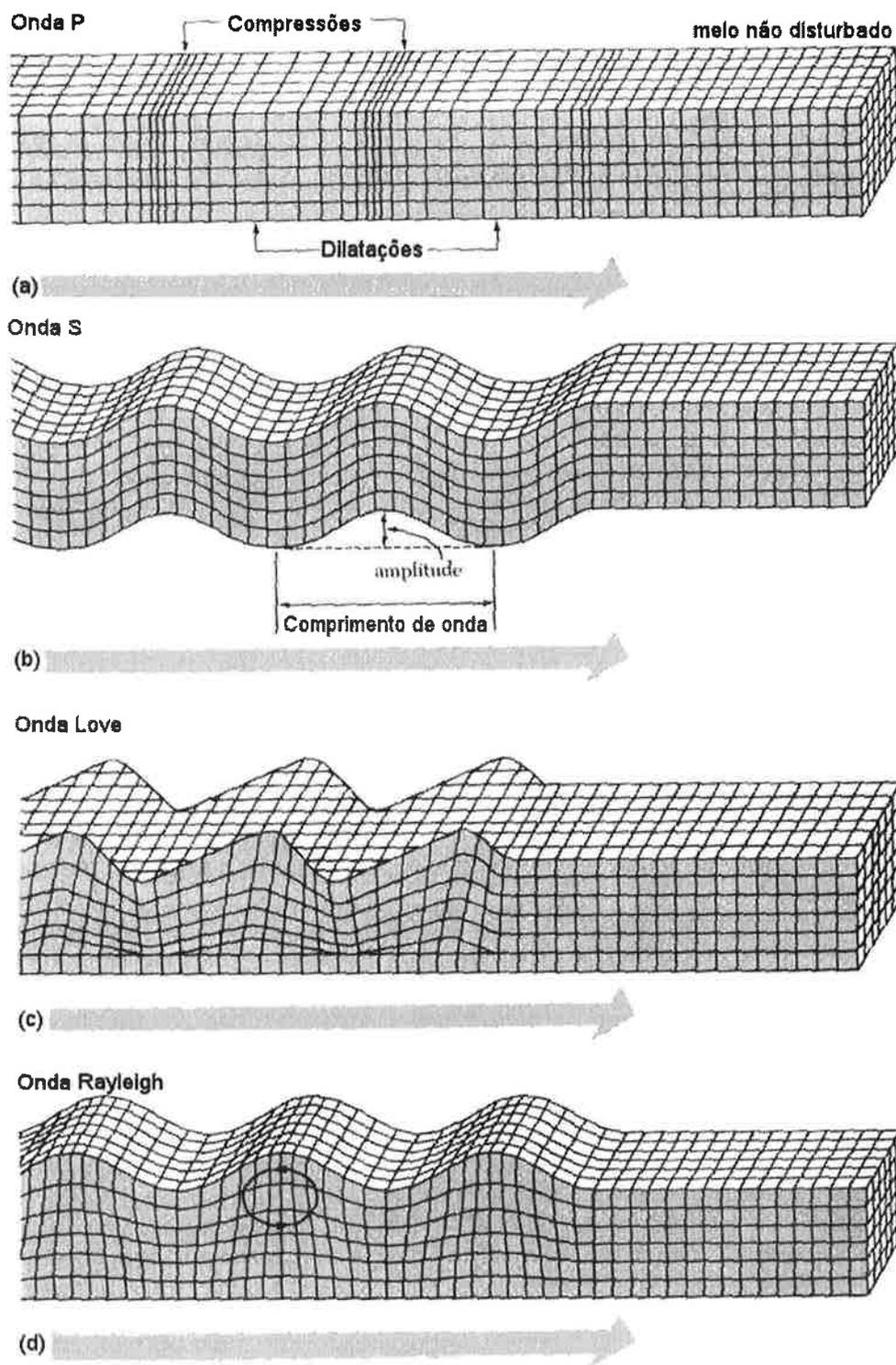


Figura 2.8 - Modos de propagação da onda de corpo e superfície (movimento da partícula) associados à propagação de ondas de corpo e superfície (Bolt, 1976).

CAPÍTULO 3 - ONDAS RAYLEIGH

3.1 Introdução

A propagação de ondas num meio pode ser dividida em duas categorias principais: ondas de corpo e ondas superficiais. As ondas superficiais são geradas somente pelo contato das ondas de corpo na presença de uma superfície livre e podem ser essencialmente de dois tipos: ondas Rayleigh e ondas Love. As ondas Rayleigh são resultantes da interação das ondas V_p e V_{SV} (velocidade de onda de cisalhamento com polaridade vertical) e sempre são geradas quando existe uma superfície livre em um corpo contínuo. Por sua vez, as ondas Love são dependentes, unicamente, das ondas V_{SH} (ondas de cisalhamento com polarização horizontal). Essas somente existem quando uma camada superficial de baixa velocidade está sobre um substrato de velocidade superior, formando-se devido ao aprisionamento de energia e a múltiplas reflexões, isto é, as ondas Love não existem em meios homogêneos.

Neste capítulo serão apresentadas algumas propriedades específicas das ondas Rayleigh, especialmente com propósitos de caracterização de solos, deixando os tratamentos mais abrangentes às referências específicas.

3.2 Propagação num semi-espaço homogêneo

Caso seja imposta uma condição de contorno para a equação geral de propagação da onda em um meio homogêneo, isotrópico e elástico linear, a solução para as ondas de superfície Rayleigh pode ser deduzida da interação entre as ondas (V_p e V_{SV}) na superfície livre. Tendo em conta a lei de Hooke, a equação básica do movimento é descrita pela equação de Navier, que em notação vetorial é expressa por:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \left(\dot{\lambda} + \mu \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}_b \quad (3.1)$$

Onde: u é o vetor deslocamento das partículas;
 ρ é a densidade do meio;
 λ e μ são as constantes de Lamé;
 t é o tempo, e;
 f_b é a força de corpo.

Desprezando a última parcela, a solução para esta equação pode ser obtida recorrendo-se à decomposição de Helmholtz (Richart et. al., 1970).

Impondo-se uma condição de contorno de tensão igual a zero na superfície livre, pode-se determinar a solução. Descartando-se a solução que dá amplitude infinita em uma profundidade infinita, a solução para as ondas Rayleigh somente pode ser obtida se a seguinte equação é satisfeita pela velocidade de propagação das ondas de superfície:

$$L^6 - 8L^4 + (24 - 16\alpha^2)L^2 + 16(\alpha^2 - 1) = 0 \quad (3.2)$$

Onde L e α são as seguintes razões entre velocidades da onda (V_p), onda (V_s) e onda Rayleigh (V_r): $L = V_r/V_s$, $\alpha = V_s/V_p$

Sendo esta uma equação cúbica em L^2 , as suas raízes são funções do coeficiente de Poisson ν , uma vez que:

$$\alpha^2 = (1 - 2\nu)/2(1 - \nu) \quad (3.3)$$

Pode-se mostrar (Viktorov, 1967) que para um meio real ($0 < \nu < 0,5$) existe somente uma solução real aceitável. A relação entre velocidade de propagação de diferentes ondas como função do coeficiente de Poisson está mostrada na Figura 3.1.

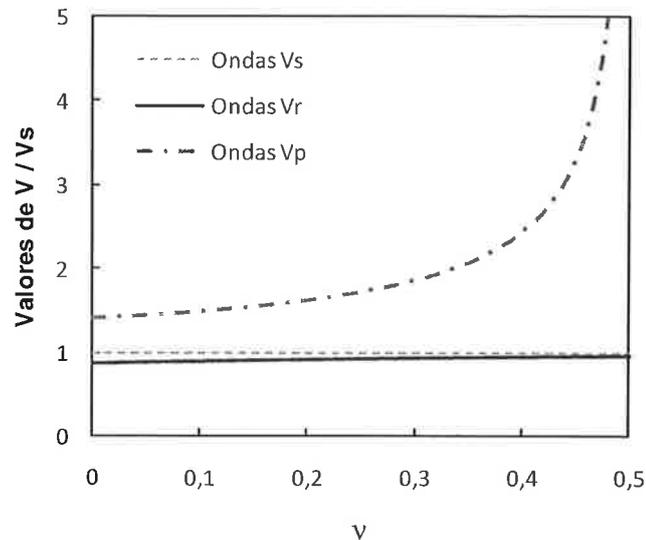


Figura 3.1 - Relação entre o coeficiente de Poisson (ν) e a velocidade de propagação de onda de compressão (V_p), cisalhamento (V_s) e Rayleigh (V_r) em um semi-espaço homogêneo (Richart et al., 1970).

Uma solução aproximada da equação 3.2 foi sugerida por Viktorov, 1967:

$$L = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \quad (3.4)$$

Pela Figura 3.1 fica claro que a diferença entre as velocidades das ondas de cisalhamento V_s e a velocidade das ondas Rayleigh V_r é pequena e limitada, sendo as velocidades das ondas Rayleigh sempre um pouco menores que das ondas V_s .

A razão entre as duas velocidades está sempre compreendida no seguinte intervalo: $0,87 < (V_r/V_s) < 0,96$.

Não existe nenhuma dependência da velocidade das ondas Rayleigh com a frequência, uma vez que no meio homogêneo elástico linear é caracterizado por um único valor de velocidade das ondas Rayleigh. A velocidade de ondas Rayleigh depende de V_s e do coeficiente de Poisson, mas essencialmente com V_s ($V_r \cong 0,9 \cdot V_s$) sendo pouco sensível ao coeficiente de Poisson.

Uma vez que a solução foi obtida utilizando-se a decomposição de Helmholtz, a onda de superfície pode ser vista como a decomposição de duas componentes: uma

longitudinal e outra transversal. Elas se propagam ao longo da superfície com a mesma velocidade, mas possuem diferentes leis exponenciais de atenuação com a profundidade, descrevendo uma elipse retrógrada na superfície. Sua característica depende do comprimento da onda e a amplitude destes movimentos decai exponencialmente com a profundidade.

Em 1904 Lamb (Figura 3.2) demonstrou que uma vibração pontual de pequena duração na superfície de um semi-espaco elástico produz ondas Rayleigh, além de ondas longitudinais e transversais. Posteriormente, Miller e Pursey (1955) concluíram que a distribuição de energia produzida no terreno pela vibração vertical de uma pequena placa circular rígida, colocada na superfície de um semi-espaco elástico homogêneo e isotrópico (Figura 3.3), era de:

- 67% da energia se propaga em forma de ondas Rayleigh,
- 26% em forma de ondas V_S ,
- 7% em forma de ondas V_P .

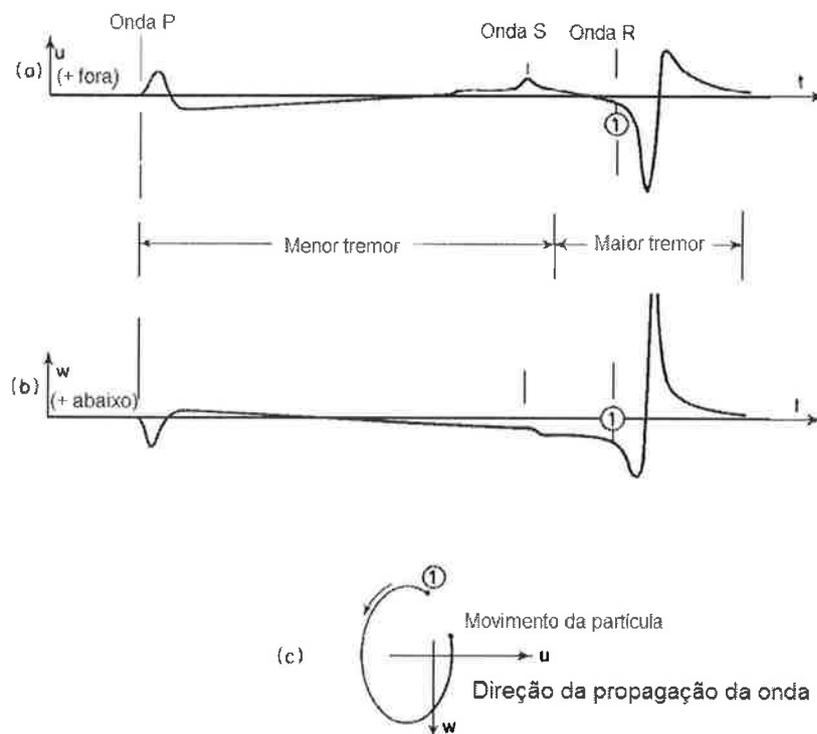


Figura 3.2 - Movimento de um ponto na superfície do semi-espaco devido a um impulso de curta duração na superfície produzido no terreno (Lamb, 1904) (a) movimento radial horizontal; (b) movimento vertical; (c) caminho da partícula das ondas Rayleigh.

Ewing et al. (1957) demonstraram que na superfície de um semi-espço, a amplitude dos três tipos de ondas, originados por uma carga pontual aplicada na superfície, se atenua com a distância à fonte (r), segundo as relações:

$$\frac{1}{r^n} \text{ com: } \quad n = 2, \text{ para ondas de compressão e cisalhamento e;}$$

$$n = 1/2, \text{ para ondas Rayleigh.}$$

O fato de $2/3$ da energia produzida por uma vibração vertical de uma pequena placa circular rígida, colocada na superfície de um semi-espço, se propague no terreno em forma de ondas Rayleigh e estas ondas superficiais se atenuam com a distância à fonte vibratória muito mais lentamente que as ondas internas, indicam que as ondas V_r são de máximo interesse para o tipo de ensaio não destrutivo. Além disso, deve-se assinalar um aspecto prático, muito interessante nestes tipos de ondas superficiais: trata-se da profundidade do bulbo da energia das ondas V_r . Como foi comentado anteriormente, segundo mostra a Figura 3.4, esta profundidade é aproximadamente um comprimento de onda.

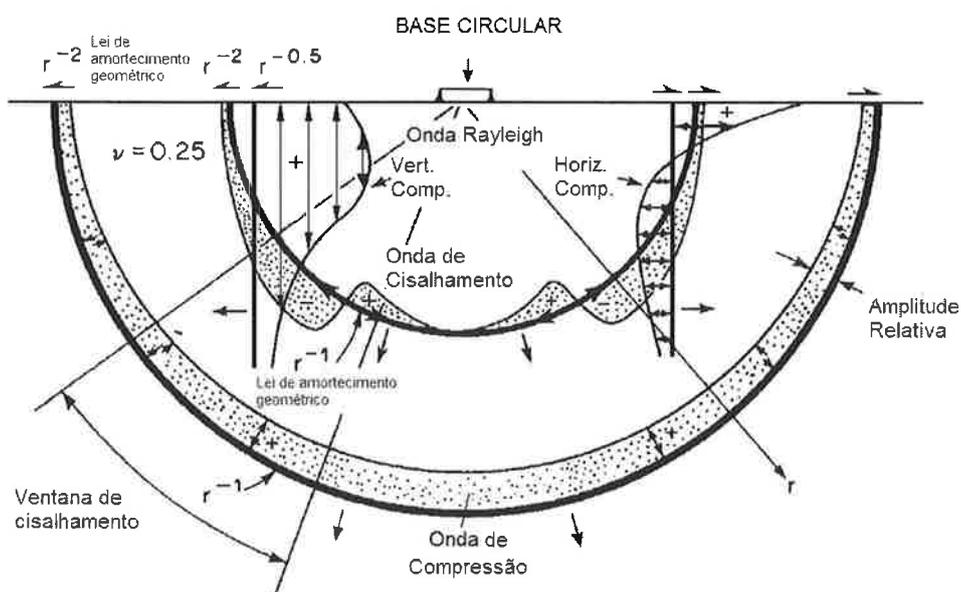


Figura 3.3 - Distribuição dos deslocamentos e de energia produzida no terreno pela vibração vertical de uma pequena placa circular rígida, colocada na superfície de um semi-espço (Woods, 1968).

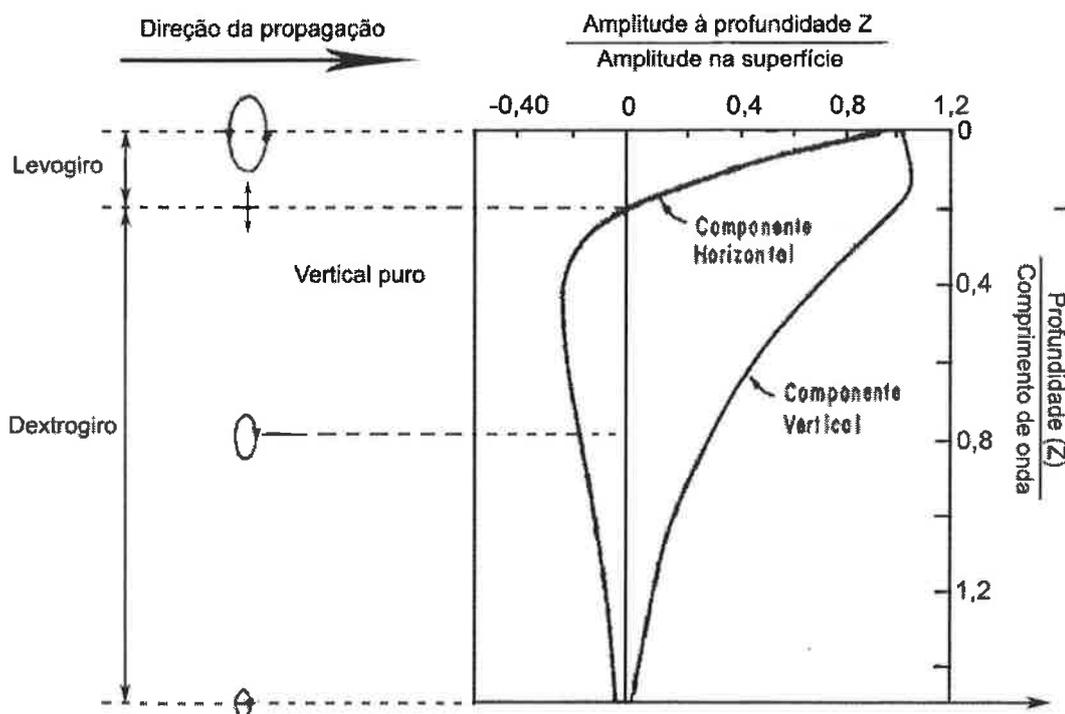


Figura 3.4 - Distribuição da amplitude e do movimento da partícula em função da profundidade das ondas Rayleigh para um semi-espaço com um coeficiente de Poisson de 0.25 (Richart et al., 1970).

Assimilar o solo a um semi-espaço elástico é, muitas vezes, uma representação somente aproximada. Na realidade, o terreno pode estar formado por camadas de diversa natureza, uma melhora na sua aproximação consiste em considerar o solo como um meio elástico estratificado (verticalmente heterogêneo).

3.3 Propagação num meio verticalmente heterogêneo

Para um meio anisotrópico e heterogêneo, a formulação matemática das ondas Rayleigh torna-se muito complexa em alguns casos inexistente. No entanto, uma simplificação é estudar o caso de um meio estratificado, horizontalmente homogêneos e isotrópicos, com a superfície livre, paralela ao plano de isotropia, Figura 3.5. Neste caso, a solução das ondas Rayleigh é análoga à solução de Lamb.

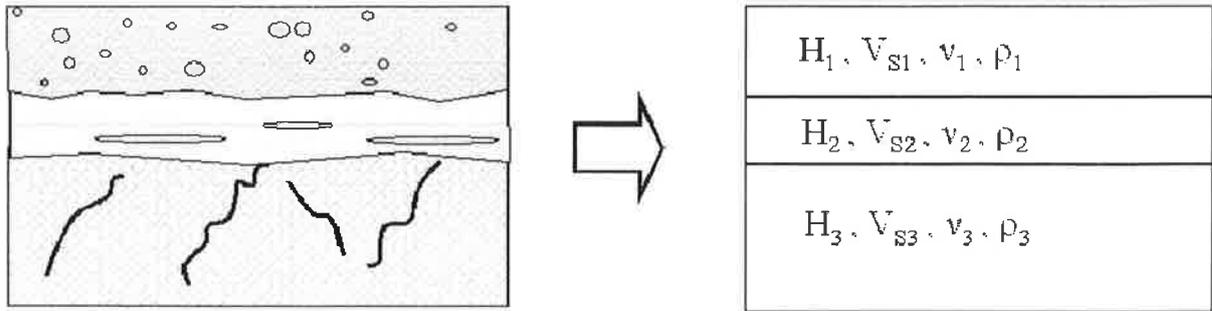


Figura 3.5 - Modelo com camadas isotrópicas e homogêneas, com espessura, parâmetros elásticos e densidades constantes (Strobbia, 2003).

Quando as propriedades mecânicas do meio se dá apenas na direção z (profundidade), a expressão da equação de Navier para meios verticalmente heterogêneos, na ausência de forças de corpo, é:

$$\mu \nabla^2 \vec{u} + (\dot{\lambda} + \mu) \nabla (\nabla \cdot \vec{u}) + e_z \frac{d\dot{\lambda}}{dz} \nabla \cdot \vec{u} + \frac{d\mu}{dz} \left(e_z \times \nabla \times \vec{u} + 2 \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} \right) = \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \quad (3.5)$$

Onde e_z é a base do vetor na direção perpendicular à superfície livre.

Para solucionar a equação 3.5 o deslocamento da partícula $u(x, t)$ para ondas Rayleigh harmônicas é assumido como:

$$u : \left\{ u_1 = r_1(z, k, \omega) \cdot e^{i(\omega t - kr)}; \quad u_2 = 0; \quad u_3 = i \cdot r_2(z, k, \omega) \cdot e^{i(\omega t - kr)} \right\} \quad (3.6)$$

A equação 3.6 representa uma onda plana na direção x ($u_2=0$). Nesta equação o termo $k=k(\omega)$ denota o número de onda que, em geral, é uma função da frequência de excitação ω . O termo r é usado para indicar a direção da propagação. A Figura 3.6 ilustra a convenção de signo assumido para os eixos coordenados.

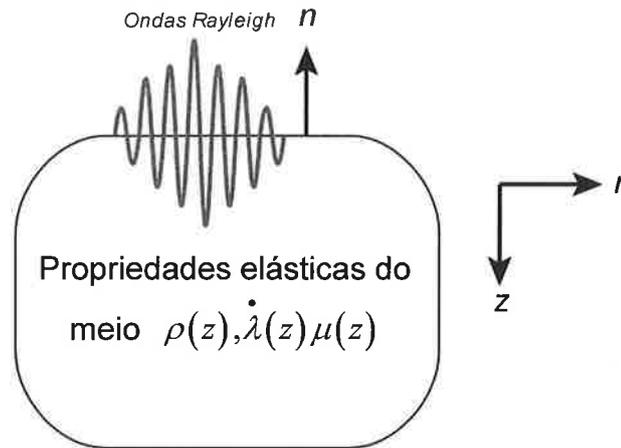


Figura 3.6 – Ondas Rayleigh em meios verticalmente heterogêneos (Lai e Rix, 1998).

Para representar as ondas Rayleigh, a equação 3.6 deve possuir apropriadas condições de contorno: nenhuma tensão na superfície livre do semi-espço e nenhuma tensão de deslocamento no infinito:

$$\begin{aligned} \sigma(r,z) \cdot n &= 0 \text{ em } z=0 \\ u(r,z) &\rightarrow 0, \sigma(r,z) \cdot n \rightarrow 0 \text{ quando } z \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (3.7)$$

Onde o símbolo $\sigma(r,z)$ denota o tensor de tensões de Cauchy e n é um vetor unitário.

