



Inversão conjunta de Ondas Rayleigh através da técnica MASW na avaliação de áreas susceptíveis a deslizamentos de terra

Sergio Bezerra Lima Junior¹, Renato Luis Prado², Welitom Rodrigues Borges³, Jackson Alves Martins¹, Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco¹, Nilo Costa Pedrosa Junior³ e Ailton Nascimento Amorim¹

Recebido em 04 de junho de 2012, aceito em 26 de novembro de 2013

¹ Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto – LGPSR / DEGEO / UFC²; Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas-IAG/USP; ³ Laboratório de Geofísica Aplicada – LGA / IG / UnB

Resumo

Este artigo mostra a aplicação do método MASW (multichannel analysis of surface waves), utilizando a inversão conjunta dos modos fundamental com o primeiro modo da curva de dispersão das ondas superficiais, com base em resultados de uma pesquisa na área de erosão e deslizamento de terra na cidade de Ubatuba, estado de São Paulo. Discutimos também aspectos relacionados à aquisição, processamento e inversão dos dados. A abordagem de usar o modo fundamental e o primeiro modo trouxe uma maior estabilidade no processo de inversão, em comparação com os resultados usando apenas o modo fundamental das ondas Rayleigh. Além disso, o método foi menos sensível às camadas mais superficiais (até 10 metros) em comparação com os métodos geofísicos de GPR e refração. A inversão multimodal das ondas Rayleigh foi capaz de mapear as interfaces mais profundas onde as camadas têm distintas propriedades elásticas (isto é, ondas de velocidades de cisalhamento diferentes). Somente método MASW identificou a espessura de solo onde que em condições de saturação mostraria uma maior suscetibilidade à deslizamento, tendo em vista a dependência direta da onda secundária em relação à constante de cisalhamento do material.

Palavras-Chave: MASW, ondas superficiais, Inversão conjunta, Ubatuba

Abstract

This paper discusses the use of MASW method (multichannel analysis of surface waves) using the joint inversion of fundamental mode with the first mode of dispersion data of surface waves, based on results from a survey in area of erosion and landslide in Ubatuba city, state of São Paulo. Here we also discuss aspects related to the acquisition, processing and data inversion. The approach of using fundamental and first mode brought greater stability in the inversion process, compared with the results using only the fundamental mode. Moreover, the method was less sensitive to the superficial layers (up to 10 meters) compared to GPR and refraction methods. The multimode inversion of Rayleigh waves was able to map deeper interfaces where the layers have distinct elastic properties (i.e. different shear waves velocities). Only MASW method identified the thickness of the soil in which they saturation conditions show increased susceptibility to slip, in order to direct dependence of the secondary wave with respect to the constant shear of the material.

Keywords: MASW, surface waves, Join inversion, Ubatuba

1. Introdução

O conhecimento das propriedades elásticas de materiais geológicos e seus efeitos na propagação de ondas sísmicas são importantes para a área da engenharia civil e da geologia ambiental. A determinação da velocidade de propagação da onda cisalhante (onda S) nos materiais superficiais (solos e rochas alteradas) é de interesse para a mecânica de solos e para a engenharia de fundações. A importância vem do fato de que sua propagação está diretamente relacionada à resistência mecânica de solos e rochas. No entanto, ainda há dificuldade na geração e registro de ondas cisalhantes em ensaios sísmicos convencionais em função da instrumentação.

Nos anos 80 houve grande impulso no uso das ondas Rayleigh visando à obtenção do perfil de velocidades das ondas S com a introdução do método de Análise Espectral de Ondas Superficiais (Spectral Analysis of Surface Waves – SASW, Stokoe et al., 1994). O método se baseia na análise da geometria de dispersão das ondas superficiais em meios estratificados. Dos registros sísmicos obtém-se a curva de dispersão do meio e consequentemente, após a aplicação de uma rotina de inversão, obtém-se o perfil de velocidades da subsuperfície.

Uma evolução do método SASW, que empregava somente dois receptores, ocorreu com a proposta do emprego da aquisição sísmica com a técnica de análise multicanal de ondas superficiais (Multichannel Analysis of Surface Waves – MASW) apresentada por pesquisadores do Serviço Geológico do Kansas, EUA (Park et al., 1999; Xia et al., 1999). No Brasil este método já foi objeto de estudo acadêmico (Marchioreto, 2002) com a realização de testes de avaliação em sítios controlados.

Lima Júnior (2007) utilizou a técnica MASW em um estudo de avaliação das ondas Rayleigh para a obtenção de perfis de velocidade de onda S visando à caracterização geotécnica de solos não saturados, apenas com os resultados da inversão do modo fundamental da onda Rayleigh. Ocorre que em meios heterogêneos estratificados a propagação das ondas Rayleigh é um fenômeno

multi-modal, ou seja, para uma mesma frequência podem existir diferentes comprimentos de onda e consequentemente diferentes velocidades de fase, correspondente a cada modo de propagação.

Empiricamente a energia de modos superiores tende a tornar-se mais dominante com o aumento da distância fonte-receptor. Em alguns casos, os componentes de menor comprimento de onda do modo fundamental são mascarados pelos modos superiores das ondas de Rayleigh em uma faixa de frequência maior, dificultando assim a análise dos dados.

Este trabalho propõe uma reanálise da interpretação da curva de dispersão do modo fundamental, e um ajuste na rotina de inversão em função de novas considerações sobre as curvas de dispersão dos modos superiores, onde é feita uma análise comparativa entre os dois resultados face às informações geológicas disponíveis da área. São também discutidos alguns aspectos da aquisição de dados e da obtenção das curvas de dispersão e da inversão.

2. Área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Ubatuba, litoral norte do estado de São Paulo, mais especificamente na região de Maranduba (Fig. 1).

O local foi selecionado entre as diversas áreas onde houve exploração de saibro e produtos associados existentes na região. Essas áreas foram mapeadas no âmbito do projeto “Diretrizes para a regeneração sócio-ambiental de áreas degradadas por mineração de saibro, Ubatuba/SP” (2º Relatório – Programa de pesquisas em políticas públicas – processo Fapesp nº 03/07182-5). Após o abandono da lavra (por exaustão ou impedimento legal) são potencialmente propícias à erosão e escorregamentos. Dentre as características geológico-geotécnicas relevantes da área podemos relacionar: i) média encosta com espessura de solo reduzida; e ii) perfil geológico básico composto de horizonte superficial de origem residual de solo argilo-arenoso sobreposto a solo saprolítico e/ou saprolito na transição para o maciço rochoso.

