

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

CLAUS NAVES EIKMEIER

**Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW): um estudo comparativo com fontes ativas e passivas, ondas Rayleigh e Love e diferentes modos de propagação**

São Paulo

2018



CLAUS NAVES EIKMEIER

**Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW): um estudo comparativo com fontes ativas e passivas, ondas Rayleigh e Love e diferentes modos de propagação**

**Versão Corrigida**

**O original encontra-se disponível na Unidade**

Dissertação apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Geofísica

Orientador: Prof. Dr. Renato Luiz Prado

São Paulo

2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, Jürgen Eikmeier e Leticia Naves Corrêa Eikmeier, pelo amor e dedicação a minha educação e formação, e a minha esposa Olívia Portella André Cardoso, pelo amor, apoio, companheirismo e compreensão ao longo do tempo...



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Jürgen Eikmeier e Letícia Naves Corrêa Eikmeier, pelo amor e educação que recebi ao longo da vida fazendo de mim a pessoa que sou hoje. Qualquer conquista alcançada será sempre por causa de vocês.

A minha esposa Olívia Portella André Cardoso pelo amor, carinho, paciência, companheirismo e compreensão de tantas horas afastado para que fosse possível a realização desta etapa.

Aos meus familiares e amigos que me deram condições e suporte em momentos adversos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Renato Luiz Prado pela amizade, ensinamentos e paciência ao longo da trajetória acadêmica e deste trabalho.

Aos técnicos de campo Marcelo César Stangari e Ernande Costa Santos pela ajuda nos ensaios de campo.

Aos professores do instituto pelos ensinamentos, paciência e apoio na jornada acadêmica.

A toda equipe de secretaria que sempre nos orientou pacientemente pelos tramites burocráticos.

Aos amigos de curso que tornam o árduo caminho mais agradável.

Ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, por me proporcionar a oportunidade de realização do curso de mestrado e deste trabalho.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio através da concessão da bolsa de mestrado.

Certamente chegar até aqui contou com a ajuda de inúmeras pessoas que colaboraram direta ou indiretamente. Portanto, por favor, considerem todos meus sinceros agradecimentos. Muito Obrigado!



*“A ciência está escrita neste grande livro aberto diante de nossos olhos – o universo –  
mas não podemos lê-lo sem aprender a linguagem e entender os símbolos  
em termos dos quais está escrito. Este livro está escrito  
na linguagem matemática.”*

Galileu Galilei



## RESUMO

EIKMEIER, C. N. **Análise Multicanal de Ondas de Superfície (MASW): um estudo comparativo com fontes ativas e passivas, ondas Rayleigh e Love e diferentes modos de propagação.** 2018. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2018.

Este trabalho teve como objetivo a realização de um estudo sobre o método MASW (Análise Multicanal de Ondas de Superfície) avaliando-se comparativamente resultados obtidos por diferentes fontes (ativas e passivas), ondas Rayleigh e Love e diferentes modos de propagação das ondas de superfície. Dois ensaios sísmicos foram executados: com geometria de aquisição bidimensional e geofones triaxiais de 10Hz, e com geometria linear e geofones de componente vertical de 4,5Hz. Foram realizados estudos com as fontes marreta, compactador de solo, ruído ambiental e com o tráfego de veículos, a última através da técnica *Passive Roadside MASW*. Resultados de inversões com dados da componente vertical (ondas Rayleigh) das ondas de superfície foram avaliados com os de inversões conjuntas com a componente radial (ondas Rayleigh) e transversal (ondas Love). Analisou-se também os produtos de inversões da curva de dispersão do modo fundamental com os de inversões conjuntas com o primeiro modo superior. Os estudos foram realizados em frente ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciência Atmosféricas (IAG) localizado no interior do campus Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira (CUASO) da Universidade de São Paulo (USP) no bairro do Butantã, São Paulo. A área de estudo possui informações de sondagem mista com descrição geológica do material e valores SPT (*Standard Penetration Test*) que foram utilizados para validação dos resultados. O compactador de solo demonstrou ser uma melhor fonte ativa em relação a marreta através de diferentes aspectos: geração de maior energia tanto na componente vertical quanto na transversal; espectros ( $V, f$ ) de melhor qualidade; os dados apresentam a vantagem de poderem ser processados através da técnica *f-k beamforming*. A aquisição com o ruído ambiental não possibilitou a interpretação de curvas de dispersão devido ao pouco tempo de aquisição utilizado. Os dados obtidos pela técnica *Passive Roadside MASW* contribuíram com os dados de ativa através do registro de frequências mais baixas. Além disso, devido a clara identificação do 1º modo superior em seu espectro ( $V, f$ ) foi possível a identificação do mesmo modo

no espectro  $(V, f)$  dos dados de ativa, interpretação até então duvidosa. No entanto, a inversão conjunta das curvas de dispersão dos dados *Passive Roadside* com as dos dados de ativa não resultou em uma melhor inversão comparada com a inversão obtida apenas pelas curvas de ativa. A inversão conjunta de curvas das componentes radial (ondas Rayleigh) e transversal (ondas Love) com as curvas obtidas da componente vertical (ondas Rayleigh) também não trouxe um melhor resultado quando comparada com a inversão alcançada apenas com as curvas da componente vertical. A utilização do primeiro modo superior com o modo fundamental, no entanto, mostrou trazer melhoras significativas nos resultados das inversões em comparação com inversões apenas da curva do modo fundamental. Considerando as incertezas envolvidas os melhores resultados deste trabalho são convergentes com os dados de sondagem da área de estudo. No atual estágio de desenvolvimento do método MASW diversas etapas são bastante dependentes do operador. Neste sentido os estudos realizados neste trabalho contribuem para um melhor entendimento do método nos seus fundamentos, parâmetros de aquisição e processamento.