Num meio verticalmente heterogêneo, onde as propriedades do material (λ, μ e ρ) apresentam variações (variam de camada para camada), a tensão e o deslocamento devem ser contínuos em cada interface das camadas:

$$\begin{aligned} u(r,z^+) &= u(r,z^-) \\ \sigma(r,z^+) \cdot n &= \sigma(r,z^-) \cdot n \end{aligned} \quad (3.8)$$

Se a equação 3.6 é substituída na equação de Navier (equação 3.5) o resultado, expresso na forma matricial resulta em (Aki e Richard, 1980):

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & k(\omega) & \mu^{-1}(z) & 0 \\ -k(\omega) \dot{\lambda}(z) \left[\dot{\lambda}(z) + 2\mu(z) \right]^{-1} & 0 & 0 & \left[\dot{\lambda}(z) + 2\mu(z) \right]^{-1} \\ [k(\omega)]^2 \zeta(z) - \omega^2 \rho(z) & 0 & 0 & -k(\omega) \dot{\lambda}(z) \left[\dot{\lambda}(z) + 2\mu(z) \right]^{-1} \\ 0 & -\omega^2 \rho(z) & -k(\omega) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Onde: $r_3(z, k, \omega) = G \left(\frac{dr_1}{dz} - kr_2 \right)$, e $r_4(z, k, \omega) = \left[\left(\dot{\lambda} + 2\mu \right) \frac{dr_2}{dz} + k \dot{\lambda} r_1 \right]$. A função $\zeta(z)$

depende dos parâmetros de Lamé, dado por $\zeta(z) = 4\mu \frac{\left(\dot{\lambda} + \mu \right)}{\left(\dot{\lambda} + 2\mu \right)}$

A motivação para introduzir as funções $r_3(z, k, \omega)$ e $r_4(z, k, \omega)$ fornece o seguinte resultado:

$$\begin{aligned} \tau_{zr} &= r_3(z, k, \omega) \cdot e^{i(\omega t - kr)} \\ \tau_{zz} &= i \cdot r_4(z, k, \omega) \cdot e^{i(\omega t - kr)} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Definindo o vetor $f(z) = [r_1, r_2, r_3, r_4]^T$ e a matriz $A(z)$, de dimensão 4×4 , com os elementos da equação 3.9, que são funções de $\dot{\lambda}(z), \mu(z), k, \omega$, esta equação pode ser reescrita de forma simplificada como:

$$\frac{df(z)}{dz} = A(z) \cdot f(z) \quad (3.11)$$

A equação 3.11 define um problema de autovalor diferencial linear com autofunção de deslocamentos $r_1(z, k, \omega)$ e $r_2(z, k, \omega)$ e autofunção de tensões $r_3(z, k, \omega)$ e $r_4(z, k, \omega)$. As condições de contorno associadas ao autoproblema são facilmente derivadas das equações 3.7 e 3.10:

$$\begin{aligned} r_3(z, k, \omega) = 0, & \quad r_4(z, k, \omega) = 0 & \text{em} & \quad z = 0 \\ f(z, k, \omega) \rightarrow 0 & & \text{quando} & \quad z \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (3.12)$$

Para uma frequência ω , soluções não triviais do autoproblema linear da equação 3.11, para a condição de contorno da equação 3.12, existem somente para valores específicos do número de onda $k, k_1(\omega), k_2(\omega), \dots, k_n(\omega)$. Estes valores particulares de k_j são os autovalores do autoproblema, e as soluções correspondentes: r_1, r_2, r_3, r_4 são as autofunções.

A relação $k = k_j(\omega)$ é somente conhecida na forma implícita como:

$$F_R \left[\lambda(z), \mu(z), \rho(z), k_j, \omega \right] = 0 \quad (3.13)$$

A equação 3.13 é chamada de equação da dispersão de Rayleigh. Esta equação mostra que, em um meio verticalmente heterogêneo, a solução será dependente da frequência (indicando ondas dispersivas), o que significa que a velocidade de fase será uma função da frequência.

Cada função $k_j, r_i(z, k_j, \omega)$ define um modo de propagação e, em geral, há m modos de propagação para uma determinada frequência. O número m pode ser finito ou infinito, dependendo da variação das propriedades do meio em relação à profundidade (z) e à frequência de excitação. Para um meio composto de um número finito de camadas homogêneas sobre um semi-espaço homogêneo, o número de modos de propagação da onda Rayleigh é sempre finito (Ewing et al., 1957; Bullen e Bolt, 1985).

Segundo Lai e Rix (1998) existem muitas técnicas possíveis para solucionar este problema de valores próprios: integração numérica, diferenças finitas, elementos finitos, elementos de contorno, e elementos espectrais.

Para modelar a propagação é necessário introduzir uma lei de variação das propriedades mecânicas com a profundidade que não esta incluída na formulação

da equação de dispersão de Rayleigh (equação 3.13).

Alguns dos métodos usados com maior frequência pertencem à classe das matrizes de transferência (Gilbert e Backus, 1966), em que se representa a estratificação como uma seqüência de camadas homogêneas, cada uma caracterizada pela sua espessura, densidade e parâmetros elásticos (V_s, V_p ou G_0 e ν). Grande parte das soluções tem como base o algoritmo de Thomson-Haskell (Thomson, 1950; Haskell, 1953), pela sua simplicidade conceitual e fácil aplicação computacional.

3.4 Dispersão das ondas de superfície

3.4.1 Propagação de ondas num semi-espaço elástico e meio estratificado

Num semi-espaço homogêneo, as velocidades de ondas Rayleigh podem relacionar-se com as velocidades de corpo pelo coeficiente de Poisson. As velocidades de corpo não mudam com a profundidade; em conseqüência, a velocidade de ondas Rayleigh não é dependente da frequência em um semi-espaço homogêneo. Quando as camadas estão presentes, a velocidade de ondas Rayleigh e ondas Love são dependentes da frequência e varia entre valores limites. Num semi-espaço homogêneo, as ondas Rayleigh são nomeadas não dispersivas. Dispersão pode ser definida como a dependência da velocidade de propagação de ondas com a frequência ou comprimento de onda.

Sendo o solo uma camada próxima da superfície da terra, sua rigidez usualmente acrescenta-se com a profundidade. Em camadas de solos as ondas Rayleigh são dispersivas e estas velocidades de propagação são dependentes da frequência ou comprimento de onda. Estas propriedades das ondas Rayleigh são usadas no ensaio SASW para determinar os perfis de rigidez (perfil de velocidade de ondas de cisalhamento) nas camadas dos solos. Um gráfico de propagação de velocidade (velocidade de fase) de ondas Rayleigh versus frequência ou comprimento de onda é nomeado curva de dispersão. Uma típica curva de dispersão é mostrada na Figura 3.7.

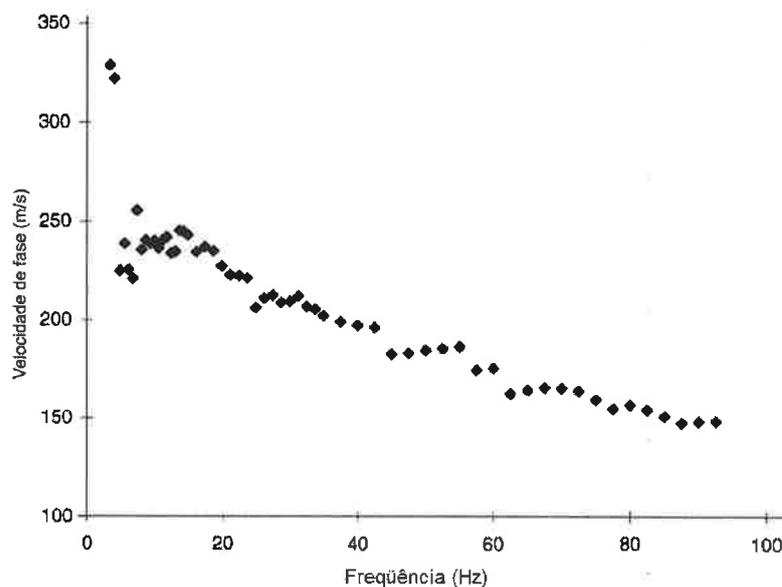


Figura 3.7 - Dispersão geométrica em profundidade através de camadas (Rix, 1988).

3.4.2 Modos de propagação

Num meio estratificado, existem vários modos de propagação. Isto pode ser explicado fisicamente pela presença de uma interferência construtiva entre as várias trajetórias curvas que se propagam num meio heterogêneo que varia continuamente e entre as ondas transmitidas e refletidas ocorridas num meio estratificado (Achenbach, 1993). É impossível dizer qual modo domina o espectro de energia de ondas, em geral, há uma transição do modo que prevalece em determinados intervalos de frequência (Gugunski e Woods, 1992). Por esta razão a análise do caso de uma fonte impulsiva é particularmente complexa. Usualmente, para um meio normalmente dispersivo e na ausência de uma brusca mudança nos parâmetros elásticos das camadas, o modo fundamental de propagação domina o pacote de onda. Resolvendo somente o problema do autovalor, sem considerar outros modos de superposição, é suficiente para obter uma boa aproximação da curva de dispersão.

3.4.3 Dispersão Geométrica das ondas Rayleigh

A dispersão geométrica, ou seja, a dependência da velocidade de fase com a frequência pode ser explicada, lembrando-se das características dessas ondas na superfície. Para um semi-espaço elástico, linear e homogêneo, o movimento da partícula decai exponencialmente com a profundidade e é tal que a porção do meio

afetada pela propagação de onda é igual a aproximadamente um comprimento de onda. Assim, o comprimento de onda λ está relacionado com a frequência f_0 pela seguinte equação:

$$\lambda = \frac{V_r}{f_0} \quad (3.14)$$

Ondas de baixa frequência penetram mais profundamente a partir da superfície do terreno. A partir dessa informação, podemos afirmar que em um meio verticalmente heterogêneo, as propagações de ondas de superfície de diferentes frequências podem penetrar diferentes camadas e, como consequência, a velocidade de fase estará relacionada às suas propriedades mecânicas. Conseqüentemente, a velocidade de ondas de superfície será uma função da frequência. A Figura 3.8 resume os conceitos mencionados, onde os deslocamentos verticais das ondas de campo em duas frequências diferentes são apresentados para um meio composto por camadas diferentes.

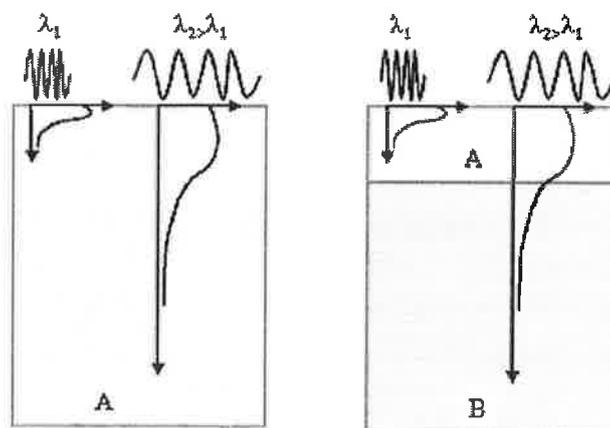


Figura 3.8 - Dispersão geométrica em profundidade através de camadas (Strobbia, 2003).

Os solos podem ser categorizados em dois tipos: (1) solos com perfis normalmente dispersivos e (2) solos com perfis inversamente dispersivos. No primeiro grupo, sempre haverá o incremento da rigidez conforme se aumenta a profundidade; enquanto que no segundo tipo, apresentam-se alguns solos mais rígidos sobre outros mais moles. A caracterização dos solos concede um grande impacto na forma da curva de dispersão nas camadas de um meio. Em outras palavras, a forma da curva de dispersão para os dois tipos de solos são completamente diferentes (Figura

3.9). A configuração das camadas em meios reais pode ser mais complexa do que aquelas mostradas na Figura 3.8, onde:

(a) descreve um semi-espço homogêneo em que a velocidade de onda de cisalhamento é sempre constante, porém, isto é um caso ideal e não acontece na realidade;

(b) mostra um meio normalmente dispersivo em que a velocidade de onda de cisalhamento do meio aumenta com a profundidade e;

(c) descreve um meio inversamente dispersivo em que a velocidade de onda de cisalhamento do meio diminui com a profundidade.

Por conseguinte, as velocidades de onda de cisalhamento de camadas superiores são maiores que das camadas inferiores.

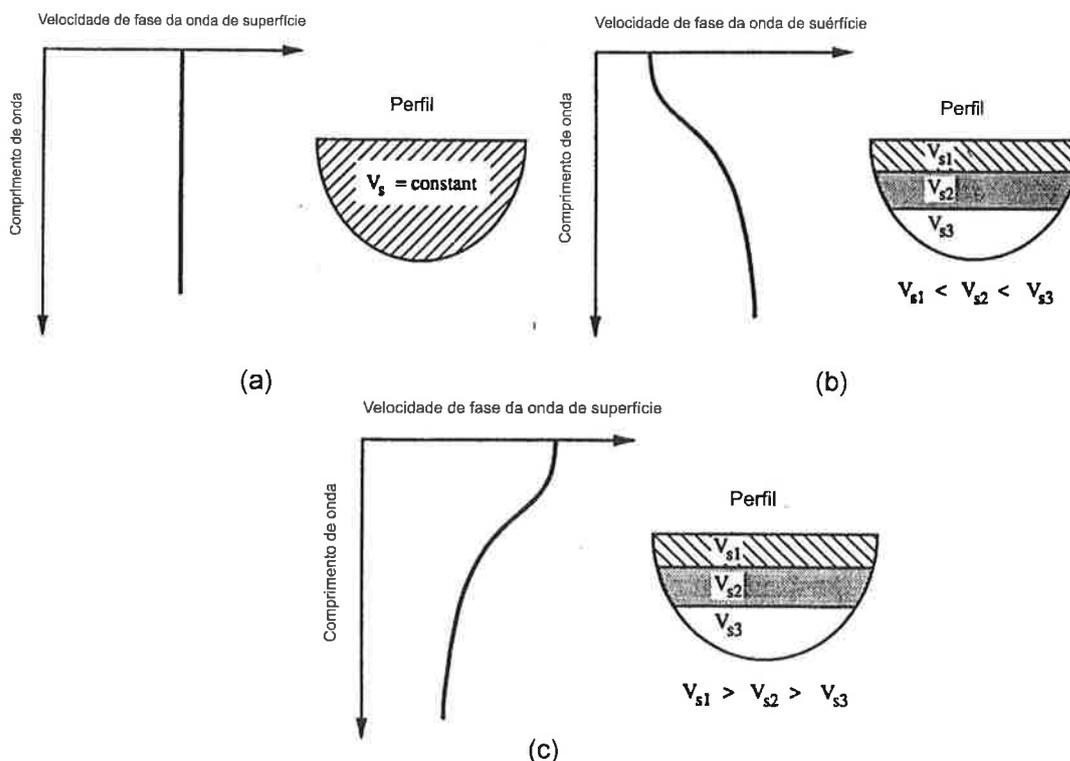


Figura 3.9 - Comparação de curvas de dispersão típicas para diferentes tipos de materiais. (a) perfil não dispersivo (semi-espço homogêneo), (b) normalmente dispersivo e (c) inversamente dispersivo (Rix, 1988).

3.4.4 Velocidade de fase e grupo das ondas Rayleigh

Para um trem de ondas infinitas, resultado de um carregamento harmônico com a frequência angular ω e número de onda k , a propagação das ondas Rayleigh é dada por:

$$V_r = \frac{\omega}{k} \quad (3.15)$$

Estas velocidades são nomeadas como velocidade de fase que corresponde à velocidade de uma frente de onda (localização de pontos de fase constantes) ou velocidade a que se propaga uma determinada frequência. No entanto, para um meio dispersivo (meio estratificado) existe ainda a velocidade de um conjunto de ondas composto por uma serie de frequências, designada por velocidade de grupo U e que corresponde à velocidade do trem de ondas (Telford et al., 1990).

A velocidade de grupo depende dos parâmetros do meio, mas também depende da variação da velocidade de fase com a frequência, a qual controla a interferência entre os diferentes componentes espectrais.

Na Figura 3.10, a inclinação da linha que conecta os alinhamentos da mesma fase corresponde à velocidade fase e a inclinação da linha que conecta os alinhamentos da energia de pico é a velocidade de grupo.

Se considerarmos um sinal com uma frequência f_0 podemos definir a velocidade de fase de cada frequência e a velocidade grupo do trem de ondas. A velocidade de grupo U é coincidente com a velocidade de fase V_r em um meio não dispersivo, mas em geral pode ser determinado usando-se as seguintes expressões, que implicam a derivada da velocidade de fase com respeito à frequência f_0 ou comprimento de onda λ (Sheriff e Geldart, 1995).

$$U = \frac{d\omega}{dk(\omega)} \approx V_r + f \frac{dV_r}{df} = V_r - \lambda \frac{dV_r}{d\lambda} \quad (3.16)$$

Da equação 3.16 é fácil constatar que se a velocidade de fase V_r aumenta com a frequência, a velocidade grupo U é maior. Se a velocidade de fase V_r diminui com o aumento da frequência (perfis normalmente dispersivos), V_r é maior que U , portanto, V_r percorre mais rápido do que U .

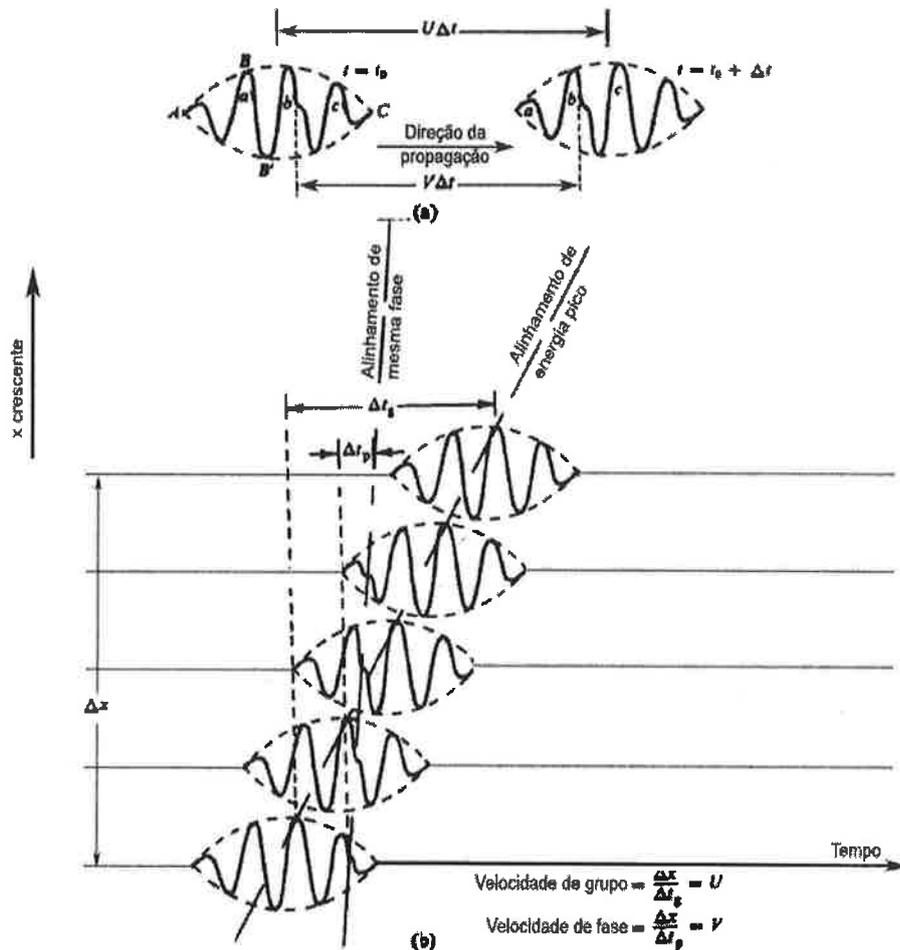


Figura 3.10 - Comparação de velocidades: (a) Velocidade de grupo e fase, U e V respectivamente. (b) Chegada de uma onda dispersiva em diferentes receptores (Sherif e Geldart, 1995).

3.5 Análise espectral de ondas superficiais

No método SASW, a fase do espectro cruzado e a função de coerência são elementos fundamentais, sendo eles produto da aplicação da Transformada de Fourier em dois sinais registrados no domínio do tempo, conforme apresentado na seqüência.

3.5.1 Transformada de Fourier

Os sinais gerados por uma fonte são captados pelos receptores no domínio do tempo com sinais $X_1(t)$ e $X_2(t)$ (figura 3.11), estes sinais são transformados ao domínio da frequência ou vice-versa, utilizando a Transformada de Fourier. Nenhuma informação é ganha ou perdida na transformação de um domínio para outro. A idéia da transformação de Fourier existe para tornar mais fácil o processamento e a interpretação de dados e é definido por:

$$X_1(f) = \int_{-\infty}^{\infty} X_1(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \quad (3.17)$$

$$X_2(f) = \int_{-\infty}^{\infty} X_2(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \quad (3.18)$$

A transformada de Fourier é definida para funções contínuas, e aplicada nelas. A análise espectral é basicamente uma operação estatística no domínio da frequência em um ou dois sinais. Vários tipos de medidas podem ser executados diretamente com a maioria dos analisadores espectrais que estão atualmente disponíveis.

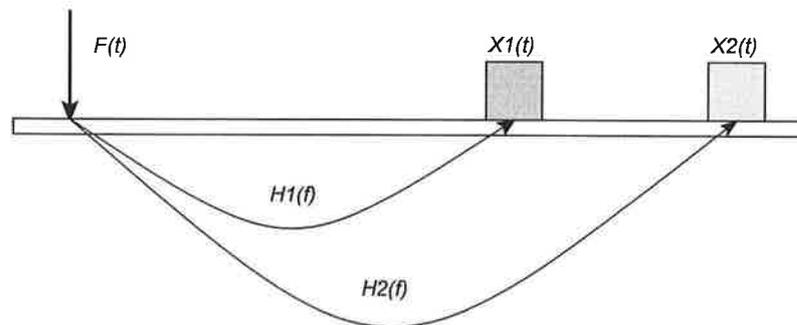


Figura 3.11 - Sinais gerados e recebidos nos ensaios de análise espectral de ondas superficiais.

3.5.2 Auto-espectro de potência

O auto-espectro de potência é um valor real, fornece a distribuição da energia do sinal como uma função da frequência. Os auto-espectros de $x(t)$ e $y(t)$ são definidos por:

$$G_{XX} = X^*(f) \cdot X(f) \quad \text{e,} \quad (3.19)$$

$$G_{YY} = Y^*(f) \cdot Y(f) \quad (3.20)$$

Onde * indica o conjugado complexo.

O auto-espectro de potência oferece a magnitude e informação de fase para todas as frequências das medidas executadas e é usado para determinar frequências predominantes do sistema dinâmico ou extrair os sinais verdadeiros, expulsando o ruído de fundo.

3.5.2 Espectro de Potência Cruzado

O espectro de potência cruzado é a transformação de Fourier da função de correlação cruzada entre dois diferentes sinais $x(t)$ e $y(t)$. O espectro de potência cruzada é definido pela seguinte equação:

$$G_{XY}(f) = X^*(f) \cdot Y(f) \quad (3.21)$$

Onde * indica o complexo conjugado.

A magnitude de $G_{XY}(f)$ é a medida do potência comum entre os dois sinais, a determinação do espectro cruzado é uma excelente medida para identificar frequências predominantes que se apresentam nos sinais de entrada e saída.

Da análise do espectro cruzado é possível, não somente obter a função de coerência, a qual é a medida da correlação de dois sinais em cada frequência, mas também o espectro de fase, o qual mede a diferença de fase destes sinais a cada frequência

3.5.3 Função de Transferência

A função de transferência $H_1(f)$ e $H_2(f)$, que caracteriza o comportamento dinâmico do sistema que conforma o solo entre a fonte e cada um dos receptores, pode ser obtida dividindo-se estas funções pelo espectro $F(f)$ do sinal gerado:

$$H_1(f) = \frac{X_1(f)}{F(f)} = \frac{X_1(f)}{F(f)} \cdot \frac{F^*(f)}{F^*(f)} = \frac{G_{X1F}}{G_{FF}} \quad (3.22)$$

$$H_2(f) = \frac{X_2(f)}{F(f)} = \frac{X_2(f)}{F(f)} \cdot \frac{F^*(f)}{F^*(f)} = \frac{G_{X2F}}{G_{FF}} \quad (3.23)$$

Onde $F^*(f)$ representa o complexo conjugado do espectro linear do sinal gerado e G_{X1F} e G_{X2F} são os espectros cruzados entre o sinal gerado e os sinais recebidos nos receptores.

Das equações anteriores as funções de transferência $H_1(f)$ e $H_2(f)$ só dependem das características do terreno compreendido entre a fonte de energia e os sensores e não do sinal gerado.

3.5.4 Coeficiente de coerência

A função de coerência é uma ferramenta prática para julgar a qualidade dos sinais observados. A função de coerência $\gamma^2(f)$ é uma medida feita em conjunção com a função de transferência e é definida por:

$$\gamma^2(f) = \frac{|G_{XY}(f)|^2}{G_{XX}(f) \cdot G_{YY}(f)} \quad (3.24)$$

A função de coerência de dois sinais varia de 0 a 1 e mede o grau de correlação entre dois sinais para uma frequência (f). Coerências menores do que um é obtido quando: (1) dados de $x(t)$ e $y(t)$ não estão correlacionados; (2) não linearidade do sistema de aquisição de dados (3) ruídos de fundo estão presentes nas medições.