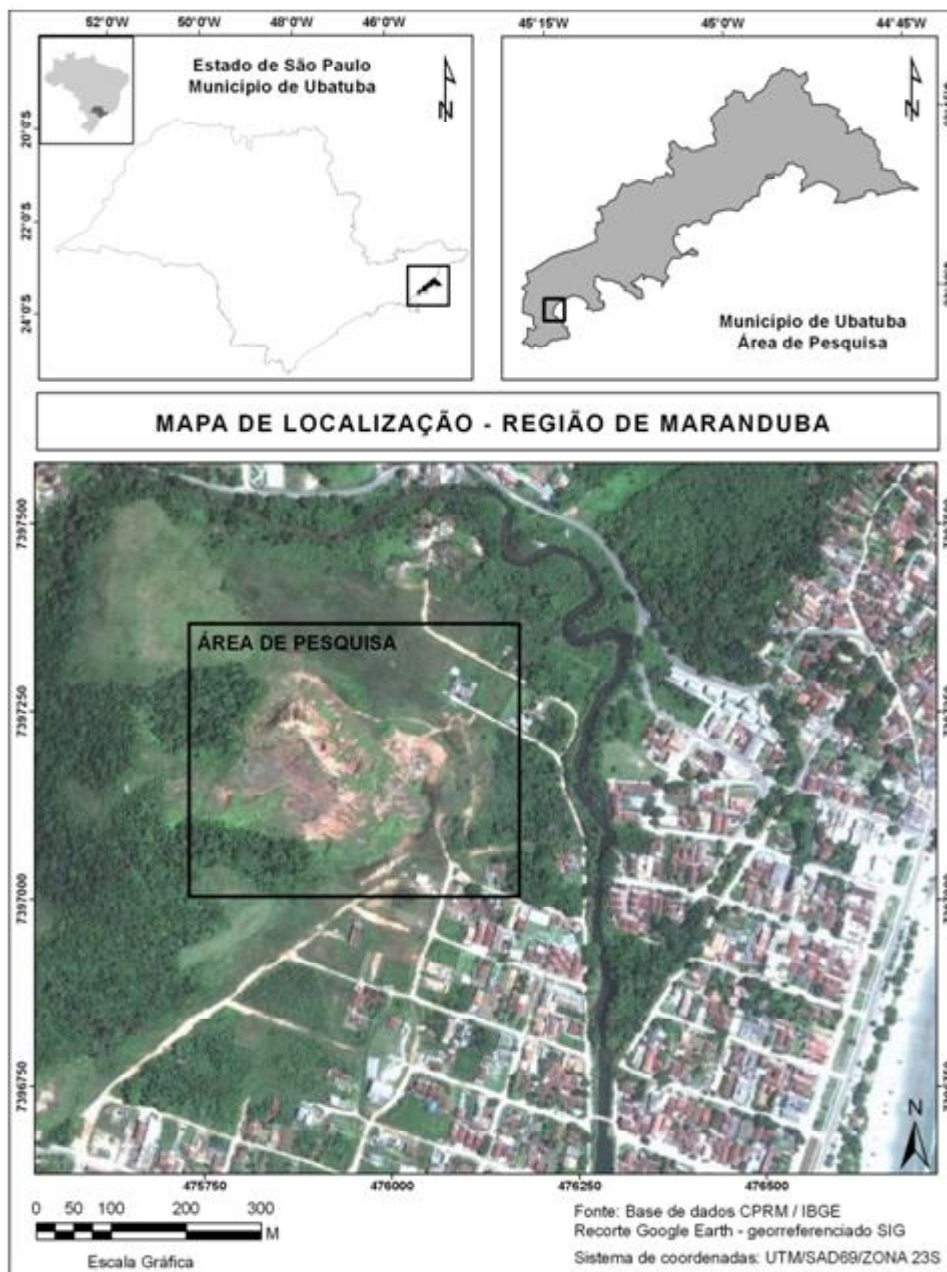


Fig. 1 – Mapa de localização da área de estudo na região de Maranduba, município de Ubatuba, litoral norte do estado de São Paulo.

A partir de análises granulométricas de amostras de sondagens a trado (Fig. 2) e do mapeamento de campo foi feita uma classificação expedita dos horizontes de solo presentes na área.

Assim, tem-se para o solo residual três horizontes distintos: i) composto por argila pouco arenosa, amarela, com intercalações de estratos orgânicos e arenosos (0–0,8 m); ii) composto por material argiloso pouco arenoso, minerais micáceos, com pequenos grãos de quartzo dispersos, sem

estrutura da rocha (0,8–5 m); e iii) material areno-argiloso a argilo-arenoso, de cor variegada e com a presença de estrutura reliquiar (5–12 m). Sob o solo residual tem-se a rocha alterada composta de granito-gnaisses.

3. Fundamentos teóricos

A aplicação ou a variação repentina de uma força em um corpo produz uma deformação que pode se transmitir através das partículas sob a

forma de ondas elásticas que dependendo das suas características de propagação são chamadas de ondas de corpo ou ondas superficiais (Evans, 1997).

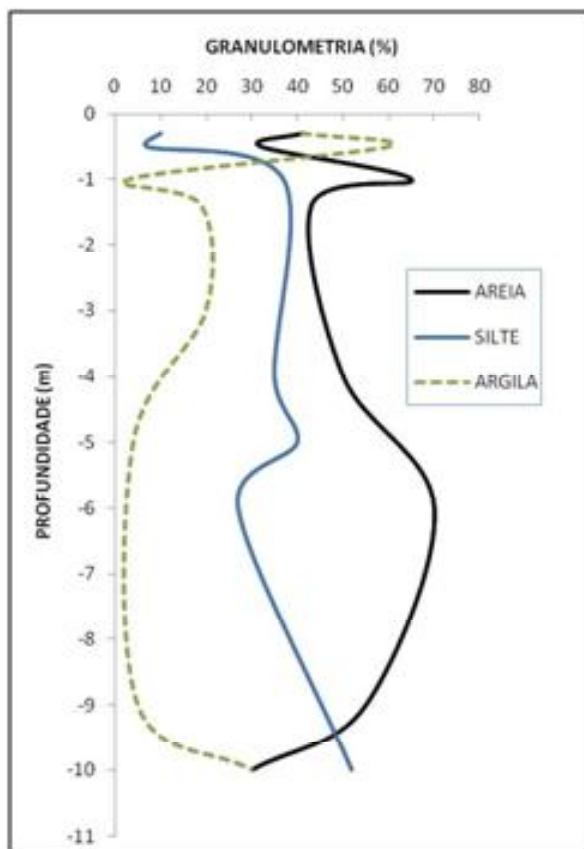


Fig. 2 – Curvas de variações granulométricas das amostras de solo coletadas no local dos ensaios geofísicos.

Os métodos sísmicos utilizam diferentes tipos de ondas ou de aspectos específicos da sua propagação. A sísmica de reflexão, por exemplo, se baseia principalmente na reflexão das ondas P nas interfaces entre materiais com propriedades elásticas distintas.

O método SASW fundamenta-se na propagação da onda Rayleigh ao longo e paralelamente à superfície livre do meio e dos horizontes geológicos rasos.

A *Rayleigh* é uma onda de superfície cuja propagação provoca nas partículas um movimento de vibração polarizado verticalmente. Apresenta velocidade ligeiramente inferior à da onda S e sua solução pode ser deduzida da interação entre as ondas P e SV (componente vertical da onda cisalhante). Numa aquisição sísmica com uma fonte pontual vertical, aproximadamente dois terços da

energia gerada associa-se à propagação da onda *Rayleigh*.

Em meios homogêneos e isotrópicos, as ondas Rayleigh vibram em diferentes frequências em profundidades distintas, todavia com a mesma velocidade de propagação (Fig. 3A). Se o meio não for verticalmente homogêneo, cada comprimento de onda propagar-se-á com uma velocidade de fase dependente das propriedades mecânicas das camadas envolvidas. Como comprimento de onda, frequência e velocidade de fase se relacionam ($V_f = \lambda f$), tem-se uma relação funcional entre a velocidade de fase e a frequência da onda *Rayleigh*, cujo comportamento dependerá das características do meio (número de camadas, espessuras e propriedades mecânicas, (Fig. 3B).

Em meios heterogêneos e estratificados a propagação das ondas *Rayleigh* é um fenômeno multimodal, esses diferentes modos de propagação podem ocorrer simultaneamente, num determinado meio estratificado, desde o modo fundamental até outros modos superiores (Fig. 3C).

Uma vez que a propagação da onda Rayleigh é dependente da estratigrafia e das propriedades mecânicas das camadas superficiais (dispersão geométrica), e considerando o meio geológico composto de n camadas com diferentes propriedades mecânicas que variam com a profundidade, pode-se inferir o modelo de subsuperfície através da obtenção e interpretação das curvas de dispersão.

3.1. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)

Na sísmica rasa as ondas *Rayleigh* são registradas através de diferentes arranjos de geofones, sendo que na geração destas ondas empregam-se métodos ditos ativos, quando a onda é gerada especialmente para o ensaio, e passivos, que utilizam ruídos culturais como fonte (ex., ruído gerado pelo tráfego de veículos).