**Palavras-chave:** MASW. Ondas de superfície. Ondas Rayleigh. Ondas Love. Modos de propagação.

## ABSTRACT

EIKMEIER, C. N. **Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW): a comparative study with active and passive sources, Rayleigh and Love waves and different modes of propagation.** 2018. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2018.

This work aim to study the MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) method by comparing results obtained with different sources (active and passive), Rayleigh and Love waves and different modes of surface waves propagation. Two seismic tests were performed: one with two-dimensional acquisition geometry and 10Hz triaxial geophones, and the other with linear geometry and 4.5 Hz vertical component geophones. Studies were carried out with the following sources: sledgehammer, rammer compactor, ambient noise and vehicular traffic, the last through the Passive Roadside MASW technique. Inversions results with vertical component data (Rayleigh waves) were evaluated through joint inversions with the radial (Rayleigh waves) and transversal (Love waves) components. It were also analyzed the inversions results of the fundamental mode of the dispersion curve with the results of joint inversions with the first higher mode. The studies were carried out in front of the *Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciência Atmosféricas (IAG)* (Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Science) located inside the university campus *Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira (CUASO)* of *Universidade de São Paulo (USP)* (University of São Paulo) in the neighborhood of *Butantã, São Paulo*. The study area has information with a geological material description and *SPT* (Standard Penetration Test) values that were used to validate the results. The rammer compactor showed to be a better active source in relation to sledgehammer through different aspects: generation of greater energy in vertical and transverse components; better quality of  $(V, f)$  spectrum; the data have the advantage that they can be processed using the *f-k beamforming* technique. The acquisition with ambient noise did not allow the dispersion curves interpretation due to the short acquisition time used. Passive Roadside MASW data contributed to the active data through the lower frequency. Besides that, due to the clear identification of the 1st higher mode in its  $(V, f)$  spectrum it was possible to identify the same mode in the  $(V, f)$  spectrum of the active data, interpretation that was, until then, doubtful. However, the joint inversion of the

Passive Roadside dispersion curves with the active curves did not produce better results compared to the inversion obtained only by the active curves. The joint inversion of dispersion curves from radial (Rayleigh) and transversal (Love waves) components with the curves obtained by the vertical component (Rayleigh waves) also did not bring a better result when compared with the inversion achieved only by the vertical component curves. The use of the first higher mode with the fundamental mode, however, showed significant improvements in the joint inversions results compared to inversions only of the fundamental mode curve. Considering the uncertainties involved, the best results of this work converge with the *a priori* information of the study area. At the current MASW method stage of development, several steps are quite dependent on the operator. Therefore, the studies carried out in this work contribute to a better understanding of the method in its fundamentals, acquisition parameters and processing.

**Keywords:** MASW. Surface waves. Rayleigh waves. Love waves. Propagation modes.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Imagens da área de estudo, localizada em frente ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) (Google Earth). ..... 27
- Figura 2** - Campus Cidade Universitária Aramando de Salles Oliveira (CUASO) da Universidade de São Paulo (USP). ..... 28
- Figura 3** - Mapa geológico da região da CUASO com indicação da área de estudo em vermelho (adaptado de Marangoni, Moura e Ferreira (2017)). ..... 29
- Figura 4** - Informações obtidas de sondagem mista realizada na área de estudo no final do ano de 2000 pela empresa Geotécnica. .... 30
- Figura 5** - Gráfico de profundidade em função de velocidade de ondas S ( $V_S$ ) obtido por conversão dos valores NSPT (Figura 4) em  $V_S$  através de fórmula empírica (Apêndice C). ..... 30
- Figura 6** - Movimento de partículas associado a passagem de diferentes tipos de ondas (adaptado de Science Learning Hub (2018)). ..... 32
- Figura 7** - Esquema que demonstra a superposição de ondas harmônicas. **Na imagem superior** estão representadas, em vermelho e azul, duas ondas harmônicas com frequências angulares e números de ondas diferentes entre si. **Na imagem inferior**, um pacote de ondas obtido da superposição das ondas harmônicas onde o ponto lilás é o ponto fixo sobre o envelope de ondas que se propaga com velocidade igual a velocidade de grupo do pulso, e o ponto verde é o ponto fixo sobre a onda oscilante no interior do envelope e que se propaga com velocidade igual a velocidade de fase do pulso (adaptado de Meyavuz (2013)). ..... 33
- Figura 8** - Registro de um sinal com diferentes distâncias à fonte (adaptado de Foti (2000)). ..... 34
- Figura 9** - Representação esquemática do caráter dispersivo das ondas de superfície. **À esquerda**, por ser um meio homogêneo todas as frequências envolvem o mesmo material em subsuperfície, resultando em uma velocidade de fase constante. **À direita**, diferentes

frequências atingem profundidades distintas e por se tratar de um meio verticalmente heterogêneo resulta em velocidades de fase distintas (adaptado de Strobbia (2003)). ... 35

**Figura 10** - Curvas de dispersão de diferentes modos de propagação, sendo  $fC2$ ,  $fC3$  e  $fC4$  respectivamente as frequências de corte do 2º, 3º e 4º modo (adaptado de Strobbia (2003))...... 36

**Figura 11** – Profundidade de penetração do modo fundamental, primeiro modo superior e segundo modo superior da onda Love para diferentes frequências (adaptado de Stein e Wyssession (2003)). ..... 37

**Figura 12** - Espectro de amplitude de um ensaio sísmico no qual foram utilizados 96 geofones de componente vertical de 4,5Hz dispostos linearmente e espaçados de 1,5m. Como fonte foi utilizado um compactador de solo que permaneceu em atividade durante 60s, a 5m do geofone 1 e, portanto, a 147,5m do geofone 96. A escala de cores representa o número de cada geofone. A letra **(a)** apresenta o espectro de amplitude como um todo e a letra **(b)** um zoom em uma banda de amplitude menor..... 39