CAPÍTULO 4 - MÉTODO SASW

4.1 Introdução

Neste capítulo a metodologia SASW é apresentada, através de ilustrações de dados reais e fotografias obtidas nesta investigação. Foi utilizado como exemplo o ensaio SASW designado como SP-01, localizado no Campo Experimental de Fundações da USP

O ensaio SASW é uma modificação do método de “vibração em regime estacionário”. Dois elementos básicos do método SASW são a geração das ondas de superfície e os registros dessas ondas em distâncias adequadas. Em um meio estratificado, a velocidade de propagação das ondas de superfície Rayleigh depende da frequência (comprimento de onda). As variações resultantes entre velocidade versus frequência são chamadas de dispersão e são originadas em razão dos diferentes comprimentos de ondas. Uma vez que pequenos comprimentos de ondas apresentam altas frequências e propagam-se somente em camadas próximas à superfície, aquelas que possuem maior comprimento de onda (baixas frequências) propagam-se tanto nas camadas próximas à superfície como em camadas mais profundas.

4.2 Vibração em regime estacionário

O uso de ondas superficiais com objetivos geotécnicos não é recente. A técnica denominada em inglês de “*steady-state Rayleigh-wave*” foi utilizada no início dos anos 60 por Jones (1962) e Ballard (1964), motivando o desenvolvimento do método SASW. O ensaio consiste na aplicação de vibrações senoidais estacionárias na superfície do terreno e em direção vertical, dentro de um amplo intervalo de frequências. Dessa forma é possível determinar os pontos na superfície do terreno que estejam em fase com o vibrador (Figura 4.1 e Figura 4.2). Conhecendo-se o comprimento de onda λ e a frequência f_0 , obtém-se a velocidade de fase V_r , mediante a expressão:

$$V_r = f_0 \cdot \lambda \quad (4.1)$$

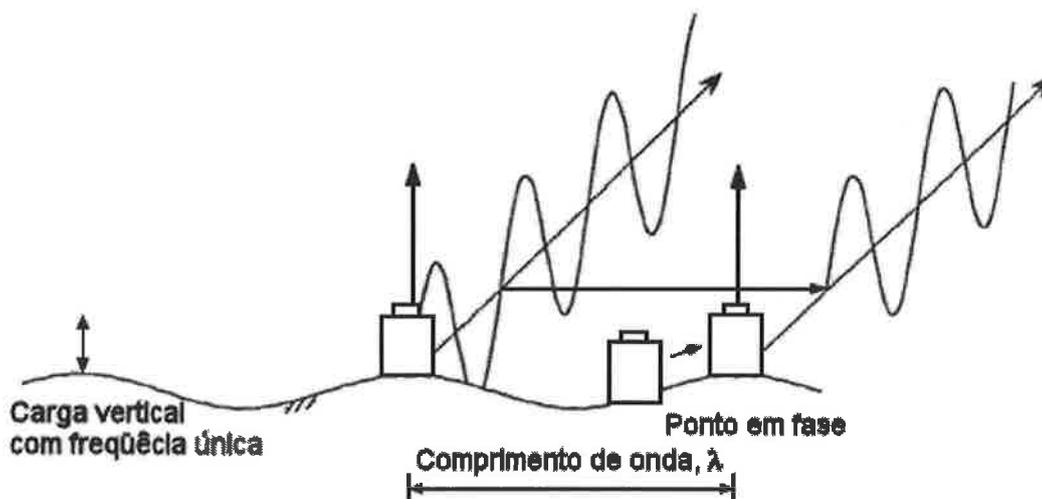


Figura 4.1 - Deformação superficial do semi-espaço elástico mediante uma carga vertical senoidal aplicada na superfície (Joh, 1996).

É possível, então, obter-se a curva de dispersão (V_r versus λ) do terreno (Figura 4.3). O passo final consiste na determinação do perfil de onda de cisalhamento por intermédio do perfil da velocidade de fase. Uma relação empírica pode ser adotada, com base na Figura 3.1, associando-se as velocidades de onda de cisalhamento às velocidades de fase:

$$V_s \cong 1,1 \cdot V_r \quad (4.2)$$

Ponderando-se as camadas subjacentes, a velocidade de onda de cisalhamento é considerada como sendo o valor característico na profundidade correspondente à metade ou a um terço ($z = \lambda/2$ ou $z = \lambda/3$) do comprimento de onda (Heukelomp e Foster, 1960). Repetindo-se este procedimento para os dados disponíveis, é possível obter-se o perfil de velocidade de onda de cisalhamento (Figura 4.3).

Este ensaio, tal como foi descrito, é de fácil compreensão e realização, porém, apresenta dois graves inconvenientes: o tempo de execução excessivo e o método de “inversão” muito simples. Estas razões podem ser o motivo da não continuidade da sua difusão e desenvolvimento.

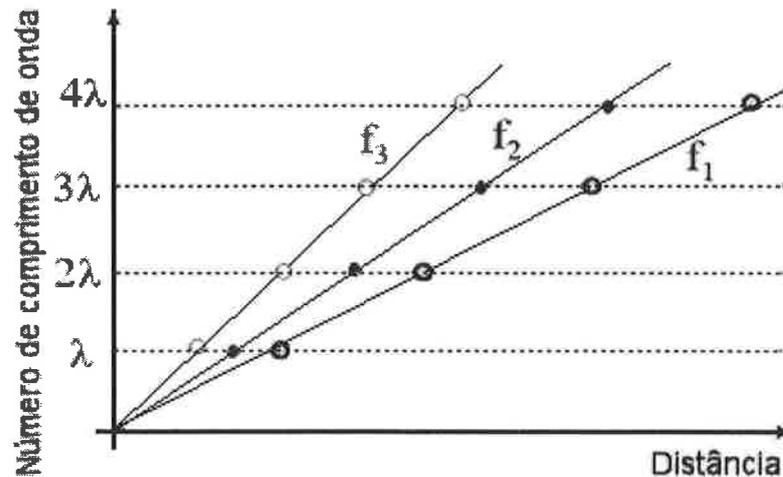


Figura 4.2 - Determinação do comprimento de onda das ondas Rayleigh (Strobbia, 2003).

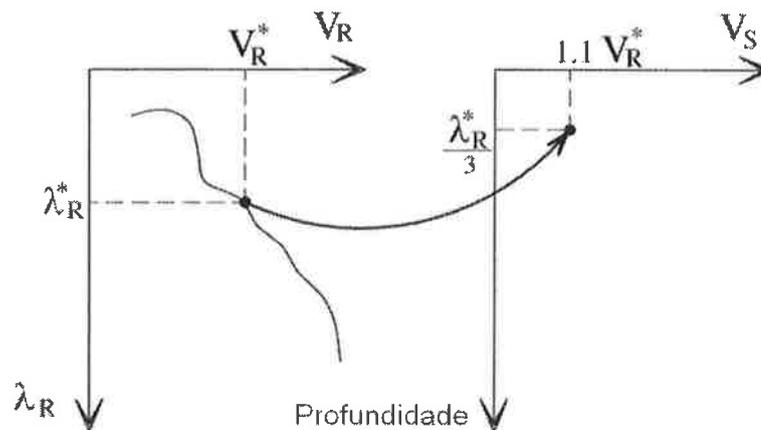


Figura 4.3 - Determinação da velocidade de fase simplificada (Foti, 2000).

4.3. Metodologia SASW e procedimento de campo

O método SASW foi desenvolvido numa época em que a técnica de armazenamento e análise de sinais digitais já estava bem consolidada. No ensaio SASW os sinais são transformados do domínio do tempo para o domínio de frequência, usando-se o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT), possibilitando o cálculo rápido da curva de dispersão para uma variedade de comprimentos de onda. Outra inovação é a utilização dos métodos de inversão das curvas de dispersão para determinar a velocidade das ondas V_S versus a profundidade.

Os primeiros trabalhos sobre SASW foram realizados em pavimentos de rodovias e aeroportos, no início dos anos 80, por pesquisadores da Universidade do Texas,

com o objetivo de testar o método para a determinação de parâmetros elásticos de espessura em diferentes camadas de pavimentos, de maneira rápida e não destrutiva (Heisey et al., 1982; Nazariam et al., 1983; Nazariam e Stokoe, 1984).

4.3.1 Procedimento de campo

O objetivo dos dados de campo nos ensaios SASW é a determinação das diferenças de fase entre dois receptores num amplo intervalo de frequências. A configuração geral do ensaio para a determinação das diferenças de fase é mostrada na Figura 4.4.

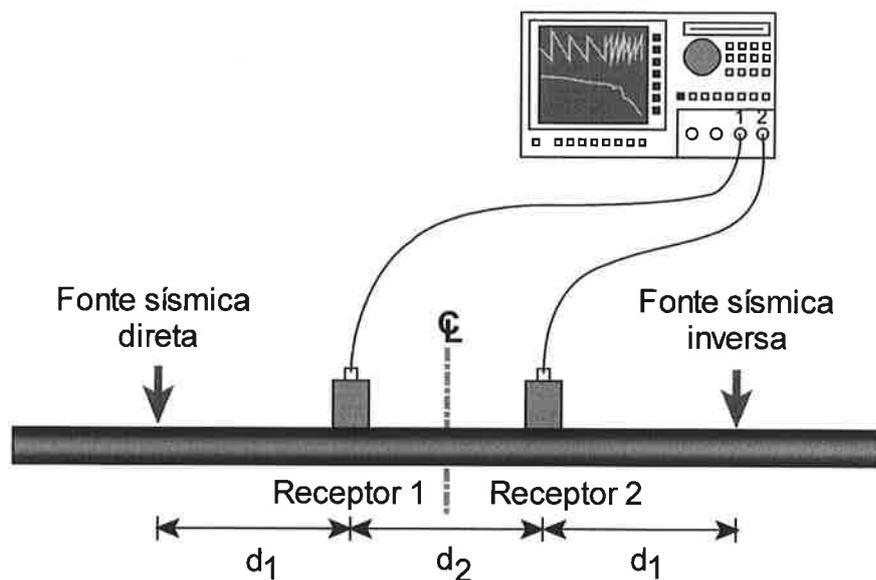


Figura 4.4 - Configuração básica dos equipamentos para ensaio SASW.

A configuração básica do ensaio consiste numa fonte, dois receptores e um sistema de aquisição de dados. A fonte e os receptores são posicionados de forma alinhada, a fim de realizar-se o monitoramento da propagação de ondas geradas a partir da fonte e adquiridas pelos receptores. A fonte utilizada deve possuir um sistema mecânico capaz de gerar cargas dinâmicas verticais na superfície do terreno. Os receptores utilizados nas medições SASW podem ser qualquer tipo de geofones ou acelerômetros, ambos orientados verticalmente, dependendo dos intervalos de frequências a serem considerados nas medições. Para a análise de ondas Rayleigh é requerido um software apropriado, sendo este capaz de considerar todos os

modos de propagação discutidos no Capítulo 3 (item 3.4.2). Maiores detalhes sobre as fontes e os receptores serão fornecidos no decorrer desta dissertação.

O procedimento geral usado na execução do ensaio SASW pode ser resumido da seguinte maneira:

1. escolher o local sobre a superfície do terreno a ensaiar;
2. determinar uma série de espaçamentos entre os receptores a fim de obter-se o intervalo necessário de comprimentos de onda para o local ensaiado. Os espaçamentos estão baseados em informações, *a priori*, do perfil da velocidade de onda de cisalhamento (velocidade e profundidade) do material;
3. selecionar a fonte e os receptores apropriados para o intervalo de freqüências em consideração. A faixa das freqüências é fortemente influenciada pelo espaçamento dos receptores. Por exemplo: em um semi-espaço com velocidade de onda Rayleigh de 152m/s, uma faixa de freqüências de 50–200Hz pode gerar comprimentos de onda de 0,76m a 3,0m, enquanto que freqüências de 2–20Hz podem gerar comprimentos de onda de 7,6m a 76,2m. A gama de freqüências será determinada utilizando-se as relações entre velocidade de onda de cisalhamento, comprimento de onda e freqüência, enunciado na equação 4.1;
4. posicionar os receptores e a fonte de ondas, alinhados de acordo com a Figura 4.5 e 4.6 (discutidos no item 4.4). Os receptores devem estar adequadamente acoplados ao terreno, a fim de não ocasionar interferências na diferença de fase entre os dois receptores;
5. gerar o sinal no domínio do tempo (este sinal será registrado pelo analisador dinâmico de sinais);
6. deslocar a fonte de ondas para um ponto simétrico ao utilizado anteriormente, a fim de gerar novo sinal;
7. repetir o passo 5;
8. repetir os passos 4 a 7, com espaçamentos diferentes entre os receptores.

Uma vez obtidos e visualizados os registros no analisador dinâmico de sinais, são calculados (no domínio da freqüência) em tempo real, a função de transferência, o espectro de poder cruzado e a função de coerência.

Após a obtenção dos dados, conforme indicado anteriormente, é necessário proceder ao seu tratamento, para elaboração da curva de dispersão.

No Capítulo 3, mostrou-se a importância da fase do espectro cruzado $G_{X_1X_2}$ dos sinais recebidos pelos receptores X_1 e X_2 na determinação da diferença de fase para cada frequência de interesse. Também foi comentado sobre a seleção da faixa útil de frequências utilizando-se a função de coerência $\gamma^2(f)$ de ambos os sinais. A referida função, empregando-se a terminologia adotada no Capítulo 3, pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\gamma^2(f) = \frac{G_{X_1X_2}^2}{G_{X_1} \cdot G_{X_2}} \quad (4.3)$$

Ao utilizar a função de coerência $\gamma^2(f)$ para selecionar os intervalos de frequências, é lícito admitir que os sinais recebidos por ambos os sensores são suficientemente parecidos e podem ser utilizados no processo de determinação da curva de dispersão, pois $\gamma^2(f)$ é uma função, no domínio da frequência, análoga ao quadrado do coeficiente de correlação, ou seja: $0 \leq \gamma^2(f) \leq 1$.

Nesta expressão, a função de coerência vale zero (0), quando os sinais não estão relacionados, e um (1) quando existe uma dependência linear entre eles. Em geral, é exigido um valor igual ou maior que 0,90, pois, pequenas flutuações na função de coerência correspondem a grandes flutuações na fase.

4.4 Configuração do ensaio nas medições SASW

Existem dois arranjos comuns de fontes e receptores utilizados nos ensaios SASW. O primeiro é chamado de Geometria de Receptor de Ponto Meio Comum (GPMC), como mostra a Figura 4.5. O espaçamento de ensaio (x) é dobrado em relação ao espaçamento anterior a cada vez que o ensaio é realizado. Neste arranjo, a linha central é mantida como ponto meio comum dos receptores em todos os espaçamentos do ensaio. A vantagem desta configuração é que todos os espaçamentos de ensaio são na mesma área. A desvantagem é que a fonte e receptores têm que movimentar-se para diferentes espaçamentos de ensaio.

Algumas fontes não são fáceis de movimentar, o que aumenta a dificuldade e o tempo para a execução do ensaio SASW. O segundo arranjo de ensaio é chamado de Geometria de Fonte Comum (GFC). Neste caso, o espaçamento do ensaio (x) também é dobrado de um espaçamento ao seguinte. Porém, como pode ser observado na Figura 4.6, a fonte é fixada e somente os receptores necessitam ser movimentados. Se o local ensaiado não possui variabilidade lateral significativa, o resultado do ensaio destas duas configurações deverá apresentar diferenças mínimas.

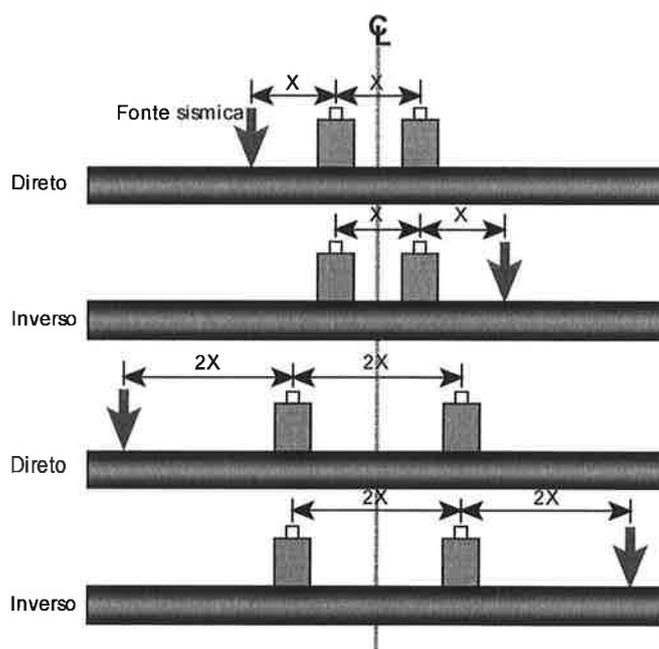


Figura 4.5 - Ilustração da Geometria de receptor de ponto meio comum (GPMC) usado nos ensaios iniciais SASW com dois receptores.

Um estudo de geometrias de fontes e receptores foi desenvolvido por Hiltunen e Woods (1989) em relação a ensaios em pavimentos. Foi constatado que as medições obtidas com estas duas geometrias no mesmo pavimento são quase idênticas e a dispersão de todos os dados recolhidos foi similar.

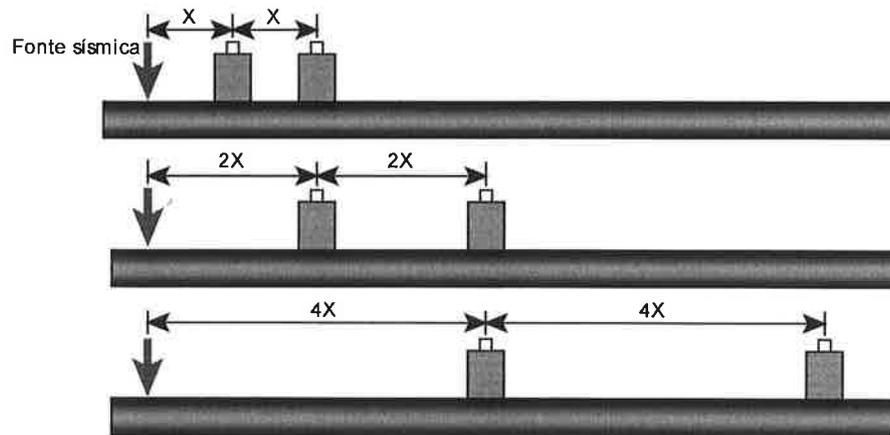


Figura 4.6 - Ilustração da Geometria de fonte comum (GFC) usado nos ensaios iniciais SASW com dois receptores.

No início da realização dos ensaios SASW, apenas dois receptores eram utilizados, pois existia apenas um tipo de analisador com dois canais disponíveis e acessíveis naquele momento. Atualmente, um analisador é capaz de manipular centenas de canais, por isso, mais receptores podem ser utilizados nos ensaios SASW. O uso adicional de receptores no ensaio SASW, reduz o tempo de ensaio de campo e maiores informações do local ensaiado podem ser obtidas, pois, dados de múltiplos espaçamentos são medidos ao mesmo tempo. É importante observar que caso exista uma grande variação lateral no local de ensaio, os dados dos diferentes pares de receptores podem não ser coerentes entre si. Desta forma, a consistência ou inconsistência pode ser usada como um “índice” para uma estimativa qualitativa da magnitude da variação lateral.

Dentro de uma certa distância da fonte sísmica do ensaio SASW, a forma da onda Rayleigh possui características adicionais (formadas próximas à superfície), não consideradas na análise de dados. Nesta análise de dados, apenas o comportamento de campo distante, para ondas Rayleigh, e ondas de corpo (V_p e V_s) são assumidos. Para evitar a má interpretação dos resultados do ensaio SASW, estes dados próximos à superfície deveriam ser excluídos e, com a intenção de se reduzir ao máximo a inclusão desses dados, dois critérios são aplicados à configuração do ensaio SASW. O primeiro deles é a relação entre o espaçamento da fonte e o primeiro receptor e, deste primeiro, ao segundo receptor. O segundo critério é a gama aceitável de máximos e mínimos comprimentos de ondas. Vários

pesquisadores têm realizado estudos para avaliar o melhor critério para o ensaio SASW e os resultados destes estudos são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Configuração e critério para filtragem de dados próximos à superfície.

Pesquisador	Configuração e critério	
Heisey et al., 1982	$d_1=d_2$	$1/3 \lambda < d_2 < 2 \lambda$
Roesset et al., 1990	$0,5 \lambda < d_1 < 2 \lambda$	$0,5 \lambda < d_2 < \lambda$
Gucunski e Woods, 1992	-	$0,5 \lambda < d_1 < 4 \lambda$
Stokoe et al., 1994	$0,5 \lambda < d_1$	

d_1 = distância entre a fonte e o primeiro receptor

d_2 = distância entre receptores

λ = comprimento de onda

4.5 Coleta de Dados

4.5.1 Fontes de ondas

É necessário que a fonte utilizada seja capaz de gerar ondas superficiais com um amplo conteúdo de freqüências e que contenha energia suficiente para ser captada pelos receptores. A seleção da fonte depende da faixa de freqüência de interesse que varia com as propriedades do material e o espaçamento dos receptores. As freqüências de interesse típicas para depósitos de solos estão entre 2,0Hz e 80,0Hz (Nazarian, 1984). A capacidade, em termos de energia de saída e freqüência de operação, das fontes sísmicas representa um dos aspectos mais importantes no método SASW, pois, quanto maior a energia que a fonte sísmica transmite ao subsolo, maior a oportunidade de se obter uma boa qualidade de dados.

Levando-se em consideração a maneira como se criam as vibrações, existem dois tipos diferentes de fontes, sendo uma delas ativa e a outra passiva. Fontes ativas são excitações artificiais formadas por vibrações, tais como *bulldozer*, ou quedas de massa; fontes passivas são ruídos ambientais naturais ou atividades humanas, tais como sismos ou tráfego. Na técnica SASW são utilizadas como fontes sísmicas todas as fontes ativas, pois, estas fontes possuem a vantagem de criar, com um impacto, uma vasta gama de freqüências, permitindo a obtenção de bons resultados com aquisições muito rápidas.

Sobre a base da sua disponibilidade para gerar energia, de acordo com o espaçamento (entre o receptor e a fonte) requerido no ensaio SASW, os martelos são a fonte mais comum, pois, são de fácil utilização, econômicos e permitem somar registros aumentando-se a razão sinal e ruído. A fonte é acionada através da queda da massa e o comando dado ao analisador dinâmico de sinais para iniciar o registro através do "trigger" (mecanismo de disparo para o início do registro). A massa do martelo influencia o conteúdo em frequências, assim, o martelo mais leve poderá gerar altas frequências enquanto que o mais pesado menores frequências. A presença de uma chapa metálica também faz elevar o conteúdo de frequências.

Quando for necessário gerar maior energia pode-se utilizar como fonte a queda de um bloco com massa elevada. No entanto, quando se utiliza este tipo de fonte é necessário haver bastante atenção ao ressalto de bloco, pois, como são utilizados tempos de registro para o ensaio SASW, o ressalto pode contaminar o sinal. Com este tipo de fonte consegue-se, de uma forma geral, aumentar o conteúdo de baixas frequências, mas é pouco prático do ponto de vista da utilização comum. A experiência mostra que nem sempre são possíveis resultados muito melhores do que aqueles que são obtidos pela soma de vários sinais registrados com um martelo (Lopes, 2005).



Figura 4.7 - Fonte de impacto de tipo ativo (martelos) de 10kg, 20kg e 25kg utilizados no ensaio SASW.

4.5.2 Receptores

No método SASW, a geração das ondas superficiais é detectada por dois tipos de receptores orientados verticalmente. O primeiro é o geofone e o segundo, o acelerômetro. A faixa de frequência útil, sensibilidade e acoplamento entre o receptor e a superfície são os parâmetros mais importantes que influenciam a seleção e desempenho dos receptores.

Se as diferenças entre as curvas de calibração dos receptores forem muito grandes, dentro da região de frequências de interesse, pode-se haver um grande erro nos resultados do ensaio. Desta forma, a calibração dos receptores é uma condição crucial para os resultados.