Mesmo com o predomínio da energia do *ground roll* em um registro sísmico, para seu bom registro é importante observar alguns procedimentos quanto à geometria de aquisição e de instrumentação. Por causa dos efeitos indesejáveis de campo próximo (afastamento mínimo reduzido), as ondas Rayleigh

podem ser tratadas como ondas planas viajando horizontalmente depois que propagaram uma determinada distância (*offset* x_1) da fonte (Richart *et al.*, 1970). A propagação de uma onda plana de ondas superficiais não ocorre em muitos casos até que seja maior do que metade do máximo comprimento de onda desejado (λ_{max}), (Stokoe *et al.*, 1994):

$$x_1 \geq 0.5\lambda_{max} \text{ (eq. 1).}$$

Existem diferentes opiniões a respeito das relações entre x_1 e λ_{max} (Gucunski e Woods, 1991; Stokoe *et al.*, 1994), mas o axioma normalmente aceito, é de que a máxima profundidade de penetração do *ground roll* é aproximadamente igual

ao seu maior comprimento de onda registrado (Richart *et al.*, 1970) e está diretamente ligado à dimensão do arranjo.

Como as componentes de alta frequência das ondas superficiais atenuam rapidamente com a distância da fonte (Bullen, 1963), nos grandes *offsets* elas deixam de ser dominantes no espectro de energia e são suplantadas pela energia associada às ondas de corpo, gerando o chamado efeito de campo remoto.

Efeitos de campo remoto se manifestam quando as velocidades de fase das ondas superficiais são muito altas e próximas às das ondas diretas reduzindo a coerência linear nos afastamentos maiores por causa da interferência entre o *ground roll* e as ondas de corpo.

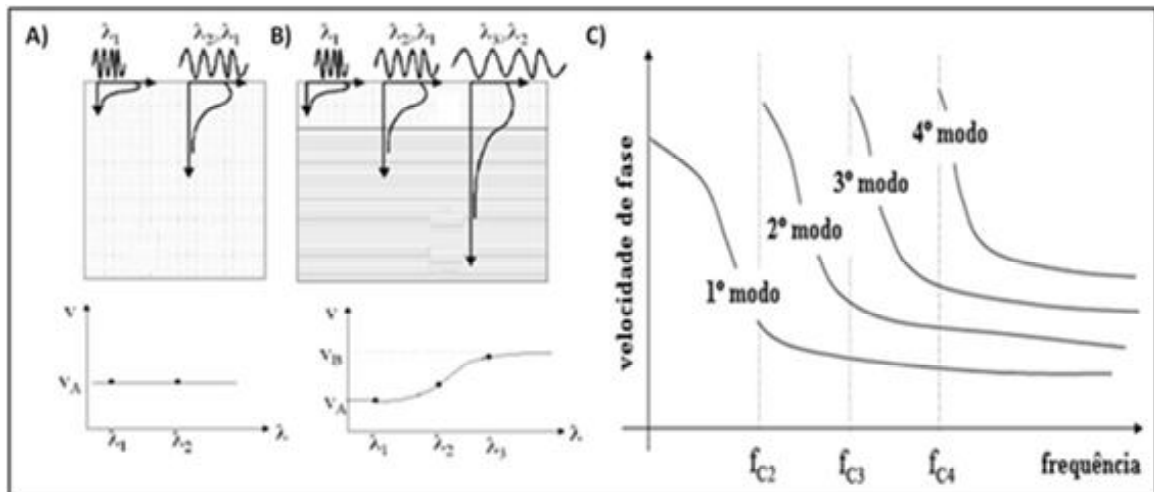


Fig. 3 - Comportamento da velocidade de fase da onda Rayleigh em função do comprimento de onda e das características do meio homogêneo (A), estratificado (B) e curvas de dispersão com diferentes modos de vibração (C). (adaptado de Strobbia, 2003).

4. Metodologia

Neste trabalho o método MASW é considerado como um processo com três fases distintas: i) a aquisição; ii) o processamento; e iii) a inversão (Fig. 4).

A aquisição envolve os procedimentos que privilegiam a geração e o registro de ondas *Rayleigh* em uma ampla banda de frequências. No processamento é extraída, dos sismogramas registrados, a informação sobre a dispersão da onda *Rayleigh*, que é usada no processo de inversão para estimar os parâmetros do modelo (velocidades das ondas S em profundidade).

4.1. Aquisição

A aquisição dos dados foi realizada em agosto de 2006 com o sismógrafo digital *Geode* (*Geometrics Inc.*). Nos ensaios foram utilizados 24 geofones de 4,5 Hz em um arranjo linear com espaçamento entre os geofones de um metro.

Para a geração da energia sísmica foi utilizado o impacto de um martelo de aproximadamente oito quilogramas sobre uma placa metálica de aproximadamente vinte centímetros de diâmetro.

Como alguns ruídos podem ocorrer durante

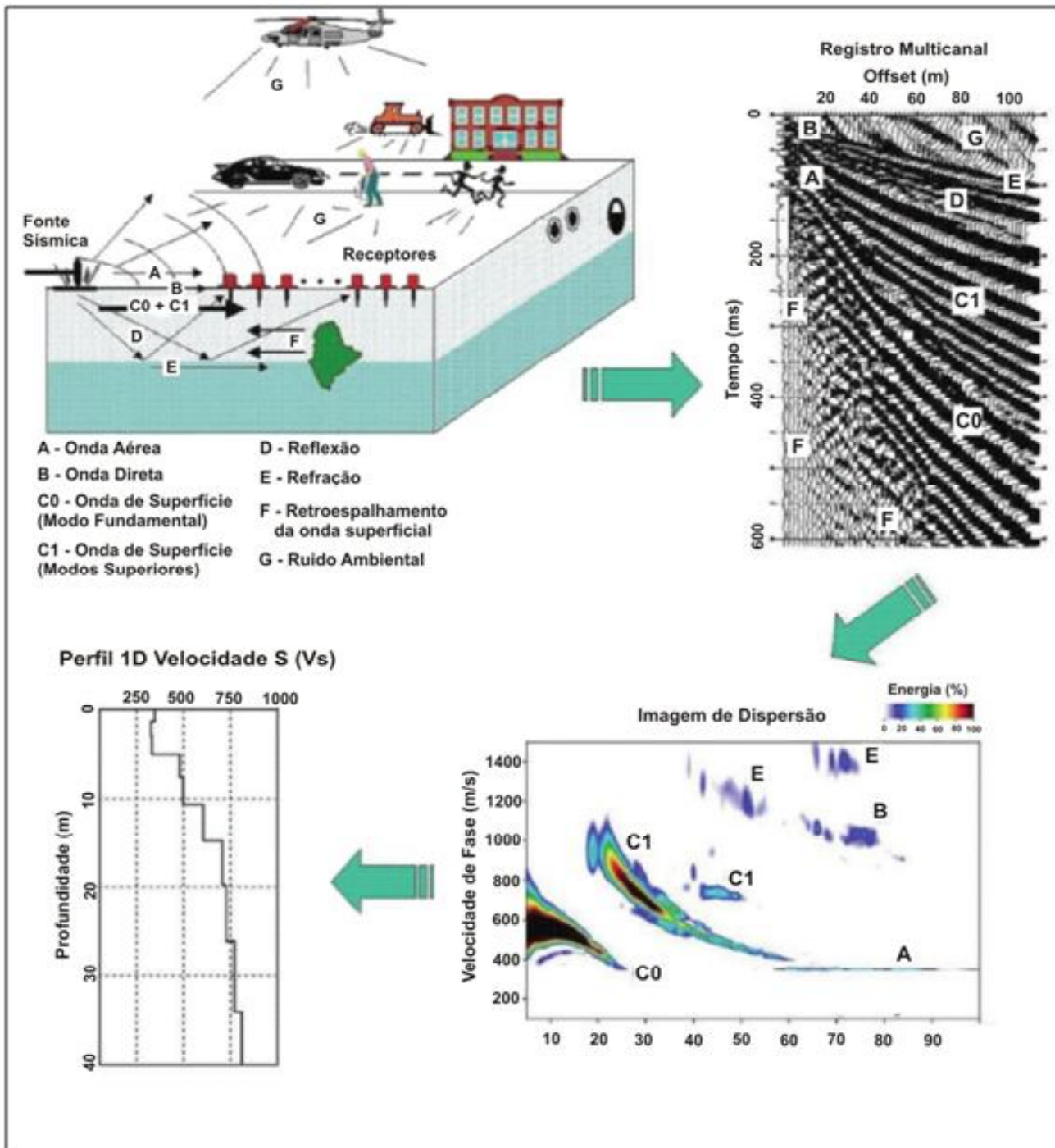


Fig. 4 – Representação esquemática das etapas de desenvolvimento do método MASW (adaptado de Park et al., 2005).