**Figura 13** - Relação entre a razões de velocidades de ondas sísmicas em função do coeficiente de Poisson para um semiespaço homogêneo (adaptado de Richart, Wood e Hall (1970)). ..... 40

**Figura 14** - Comportamento da amplitude normalizada em função da profundidade normalizada da onda Rayleigh (adaptado de Richart, Wood e Hall (1970))..... 41

**Figura 15** - Esquema das etapas do método MASW onde  $H_i$  e  $V_{si}$ , para  $i$  natural, são respectivamente a espessura e a velocidade de onda S para cada camada  $i$  (adaptado de Strobbia (2003)). ..... 46

**Figura 16** - Equipamentos utilizados em aquisições MASW. Nessa figura está exemplificado um arranjo sísmico linear com a utilização de uma marreta como fonte ativa (adaptado de Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) (2018)). ..... 47

**Figura 17** - Sismógrafo Geometrics Geode de 24 canais. .... 48

<b>Figura 18</b> - Espectros de amplitude da componente vertical de um geofone triaxial de 10Hz de duas aquisições: com emprego de compactador de solo (em preto) e com emprego de marreta (em marrom), ambas com offset mínimo de 35m.....	49
<b>Figura 19</b> - Fontes sísmicas: marreta ( <b>esquerda</b> ) e compactador de solo ( <b>direita</b> ). ....	49
<b>Figura 20</b> - Espectros ( $V, f$ ) de aquisições com fonte passiva ( <b>a</b> ) e ativa ( <b>b</b> ) para o uso combinado ( <b>c</b> ). Nas imagens, M0 se refere a curva de dispersão do modo fundamental (adaptado de Park <i>et al.</i> (2007)). .....	50
<b>Figura 21</b> - Base de impacto para a fonte marreta em posição horizontal. ....	51
<b>Figura 22</b> - Base de impacto em posição inclinada para geração de ondas Love, além de ondas Rayleigh.....	51
<b>Figura 23</b> - Espectros de amplitude comparativos entre as energias em cada componente de um geofone triaxial de 10Hz para tiros efetuados com uma marreta sobre a base de impacto na posição horizontal (preto) (Figura 21) e na posição inclinada (vermelho) (Figura 22). Cada aquisição resulta de um empilhamento de 5 tiros com <i>offset</i> mínimo de 35m. O espectro vermelho possui transparência de 40% para que seja possível a visualização do espectro preto que se encontra atrás do espectro vermelho. ....	52
<b>Figura 24</b> - Geofones. Geofone de componente vertical ( <b>esquerda</b> ) e geofone triaxial ( <b>direita</b> ).....	53
<b>Figura 25</b> - Curva característica do geofone GS-11D da marca Geospace de frequência natural de 4,5Hz (Geospace Technologies, 1980). .....	54
<b>Figura 26</b> - Curva característica do geofone GS-32CT da marca Geospace de frequência natural de 10Hz (Geospace Technologies, 1980). .....	54
<b>Figura 27</b> - Arranjo sísmico em L com todos os geofones posicionados verticalmente com mesmas direções e sentidos. ....	55
<b>Figura 28</b> - Influência do espaçamento mínimo entre geofones no falseamento espacial. As figuras foram obtidas através de experimentos numéricos sendo em ( <b>a</b> ) utilizado um espaçamento constante entre geofones de 1m com 190 geofones, em ( <b>b</b> ) 10m com 19 geofones e em ( <b>c</b> ) 20m com 10 geofones. A curva preta indica o limite inferior de	

comprimento de onda para o qual não ocorre falseamento espacial (FOTI <i>et al.</i> , 2017). .....	56
<b>Figura 29</b> - Arranjo linear de aquisições MASW com fontes ativas onde $L$ e $\Delta x$ são, respectivamente, o comprimento do arranjo e o espaçamento entre os geofones (adaptado de Strobbia (2003)). .....	57
<b>Figura 30</b> - Exemplos de geometrias para arranjos 2D com espaçamento entre geofones constante (adaptado de Surfseis MASW Software (2018)). .....	58
<b>Figura 31</b> - Exemplos de geometrias para arranjos 2D com espaçamento crescente entre geofones (adaptado de (FOTI <i>et al.</i> , 2017)). .....	58
<b>Figura 32</b> - Exemplo de arranjo de campo para aquisições <i>Roadside Passive</i> MASW, onde $\Delta x$ é o espaçamento entre geofones e $L$ o comprimento do arranjo (Google Maps). .....	60
<b>Figura 33</b> - Exemplo de um espectro $(V, f)$ com densidade de energia associada ( <i>software</i> Geopsy). .....	66
<b>Figura 34</b> - Esquema geral de eventos sísmicos no domínio $f, k$ (adaptado de Strobbia (2003)). .....	67
<b>Figura 35</b> - Ilustração em planta de um arranjo sísmico, em azul, e dos parâmetros necessários para o entendimento da técnica <i>f-k beamforming</i> (adaptado de Bormann (2012)). .....	68
<b>Figura 36</b> - Exemplo do processo de obtenção do gráfico de velocidade de fase $Vf$ por frequência $f$ e energia associada (espectro $(V, f)$ ). .....	72
<b>Figura 37</b> – Espectro $(V, f)$ com uma possível interpretação para as curvas de dispersão. .....	73
<b>Figura 38</b> - Exemplo de resultado obtido no processo de inversão pelo <i>software</i> Dinver. <b>À esquerda</b> a curva de dispersão do modo fundamental da onda Rayleigh com os modelos gerados pela inversão em diversas cores e <b>à direita</b> o perfil de velocidade da onda S. <b>Abaixo</b> os valores de <i>misfit</i> para os modelos gerados com escala de cores. ....	77