Outro aspecto importante a ser considerado é a necessidade de haver um correto acoplamento entre os geofones e a superfície do terreno, a fim de garantir que os seus movimentos sejam idênticos entre eles e seja transmitido fielmente ao receptor o movimento atual do terreno sobre a faixa de frequência de interesse. Um acoplamento impróprio frequentemente causa erros, resultando em medições de sinais de amplitudes alteradas. Caso seja necessário o seu acoplamento em solos, estes geofones devem ser parcialmente enterrados

4.5.2.1 Geofones

Geofones são utilizados como receptores de sinal na maioria de locais geotécnicos. Nas medições SASW são geralmente usados geofones com frequência natural de 1Hz (Figura 4.8), pois, estes atuam muito bem em baixas frequências (1Hz a 1.000Hz), sendo muito importante para reunir dados de grandes comprimentos de onda.

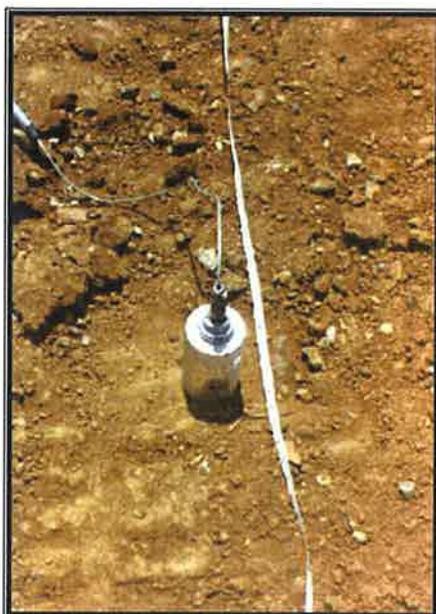


Figura 4.8 - Fotografia de um Geofone de 1Hz utilizado nos ensaios SASW modelo L-4C da Mark Products.

4.5.2.2 Acelerômetros

Em rochas, solos duros ou pavimentos, são usados acelerômetros (Figura 4.9) em substituição aos geofones, para fins de realização de ensaios SASW ou, pelo menos, em parte destes. Os acelerômetros apresentam melhor rendimento na gama de altas frequências (100Hz a 20.000Hz) se comparado aos geofones nestas condições específicas, e sua gama de frequência é suficientemente ampla para adquirir todos os dados úteis, gerados por uma fonte sísmica. Também são muito menores aos geofones tornando-os mais apropriados para medições em espaços pequenos. Nazarian (1984), baseado nas suas experiências, sugere que os acelerômetros são mais adequados para reduzir o efeito do ruído ambiental.

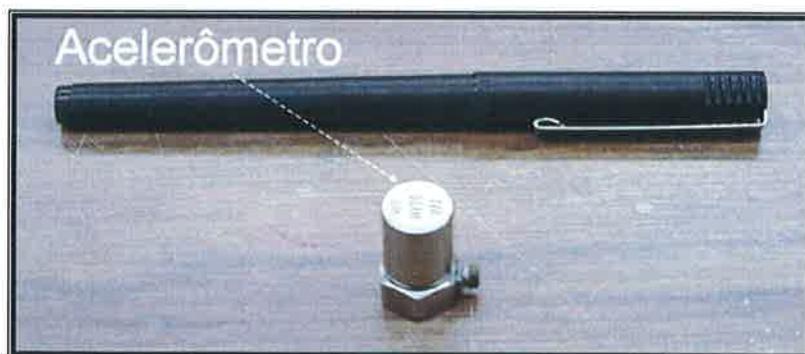


Figura 4.9 - Fotografia de acelerômetro Wilcoxon Modelo 736.

4.5.3 Analisador dinâmico de sinais

Os sinais detectados pelos receptores são transmitidos por fios para um Analisador Dinâmico de Sinais e estes são armazenados para futuras análises (Figura 4.10). O analisador espectral é um dispositivo de gravação para a realização do ensaio SASW. Este é um osciloscópio digital que, por intermédio de um microprocessador, é capaz de fazer análise dos sinais diretamente, seja no domínio do tempo como no domínio da frequência. Também realiza as diversas funções dos sinais como espectro linear, função de transferência, o espectro de potência cruzado e a função de coerência.

A qualidade dos dados SASW no domínio da frequência poderia ser melhorada pela aplicação da média de várias repetições do mesmo ensaio. Nazariam e Stokoe (1985) estimaram que uma média de cinco sinais seja considerada adequada. Dados em domínio da frequência são transferidos para um computador para o cálculo da curva de dispersão.



Figura 4.10 - Fotografia do Analisador Dinâmico de Sinais HP-35670A.

Como exemplo, os registros de tempo de um sinal gerado por um martelo de 20 kg, com espaçamentos dos geofones de 2m e 4m, em um disco metálico orientado horizontalmente do ensaio SASW no local SP-01, são mostrados na Figura 4.11.

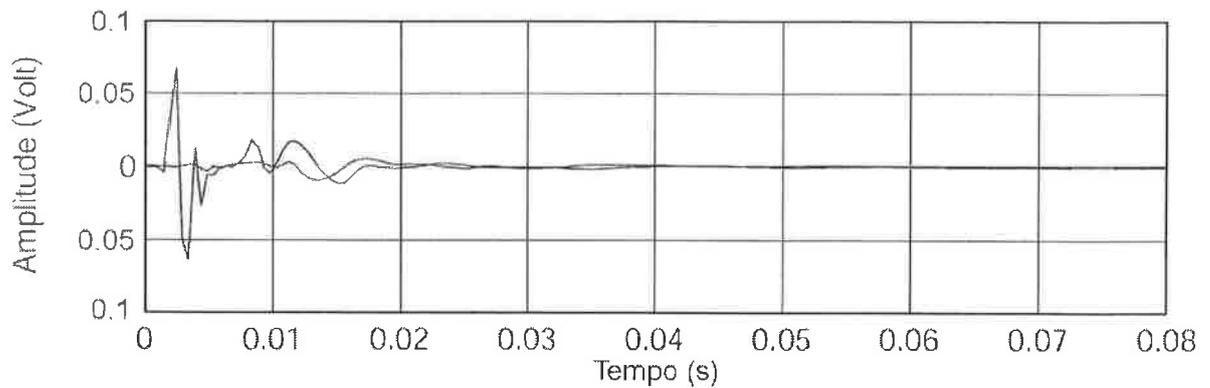


Figura 4.11 - Registro dos sinais de tempo ($d=2m$), dos receptores orientados verticalmente do local SP-01.

A diferença de fase entre a localização dos dois receptores é determinada pelo uso da Transformada Rápida de Fourier (FFT), procedimento de transformação dos registros no domínio do tempo para o domínio da frequência. Após a transformação no domínio da frequência, os componentes da onda em certa frequência se expressam como números complexos e podem-se descrever através das seguintes equações:

$$z_1 = A_1 (\cos \phi_1 + i \cdot \text{sen} \phi_1) \quad (4.4)$$

$$z_2 = A_2 (\cos \phi_2 + i \cdot \text{sen} \phi_2) \quad (4.5)$$

A diferença da fase entre os dois componentes de onda, $\phi_2 - \phi_1$, pode ser determinada em qualquer uma das duas operações seguintes, com números complexos:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{A_2}{A_1} \{ \cos(\phi_2 - \phi_1) + i \cdot \text{sen}(\phi_2 - \phi_1) \} \quad (4.6)$$

$$z_1 \cdot z_2^* = A_1 \cdot A_2 \{ \cos(\phi_2 - \phi_1) + i \cdot \text{sen}(\phi_2 - \phi_1) \} \quad (4.7)$$

A equação 4.6 corresponde ao espectro de resposta da frequência e a equação 4.7 corresponde ao espectro de potência cruzada (Joh, 1996). A Figura 4.12 mostra o

espectro de potência cruzada estimada dos registros do tempo, mostrados na Figura 4.11. Este gráfico de fase oscila entre $+180^\circ$ e -180° entre os dois receptores, como uma função da frequência. A determinação da curva de dispersão experimental calculada é apresentada na seguinte seção.

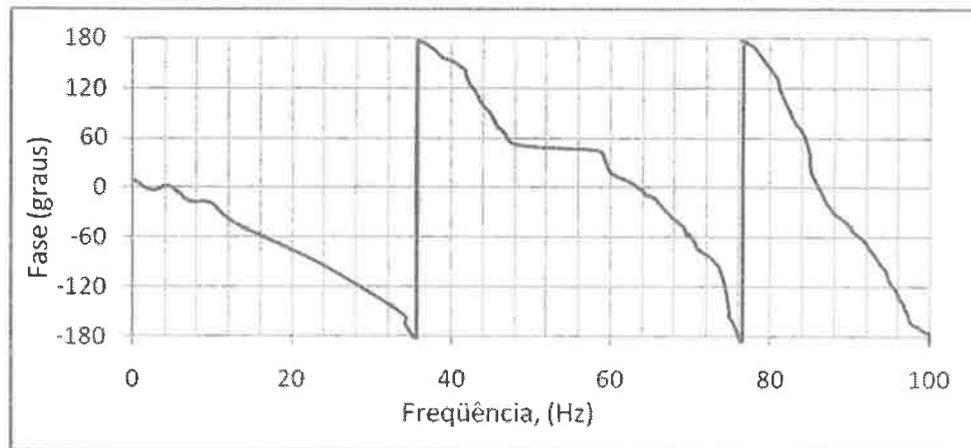


Figura 4.12 - Espectro de fase dobrada para espaçamentos entre receptores de 2m do local ensaiado SP-01 do Campo Experimental de Fundações da USP.

4.6 Ferramentas de Análise

No método SASW são considerados os efeitos do coeficiente de Poisson, assim como outros fatores, incluindo os modos superiores de ondas Rayleigh, os quais têm um impacto importante sobre o perfil de velocidade de onda de cisalhamento. Para incluir os efeitos desses fatores, um algoritmo ou programa deve ser utilizado para processar os dados do ensaio SASW. O software utilizado com o propósito de analisar os dados do ensaio SASW foi desenvolvido pelo professor Sung-Ho Joh (1992) e denomina-se "*WinSASW*" (versão 1.23).

4.6.1 Capacidade do *WinSASW*

O *WinSASW* é um software completo com o qual a modelagem direta, curva composta e inversão podem ser executados. A modelagem direta, incorporado ao *WinSASW*, está baseado no método da Matriz de Rigidez Dinâmica, apresentada por Kausel e Roesset (1981) e Kausel e Peek (1982).

4.6.1.1 Modelagem Direta e Análise de inversão

Existem dois métodos para obter-se os perfis de velocidade de onda de cisalhamento: modelagem direta e análise de inversão. A diferença entre estes dois métodos é ilustrada na Figura 4.13.

O programa *WinSASW* tem a capacidade de manipular os dados registrados pelo Analisador Dinâmico de Sinais, possuindo as funções para calcular a fase (diferença de fase entre os dois receptores), mascaramento de dados de fase indesejados e a geração das curvas experimentais de dispersão. Também se pode determinar o perfil de velocidade de onda de cisalhamento do local ensaiado através do ajuste da curva de dispersão experimental com uma curva de dispersão teórica. O método de ajuste é um procedimento iterativo (tentativa e erro), a fim de identificar o melhor perfil de velocidade de onda de cisalhamento que se ajusta à curva de dispersão experimental avaliada no local do ensaio. Este método é também conhecido como modelagem direta. A versão 1.23 do programa *WinSASW* pode realizar somente o modelagem direta, utilizado nesta dissertação.

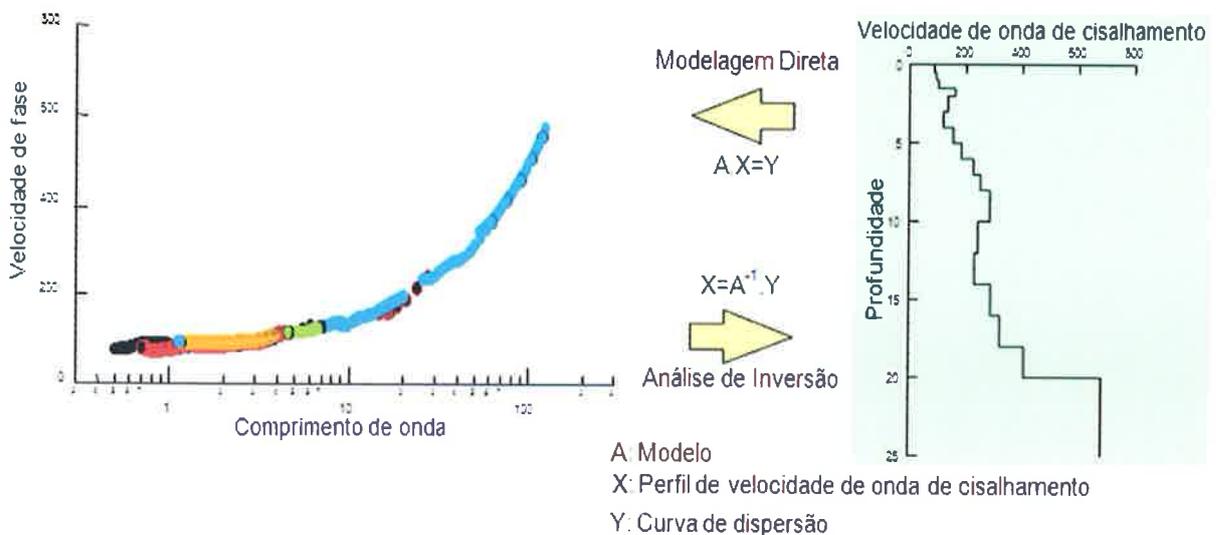


Figura 4.13 - Ilustração da diferença entre a modelagem direta e análise de inversão.

4.6.1.2 Soluções 2D e 3D

No início do desenvolvimento do método SASW, apenas ondas planas Rayleigh eram consideradas. Isso significa que somente era analisado o modo fundamental de onda Rayleigh e, além das ondas de corpo não refletidas e não refratadas,

denominadas, neste estudo, solução 2D. Pode ou não ser adequado a algumas técnicas sísmicas, tais como o método de ensaio ReMi (Refração Microtemor) que utiliza fontes passivas na sua realização. Neste caso, o efeito de reflexões e refrações das ondas de corpo pode ser insignificante. Contudo, modos superiores de ondas Rayleigh podem existir, já que elas podem surgir com fontes ativas. Por esta razão, uma solução mais completa, chamada de solução 3D, pode ser adotada para simular a curva de dispersão de campo. O software *WinSASW*, adotado neste estudo, é capaz de realizar tanto análises 2D como 3D e, por este motivo, apenas análises 3D serão utilizadas nesta dissertação.

4.6.1.3 Modo Fundamental e Superior

Quando a velocidade de onda de cisalhamento das camadas do solo aumenta suavemente e gradualmente com o perfil de profundidade, é provável que somente o modo fundamental das ondas Rayleigh possa acontecer. Porém, caso exista uma camada de rocha abaixo das camadas de solo ou uma camada mole entre duas camadas mais rígidas, ou mesmo, se a velocidade de onda de cisalhamento aumenta rapidamente entre as camadas, os modos superiores das ondas Rayleigh podem converter-se nos dominantes. Neste caso, a curva de dispersão pode ser mal interpretada se apenas a solução 2D (solução de ondas planas Rayleigh) for considerada.

O programa de análise *WinSASW*, é capaz de realizar a análise 3D e considerar os modos superiores de ondas Rayleigh, não identificados com a análise 2D. Portanto, curvas de dispersão teóricas podem ser geradas mesmo contendo os efeitos de reflexão e refração das ondas de corpo e modo superior de ondas Rayleigh.

4.7 Processamento de dados

O processamento de dados envolve a interpretação do espectro da fase gerado no campo e a construção de uma curva de dispersão experimental. O tempo de percurso numa certa frequência é avaliado usando-se a diferença de fase entre o par de receptores. A Figura 4.14 ilustra a diferença de fase entre dois sinais de

tempo para uma onda viajando a uma frequência de f_o (Joh, 1996). A diferença de fase entre cada receptor é calculada usando-se as seguintes expressões:

$$y_1 = \text{sen}(2\pi f_o t) \quad (4.8)$$

$$y_2 = \text{sen}(2\pi f_o (t - t_1)) \quad (4.9)$$

$$= \text{sen}(2\pi f_o t - 2\pi f_o t_1)$$

$$= \text{sen}(2\pi f_o t - \phi) \quad (4.10)$$

Onde y_1 é o movimento da onda na localização A, y_2 é o movimento da onda na localização B, t é o tempo que toma uma onda para viajar da fonte à localização A, t_1 é o tempo que toma uma onda para viajar da localização A à localização B, ϕ é a diferença de fase entre o ponto A e B, para uma frequência de f_o (Joh, 1996).

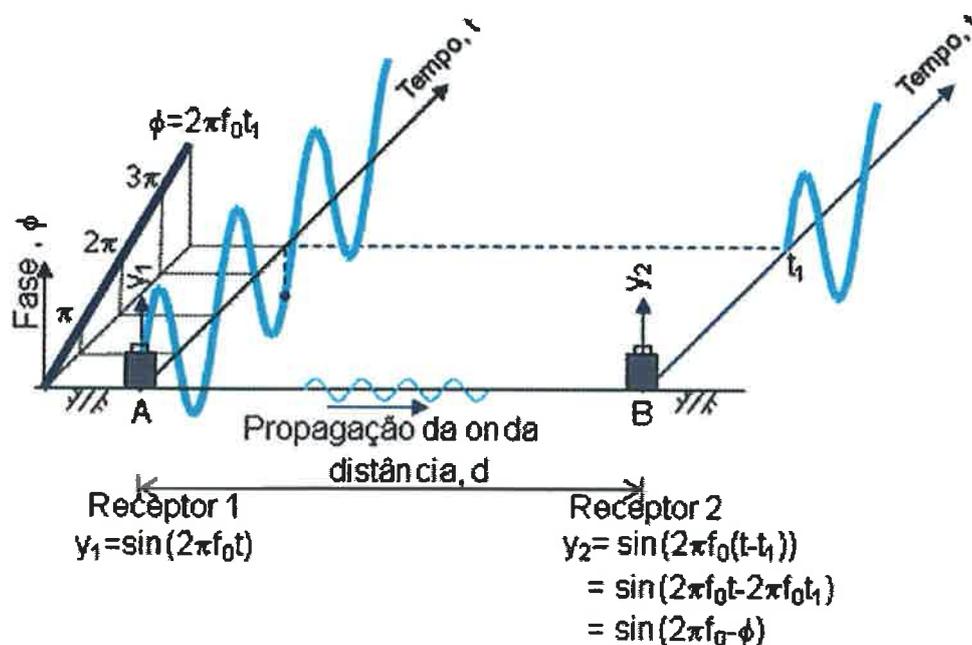


Figura 4.14 - Ilustração da diferença de fase entre dois sinais de tempo (Joh, 1996).

A diferença de fase entre as duas localizações das ondas, numa frequência f_o , pode ser relacionada com o tempo, pela seguinte equação:

$$\phi = 2\pi f_o t_1 \quad (4.11)$$

A velocidade de fase correspondente à frequência f_o pode, então, ser calculada usando-se a distância (d) entre a localização A e B e é verificada na seguinte equação:

$$V_r = \frac{d}{t_1} \quad (4.12)$$

Substituindo-se a equação 4.11 em 4.12, obtém-se:

$$V_r = d \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f_o}{\phi} \right) \quad (4.13)$$

O ângulo de fase exibido na Equação 4.13 corresponde à fase acumulada entre as duas posições dos receptores e, para obter-se este valor na fase desejada, é necessário identificar a fase para cada frequência, através de um processo conhecido como desdobramento de fase “*unwrapped*”. Este passo é automaticamente realizado no *WinSASW*. Este procedimento envolve a identificação do número de ciclos ou “*jumps*” no espectro da fase desdobrada.

Um exemplo de desdobramento de fase dos dados obtidos nesta dissertação é mostrado na Figura 4.15. O procedimento de desdobramento também envolve a eliminação de dados (mascaramento) que não devam ser incluídos no cálculo da curva de dispersão. Estes incluem os efeitos de proximidade gerados próximos à superfície, sinais com baixa relação entre sinal e ruído e efeitos de interferência das ondas de corpo. Este passo deve ser realizado manualmente e é interativo no *WinSASW*.

A porção sombreada na Figura 4.16 mostra os dados que são tipicamente eliminados. Nazariam e Stokoe (1984) têm recomendado que somente uma gama

de frequências com valores de coerência maiores que 0,90 sejam considerados.

Sobre a base da informação do gráfico de fase e a distância entre os dois receptores, a velocidade de fase pode ser calculada para cada medida de frequência e comprimento de onda. Este procedimento de cálculo é detalhado na Figura 4.17.

Para facilidade no entendimento, dois exemplos são demonstrados a seguir:

Exemplo 1:

Na Figura 4.15, o Ponto A no gráfico de fase desdobrada: $d_2=2m$, $|\phi|=46,45^\circ$ e $f_o=14,52Hz$.

$$\text{Então: } \lambda = \frac{d_2}{\frac{|\phi|}{360^\circ}} = \frac{2}{\frac{46,45^\circ}{360^\circ}} = 15,50m$$

$$\text{e: } V_r = f_o \cdot \lambda = 14,52Hz \cdot 15,50m = 225 \frac{m}{s}$$

O valor resultante de V_r e a sua correspondente λ para o ponto A é mostrado na Figura 4.18.

Exemplo 2:

Na Figura 4.15, o Ponto B no gráfico de fase desdobrada: $d_2=2m$, $|\phi|=141,18^\circ$ e $f_o=32,35Hz$.

$$\text{Então: } \lambda = \frac{d_2}{\frac{|\phi|}{360^\circ}} = \frac{2}{\frac{141,18^\circ}{360^\circ}} = 5,10m$$

$$\text{e: } V_r = f_o \cdot \lambda = 32,35Hz \cdot 5,10m = 165 \frac{m}{s}$$

O valor resultante de V_r e a sua correspondente λ para o ponto B é mostrado na Figura 4.18.

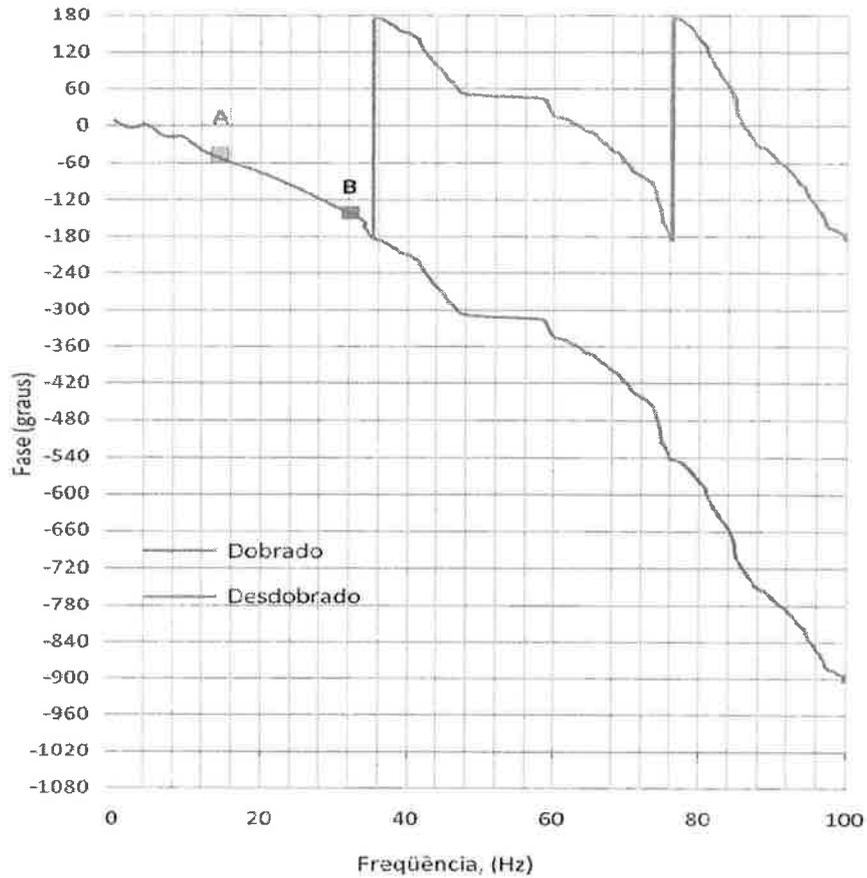


Figura 4.15 - Comparação de fase dobrada e desdobrada determinada da avaliação do Espectro de Potência Cruzada do par de receptores para o local SP-01.