a aquisição de dados, foram realizados testes de *offset*. No caso do ruído conhecido como efeito de campo próximo, evitam-se os grandes *offsets* para que as ondas de corpo não contaminem os dados nas frequências desejadas. Foram testados diferentes afastamentos mínimos (*offset*), desde um até quinze metros.

O objetivo principal é o registro das ondas *Rayleigh* em uma ampla faixa de frequências, onde a aquisição deve ser projetada e executada de modo que a interferência dos outros eventos sísmicos (nesse caso considerados ruídos), tais como ondas de corpo, não comprometa a qualidade dos dados. O comprimento do arranjo (D) está diretamente ligado ao maior comprimento de onda registrado e consequentemente a profundidade de investigação (Z_{max}). O espaçamento entre geofones se relaciona ao menor comprimento de onda e por consequência a profundidade mínima de investigação:

$$D \approx \lambda_{max} \approx Z_{max} \quad (\text{eq. 2})$$

$$dx \approx \lambda_{min} \approx Z_{min} \quad (\text{eq. 3})$$

4.2. Processamento

Na primeira etapa do processamento foi realizada uma avaliação preliminar do conteúdo espectral dos dados adquiridos com os diferentes *offsets*, alguns registros foram decompostos na forma de registros de varredura de frequência (*swept-frequency record*), como sugerido por Park et al. (1999). Um registro impulsivo $r(t)$ obtido usando uma fonte como uma marreta ou queda de peso pode ser transformado em um registro de varredura de frequência $r_s(t)$, pela convolução de $r(t)$ com uma função de estiramento $s(t)$ (Coruh, 1985):

$$r_s(t) = r(t) * s(t), \quad (\text{eq. 4})$$

onde $*$ denota a operação de convolução. A função de estiramento $s(t)$ é uma função senoidal com

variação da frequência em função do tempo, da forma:

$$s(t) = \sin\left(2\pi f_1 + \frac{\pi(f_2 - f_1)}{T} t^2\right), \quad (\text{eq. 5})$$

onde f_1, f_2 são a menor e maior frequências do espectro, e T o comprimento de $s(t)$.

Os dados adquiridos com *offsets* mínimos de um a quinze metros mostraram melhores resultados com *offsets* superiores a 3 metros e inferiores a 10 metros, onde sofrem menos os efeitos de campo próximo e remoto, no qual nota-se que os dados com *offset* mínimo de quatro metros sofrem influência de campo remoto somente nos maiores *offsets*, mas mesmo assim a partir das frequências mais elevadas. Já os dados com *offset* de um metro trazem o efeito de campo próximo e os de *offset* de dez metros um efeito de campo remoto mais significativo no espectro de frequência de interesse (Fig. 5).

Na etapa seguinte analisou-se detalhadamente os máximos de energia no domínio velocidade de fase-frequência para os *offsets* mínimos de um, quatro, nove e quinze metros (Fig. 6) e observou-se uma melhor relação sinal/ruído para os afastamentos mínimos menores.

Observa-se que com o aumento do afastamento mínimo, se nota o “aparecimento” dos modos superiores nas curvas de dispersão para os dados obtidos com *offsets* mínimos de nove a quinze metros confirmando que os dados de *offset* mínimo de um a três metros sofrem com maior intensidade do efeito de campo próximo, que compromete a qualidade dos dados sendo que o aparecimento dos modos superiores se dá de forma muito discreta com uma baixa relação sinal-ruído. Já os dados de *offset* mínimo de dez a quinze metros sofrem os efeitos de campo remoto e devido às características do local, a energia gerada é bastante atenuada, comprometendo a qualidade dos dados para análise.

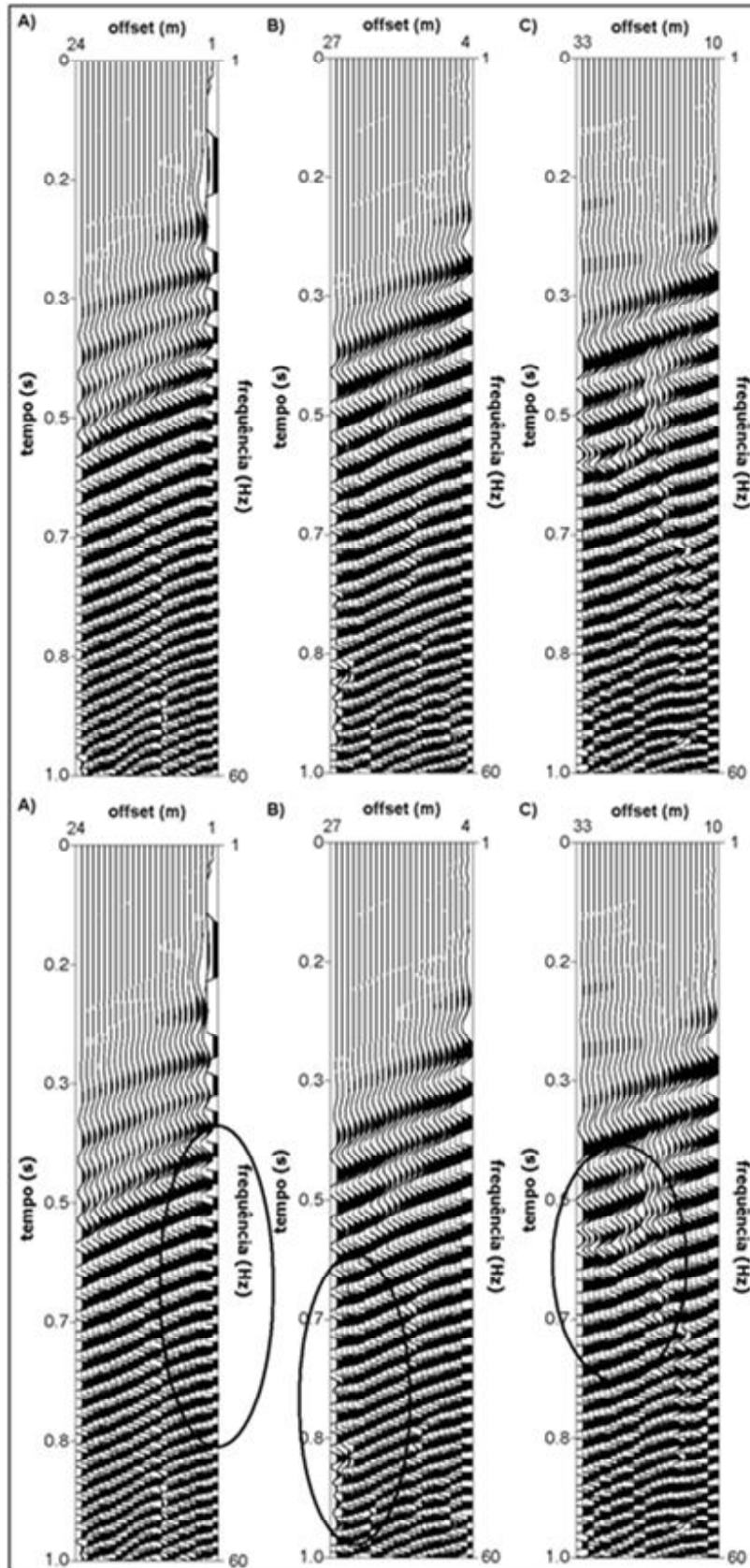


Fig. 5- Registros transformados para o domínio de varredura de frequência. O registro (A) foi adquirido com offset mínimo de um metro, (B) com offset mínimo de quatro metros e (C) com offset mínimo de dez metros.