<b>Figura 39</b> - Arranjo de campo do ensaio sísmico 2D.....	81
<b>Figura 40</b> - Espectros ( $V, f$ ) da componente vertical (ondas Rayleigh) do ensaio sísmico 2D de uma aquisição com a fonte compactador (aquisição 2D-C-V-SP1) obtidos por processamentos distintos. O espectro <b>superior</b> foi obtido pela técnica <i>f-k transform</i> e o <b>inferior</b> pela técnica <i>f-k beamforming</i> .....	84
<b>Figura 41</b> - Espectros de amplitude da componente transversal (ondas Love) do geofone 1 (triaxial de 10Hz) do ensaio sísmico 2D para duas aquisições: com um compactador de solo incidindo verticalmente sobre o solo (aquisição 2D-C-V-SP1) (em preto) e com uma marreta incidindo sobre uma base inclinada (aquisição 2D-M-I-SP1-5) (em vermelho), ambas com <i>offset</i> mínimo de 35m. ....	85
<b>Figura 42</b> - Espectros ( $V, f$ ) da componente transversal (ondas Love) do geofone 1 (triaxial de 10Hz) do ensaio sísmico 2D para duas aquisições: <b>na imagem superior</b> com uma marreta incidindo sobre uma base inclinada (aquisição 2D-M-I-SP1-5) e <b>na imagem inferior</b> com um compactador de solo incidindo verticalmente sobre o solo (aquisição 2D-C-V-SP1). Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1° modo superior... 86	86
<b>Figura 43</b> - Espectros de amplitude das componentes vertical (ondas Rayleigh), radial (ondas Rayleigh) e transversal (ondas Love) obtidos do registro do geofone 1 da aquisição 2D-C-V-SP1 (compactador) do ensaio sísmico 2D. ....	87
<b>Figura 44</b> - Espectros ( $V, f$ ) da componente vertical (ondas Rayleigh) do ensaio sísmico 2D obtidos pelas aquisições realizadas com a fonte compactador em diferentes posições (aquisições 2D-C-V-SP1, 2D-C-V-SP2 e 2D-C-V-SP3). Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1° modo superior.....	89
<b>Figura 45</b> - Espectros ( $V, f$ ) da componente vertical (ondas Rayleigh) do ensaio sísmico 2D obtidos pelas aquisições realizadas com a fonte compactador em diferentes posições (aquisições 2D-C-V-SP4 e 2D-C-V-SP5) ( <b>imagem superior e central</b> ) e gráfico ( $V, f$ ) com as curvas de dispersão interpretadas dos espectros da Figura 44 e da presente figura ( <b>imagem inferior</b> ). Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1° modo superior. ....	90

<b>Figura 46</b> - Espectros ( $V, f$ ) da componente radial (ondas Rayleigh) do ensaio sísmico 2D obtidos pelas aquisições realizadas com a fonte compactador em diferentes posições (aquisições 2D-C-V-SP1, 2D-C-V-SP2 e 2D-C-V-SP3). Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1° modo superior.....	91
<b>Figura 47</b> - Espectros ( $V, f$ ) da componente radial (ondas Rayleigh) do ensaio sísmico 2D obtidos pelas aquisições realizadas com a fonte compactador em diferentes posições (aquisições 2D-C-V-SP4 e 2D-C-V-SP5) ( <b>imagem superior e central</b> ) e gráfico ( $V, f$ ) com as curvas de dispersão interpretadas dos espectros da Figura 46 e da presente figura ( <b>imagem inferior</b> ). Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1° modo superior. ....	92
<b>Figura 48</b> - Espectros ( $V, f$ ) da componente transversal (ondas Love) do ensaio sísmico 2D obtidos pelas aquisições realizadas com a fonte compactador em diferentes posições (aquisições 2D-C-V-SP1, 2D-C-V-SP2 e 2D-C-V-SP3). Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1° modo superior.....	93
<b>Figura 49</b> - Na <b>imagem de cima e do meio</b> , espectros ( $V, f$ ) da componente transversal (ondas Love) do ensaio sísmico 2D obtidos pelas aquisições realizadas com a fonte compactador em diferentes posições (aquisições 2D-C-V-SP4 e 2D-C-V-SP5) ( <b>imagem superior e central</b> ) e gráfico ( $V, f$ ) com as curvas de dispersão interpretadas dos espectros da Figura 48 e da presente figura ( <b>imagem inferior</b> ). Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1° modo superior. ....	94
<b>Figura 50</b> - Gráficos ( $V, f$ ) das curvas de dispersão médias obtidas no ensaio sísmico 2D das aquisições com a fonte compactador em diferentes posições (aquisições 2D-C-V-SP1, 2D-C-V-SP2, 2D-C-V-SP3, 2D-C-V-SP4 e 2D-C-V-SP5). As curvas do gráfico ( <b>c</b> ) foram obtidas pelas composições e nova média das curvas dos gráficos ( <b>a</b> ) e ( <b>b</b> ). Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1° modo superior. ....	95
<b>Figura 51</b> - Espectros ( $V, f$ ) das três componentes do ensaio sísmico 2D obtidos pela aquisição 2D-RA realizada com fonte passiva (ruído ambiental). ....	97
<b>Figura 52</b> - Arranjo de campo do ensaio sísmico 1D.....	101