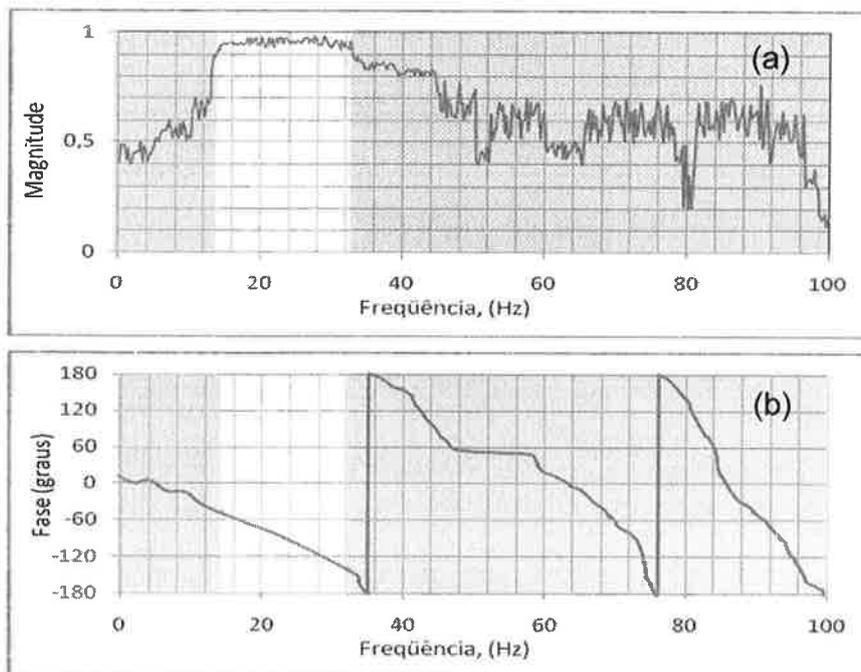


Figura 4.16 - Ilustração do mascaramento de dados não desejados: (a) critério da função de coesão e; (b) fase dobrada.

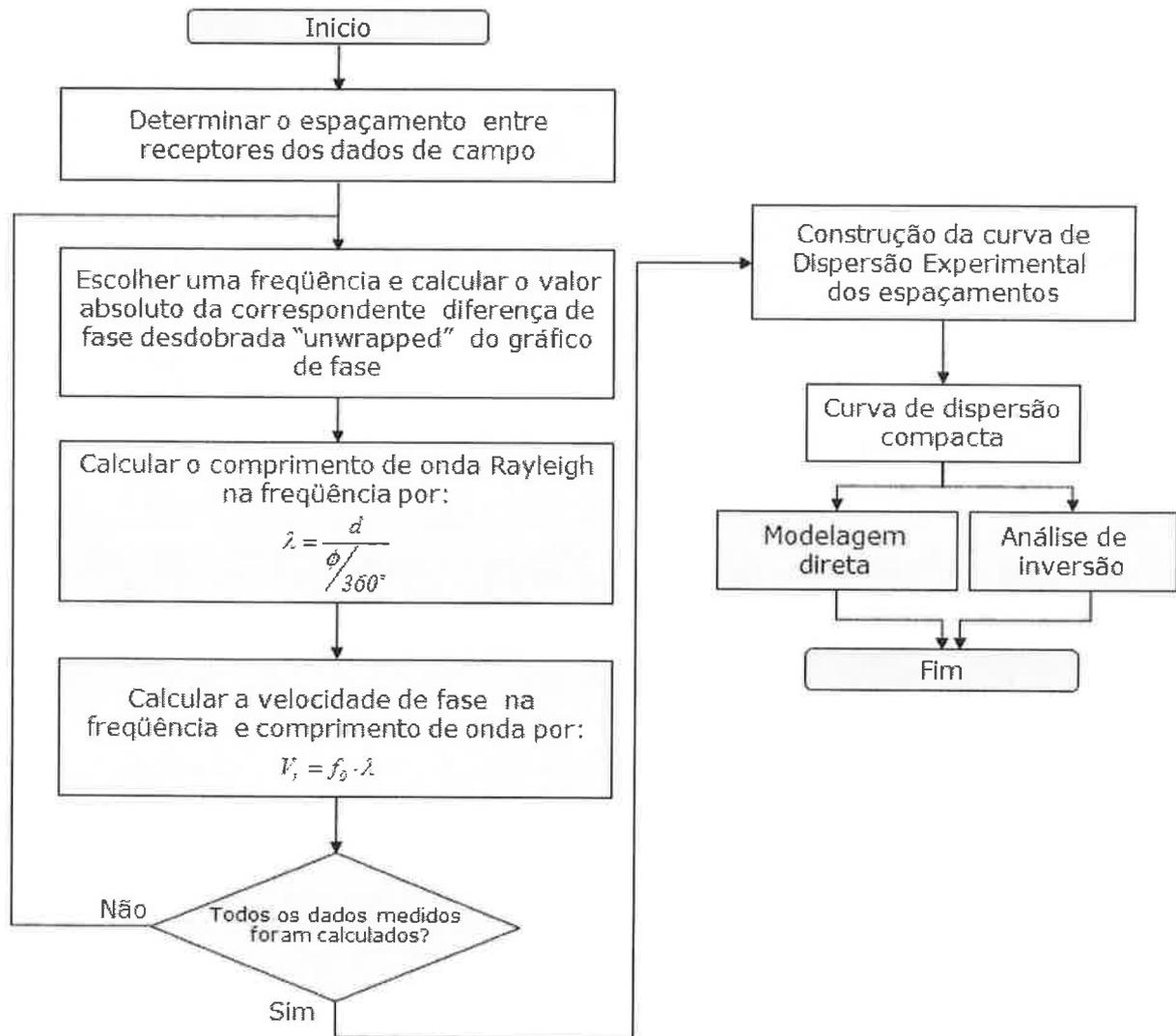


Figura 4.17 - Fluxograma de cálculo da curva de dispersão experimental.

Após a realização dos cálculos para cada medida entre frequência e comprimento de onda, a curva de dispersão experimental, dos diferentes espaçamentos de ensaio, pode ser construída (mostrada nas linhas coloridas da Figura 4.18).

Um ponto importante na avaliação da idoneidade do ensaio SASW, num determinado local, é verificar o quão bem as curvas de dispersão individuais se encaixam (superposição entre elas) a fim de formar a curva de dispersão experimental. A Figura 4.18, mostra a superposição entre as curvas individuais no local SP-01, as quais podem ser consideradas como adequadas, indicando pouca variabilidade lateral neste local.

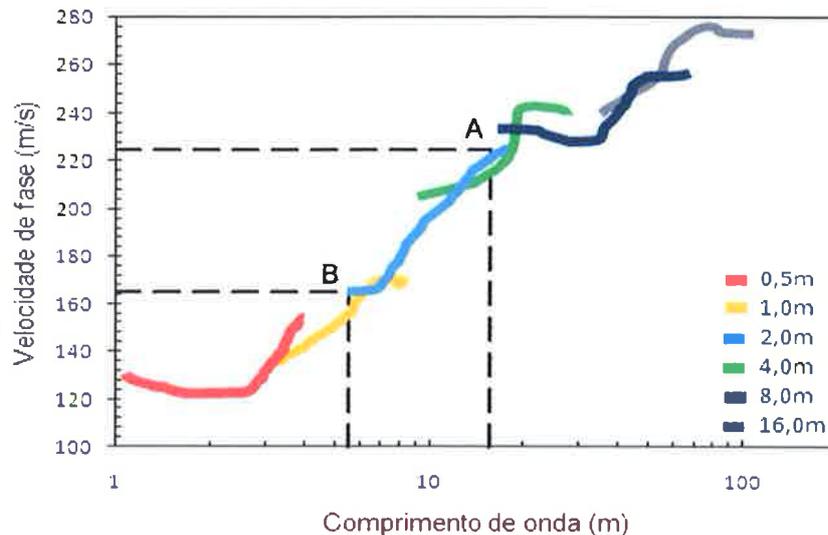


Figura 4.18 - Curva de dispersão de receptores separados 2m, gerados da fase dobrada, mostrada na Figura 4.16.

4.8 Análises de Dados

O passo final no ensaio SASW é a análise de dados. Este procedimento implica a geração do perfil de velocidade de onda de cisalhamento, que possui uma curva de dispersão teórica, devendo esta ajustar-se bem à curva de dispersão experimental. Para chegar a este objetivo, a modelagem direta ou análise de inversão deve ser utilizada. Nesta dissertação, todos os perfis de V_s foram determinados pela modelagem direta.

4.8.1 Curva de dispersão experimental compacta

Logo após a realização dos cálculos para a obtenção das curvas de dispersão do ensaio SASW, uma curva de dispersão experimental composta pode ser obtida (Figura 4.19), combinando-se as curvas de dispersão experimental dos diferentes espaçamentos.

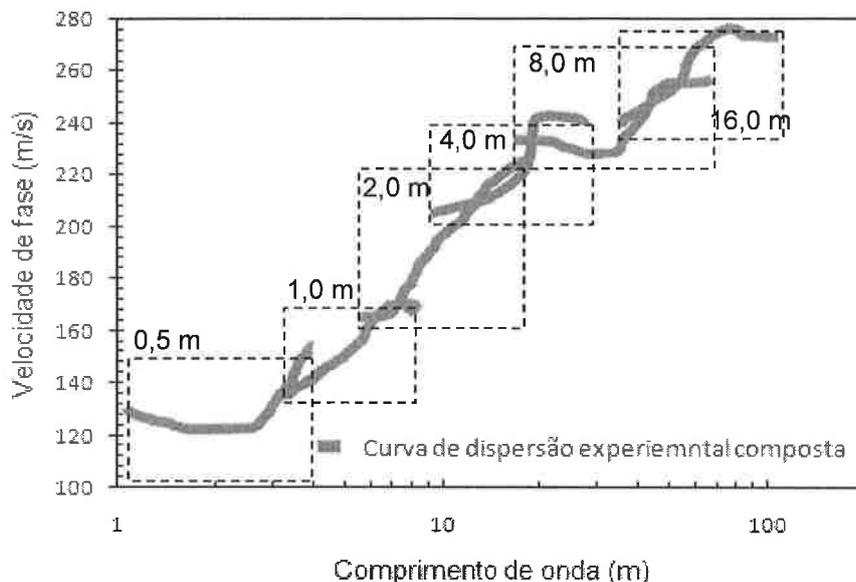


Figura 4.19 - Curva de dispersão compacta de seis espaçamentos de receptores.

4.8.2 Modelagem Direta

Os perfis SASW de V_s , utilizados neste estudo, são determinados pela modelagem direta. O método da modelagem direta, empregado no *WinSASW*, consiste na técnica de realização, pelo usuário, da análise adequada da curva de dispersão teórica (gerada a partir do perfil de V_s assumido e um modelo teórico) à curva de dispersão experimental composta, através de um processo iterativo (tentativa e erro). Geralmente, o valor de densidade e o coeficiente de Poisson permanecem constantes.

O procedimento *WinSASW* do método da modelagem direta é demonstrado a seguir. Primeiro, um simples perfil de V_s (Figura 4.20 (a)) é assumido para gerar a curva de dispersão teórica inicial, mostrada na Figura 4.20 (b). Como pode-se verificar, a curva de dispersão teórica está abaixo da curva de dispersão experimental, na faixa de comprimento de onda de 5m a 40m, porém, acima nas faixas de comprimentos de onda de 1m a 3m e 30m.

Para melhorar a concordância entre as curvas de dispersão teórica e experimental, as camadas foram divididas, a sua espessura foi ajustada e os seus valores de V_s também se ajustaram (baseados em julgamentos de engenharia). O resultado dessas mudanças está apresentado na Figura 4.21(a). Depois do ajuste, as curvas

de dispersão teórica e experimental, apresentadas na Figura 4.21 (b), mostram um melhor ajuste em faixas de comprimentos de onda entre 3m e 20m.

O passo seguinte é ajustar os valores de V_s na faixa de comprimento de onda intermediária, inferior e superior. As suas espessuras e valores de V_s das camadas são modificadas e ajustadas, como mostra a Figura 4.22 (a). Como se observa na Figura 4.22 (b), uma melhor adequação entre as curvas de dispersão teórica e experimental é atingida. Para fazer com que a curva de dispersão teórica se ajuste melhor à curva de dispersão experimental, nas faixas de comprimentos de ondas maiores, o número e valores de V_s das camadas mais profundas foram modificados na Figura 4.23. A nova curva de dispersão teórica mostrada na Figura 4.23 (b) se ajusta melhor à curva de dispersão teórica anterior (Figura 4.22 (b)). A montagem final e o perfil de velocidade de cisalhamento são apresentados na Figura 4.24 e na tabela 4.2.

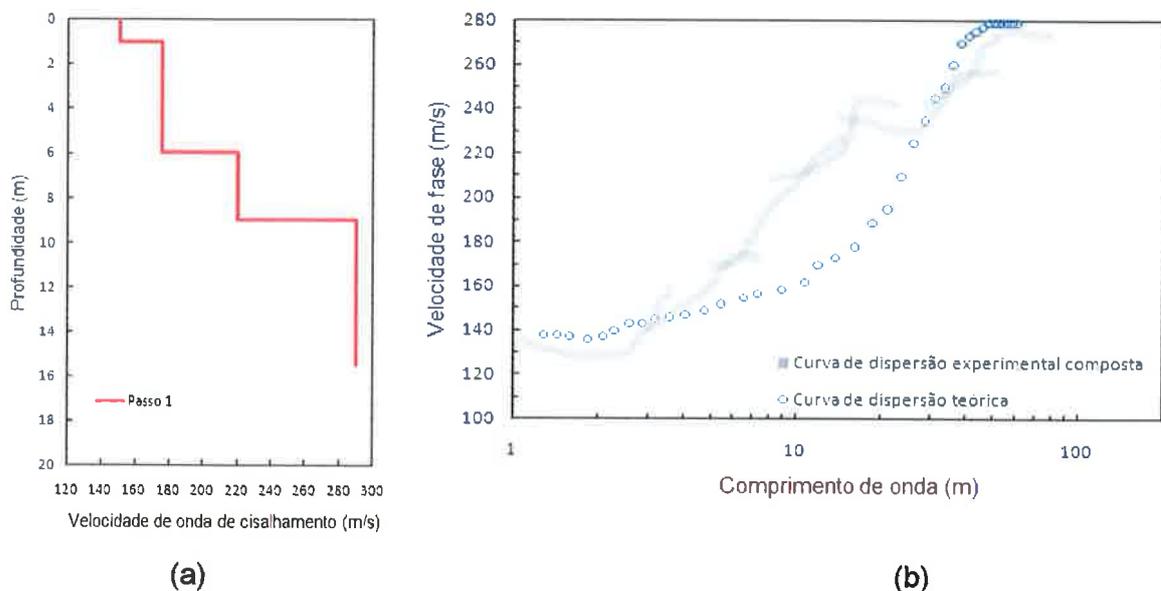


Figura 4.20 - Ilustração da modelagem direta - Passo 1: (a) Assumir um perfil de V_s ; (b) Comparação da curva de dispersão teórica o perfil de V_s assumido com a curva de dispersão experimental composta.

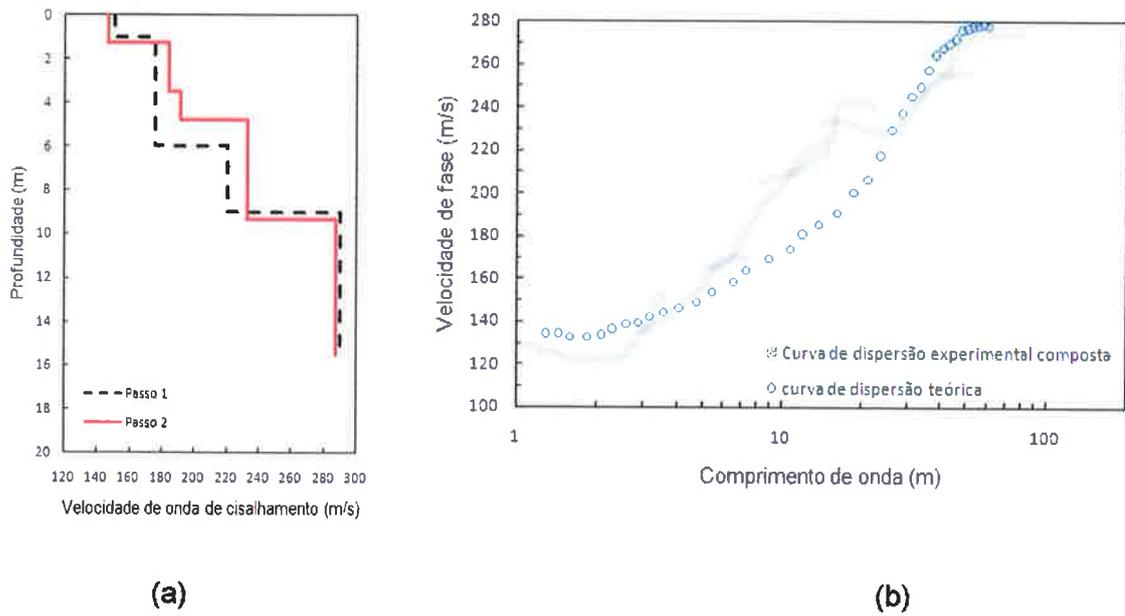


Figura 4.21 - Ilustração da modelagem direta - Passo 2: (a) Assumir um perfil de V_s ; (b) Comparação da curva de dispersão teórica o perfil de V_s assumido com a curva de dispersão experimental composta.

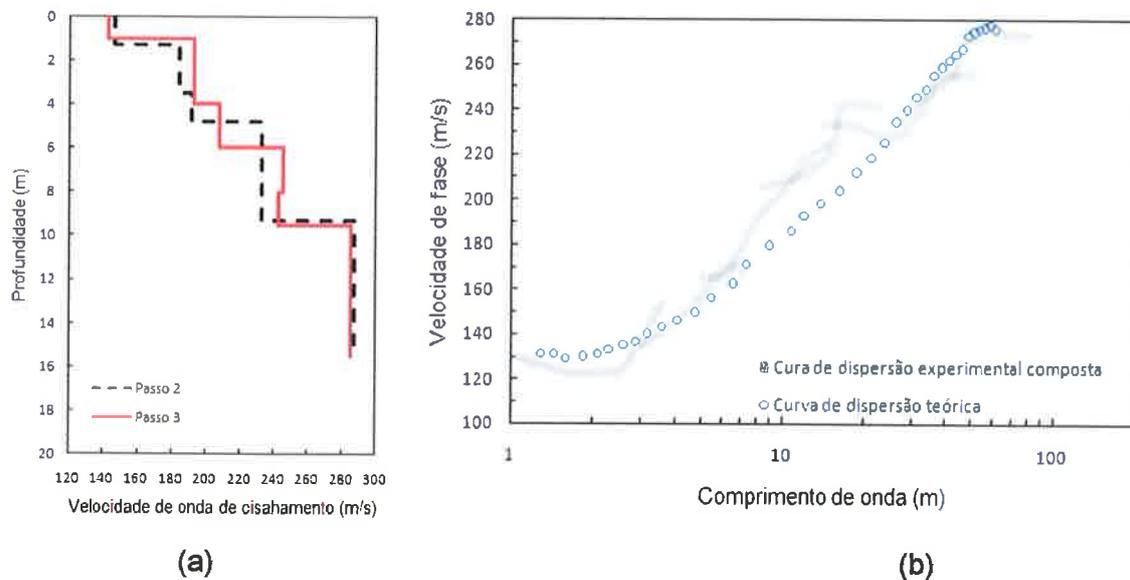


Figura 4.22 - Ilustração da modelagem direta - Passo 3: (a) Assumir um perfil de V_s ; (b) Comparação da curva de dispersão teórica o perfil de V_s assumido com a curva de dispersão experimental composta.

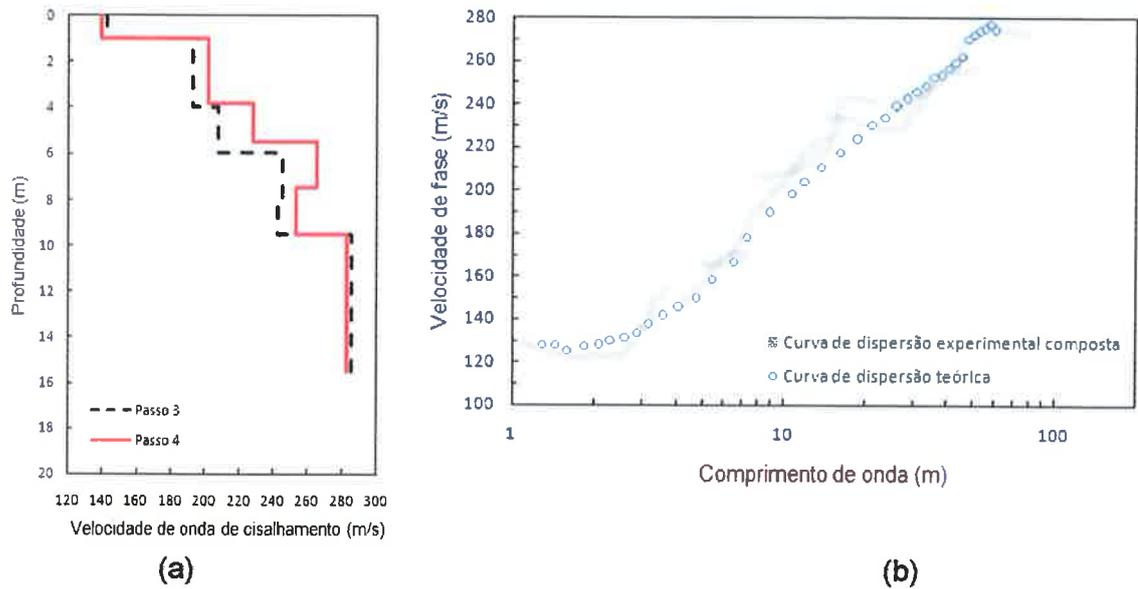


Figura 4.23 - Ilustração da modelagem direta - Passo 4: (a) Assumir um perfil de V_s ; (b) Comparação da curva de dispersão teórica o perfil de V_s assumido com a curva de dispersão experimental composta.

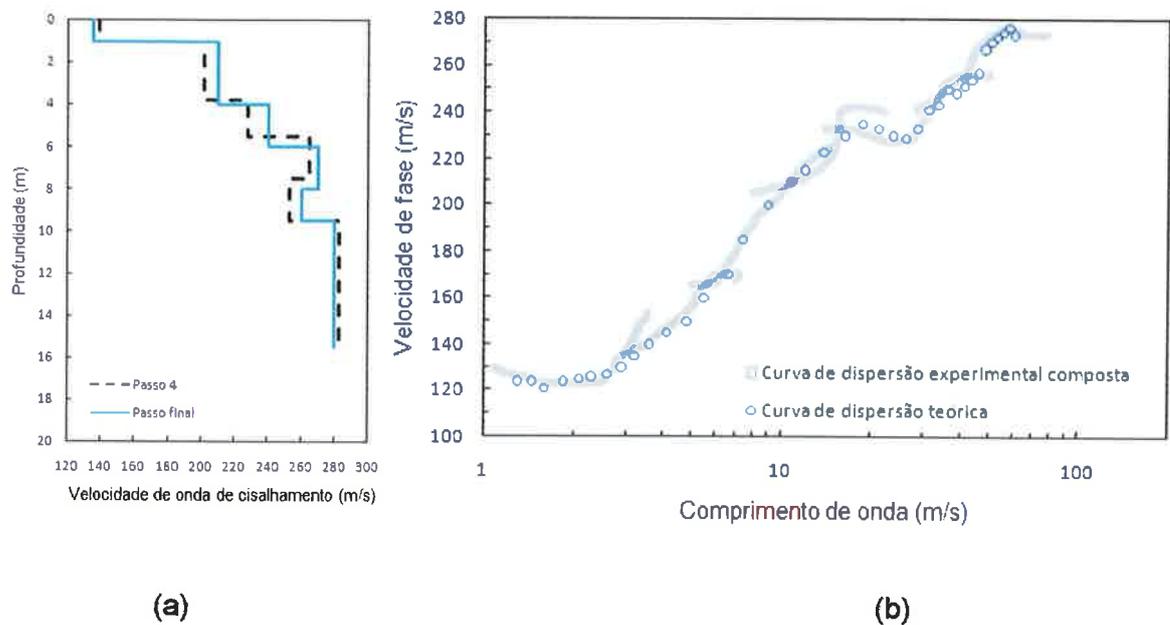


Figura 4.24 - Ilustração da modelagem direta - Passo final: (a) Assumir um perfil de V_s ; (b) Comparação da curva de dispersão teórica o perfil de V_s assumido com a curva de dispersão experimental composta.