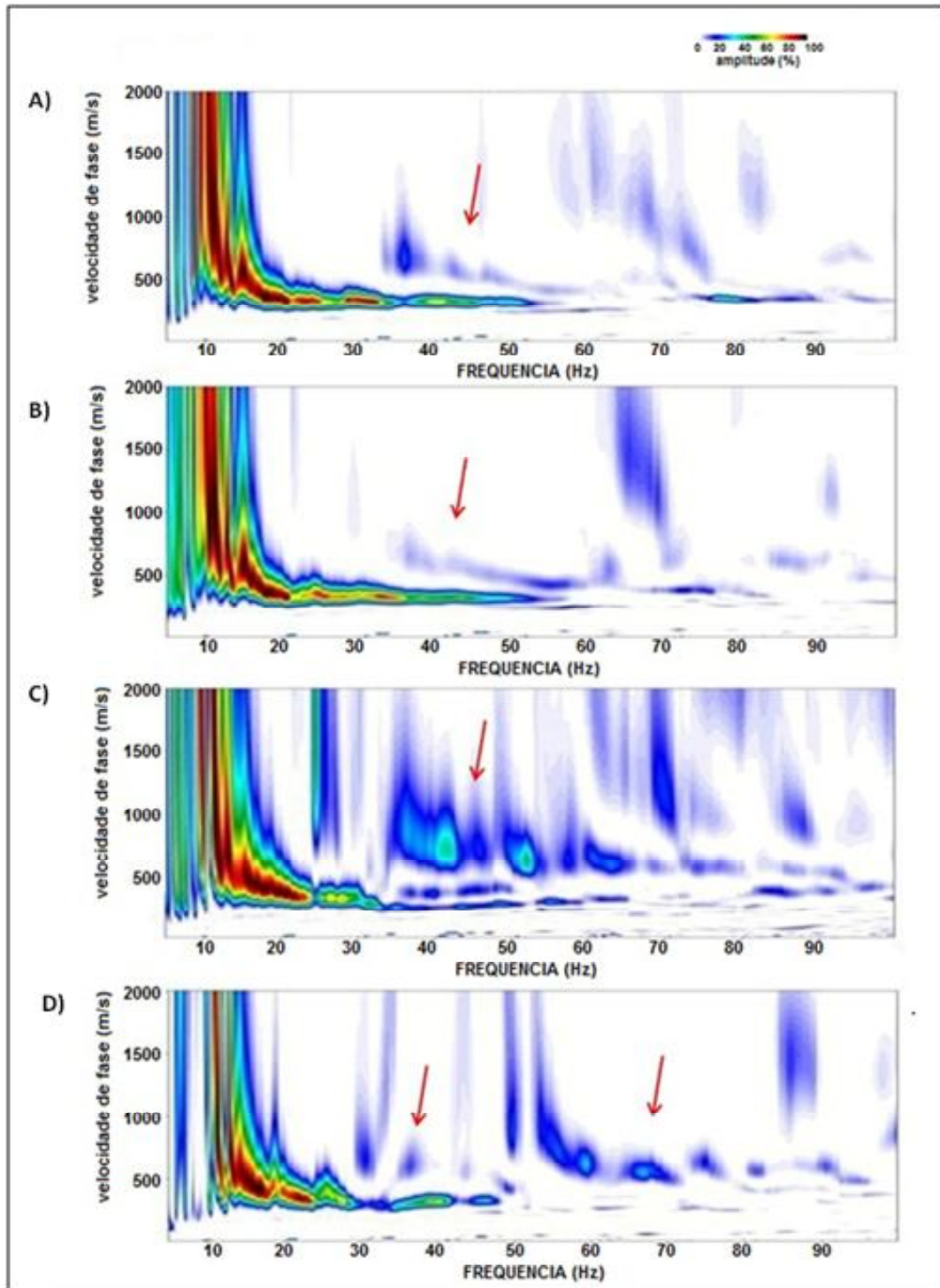


Fig. 6 – Gráficos de frequência por velocidade de fase da onda Rayleigh para offsets de (A) um, (B) quatro, (C) nove e (D) quinze metros. As setas indicam os modos superiores da onda Rayleigh.

Desta forma, após criteriosa análise dos dados para todos os *offsets* testados foram escolhidos os registros a serem analisados (quatro e nove metros), no qual foi cuidadosamente selecionada uma banda de frequência (maior relação sinal-ruído no espectro) onde foram marcados os

pontos da curva de dispersão, e que a partir desses pontos foi feita à inversão. Para o dado adquirido com *offset* mínimo de quatro metros foi selecionada uma janela de frequência entre 15 e 50 Hz para a definição da curva do modo fundamental e entre 35 e 70 Hz aproximadamente para a curva relativa ao

primeiro modo (Fig. 7A). Para o dado adquirido com *offset* mínimo de nove metros o *range* empregado foi de 15 a 55 Hz e 40 a 70 Hz, respectivamente (Fig. 7B).

Foi efetuado um ganho automático (*Automatic Gain Control* – AGC) no espectro para acentuar a visualização dos modos superiores,

mas que também auxiliou na marcação do primeiro modo. Levando-se em conta que este ganho também acentua o ruído, essa análise deve ser cautelosa.

Os dados da curva de dispersão foram processados utilizando apenas a curva do modo fundamental, e também empregando conjuntamente as do modo fundamental e primeiro modo.