<b>Figura 53</b> - Caminhonete Toyota Hilux utilizada na aquisição <i>Passive Roadside</i> MASW. .....	102
<b>Figura 54</b> - Mapa do local da aquisição <i>Passive Roadside</i> MASW com posição dos lugares de geração de ondas e arranjo de geofones.....	102
<b>Figura 55</b> - Espectros de amplitude da componente vertical (ondas Rayleigh) do geofone 1 (vertical de 4,5Hz) do ensaio sísmico 1D obtidos pelas aquisições 1D-M-V-SP1-5 (em marrom) e 1D-C-V-SP1 (em preto), com as fontes marreta e compactador, respectivamente.....	103
<b>Figura 56</b> - Espectros ( $V, f$ ) da componente vertical (ondas Rayleigh) do ensaio sísmico 1D obtidos pelas aquisições 1D-M-V-SP1-5 e 1D-C-V-SP1, com as fontes marreta e compactador, respectivamente. ....	104
<b>Figura 57</b> - Espectros ( $V, f$ ) da componente vertical (ondas Rayleigh) do ensaio sísmico 1D obtidos das aquisições 1D-C-V-SP1, 1D-C-V-SP2 e 1D-C-V-SP3, com <i>offsets</i> mínimos de 5, 15 e 25m, respectivamente. ....	106
<b>Figura 58</b> - Espectros ( $V, f$ ) da componente vertical (ondas Rayleigh) do ensaio sísmico 1D obtidos pelas aquisições realizadas com a fonte compactador em lados opostos do arranjo com <i>offsets</i> mínimos de 5m (aquisições 1D-C-V-SP1 e 1D-C-V-SP4) ( <b>imagens superior e central</b> ) e gráfico ( $V, f$ ) com as curvas de dispersão interpretadas nos espectros da própria figura ( <b>imagem inferior</b> ). Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1° modo superior. ....	107
<b>Figura 59</b> - Espectros de amplitude de todos os traços sísmicos da componente vertical (ondas Rayleigh) (geofones verticais de 4,5Hz) do ensaio sísmico 1D aquisição 1D-PR. .....	108
<b>Figura 60</b> – Espectro ( $V, f$ ) da aquisição 1D-PR obtida através da técnica <i>Passive Roadside</i> com duas interpretações distintas para a banda de frequência de 3,2 a 4,2Hz. Na <b>imagem superior</b> a curva do modo fundamental tem início em 4,2Hz e na <b>imagem inferior</b> em 3,2Hz. Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1° modo superior. .....	109

**Figura 61** - Gráficos ( $V, f$ ) das curvas de dispersão obtidas no ensaio sísmico 2D das aquisições ativa, com a fonte compactador (aquisição C-V-SP1), e passiva, com a técnica *Passive Roadside MASW* (aquisição 1D-PR). Nos gráficos (a) e (b) constam as curvas das aquisições ativa (em preto) e passiva (em azul), apresentando o gráfico (a) a primeira interpretação e o gráfico (b) a segunda. Os gráficos (c) e (d) apresentam as composições das curvas de (a) e (b), respectivamente, obtidas por cálculo de médias das regiões de sobreposição das curvas. Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1º modo superior.....110

**Figura 62** - Gráficos ( $V, f$ ) das curvas de dispersão experimentais acompanhadas das curvas modeladas pelas inversões da Tabela 5, onde a escala de cores representa valores de *misfit* (desajuste). Essa figura tem como referência o ensaio sísmico 2D.....114

**Figura 63** - Perfis de velocidade de ondas S ( $VS$ ) obtidos pelas inversões da Tabela 5. Diferentes cores representam modelos com diferentes valores de *misfit* (desajuste). As inversões (b), (d) e (f) exibem o perfil  $VS$  obtido por conversão dos valores NSPT da sondagem da área de estudo (Figura 5) através de equação empírica. Essa figura tem como referência o ensaio sísmico 2D.....116

**Figura 64** - Gráficos ( $V, f$ ) das curvas de dispersão experimentais acompanhadas das curvas modeladas pelas inversões da Tabela 7, onde a escala de cores representa valores de *misfit* (desajuste). Essa figura tem como referência o ensaio sísmico 1D.....118

**Figura 65** - Perfis de velocidade de ondas S ( $VS$ ) obtidos pelas inversões da Tabela 7. Diferentes cores representam modelos com diferentes valores de *misfit* (desajuste). As inversões (b) e (d) exibem o perfil  $VS$  obtido por conversão dos valores NSPT da sondagem da área de estudo (Figura 5) através de equação empírica. Essa figura tem como referência o ensaio sísmico 1D.....120

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Valores esperados da razão de Poisson, densidade e velocidades sísmicas para solos e rochas. Os valores em preto foram obtidos em Foti <i>et al.</i> , (2017) e os valores em azul foram calculados com base nos extremos da razão de Poisson e velocidade de onda S através da equação (6). .....	43
<b>Tabela 2</b> - Tabela de orientação para o planejamento dos parâmetros de aquisições de ensaios MASW. Essa tabela apresenta uma compilação de informações de Park, Miller e Xia, (1999), Strobbia (2003) e Foti <i>et al.</i> , (2017). .....	64
<b>Tabela 3</b> - Aquisições do ensaio sísmico 2D. ....	82
<b>Tabela 4</b> - Parâmetros do modelo inicial da inversão. ....	99
<b>Tabela 5</b> - Inversões realizadas no ensaio sísmico 2D. ....	99
<b>Tabela 6</b> - Aquisições do ensaio sísmico 1D. ....	101
<b>Tabela 7</b> - Inversões realizadas no ensaio sísmico 1D. ....	111



# SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO.....	25
CAPÍTULO 2	ÁREA DE ESTUDO.....	27
CAPÍTULO 3	METODOLOGIA.....	31
3.1	Introdução.....	31
3.2	Ondas de Superfície.....	31
3.2.1	Velocidade de Grupo e Velocidade de Fase.....	32
3.2.2	Dispersão.....	34
3.2.3	Modos de Propagação.....	35
3.2.4	Atenuação.....	37
3.2.5	Ondas Rayleigh.....	40
3.2.6	Ondas Love.....	41
3.3	Coefficiente (Módulo ou Razão) de Poisson.....	42
3.4	Análise Multicanal de Ondas de Superfície - MASW.....	44
3.4.1	Aquisição.....	46
3.4.1.1	Equipamentos.....	46
3.4.1.1.1	Sensores Sísmicos (Geofones).....	53
3.4.1.2	Geometria de Aquisição - Resolução Vertical e Profundidade de Investigação.....	55
3.4.1.2.1	MASW com Fonte Ativa (A-MASW).....	57
3.4.1.2.2	MASW com Fonte Passiva (P-MASW).....	58
3.4.1.2.3	<i>Passive Roadside</i> MASW (RP-MASW).....	59
3.4.1.3	Parâmetros de Gravação.....	60
3.4.1.4	Empilhamento Vertical.....	61
3.4.1.5	Efeito de Campo Próximo e Remoto.....	61
3.4.1.6	Heterogeneidade Lateral.....	62
3.4.1.7	Parâmetros de Aquisição MASW (Resumo).....	63
3.4.2	Processamento.....	65
3.4.2.1	<i>f-k transform</i> .....	66
3.4.2.2	<i>f-k beamforming</i> .....	67
3.4.2.2.1	<i>beamforming</i> .....	68

3.4.2.2.2 <i>f-k beamforming</i> .....	70
3.4.2.3 Interpretação das Curvas de Dispersão .....	73
3.4.3 Inversão.....	74
3.4.3.1 Parametrização do Modelo Inicial .....	75
3.4.3.2 Algoritmo de Inversão .....	76
CAPÍTULO 4 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS.....	79
4.1 Ensaio Sísmico 2D .....	79
4.1.1 Aquisição .....	79
4.1.2 Processamento .....	82
4.1.3 Inversão.....	98
4.2 Ensaio Sísmico 1D .....	99
4.2.1 Aquisição .....	100
4.2.2 Processamento .....	103
4.2.3 Inversão.....	111
CAPÍTULO 5 RESULTADOS .....	113
5.1 Discussão dos Resultados do Ensaio Sísmico 2D .....	113
5.2 Discussão dos Resultados do Ensaio Sísmico 1D .....	117
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	121
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123
APÊNDICES .....	129
Apêndice A – Módulos de Elasticidade Dinâmicos .....	129
Apêndice B – Sondagem SPT ( <i>Standard Penetration Test</i> ) .....	129
Apêndice C – Fórmula Empírica de Correlação entre Valores NSPT e $V_S$ .....	130
Apêndice D – Velocidade Média de Propagação de Ondas S nos Primeiros 30m ( $V_{S,30}$ ) .....	130

## CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

---

---

A análise do comportamento dispersivo das ondas de superfície (Rayleigh e Love) permite caracterizar o meio geológico através de perfis de velocidades das ondas sísmicas por meio da inversão de curvas de dispersão. O conhecimento da velocidade de propagação das ondas P e S é importante para diferentes áreas de aplicação. A informação da profundidade onde se localiza o topo do embasamento (rocha sã), usualmente caracterizado por variações mais bruscas dos perfis de velocidades das ondas sísmicas, é importante em projetos de engenharia e meio ambiente. Em projetos de fundações os módulos de elasticidade dinâmicos, como o módulo de Young dinâmico e o módulo de cisalhamento dinâmico, são calculados a partir das velocidades de propagação das ondas P e S. Ainda no campo da engenharia geotécnica, existe uma forte relação entre o valor NSPT (número de golpes em sondagens SPT) com a velocidade de propagação de ondas S. Normas de projetos e estruturas para resistência aos sismos, como o EC8 (*Eurocode 8*) e o IBC (*International Building Code*), utilizam o parâmetro  $V_{S,30}$  que fornece a velocidade média de propagação das ondas de cisalhamento nos primeiros 30m de profundidade, calculado a partir de um perfil de  $V_S$ .

Para o propósito do mapeamento do campo de velocidades de ondas P e S, principalmente ondas S, o método sísmico de Análise Multicanal de Ondas de Superfície (*Multichannel Analysis of Surface Waves - MASW*), apresentado pelo Serviço Geológico do Kansas (*Kansas Geological Survey - KGS*) (PARK, MILLER e XIA, 1996, 1998, 1999; XIA, MILLER e PARK, 1999), é um dos mais empregados. O MASW incorpora conceitos da técnica Análise Espectral de Ondas de Superfície (*Spectral Analysis of Surface Waves - SASW*) introduzido por Nazarian, Stokoe e Hudson (1983) e Nazarian e Stokoe (1984) permitindo-se estimar modelos 1D de velocidades sísmicas que, integrados, podem gerar uma seção 2D do campo de velocidades das ondas nos estratos geológicos. O método apresenta várias técnicas de aquisição e processamento dos dados, utilizando-se diferentes fontes geradoras de ondas podendo-se registrar o campo dessas por geofones verticais ou triaxiais para análise de ondas Rayleigh e/ou Love. Também podem ser utilizados diferentes modos de propagação das ondas para obtenção de melhores resultados através de inversões conjuntas.