Tabela 4.2 - Parâmetros usados no perfil final para desenvolver a curva de dispersão teórica para o local SP-01.

No	Espessura (m)	Profundidade (m)	Velocidade Onda S (m/s)	Poisson ** (v)	Densidade ** (g/cm ³)
1	1,00	0,00	135	0,33	1,89
2	3,00	1,00	210	0,33	1,89
3	2,00	4,00	240	0,33	1,89
4	2,00	6,00	270	0,33	1,90
5	1,30	8,00	260	0,25	1,90
6	6,20	9,30	280	0,25	1,90
7	-	15,50	280	0,25	1,90

** Valores assumidos

O número real de passos na redução de dados foi maior ao exemplo apresentado anteriormente, exigindo entre uma a duas horas para o exemplo.

Todos os processos de acondicionamento no modelo foram avaliados de maneira visual sendo dependente do julgamento crítico do operador. O bom senso e conhecimento da teoria de propagação de ondas são importantes no procedimento da modelagem.

A Figura 4.25 apresenta a diferença que resultaria no perfil final de V_s caso o último ajuste estivesse próximo à parte superior ou inferior dos limites da curva de dispersão experimental composta. Para isso, duas novas curvas de dispersão teóricas foram geradas para ajustarem-se aos limites superiores e inferiores da curva de dispersão experimental. Na mesma figura são apresentadas as comparações entre o perfil original de V_s e os dois novos perfis gerados, além das correspondentes curvas de dispersão teóricas. Como demonstrado na tabela 4.3, a diferença entre os perfis de V_s original e o novo perfil é inferior a 2%, em média, sendo a diferença máxima 5,4%.

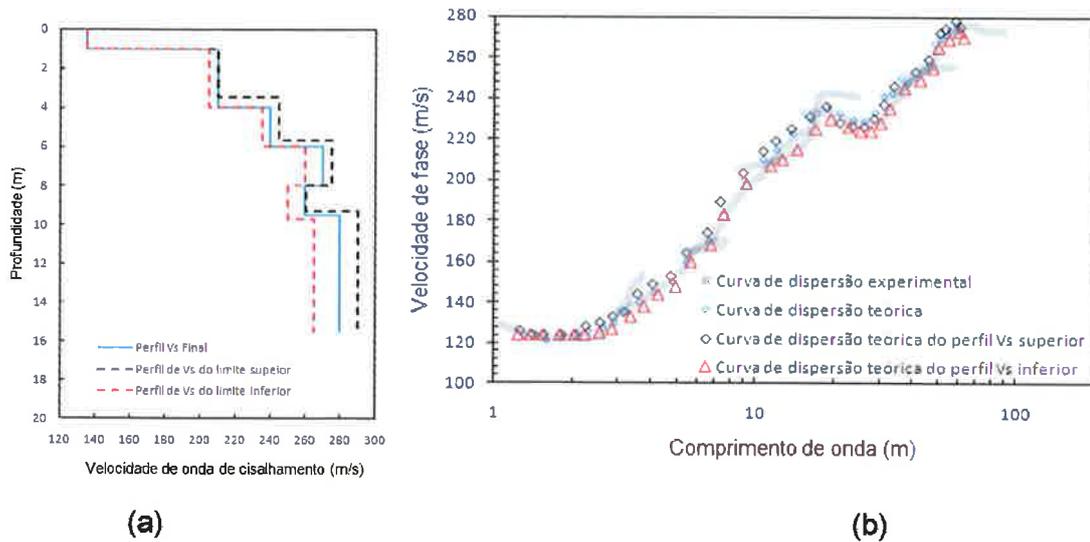


Figura 4.25 - Comparações entre os perfis de V_s e as correspondentes curvas de dispersão teórica original, inferior e superior com a curva de dispersão experimental.

Tabela 4.3 - Comparação do perfil de V_s utilizado para determinar os limites original superior e inferior das curvas de dispersão teórica.

Profundidade (m)	Velocidade (m/s)			Diferença entre perfil V_s (%)	
	Original	limite			
		(1)	superior (2)	inferior (3)	(2)/(1)-1
0,00	135,00	135,00	135,00	0,0%	0,0%
1,00	210,00	210,00	205,00	0,0%	-2,4%
4,00	240,00	245,00	235,00	2,1%	-2,1%
6,00	270,00	275,00	260,00	1,9%	-3,7%
8,00	260,00	260,00	250,00	0,0%	-3,8%
9,30	280,00	290,00	265,00	3,6%	-5,4%
15,50	280,00	290,00	265,00	3,6%	-5,4%

Média V_s : 1,85% -3,70%

CAPÍTULO 5 – ENSAIOS REALIZADOS

5.1 Introdução

Neste capítulo serão mostrados os resultados de ensaios SASW executados no campo experimental da USP, nomeados SP-01 e SP-02. Na escolha dos locais para os ensaios de campo foram levados em consideração a facilidade de acesso e logística, bem como o conhecimento geológico prévio da área. Como a execução de outros ensaios geotécnicos já havia sido realizada no Campo Experimental de Fundação da USP/ABEF, nesse mesmo local também foram realizados os ensaios desta dissertação. Além disso, procurou-se minimizar o efeito da topografia, efetuando os ensaios em terrenos praticamente planos.

5.2 Configuração do ensaio SASW

Na execução do ensaio SASW foi utilizado o arranjo de Geometria de Receptor de Ponto Meio Comum (GPMC), e os espaçamentos entre receptores de 0,5m, 1,0m, 2,0m, 4,0m, 8,0m, e 16,0m.

Foram utilizadas marretas de 10,0kg, 20,0kg e 25,0kg como fonte geradora de energia. Durante os testes foi verificado que a energia gerada pela marreta era suficiente para gerar a curva de dispersão dos pares de geofones posicionados até 16 metros da fonte. Para distâncias maiores a relação sinal/ruído diminui tornando a função de coerência entre os sinais cada vez menores.

Como receptores foram usados dois geofones, com faixa de frequência natural de 1 Hz, resistência interna de 55,00ohm e massa de 963,70g, Modelo L-4C (Seismometer) da Mark Products.

Um Analisador Dinâmico de Sinais (HP 35670 A) foi utilizado para os registros e análise de dados. Este analisador possui quatro canais, podendo obter dados de quatro diferentes geofones ao mesmo tempo. Porém, foram utilizados somente dois canais conforme o número de geofones disponíveis e concordantes com o método

SASW. Este analisador permite trabalhar tanto com energia de corrente alternada de 120 a 240 volts como corrente contínua de 12 volts.

Além dos equipamentos anteriormente mencionados, nos trabalhos de campo foi utilizada uma bateria de 12 volts e 24 ampères, para alimentação do Analisador Dinâmico de Sinais nos locais de ensaio SASW. Também foi utilizada uma trena de 50 metros, permitindo a localização dos geofones no terreno. Para a gravação dos sinais foi usado um disquete magnético de 1,44 MB.

Tanto o Analisador Dinâmico de Sinais, como os geofones e cabos, são de propriedade do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT). A Figura 5.1 mostra os diferentes equipamentos utilizados nos ensaios de campo.

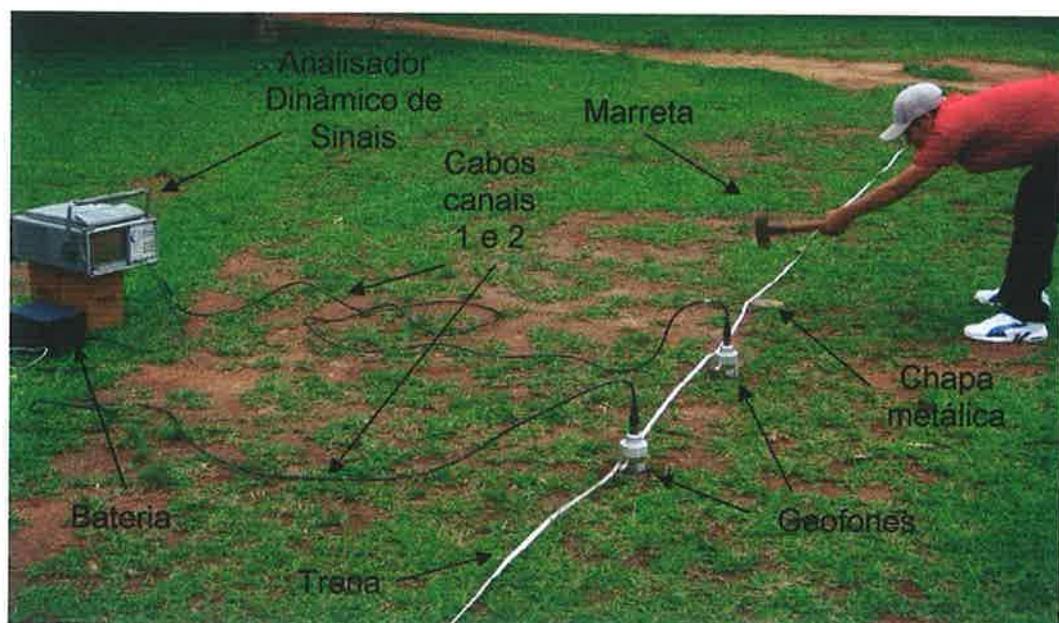


Figura 5.1 - Conjunto de equipamentos de campo necessários para o ensaio SASW.

O sinal dinâmico é gerado utilizando as diferentes fontes, dependendo da faixa de frequências de interesse ou da profundidade desejada. Em geral, para produzir sinais com altos valores da função de coerência na faixa de frequência de interesse, o ensaio foi realizado utilizando-se das diferentes fontes. Normalmente, nos ensaios com espaçamentos entre os geofones de até 1,0m foram utilizados a fonte de 10,0kg; para espaçamentos entre 1,0m e 6,0m, a fonte de 20,0kg e para espaçamentos maiores foi utilizada a fonte de 25,0kg. Em todos os casos, os

ensaios foram repetidos várias vezes, usando-se os mesmos parâmetros de aquisição, a fim de verificar a reprodutibilidade das informações. Vários sinais foram medidos, mas não foram armazenados, pois os valores da função de coerência eram abaixo de 0,90. O objetivo foi proceder aos golpes e os registros, armazenando resultados típicos, representativos de cada espaçamento.

Para identificar uma provável falta de homogeneidade nas camadas, o ensaio é executado usando uma configuração direta e inversa.

5.3 Área estudada

O Campo Experimental de Fundações da USP (Figura 5.2) está localizado na extremidade oeste da bacia de São Paulo, onde o subsolo é composto por solo saprolítico de migmatito, coberto por uma pequena camada de solo coluvionar, silte argiloso poroso, amarelo e marrom. O solo saprolítico forma uma camada espessa de 20m e é basicamente constituído por silte micáceo, arenoso, de cor púrpura, com ocorrências de areia fina siltosa, conforme ABEF (1989). O solo do campo experimental onde foram realizados os ensaios SASW, é bastante heterogêneo e foi objeto de vários estudos (Azevedo e Nijama, 1990; Niyama e Aoki, 1991; Massad, 1991a; Massad, 1991b; Souza, 2001; entre outros).

Ensaio de laboratório indicaram envoltórias efetivas de resistência com coesões da ordem de 22kPa a 115kPa e ângulo de atrito do solo de 23° a 36°. A Figura 5.3 mostra os perfis das sondagens de simples reconhecimento (ABEF, 1989 e Peixoto, 2001).

Ensaio Cross Hole foram executados na zona, indicado velocidades de onda de cisalhamento $V_s=340\text{m/s}$ em profundidades de 10m e $V_s=200\text{m/s}$ próximas da superfície, conforme ABEF (1989).

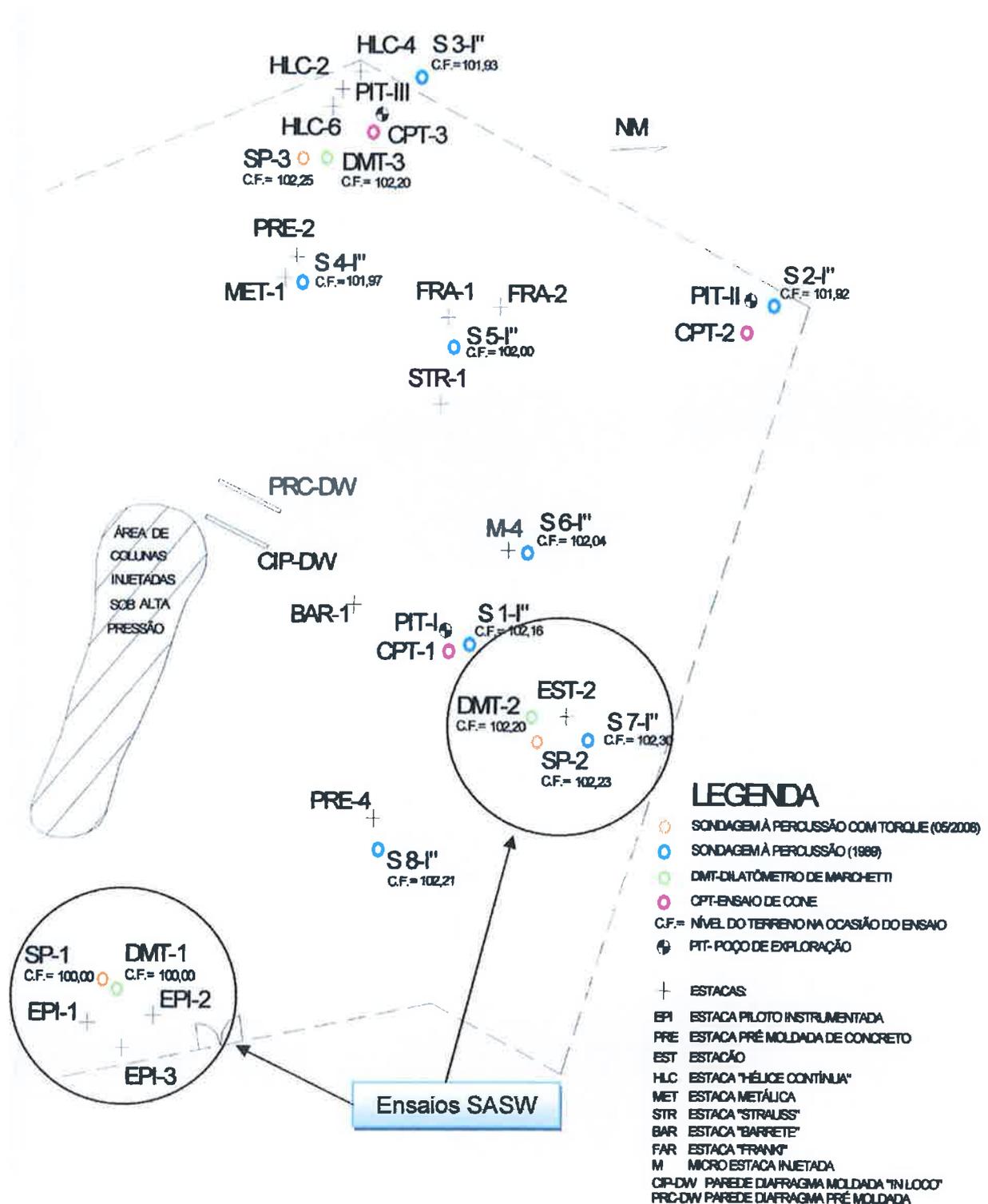


Figura 5.2 - Croquis da locação dos ensaios no Campo Experimental de Fundações da USP (ABEF, 1989) modificado (Gomes, 2007).

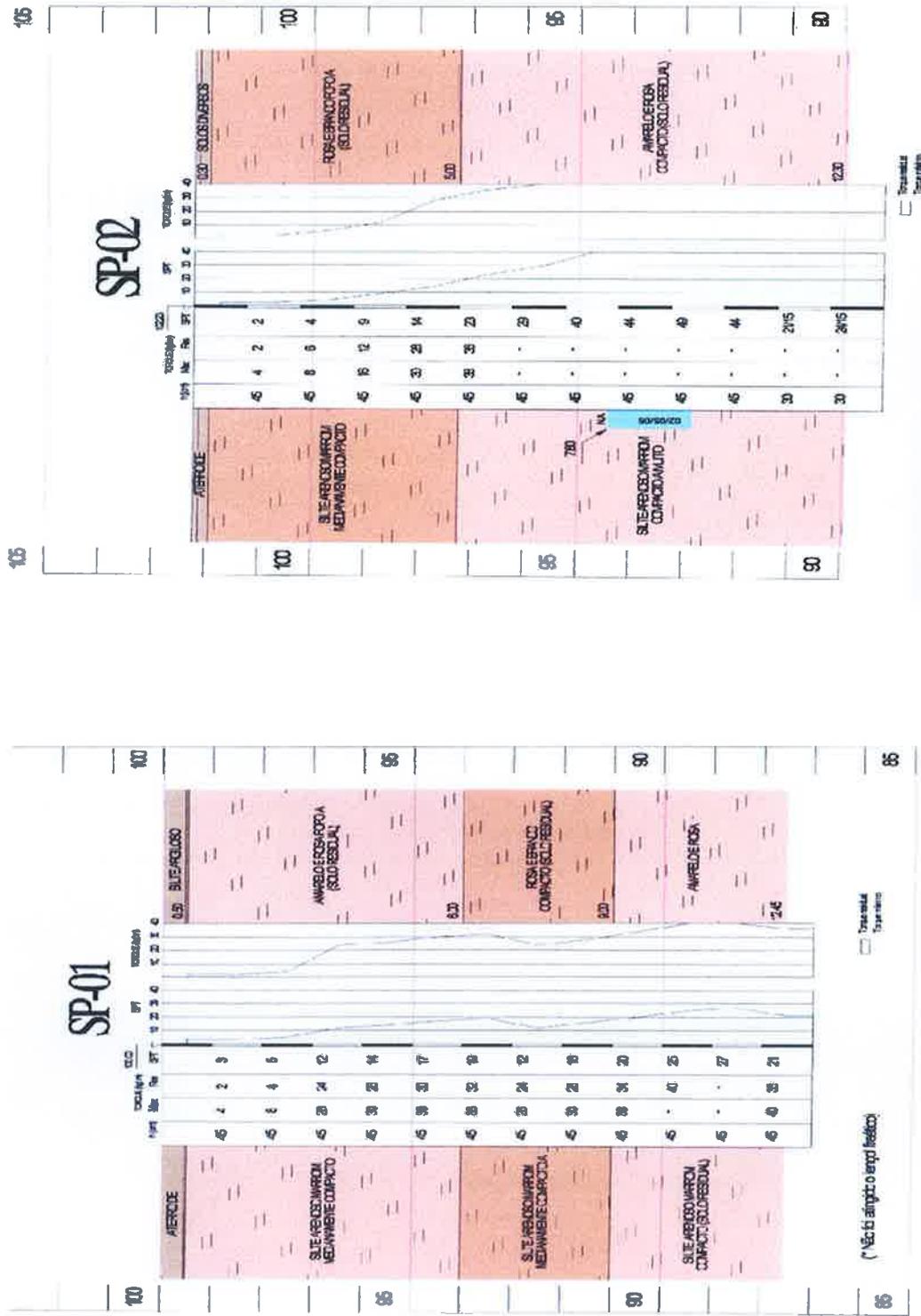


Figura 5.3 - Perfis de solo dos locais estudados SP-01 e SP-02 no Campo Experimental de Fundações da USP (ABEF, 1989) modificado (Gomes, 2007).

5.4 Resultados Obtidos

A fim de avaliar a metodologia foram selecionados dois locais no Campo Experimental de Fundações da USP, ilustrando os principais aspectos da aplicação do método. Nestes locais, as respostas obtidas podem ser classificadas como boas. Foram adotados nestas áreas os mesmos procedimentos de campo, assim como, os mesmos equipamentos e as mesmas rotinas de processamento, indicadas no Capítulo 4.

- Campo Experimental de Fundações da USP

No Campo Experimental de Fundações da USP foram realizados dois ensaios SASW, nas localizações denominadas SP-01 e SP-02, mostradas na Figura 5.2. A disposição dos receptores foi posicionada a 0,5m, 1,0m, 2,0m, 4,0m, 8,0m e 16m da fonte. Obteve-se, assim, uma chegada de energia aceitável, fazendo uso de marretas de 10,0kg, 20,0kg e 25,0kg. Os perfis de velocidade de onda de cisalhamento e as curvas de dispersão obtidas são mostrados nas Figuras 5.4 e 5.5. As Tabelas 4.4 e 4.5, mostram a obtenção do módulo de cisalhamento máximo.

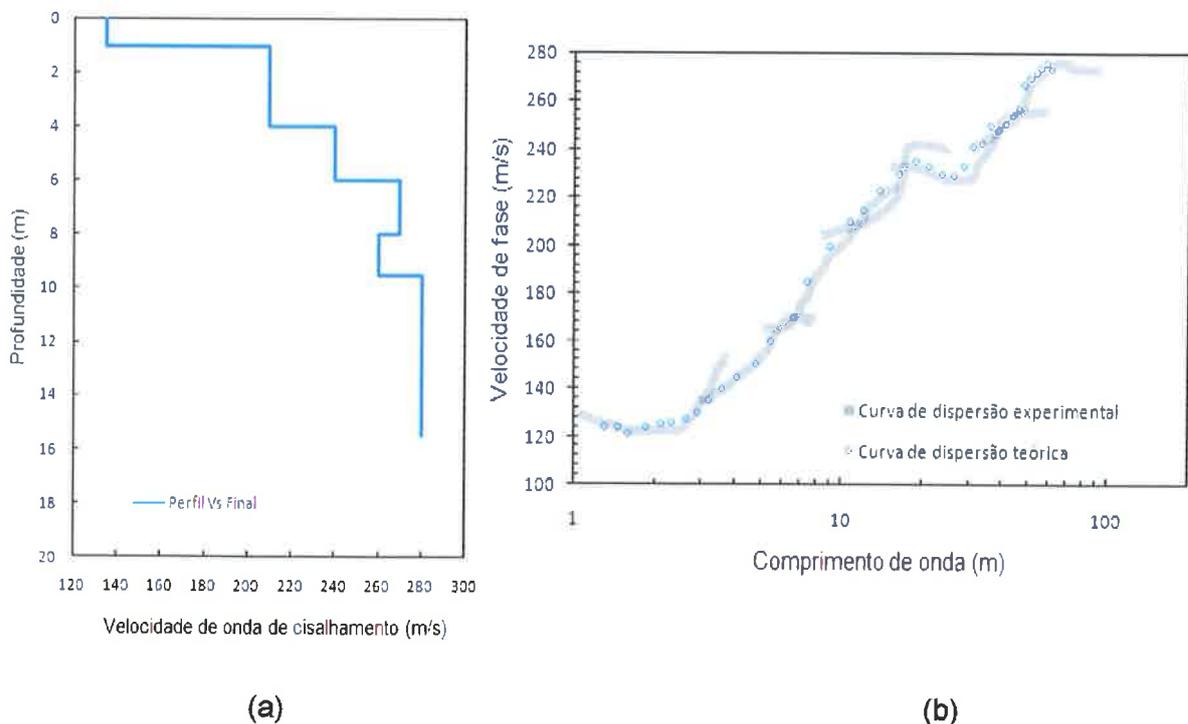


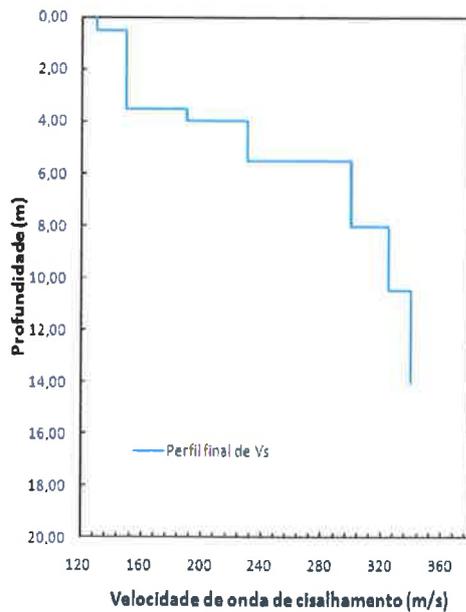
Figura 5.4 – Local ensaiado SP-01: (a) Perfil de velocidade de onda cisalhamento e (b) Curva de dispersão teórica.