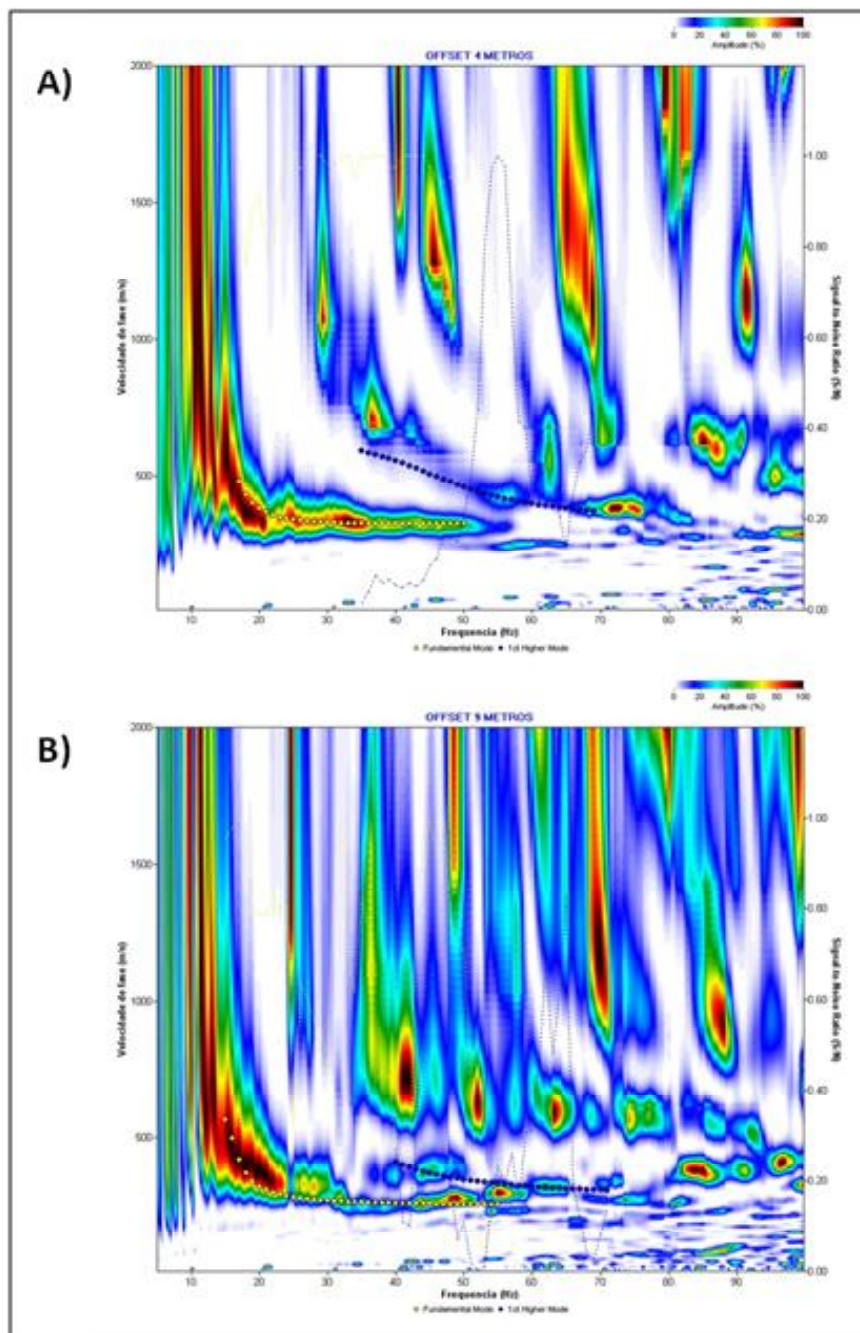


Fig. 7 - Curvas de dispersão dos dados com *offset* mínimo de quatro (A) e nove (B) metros (com ganho AGC) traçados os modos fundamental e superior.

4.3. Inversão

Segundo Xia *et al.* (1999), a velocidade de fase da onda *Rayleigh* (dados de dispersão) é uma função de quatro parâmetros: a velocidade da onda S, a velocidade da onda P, a densidade, e a espessura da camada, além da frequência para o caso de um meio com múltiplas camadas, ou seja:

$$F(f_j, C_{Rj}, V_S, V_P, \rho, h) = 0$$

$$(j = 1, 2, \dots, m), \text{ (eq. 6)}$$

onde f_j é a frequência, em *hertz*; C_{Rj} é a velocidade de fase da onda *Rayleigh* na frequência; V_S é a velocidade da onda S em cada camada; V_P é a velocidade da onda P em cada camada; ρ é a densidade; e h é a espessura das camadas (Press *et al.*, 1992).

Testes de sensibilidade realizados por Xia *et al.* (1999) mostram que cada parâmetro da terra contribui na curva de dispersão de uma maneira exclusiva. Os autores avaliaram as influências de cada parâmetro na acurácia do processo de inversão e observaram que as variações nas velocidades das ondas S têm o efeito mais significativo nas velocidades de fase da onda *Rayleigh*.

Usando um modelo de múltiplas camadas e considerando a função (Eq. 6), a matriz Jacobiana do modelo com respeito à velocidade da onda S, para diferentes frequências, pode ser expressa como:

$$J_S = \left[- \frac{\partial F / \partial V_{Sj}}{\partial F / \partial C_{Rj}} \right]_{f=f_l}$$

(eq. 7)

Os efeitos das mudanças nas velocidades da onda S em velocidades de fase podem ser calculados multiplicando J_S com mudanças de velocidades das ondas S. Portanto, para o

desenvolvimento do algoritmo de inversão, Xia *et al.* (1999) partiram da base de que são as velocidades da onda S que fundamentalmente controlam as mudanças nas velocidades de fase da onda *Rayleigh* para modelos de múltiplas camadas, portanto elas são obtidas a partir da inversão destes dados.

A inversão conjunta dos modos fundamental e superiores é uma rotina tradicional do processo de inversão, exceto pela inclusão de dados desses modos (Xia *et al.*, 2003). Como diferentes modos são sensíveis a profundidades diferentes, a inversão conjunta pode gerar resultados mais estáveis, visto que, a inversão da curva do modo fundamental pode gerar melhores resultados para as porções mais superficiais apresentando certa instabilidade nas porções mais profundas, e estas últimas, definidas pela inversão dos modos superiores (Luo *et al.*, 2007).

Deste modo, inseriu-se um modelo inicial de velocidades V_S com as espessuras, profundidades, V_P e densidade das camadas, e geradas por modelagem direta curvas (fundamental e primeiro modo) onde se procurou o melhor ajuste com os máximos energéticos e conseqüentemente uma maior relação sinal-ruído. Sendo este o modelo inicial para o processo de inversão empregado pelo software *Surfseis*. O modelo direto inicial para a inversão nos dados, tanto para o de quatro metros quanto para o de nove metros, foi o mesmo, tendo em vista que a posição dos receptores era a mesma, mudando somente a posição da fonte.

O aplicativo (*Surfseis*) executa várias iterações até a obtenção da inversão final. As iterações finalizam após atingir o critério de número de vezes (máximo 30) ou erro mínimo quadrático (RMS). A verificação é executada em função da diferença entre a curva de dispersão teórica (gerada pelo modelo inicial) e a observada (gerada pelos dados reais), realizando alterações no modelo inicial buscando ajustar a curva do modelo à curva real.

As inversões obtidas com *offset* mínimo de quatro metros resultaram em perfis distintos de V_S em relação à profundidade quando analisado somente o modo fundamental em comparação com

a análise do modo fundamental em conjunto com o primeiro modo das ondas *Rayleigh* (Fig. 7A). O mesmo aconteceu para os dados obtidos com *offset* mínimo de 9 metros (Fig. 7B).

De acordo com Foti (2000), o aumento dos afastamentos mínimos, favorece o aparecimento dos modos superiores de forma mais explícita. Neste caso, fazendo-se a inversão empregando somente a curva relativa ao modo fundamental, podem ocorrer instabilidades no processo de inversão quando o modo fundamental está “contaminado” pelos modos superiores (gerando erros no modelo de velocidades para as profundidades menores, próximas da superfície).

5. Resultados

Ao analisar os dados adquiridos com *offset* mínimo de quatro metros (fundamental e fundamental+1º modo), observa-se uma boa correlação de V_s em relação à profundidade para os horizontes mais superficiais (Fig. 8A), julgando que o modo fundamental esteja bem definido e que

o modelo obtido esteja coerente em ambas às análises para esse caso. caso do dado obtido com *offset* mínimo de nove metros (Fig. 8B), ocorre uma instabilidade no processo de inversão para os horizontes mais superficiais (análise do modo fundamental), e isso pode ser pelo fato do dado ter uma relação sinal-ruído inferior ao dado de quatro metros (Fig. 7), estando contaminado pelos modos superiores nas frequências menores. Mas note que para horizontes mais profundos (~8 metros) a inversão começa ter certa concordância de em relação à profundidade para as duas inversões.

Na análise dos modos superiores, para estes dados, há uma identificação de comprimento de onda maior, devido ao fato de se ter maiores velocidades de fase para mesma frequência e consequentemente, amostragem em maiores profundidades como observado na inversão dos dados de quatro e nove metros. Notou-se também uma maior estabilidade no processo de inversão para ambos os dados na análise com os modos superiores para horizontes mais superficiais (até 10 metros).