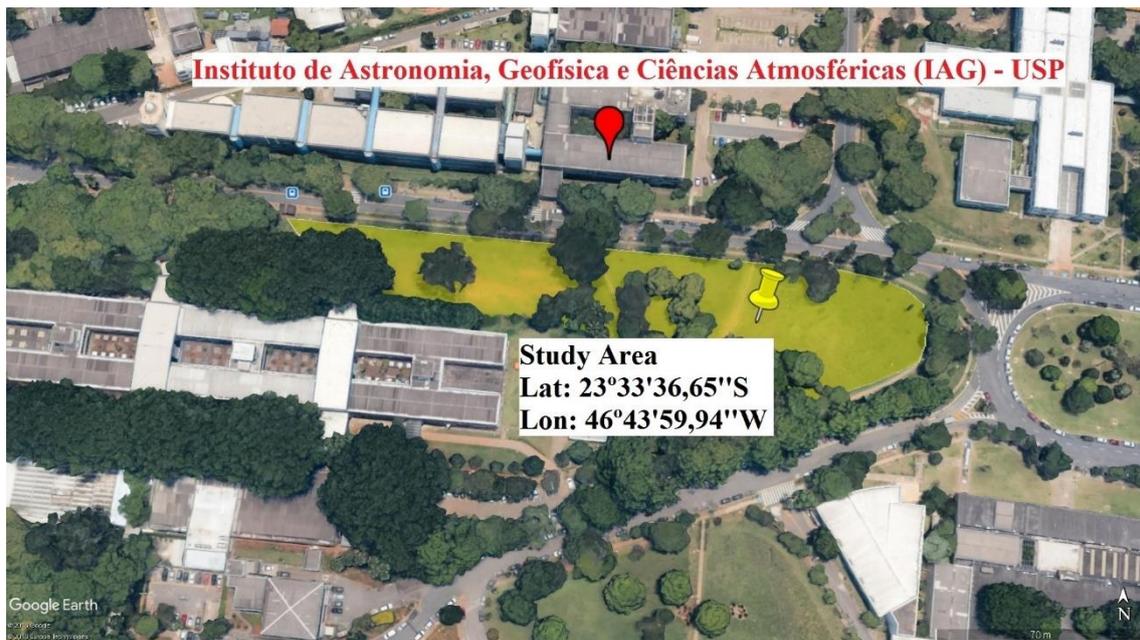
Este trabalho teve como objetivo a realização de um estudo sobre o método MASW (Análise Multicanal de Ondas de Superfície) avaliando-se comparativamente os

resultados obtidos com a utilização de diferentes fontes, ativas (marreta e compactador de solo) e passivas (ruído ambiental e tráfego de veículos (*Passive Roadside MASW*)), diferentes componentes de ondas (vertical (ondas Rayleigh), radial (ondas Rayleigh) e transversal (ondas Love)) e diferentes modos de propagação, fundamental e superiores. Foram utilizados os *softwares* livres Geopsy, para o processamento dos dados, e Dinver, para inversão ([GEOPSY PROJECT, 2005](#)). Dois ensaios sísmicos foram realizados utilizando-se diferentes geofones (verticais de 4,5Hz e triaxiais de 10Hz) e diferentes geometrias de aquisição (1D e 2D). Os estudos foram realizados em frente ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciência Atmosféricas (IAG) localizado no interior do campus Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira (CUASO) da Universidade de São Paulo (USP) no bairro do Butantã, São Paulo. A área de estudo possui informações de sondagem mista com descrição geológica do material e valores SPT (*Standard Penetration Test*) que foram utilizados para validação dos resultados.

O método MASW possui etapas que são bastante dependentes do operador tornando-se indispensável um sólido conhecimento do método. Neste sentido os estudos realizados neste trabalho abordam uma variedade de situações envolvendo o método MASW visando um melhor entendimento sobre o método nos seus fundamentos, parâmetros de aquisição e processamento.

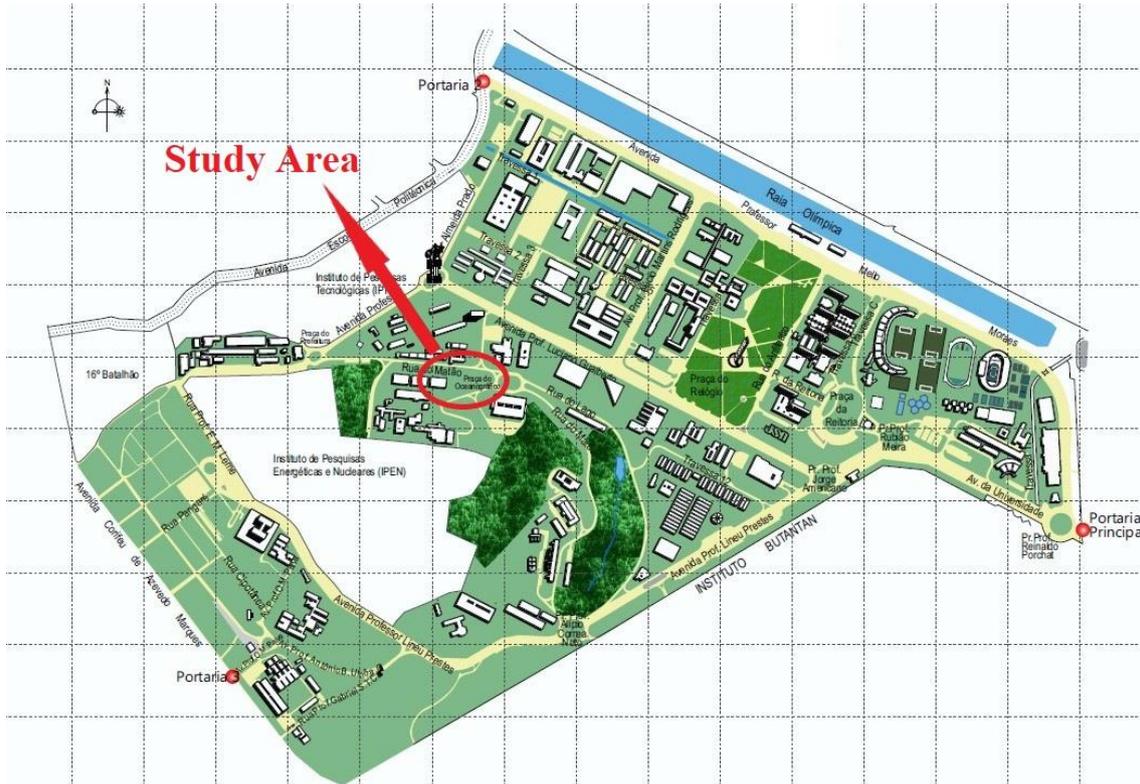
## CAPÍTULO 2    ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do presente trabalho encontra-se em frente ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) (Figura 1) localizado no interior do campus Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira (CUASO) da Universidade de São Paulo (USP) no bairro do Butantã, São Paulo.