Tabela 4.4 - Valores do módulo cisalhante do local SP-01.

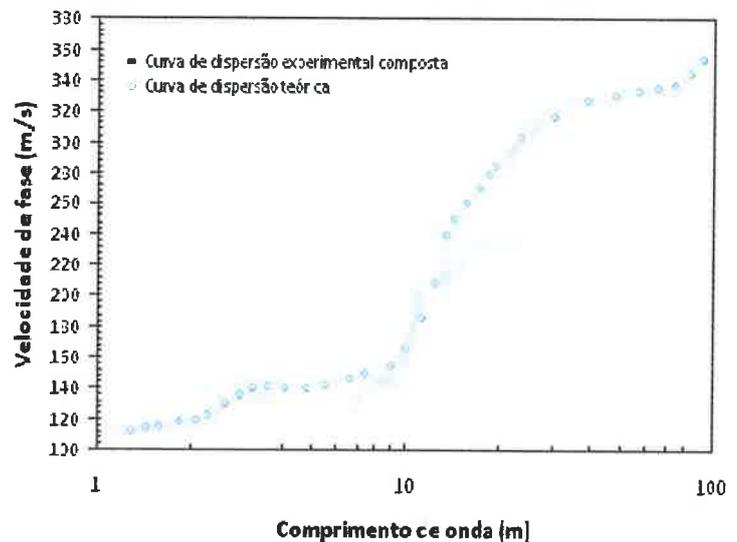
No	Espessura (m)	Profundidade (m)	Velocidade Onda S (m/s)	Poisson ** (ν)	Densidade ** (g/cm ³)	G _{máx} * MPa
1	1,00	0,00	135	0,33	1,89	34
2	3,00	1,00	210	0,33	1,89	83
3	2,00	4,00	240	0,33	1,89	109
4	2,00	6,00	270	0,33	1,90	139
5	1,30	8,00	260	0,25	1,90	128
6	6,20	9,30	280	0,25	1,90	149
7	-	15,50	280	0,25	1,90	149

* Valores calculados: $G_{máx} = V_S^2 \cdot \rho$

** Valores assumidos



(a)



(b)

Figura 5.5 – Local ensaiado SP-02: (a) Perfil de velocidade de onda cisalhamento e (b) Curva de dispersão teórica.

Tabela 4.5 - Valores do módulo cisalhante do local SP-02.

No	Espessura (m)	Profundidade (m)	Velocidade Onda S (m/s)	Poisson ** (v)	Densidade ** massa g/cm ³	G _{máx} * MPa
1	1,00	0,00	130	0,33	1,89	32
2	2,50	3,50	190	0,33	1,89	68
3	2,20	4,00	230	0,33	1,89	100
4	2,30	5,50	300	0,25	1,90	171
5	1,30	8,00	325	0,25	1,90	201
6	6,20	10,50	340	0,25	1,90	220
7	-	14,00	340	0,25	1,90	220

* Valores calculados: $G_{máx} = V_S^2 \cdot \rho$

** Valores assumidos

A determinação dos perfis de velocidade dos locais estudados foi obtida seguindo-se a metodologia indicada no capítulo 4 desta dissertação. Com o intuito de comparação, fez-se a estimativa da V_S a partir de ensaios *SPT*, cujos valores são conhecidos, com os valores de V_S , determinados a partir de ensaio *SASW*, nos locais SP-01 e SP-02. As equações usadas foram a de Ohta e Goto (1978) e Imai e Tounouchi (1982), determinada em solos japoneses, descritas em Barros (1997):

$$V_S = 85,3 N_{SPT}^{0,341} \quad \text{Ohta e Goto (1978)} \quad (5.1)$$

$$V_S = 96,9 N_{SPT}^{0,314} \quad \text{Imai e Touchi (1982)} \quad (5.2)$$

Com V_S em m/s, a Figura 5.6 mostra o perfil de velocidades dos locais SP-01 e SP-02.

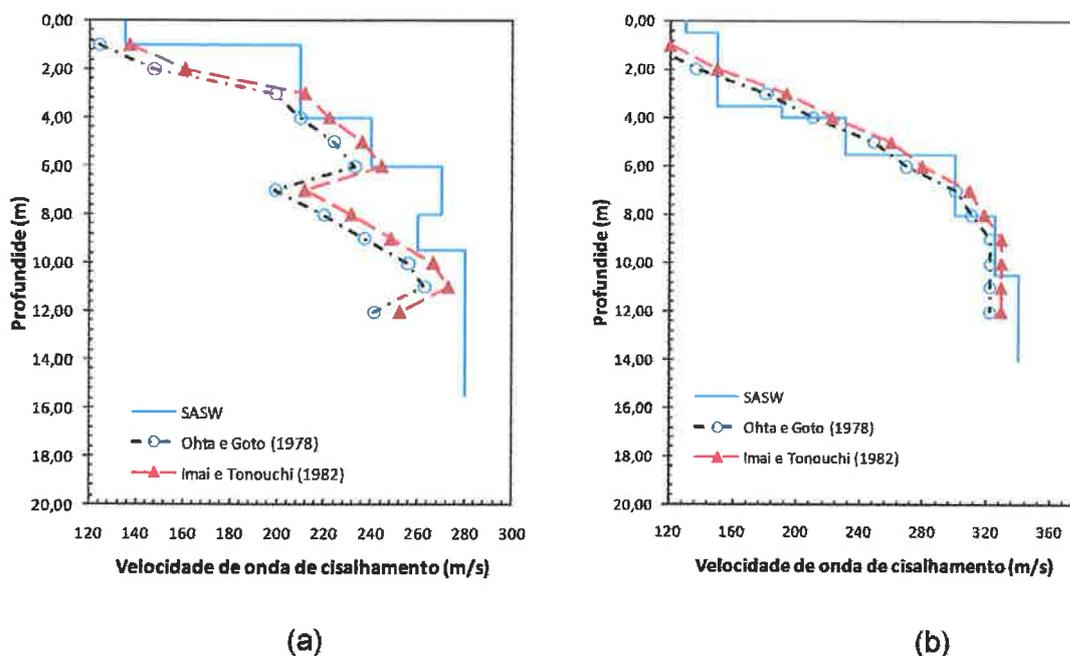


Figura 5.6 - Perfis de velocidade dos locais: (a) SP-01 e (b) SP-02

Na metodologia SASW pode se determinar o $G_{m\acute{a}x}$, utilizando a seguinte relação:

$$G_{m\acute{a}x} = V_s^2 \cdot \rho \quad (5.3)$$

Onde V_s é a velocidade de cisalhamento e ρ a densidade do material.

A influência nos resultados dos valores de densidade e do coeficiente de Poisson será exposta no item 5.5.

Realizou-se uma comparação do $G_{m\acute{a}x}$ obtido através do ensaio SASW e através das correlações de Imai e Tounuchi (1982), descrita em Barros (1997), as quais foram determinadas em solos japoneses, sendo:

$$G_{m\acute{a}x} = 14,07 N_{SPT}^{0,68} \quad (5.4)$$

Com $G_{m\acute{a}x}$ em MPa.

Também foram utilizadas as correlações obtidas por Barros (1997) na sua tese de doutoramento:

$$G_{m\acute{a}x} = 43,8 N_{SPT}^{0,419} \quad (\text{A}) \quad (r=0,902; 26 \text{ pontos}) \quad (5.5)$$

$$G_{m\acute{a}x} = 94 + 2,3 N_{SPT} \quad (\text{B}) \quad (r=0,932; 26 \text{ pontos}) \quad (5.6)$$

Com $G_{m\acute{a}x}$ em MPa.

A Figura 5.7 mostra a variação do $G_{m\acute{a}x}$ com a profundidade nos locais SP-01 e SP-02.

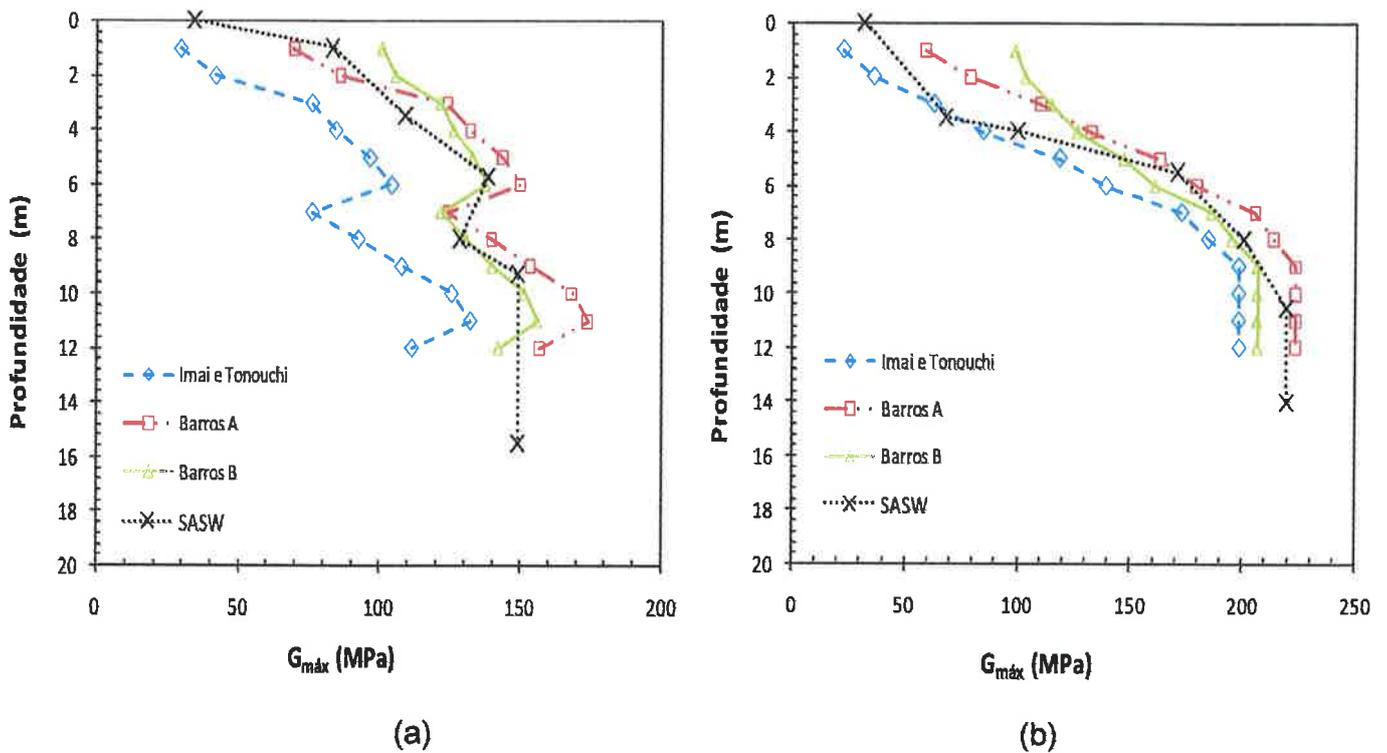


Figura 5.7 - Perfis de $G_{m\acute{a}x}$ dos locais: (a) SP-01 e (b) SP-02.

Tanto no local SP-01 como SP-02 foram observados um incremento gradual na velocidade da onda de cisalhamento.

Os valores de velocidade de onda de cisalhamento nos locais SP-01 e SP-02 foram muito próximos dos valores obtidos a partir de correlações com SPT. Houve a

ocorrência de um desvio no local SP-01 nas profundidades de 6,00m a 9,00m, devido provavelmente à heterogeneidade dos estratos no local estudado.

Nas localizações próximas da superfície houve dificuldade na determinação da velocidade de cisalhamento devido aos tipos de receptores usados (geofones), apresentando diferenças no primeiro metro de profundidade, em ambos os locais.

Os valores do módulo de cisalhamento máximo $G_{m\acute{a}x}$ calculados são diretamente proporcionais ao quadrado da velocidade de propagação das ondas V_s . A Figura 5.7(a) e 5.7(b) mostra o perfil do módulo de cisalhamento máximo dos locais estudados.

No local SP-01 verifica-se uma boa aproximação do $G_{m\acute{a}x}$ com a correlação encontrada por Barros (1997), em ambas as correlações. A correlação de Imai (1978) e Tonouchi (1982) foi menor aos determinados com o ensaio SASW. Os valores de $G_{m\acute{a}x}$ variáveis entre 40MPa e 150MPa, incrementando-se com a profundidade.

No caso do local SP-02 encontraram-se valores próximos à relação de Imai e Tonouchi até uma profundidade de 4,00m. Em ambos os locais verifica-se um incremento no valor de $G_{m\acute{a}x}$ com a profundidade. Os valores de $G_{m\acute{a}x}$ variam entre 40MPa e 210MPa, incrementado-se com a profundidade.

Os parâmetros do modelo, que levam a maiores alterações no comportamento da curva, são a velocidade da onda de cisalhamento e a espessura das camadas. Assumindo valores de densidade e o coeficiente de Poisson (ou velocidade de compressão) mantendo-os inalterados durante toda a inversão. Além disso, quando houver outro tipo de informação que permita definir o número de camadas, a sua espessura, deve ser introduzida com dados fixos, a fim de diminuir o número de variáveis do modelo e facilitar a inversão.

5.5 Análise de sensibilidade

No processo de modelagem direta que é usado no *WinSASW*, alguns parâmetros devem ser assumidos a fim de se desenvolver o perfil de V_s e a curva de dispersão

teórica. Estes incluem a espessura das camadas, peso unitário (γ_n), além de dois valores escolhidos entre os três parâmetros: V_p , V_s ou coeficiente de Poisson (ν) de cada camada. Para estudar o efeito das alterações destes parâmetros no resultado do perfil de V_s foi realizado uma modelagem direta com o programa *WinSASW*, gerando curvas de dispersão para os correspondentes perfis de V_s , observando os ajustes ocorridos entre as curvas de dispersão antes e depois das modificações.

5.5.1 Coeficiente de Poisson

Cada um dos três parâmetros, V_p , V_s e ν , de cada camada pode ser calculado a partir dos outros dois, através da equação 2.14, vista no Capítulo 2, a qual está relacionada ao coeficiente de Poisson, sendo este um parâmetro importante nas análises de dados SASW. Para solos e rochas, o coeficiente de Poisson varia, em geral, entre 0,20 e 0,40. (Das, 1999) Para estudar o efeito que produz a mudança do coeficiente de Poisson sobre a resultante dos perfis de V_s , um estudo de sensibilidade foi realizado com os dados do local SP-01.

Com a finalidade de estudar o efeito que produz a variação do coeficiente de Poisson sobre o perfil de V_s , os valores mínimos e máximos do coeficiente de Poisson (0,20 e 0,40) serão usados, substituindo-se os valores iniciais com os que foram utilizados na modelagem direta da curva de dispersão teórica original. Para cada estudo, o perfil inicial de V_s foi mantido, porém, o coeficiente de Poisson foi modificado, pelos os valores de 0,20 ou 0,40, de acordo com cada caso. As correspondentes curvas de dispersão teóricas de cada um dos casos são mostradas na Figura 5.8. Como pode ser observado, existem nítidas diferenças entre as três curvas de dispersão teóricas

Da mesma maneira foi realizada uma modelagem direta, com valores de coeficiente de Poisson de 0,20 e 0,40, respectivamente, determinando o perfil final de V_s de cada um dos casos, ajustando as curvas de dispersão teóricas às curvas de dispersão experimental. A curva de dispersão teórica original e as duas novas curvas teóricas, além da curva de dispersão experimental, estão mostradas na Figura 5.9. Como pode-se observar na Figura 5.9, as três curvas de dispersão

teóricas, geradas pela modelagem direta, são quase idênticas. Isso se reflete nos perfis de V_s , conforme está mostrado na Figura 5.10.

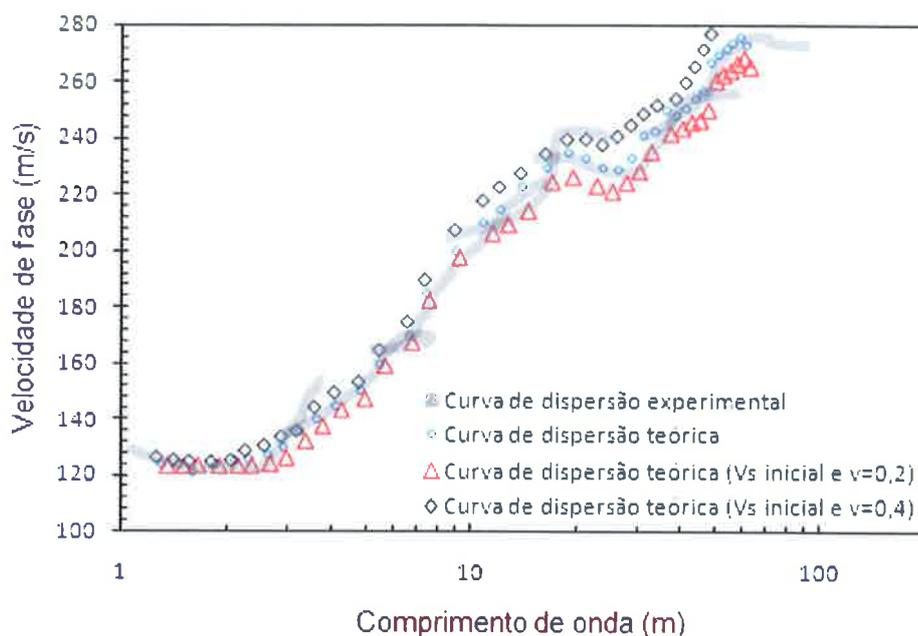


Figura 5.8 - Comparação da curva de dispersão teórica original e as duas novas curvas de dispersão teóricas com perfil de velocidade original e com valores de coeficiente de Poisson modificados ($\nu=0,20$ e $\nu=0,4$).

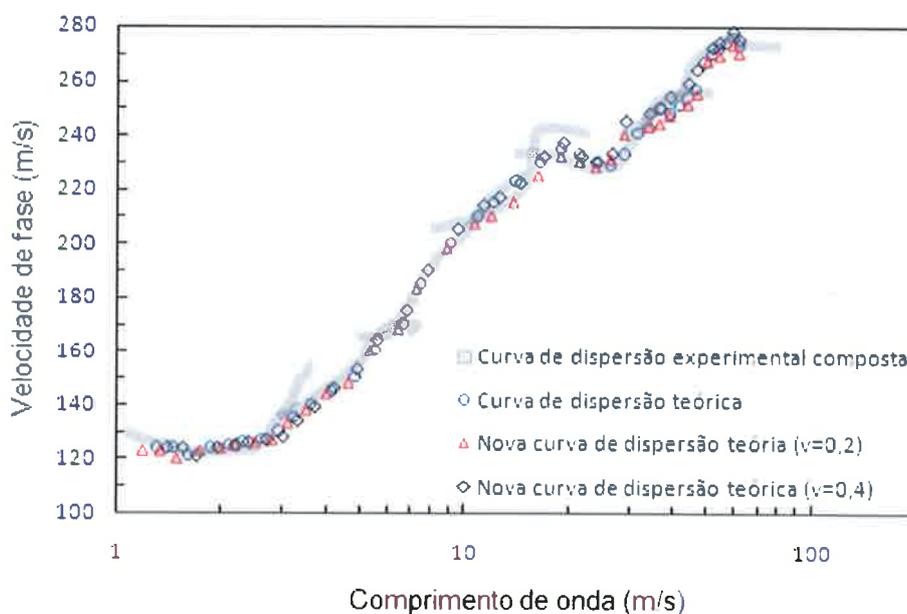


Figura 5.9 - Comparação da curva de dispersão experimental e teórica com as duas novas curvas de dispersão teóricas (considerando a variação do coeficiente de Poisson).

Também é possível verificar que o perfil de V_s (Figura 5.10) gerado com $\nu = 0,20$, não difere muito ao perfil de V_s original. Em média, a variação foi inferior a 3%,

como indicado na Figura 5.10(b). No caso do perfil de V_s com $\nu = 0,40$, a diferença é menor na parcela superior, aumentando-se na parcela inferior, sendo em média 4% (Figura 5.10(b)). Nazarian (1984) determinou que a variação da velocidade de cisalhamento, produto da variação do coeficiente de Poisson (0,15 e 0,49) não é superior a 10%. Neste caso, a diferença total é inferior a 10% na faixa de valores de coeficiente de Poisson entre 0,20 a 0,40. Por outro lado, é raro o coeficiente de Poisson assumir valores $\nu = 0,20$ ou $\nu = 0,40$, sendo esta diferença menor na realidade.

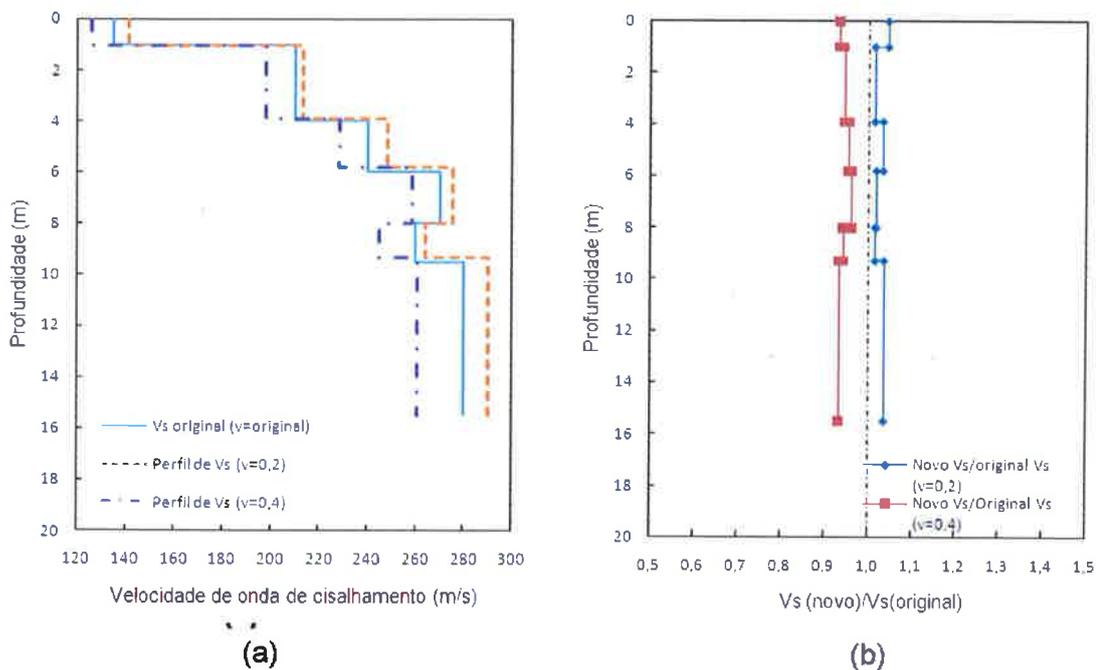


Figura 5.10 - Comparação dos perfis de V_s : (a) Perfil de V_s original e perfis de V_s determinados assumindo valores de coeficiente de Poisson mínimos e máximo; (b) Variação da relação entre V_s novo e V_s original.

5.5.2 Peso específico natural

Segundo estudos teóricos realizados por Stokoe et al. (1994), a precisão necessária do peso específico natural (γ_n) assumido e utilizados nas análises SASW é pequena, ou seja, as mudanças no peso específico natural têm um pequeno efeito no perfil de V_s . Geralmente a faixa de valores de peso específico natural dos materiais geotécnicos está entre 14kN/m^3 a 25kN/m^3 e estes valores abrangem a maioria de

solos e rochas. Os limites superiores e inferiores são utilizados para estudar a maneira em que este parâmetro afeta o perfil final de V_s .

Primeiramente, as curvas de dispersão teórica original e experimental de campo serão utilizadas como referência de comparação. Para verificar a influência do valor do peso específico natural, foram realizadas novas análises usando-se dois outros valores: 14kN/m^3 ou 25kN/m^3 . Com esses valores, foram calculadas as correspondentes curvas de dispersão teóricas. Comparando-se as duas novas curvas de dispersão teóricas com a experimental de campo (Figura 5.11), geradas a partir do mesmo perfil de V_s com diferente peso específico natural, pode ser observado que não existe diferença prática entre estas curvas de dispersão, pois, as três curvas são quase idênticas. Portanto, o efeito do peso específico assumido nas análises SASW é pequeno ou inexistente.