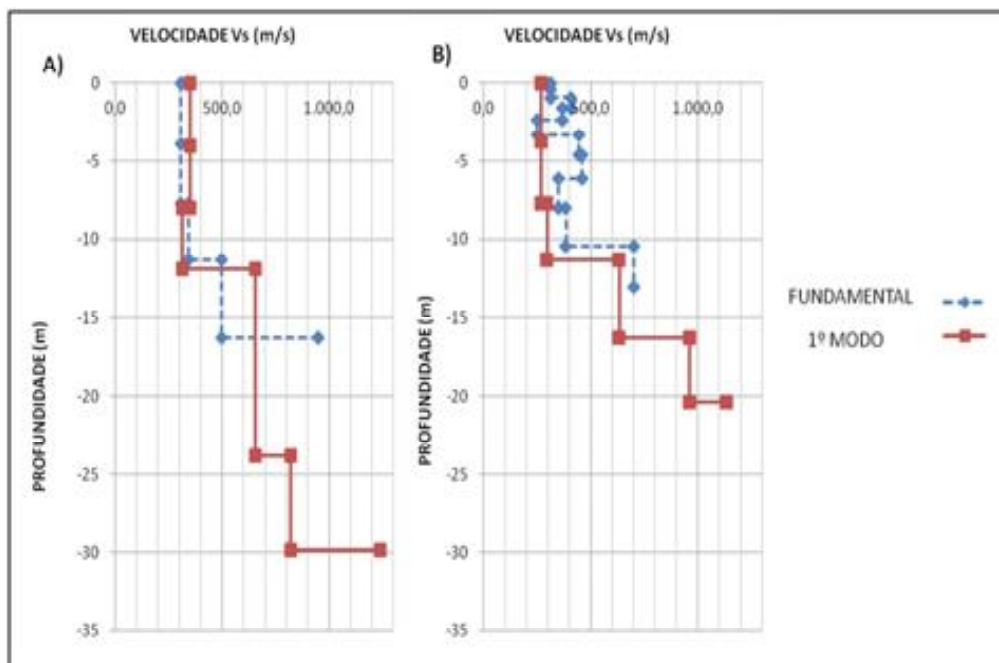


Fig. 8 - Resultado da Inversão do modo fundamental (linha tracejada) e modo fundamental com primeiro modo (linha sólida) para o dado de quatro (a) e nove metros (b).

A partir da análise das inversões do modo fundamental em conjunto com o primeiro modo para os dados de quatro e nove metros (Fig. 9), pode-se verificar uma boa similaridade entre os perfis de velocidade V_s para os horizontes mais superficiais (~ 10 metros), mas para as maiores profundidades os perfis são distintos. No dado de quatro metros, ocorrem mudanças significativas de velocidade, ou seja, uma interface em torno de 23 metros de profundidade, enquanto que para o dado de nove metros ocorre uma mudança em torno de 16 metros de profundidade, portanto resultando em modelos diferentes. Levando-se em conta a qualidade inferior do dado de nove metros (menor relação sinal-ruído), e a marcação de menos pontos, na curva de dispersão, ocorre uma diminuição na amostragem, gerando um modelo menos confiável para maiores profundidades.

Através do projeto “Programa de pesquisas em políticas públicas” - processo Fapesp n° 03/07182-5 foram realizados ensaios de radar de

penetração no solo (*Ground Penetrating Radar – GPR*) com antena de 200 MHz coletados em março de 2006 empregando o arranjo do ponto médio comum (*common mid point – CMP*) com a finalidade de mostrar uma investigação 1D em termos da constante dielétrica *versus* profundidade para auxílio na interpretação no qual foram identificadas duas interfaces (Fig. 10).

Foram também realizados ensaios de refração utilizando o mesmo equipamento, sismógrafo *Geode (Geometrics)* de 96 canais com geofones verticais de 40 Hz de frequência natural e geofones horizontais de 28 Hz de frequência natural com o intuito de auxiliar na integração dos dados para interpretação geológica, onde foram analisadas as refrações das ondas P e ondas S (Fig. 11). A interpretação final dos dados revelou um modelo simples de duas camadas com espessuras variando ao longo do arranjo. Essas variações se devem à variação lateral da camada de solo residual, que em alguns trechos chega a estar praticamente ausente, aflorando diretamente o solo saprolítico (Tab. 1).

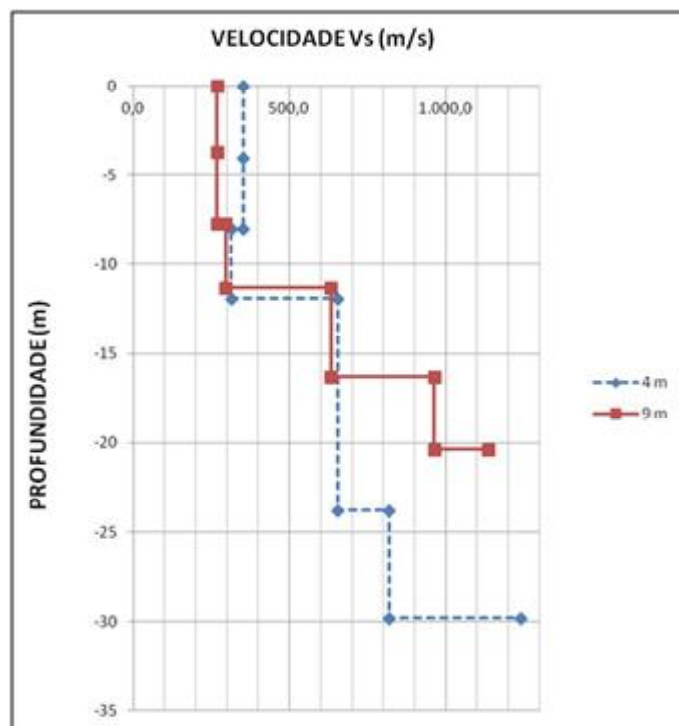


Fig. 9 - Inversões do modo fundamental em conjunto com primeiro modo para os dados de quatro (linha tracejada) e nove metros (linha sólida).

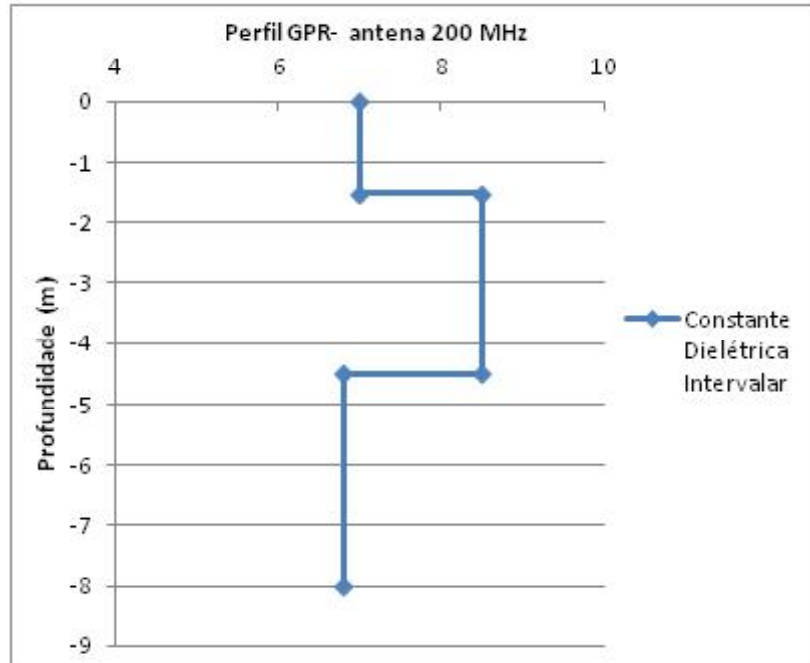


Fig. 10 – Modelo geofísico de três camadas elaborado a partir dos dados de GPR (Fonte: Programa de pesquisas em políticas públicas - processo Fapesp n 03/07182-5).