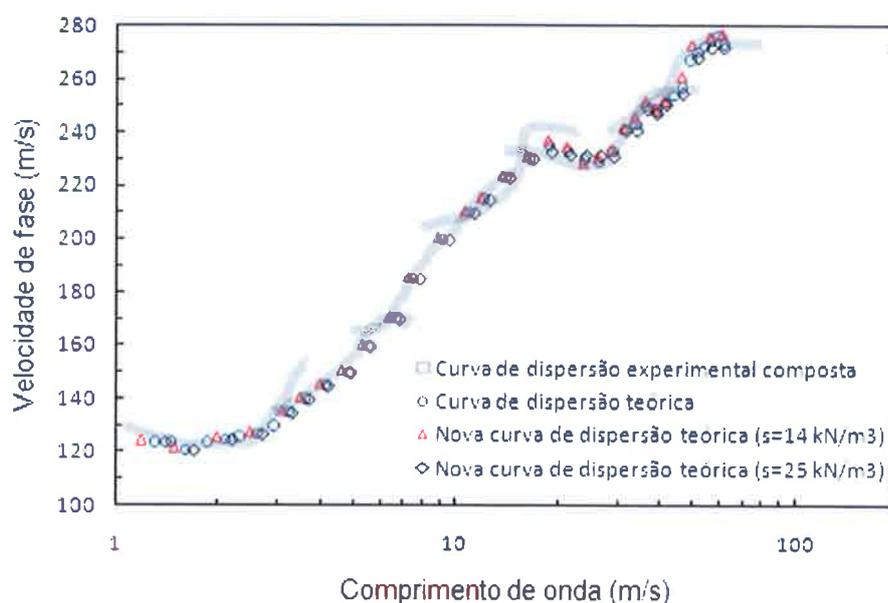


Figura 5.11 - Comparação das curvas de dispersão experimental de campo e teórico com as duas novas curvas de dispersão geradas usando pesos unitários modificados e o perfil de V_s original.

5.5.3 Espessuras das camadas

Em relação à espessura das camadas, foi tomada como exemplo a camada 3 que possui uma espessura adotada como 2,0m, com variações de +/- 5%, +/- 10% e +/- 15%. Logo, as curvas geradas foram comparadas à curva de dispersão teórica original e estão mostradas na Figura 5.12. Como podem ser observadas, as

diferenças são pequenas. Portanto, pode-se afirmar que a mudança na espessura das camadas tem um efeito muito pequeno nas análises do método SASW.

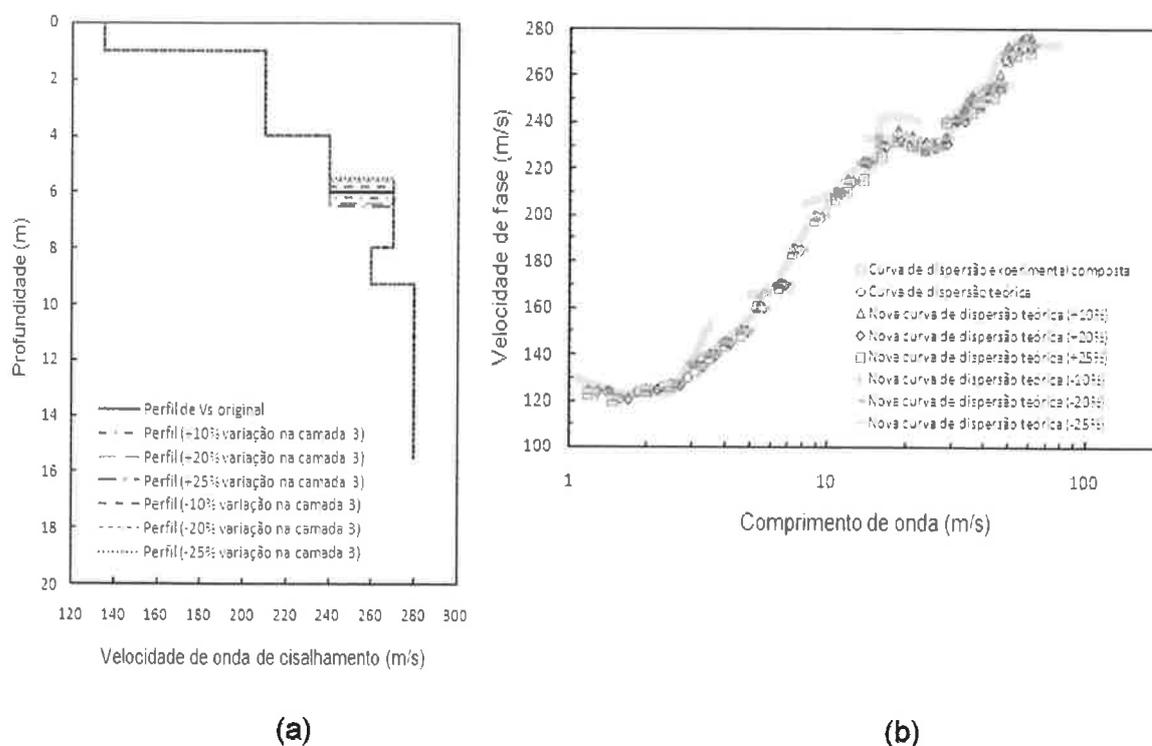


Figura 5.12 - Variação da espessura da camada 3 no local SP-01: (a) Perfil de velocidade de onda de cisalhamento; (b) Curva de dispersão experimental e novas curvas de dispersão teóricas com variação das espessuras.

Concluindo, os parâmetros do modelo que levam a maiores alterações no comportamento da curva de dispersão teórica no processo de modelagem direta são a velocidade da onda de cisalhamento e a espessura das camadas, mantendo-se constantes o coeficiente de Poisson e o peso específico natural.

Em relação à variação dos valores assumidos, logo após a obtenção da curva de dispersão teórica, o coeficiente de Poisson produz uma maior variação na mesma, sendo este inferior a 5%, enquanto que o efeito da variação nos valores de peso unitário natural e espessura das camadas é muito pequeno. Em geral, os valores de peso unitário natural e coeficiente de Poisson podem manter-se inalterados durante todo o processo da modelagem direta. Além disso, quando houver outro tipo de informação que permita definir o número de camadas, a sua espessura deve ser introduzida como dados fixos, a fim de diminuir o número de variáveis do modelo e facilitar a modelagem direta (inversão).

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho de dissertação foi apresentado o método de análise espectral de ondas superficiais (SASW) que, a conhecimento do autor, ainda não é aplicado, além de ser pouco difundido no Brasil. Por ser um método de ensaio, de rápida execução no campo e que, com um correto planejamento de aquisição, registro e análise de dados, considerando-se o enquadramento geológico da área, permite caracterizar adequadamente os locais estudados através da determinação dos perfis de velocidade de onda de cisalhamento, assim como o perfil de $G_{máx}$. Este fato pode ser verificado pelos resultados apresentados neste trabalho.

7.1 Conclusões

O método de análise espectral de ondas superficiais apresenta-se como uma técnica rápida e adequada para a caracterização dos perfis de solos.

Em relação aos conceitos teóricos, foram apresentadas as propriedades dinâmicas dos solos, possibilitando o entendimento de suas características. Também foram desenvolvidas as equações que dominam a propagação das ondas elásticas, sejam elas em meios homogêneos ou em meios heterogêneos, permitindo uma maior compreensão do método SASW.

De uma maneira geral, pode-se extrair as seguintes conclusões sobre as vantagens e desvantagens do método:

Vantagens:

- Possibilita a determinação do perfil de velocidade de onda de cisalhamento de um sistema de várias camadas, com simetria axial.
- É um método de ensaio não destrutivo.
- Permite obter informações do terreno localizadas abaixo de camadas mais rígidas.
- A informação obtida não depende da fonte de ondas utilizada, ou seja,

- depende apenas das propriedades do terreno entre a fonte e os receptores.
- Comparando-se a outros métodos sísmicos pontuais, o método SASW globaliza as propriedades do terreno, afetando volumes importantes de material.
 - Indicado para identificar superfícies de terreno onde há suspeita da existência de solos com diferentes tipos de rigidez.

Desvantagens:

- A profundidade de investigação depende da frequência gerada, necessitando de baixas frequências para a obtenção de informações a maiores profundidades.
- As reflexões produzidas pelos contornos laterais afetam a curva de dispersão, tornando difícil a inversão.

A orientação dos geofones influencia significativamente a qualidade dos sinais, sendo de fundamental importância manter a orientação dos mesmos na posição vertical. Da mesma maneira, deve-se garantir um contato adequado com o solo, pois, ao ser gerado um sinal a partir de um impacto, o geofone pode apresentar um ressalto, resultando sinais de baixa qualidade, refletindo em baixos valores de coerência. Salienta-se a falta de padronização do procedimento de ensaio, inclusive a nível internacional, seguindo-se um procedimento seletivo de golpes em campo e avaliação qualitativa dos resultados.

Sobre as curvas de dispersão teóricas, a inversão da curva de dispersão experimental é um ponto crítico na interpretação dos resultados e a este respeito foi comprovado a viabilidade do programa *WinSASW* para obtê-las, evidenciando a influência que a espessura e a rigidez das distintas camadas num meio estratificado podem apresentar nessas curvas. Este fato foi comprovado com o local SP-01 que apresenta um contraste na rigidez em profundidade, sendo este bem representado pela modelagem direta com a solução 3D.

O algoritmo de inversão utilizado no programa *WinSASW* permite obter as velocidades das camadas mas, para isso, é necessário que os valores de espessura

e velocidade de onda de cisalhamento sejam inseridas pelo operador na interação inicial, assumindo valores de coeficiente de Poisson e peso específico natural, mantendo-os constantes durante o processo de inversão, por isso, a modelagem direta apresenta-se como a melhor opção. Este processo apesar de permitir aferir manualmente velocidades e espessuras, é dependente do julgamento crítico do operador.

As fontes portáteis utilizadas na presente dissertação fornecem resultados aceitáveis até uma profundidade máxima de 10m. A definição da profundidade de investigação dependerá da qualidade dos sinais de baixa frequência, podendo ser necessários outros tipos de fonte.

Em relação à análise de sensibilidade, três parâmetros foram estudados: o coeficiente de Poisson, peso específico natural e espessura das camadas. O parâmetro V_p não foi estudado, pois, está relacionado ao coeficiente de Poisson. No estudo experimental desta dissertação, variando-se o coeficiente de Poisson na faixa de 0,2 a 0,4, foi obtida uma diferença máxima nos perfis de velocidade de onda de cisalhamento de 5%. Essa diferença nos perfis de V_s pode ser considerada como razoável na prática de engenharia. Já em relação ao peso unitário e às espessuras das camadas, os estudos mostraram que não há impacto no perfil final de V_s , pois, mudanças nos valores de peso específico ou espessuras das camadas produzem um efeito muito menor nas curvas de dispersão teóricas.

Finalmente, a boa concordância entre os resultados do ensaio SASW com as estimativas feitas a partir de correlações com SPT, permite afirmar que o método SASW possibilita, de forma rápida e econômica, a determinação do módulo cisalhante ($G_{máx}$) em deformações muito pequenas.

7.2 Futuros trabalhos de pesquisa

Para melhorar e promover o uso da metodologia SASW, apresentam-se a seguir algumas sugestões de pesquisas futuras que podem complementar e melhorar a metodologia proposta:

- Baseados na experiência desta dissertação, o processamento de dados após a

realização do ensaio SASW demanda muito tempo nas etapas de mascaramento e procedimento da modelagem direta para a obtenção da curva de dispersão teórica que possa representar as características do terreno. A este respeito pode-se desenvolver um algoritmo de análise de inversão mais amigável, podendo contribuir para uma automação do método SASW, tornando-o mais robusto e, podendo, assim, ser amplamente utilizado na prática da engenharia geotécnica.

- Sugere-se a possibilidade de utilizar mais receptores na etapa de registro dos sinais a fim de tornar mais rápida a construção da curva de dispersão experimental no método de ensaio SASW.

- Realização de ensaios SASW em modelos de ensaio com conhecimento das propriedades dos materiais em laboratório podendo, dessa maneira, compreender o comportamento das ondas, o efeito do acoplamento do receptor, o efeito da forma e peso das fontes e as configurações das fontes e receptores, obtendo-se dados concretos através de experiências realizadas em solos brasileiros.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABEF. Research on foundation engineering. Published on the occasion of the XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, 1989, 86 p.

ACHENBACH, J. D. Wave propagation in elastic solids. Amsterdam: North-Holland, 1993. 425 p.

AKI, K.; RICHARD, P. G. Quantitative seismology: theory and methods. San Francisco: W. H. Freeman, 1980. 932 p.

AL-HUNAIDI, M. O. Difficulties with phase spectrum unwrapping in spectral analysis of surface waves nondestructive testing of pavements. Canadian Geotechnical Journal. n. 29, 1992, p 506-511.

ALKIRE, B. D. Seasonal soil strength by spectral analysis surface waves. Journal of Cold Regions Engineering, ASCE v. 6, p. 22-38, 1992.

ANDRUS, R. D.; et al. Delineation of densified sand at treasure island by SASW testing. Geotechnical Site Characterization: Proceedings of the First International Conference, edited by Robertson & Mayne, Atlanta, GA, A.A. Balkema – Rotterdam/ Netherlands, v. 1, p. 459-464. 1998. Disponível em: <<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build98/PDF/b98012.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2008

AZEVEDO JR, N; NIYAMA, S. Determinação do módulo de elasticidade de estacas de concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECANICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 9, 1990, Salvador, ABMS/ABGE, *Anais*. Salvador, v.2, 1990, p. 519-522.

BALLARD (JR), R. F. Determination of soil shear moduli at depths by in-situ vibrator techniques. United State Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Miscellaneous Paper n. 4-691, Vicksburg, Mississippi. 1964.

BARROS, C. J. M. Módulo de Cisalhamento Dinâmico em Solos Tropicais. 1997. 437 p. Tese (doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo 1997.

BOLT, B. A. Nuclear explosions and earthquakes. São Francisco: W. H. Freeman & Company, 1976. 310 p.

BULLEN, K. E.; BOLT, B. A. An Introduction to the Theory of Seismology. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 499 p.

CAMPANELLA, R. G. Field methods for dynamic geotechnical testing: An Overview of Capabilities and Needs. Dynamic Geotechnical Testing II, ASTM - STP 1213, p. 3-23, 1994.

DAS, B. M. Principles of Foundation Engineering. São Francisco: Thomson & Learning, 1999. 862 p.

DOYLE, H. Seismology. Chichester: J. Wiley & Sons, 1995. 218 p.

EWING, W. M.; JARDETZKY, W. S.; PRESS, F. Elastic Waves in Layered Media. New York: McGraw-Hill, 1957. 380 p.

FOTI, S. Multistation methods for geotechnical characteristics using surface waves, 2000. 229 p. Tese (Doutorado), Politecnico di Torino, Torino, 2000.

GOMES, D. D. Uso do Dilatometro de Marquetti para a previsão de capacidade de carga e dos recalques elásticas em estacas. 2007. 145 p. Dissertação (mestrado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GUCUNSKI, N.; WOODS, R. D. Numerical simulation of the SASW test. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. v. 11, n. 4, p. 213-227. 1992.

HARDIN, B. O.; DRNEVICH, V. P. Shear modulus and damping in soils: measurements and parameters effects. Journal of Soil Mechanics and Foundation Divisions, ASCE, v. 89, n. SM6, p. 603-624, 1972.

HASKELL, N. A. The dispersion of surface waves on multilayered media. Bulletin of the Seismological Society of America, v. 43, p. 17-34. 1953.

HEISEY, J. S. et al. Determination of in situ Shear-Wave Velocities from Spectral Analysis of Surface Waves, Research Report No. 256-2, Center of Transportation Research, The University of Texas at Austin, Texas, 1982.

HEUKELOM, W.; FOSTER, C. R. Dynamic testing of pavements. Journal of Soil Mechanics and Foundation Divisions, ASCE, v. 86, n. SM1, p. 1-28, 1960.

HILTUNEN, D. R., WOODS, R. D. Influence of source and receiver geometry on the testing of pavements by the surface waves method. Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, ASTM – SPT 1026, p. 138-154, 1989.

IMAI, T.; TONOUCI, K. Correlation of N - Value with S. – Wave Velocity and Shear Modulus. In: European Symposium on Penetration Testing, 2, Amsterdam, Netherlands. Proceedings, p. 67-72, 1982

ISHIHARA, K. Soil Behaviour in earthquake geotechnics. New York: Oxford University Press, 1996. 350 p.

JOH, J. H. Advances in interpretation and analysis techniques for spectral-analysis-of-surface-waves (SASW) measurements. 1996. 240 p. Tese (Doutorado) – Universidade do Texas at Austin, Texas, 1996

JOH, J. H. User's guide to WinSASW, a program for data reduction and analysis of SASW measurements. The University of Texas at Austin, Texas, 1992.

JONES, R. B. Surface wave technique for measuring the elastic properties and thickness of roads: theoretical development. *British Journal of Applied Physics*, v. 13, p. 21-29, 1962.

KAUSEL, E.; PEEK, R. Dynamic Loads in the Interior of a Layered Stratum: an Explicit Solution. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 72, n. 5, p. 1459-1481. 1982.

KAUSEL, E.; ROESSET, J. M. Stiffness matrices for layered soils. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 71, n. 6, p. 1743-1761, 1981.

KRAMER, S. L. *Geotechnical earthquake, engineering*. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 653 p.

LAI, C. G.; RIX, G. J. Simultaneous Inversion of Rayleigh Phase Velocity and Attenuation for Near-Surface Site Characterization. Report n. GIT-CEE/GEO-98-2, Georgia Institute of Technology, School of Civil and Environmental Engineering, p. 258, 1998. Disponível em:
<<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=CCDFC320196D8F7850F0536ACF922ACC?doi=10.1.1.37.587&rep=rep1&type=pdf>> . Acesso em: 4 maio 2007.

LAMB, H. On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Serie A*, v. 203, p. 1-42, 1904.

LOPES, I. M. F. Caracterização de solos no domínio das pequenas deformações. Aplicação do Método das Ondas Superficiais. 2005. 369 p. Tese (Doutorado) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2005.

LUKE, B. A. In situ measurements of stiffness profiles in the seafloor using the spectral analysis of surface waves (SASW) method. 1994. 232 p. Tese (Doutorado) – Universidade do Texas at Austin, Texas, 1994.

MANESH, S. M. Theoretical investigation of the spectral analysis of surface waves (SASW) technique for application offshore. 1991. 282 p. Tese (Doutorado) – Universidade do Texas at Austin, Texas, 1991.

MASSAD, F. Análise da transferência de carga em duas estacas instrumentadas quando submetidas a compressão axial. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS, 2, 1991, São Paulo, ABMS/ABMF, *Anais*. São Paulo, Novembro, v. 1, 1991a, p. 235-244.

MASSAD, F. Estacas escavadas em compressão axial: comportamento e parâmetros visando a estimativa dos recalques. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA

DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS, 2, 1991, São Paulo, ABMS/ABMF. *Anais*, São Paulo, Novembro, v. 1, 1991b, p. 255-264.

MATTHEWS, M. C.; HOPE, V. S.; CLAYTON, C. R. The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles. *Proceedings Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, v. 119, n. 2, p. 84-95, 1996.

MILLER, G. F.; PURSEY, H. On the partition of energy between elastic waves in semi-infinite solid. *Proceedings of the Royal Society of London., Mathematical and Physical Sciences. Series A*, v. 233, p. 55-69. 1955.

NAGARAJ, T. S.; MIURA, N. *Soft Clay Behaviour: Analysis and assessment*, Taylor & Francis, 2001, 332p.

NAZARIAN, S. In situ determination of elastic moduli of soil deposits and pavement systems by spectral-analysis-of-surface-waves method. 1984. 453 p. Tese (Doutorado) – Universidade do Texas at Austin, Austin, 1984.

NAZARIAN, S.; STOKOE K. H. Evaluation of moduli and thicknesses of pavement systems by spectral-analysis-of-surface-waves method, Research Report 256-4, Center of Transportation Research, The university of texas at austin, n 256-4, Texas. December, 1983.

NAZARIAN, S.; STOKOE K. H. In situ determination of elastic moduli of pavement system by spectral analysis of surface waves method: practical aspects, Research Report 368-1F, Center for Transportation Research, The university of texas at Austin, Texas . August, 1985.

NAZARIAN, S.; STOKOE K. H. In situ shear wave velocities from spectral analysis of surface waves, In: *World Conference on Earthquake Engineering*, 8, San Francisco, California: Pretince-Hall, July, v. 3, p. 31-38, 1984.

NAZARIAN, S.; STOKOE, K. H.; HUDSON, W. R. Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems, *Transportation Research Record*, Transportation Research Board, Washington, D.C. n. 930, p. 38-45, 1983.

NIYAMA, S.; AOKI, N. Correlações entre provas de carga dinâmica e estática no campo experimental da EPUSP/ABEF. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS, 2, 1991, São Paulo, ABMS/ABEF. *Anais*, São Paulo, Novembro, v.1, 1991, p. 285-293.

OHTA, Y.; GOTO, N. Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes. In: Earthquake engineering and structural dynamics. Proceedings, v. 6, p. 167-18, 1978.

PEIXOTO, A. S. P. Estudo dos ensaios SPT e sua aplicação na prática de engenharia de fundações. 2001. 468 p. Tese (Doutorado) – Universidade de Campinas, Campinas, 2001.

PUZRIN, A. M.; BURLAND, J. B. Nonlinear model of small strain behaviour of soils, *Geotechnique*, v. 48, n. 2, p. 217-233, 1998.

RICHART, F. E.; WOODS, R. D.; HALL, J. R. *Vibrations of Soils and Foundations*, New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1970. 414 p.

RIX G. J. Experimental study of factors affecting the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves method, 1988. 231 p. Tese (Doutorado) - Universidade de Texas at Austin, Austin, 1988.

RIX, G. J.; et al. Surface wave test in landfills and embankments. *Geotechnical Earthquake engineering and Soil Dynamics III*, ASCE, n. 75, p. 1008-1019, 1998.

ROSENBLAND, B. L.. Experimental and Theoretical Studies in Support of Implementing the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) Method Offshore. 2000. 298 p. Tese (Doutorado) - Universidade de Texas at Austin, Austin, 2000.

ROESET et al. Modulus and Thickness of the Pavement Surface Layer from SASW Test. *Transportation Research Record 1260*, Transportation Research Board, Washington, DC, p. 53-63, 1990.

SHEARER, P. M, *Introduction to Seismology*. New York: Cambridge University Press, 1995. 260 p.

SHERIFF R. E.; GELDART L. P. *Exploration seismology*. New York: Cambridge University Press, 1995. 592 p.

SOUZA, A. Estaca piloto instrumentada: Uma ferramenta para o estudo da capacidade de carga de estacas quando submetidas a esforços axiais de compressão. 2001. 250 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

STOKOE, K. N. et al, Characterization of Geotechnical Sites by SASW Method. In: Geophysical Characterization of Sites. Proceedings, ISSMFE, Technical Committee, Edited R. D. Woods, Oxford & IBH Pub. Co., New Delhi, India, n. 10, p. 15-25, 1994

STROBBIA, C. Surface wave method: acquisition, processing and inversion. 2003. 317 p. Tese (Doutorado) - Politécnico de Torino, Torino, 2003.

TATSUOKA, F. Impacts on geotechnical engineering of several recent findings from laboratory stress-strain tests on geomaterials, the 2000 Burmister Lecture, The Columbia University, New York, 2000. Disponível em: <<http://geotle.t.u-tokyo.ac.jp/tatsuoka/lecture/Burmister00/Burmister.html>>. Acesso em: 13 set. 2007.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIF, R. E. Applied Geophysics. Cambridge University Press, 1990, 770 p.

THOMSON, W. T. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium. Journal Applied Physics, v. 21, p. 89-93, 1950.

VIKTOROV I. A. Rayleigh and lamb waves: physical theory and applications. New York: Plenum Press, 1967. 154 p.

VUCETIC, M. Cyclic Threshold Shear Strains in Soils, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. V. 120, n. 12, p. 2208-2228, 1994.

WOODS, R. D. Screening of surface waves in solids. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, v. 94, n. 4, p. 951-979, 1968.