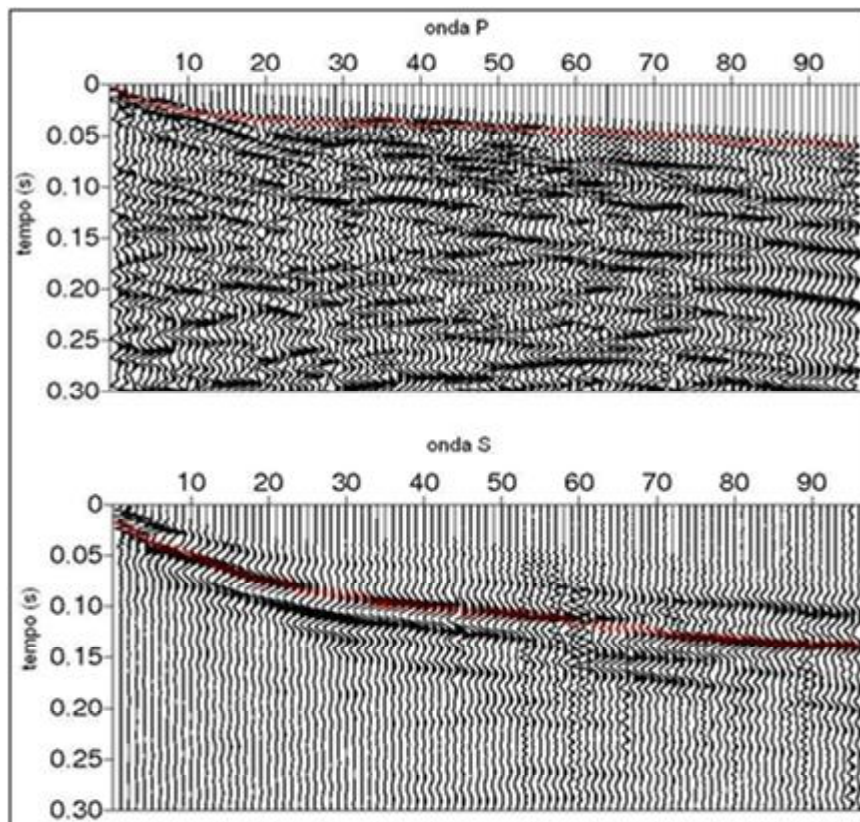


Fig. 11- Sismogramas dos ensaios de refração obtidos na área para registro das ondas P e S.

Tab. 1 - Resultados da interpretação dos dados de sísmica de refração

	Espessura (m)	Veloc. P (m/s)	Veloc. S (m/s)	Coef. de Poisson
Camada 1	2,27 a 4,8	370 a 390	186 a 220	0,26 a 0,33
Camada 2	X	1000 a 1200	500 a 650	0,29 a 0,34

Analisando os resultados obtidos com o método MASW, observou-se a eficiência do método na identificação da interface situada a aproximadamente onze metros de profundidade, que correlacionada aos dados da classificação granulométrica com amostras de trado do solo coletadas do local e do mapeamento de campo, onde seria a rocha sã alterada composta de granito-gnaiss. Por outro lado, o método não foi sensível na identificação das camadas mais superficiais (até 10 metros) em comparação aos métodos de GPR e refração, que mapearam esses estratos mais rasos (Fig. 12).

Assim, o método MASW visando à análise do modo fundamental em conjunto com o primeiro modo das velocidades de fase das ondas Rayleigh apresentou bons resultados na inversão para interfaces onde as mudanças de velocidades da onda cisalhante se dão de formas mais abruptas (mudança de solo para rocha alterada ou embasamento). No entanto, para horizontes mais superficiais, o método não foi tão eficiente comparado aos outros métodos empregados, não identificando as interfaces existentes.



Fig. 12 - Perfil de alteração típico do local dos ensaios com a identificação das interfaces de cada método usado. (modificado do relatório parcial do Projeto FAPESP nº 03/07182-5).

6. Conclusões

Ao término desta pesquisa se conclui que análise do dado transformado em termos das frequências varridas auxiliou na identificação dos efeitos de campo próximo e remoto e, portanto,

fornece bons subsídios para a escolha dos *offsets* mínimo e máximo.

Analisando os máximos de energia no domínio velocidade de fase-frequência observou-se uma melhor relação sinal/ruído para os

afastamentos mínimos menores, mas observa-se que com o aumento do afastamento mínimo, o “aparecimento” dos modos superiores nas curvas de dispersão.

Notou-se uma maior estabilidade no processo de inversão para os dados (quatro e nove metros) na análise do modo fundamental com o primeiro modo para horizontes mais superficiais, onde apresentou bons resultados na inversão para interfaces onde as mudanças de velocidades da onda cisalhante se dão de formas mais abruptas, no entanto, para horizontes mais superficiais, o emprego dos métodos geofísicos de GPR e Refração obtiveram uma melhor na identificação das interfaces existentes.

Somente método MASW identificou a espessura de solo onde que em condições de saturação mostraria uma maior suscetibilidade à deslizamento, tendo em vista a dependência direta da onda secundária em relação à constante de cisalhamento do material.

Agradecimentos

Agradecemos à Fundação de Amparo à pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Processo 2006/00852-3 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Referências Bibliográficas

- Bullen, KE. 1963. An introduction to the theory of seismology: Cambridge Univ. Press.
- Evans, BJ. 1997. A Handbook for Seismic Data Acquisition in Exploration. Geophysical monograph series. Number 7. Society of Exploration Geophysicists. 295p.
- Fapesp. 2006. Diretrizes para regeneração socioambiental de áreas degradadas por mineração de saibro (caixas de empréstimo), Ubatuba, SP. 2º Relatório - Programa de pesquisas em políticas públicas, Processo Fapesp nº 03/07182-5.
- Foti, S. 2000. Multi station Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves. PHD thesis. Politecnico di Torino, 229p.
- Gucunski, N e Woods, RD. 1991. Instrumentation for SASW testing, in Bhatia, S. K., and Blaney, G. W., Eds., Recent advances in instrumentation, data acquisition and testing in soil dynamics: Am. Soc. Civil Eng., 1–16.
- Lima Júnior, SB. 2007. Emprego das ondas Rayleigh visando à caracterização geotécnica de solos superficiais de encosta numa área teste em Ubatuba/SP. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 81p.
- Luo, Y; Xia, J; Liu, J; Liu, Q e Xu, S. 2007. Joint inversion of high-frequency surface waves with fundamental and higher modes. *Journal of Applied Geophysics*, 62(4): 375-384.
- Marchioreto, A. 2002. A Implementação, testes e avaliação do método SASW. Instituto de Geociências (Tese de Doutorado), USP, São Paulo. 106 p.
- Park, CB; Miller, RD; Xia, J. 1999. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3):800-808.
- Park, CB; Miller, RD; Xia, J; Ivanov, AJ. 2005. Multichannel analysis of surface waves (MASW)—active and passive methods. *Journal of Engineering and Environmental Geophysics*.
- Press, WH; Teukosky, SA; Vetterling, WT e Flannery, BP. 1992. Numerical recipes in C. The Art of Scientific Computing, Third Edition, Cambridge Univ. Press, 1235pp.
- Richart, FE; Hall, JR e Woods, RD. 1970. Vibrations of soils and foundations. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 414pp.
- Stokoe, KH; Wright, SG; Bay, JA; e Roesset, JM. 1994. Characterization of geotechnical sites by SASW method. Technical Review: Geophysical Characterization of Sites, ISSMFE Technical Committee 10, Oxford Publishers, New Delhi, 15-25.
- Strobbia, C. 2003. Surface Wave Method. Acquisition, processing and inversion. PhD Thesis, Politecnico di Torino, 317p.
- Xia, J; Miller, RD; Park, CB. 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, 64(3): 691-700.
- Xia, J; Miller, RD; Park, CB; e Tian, G 2003. Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes. *Journal of Applied Geophysics* 52(1): 45–57.