**Figura 1** - Imagens da área de estudo, localizada em frente ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) (Google Earth).

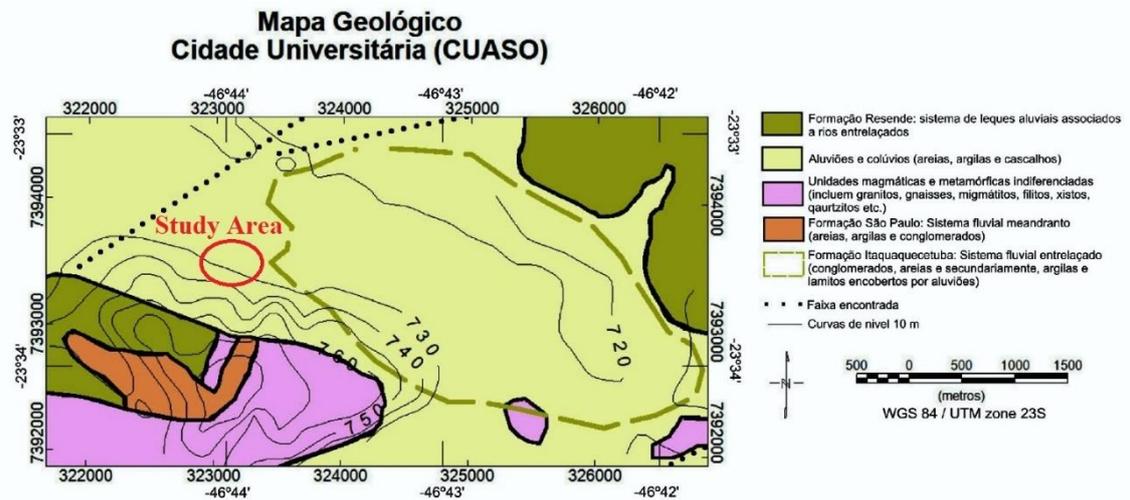
Devido a diversidade de ambientes geológicos e a facilidade de acesso a CUASO (Figura 2) é considerada por professores e alunos um laboratório de pesquisas nas áreas de geologia e geofísica. Diversos artigos, trabalhos de graduação, dissertações de mestrado e teses de doutorado já foram desenvolvidos em áreas de estudo no interior do campus.



**Figura 2** - Campus Cidade Universitária Aramando de Salles Oliveira (CUASO) da Universidade de São Paulo (USP).

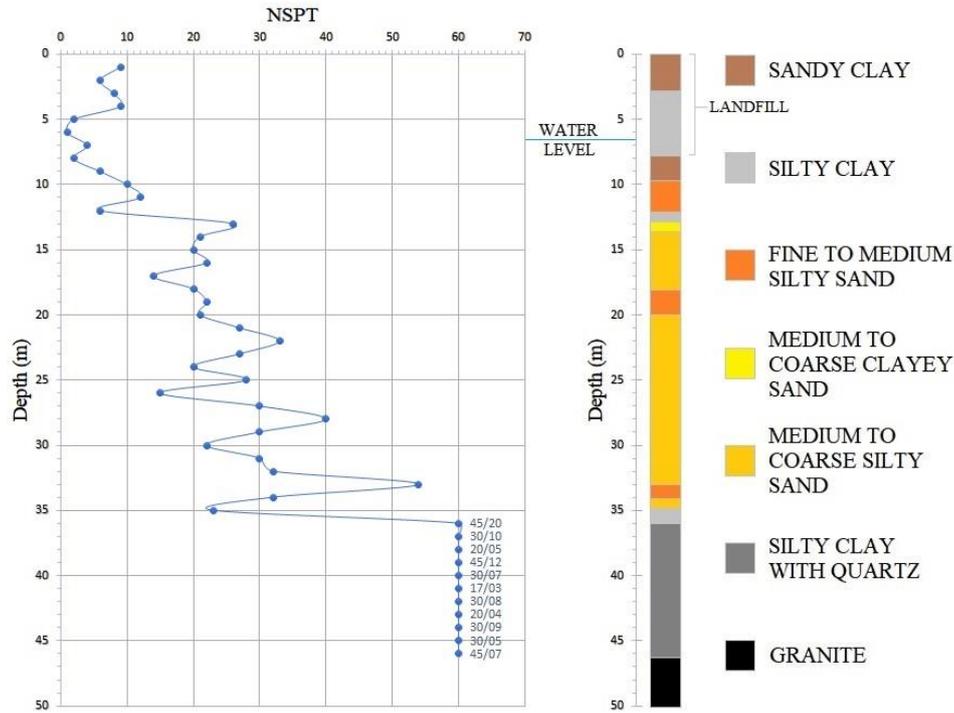
A CUASO localiza-se em sua porção Oeste entre as coordenadas UTM 23S 7392km e 7395km Norte e 322km e 326km Leste (IRITANI, 1993) e apresenta uma topografia com altitudes entre 718 e 725m representando em boa parte a planície de inundação do Rio Pinheiros, localizado a nordeste do campus. O campus está inserido na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, de idade Cenozoica, pertencente à porção central do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (ALMEIDA, 1976; RICCOMINI, 1989) originado do evento de ruptura do Atlântico Sul. O embasamento da Bacia de São Paulo é constituído de rochas ígneas e metamórficas do Cinturão de Dobramentos Ribeira, de idade Pré-Cambriana, tendo ocorrido o preenchimento da bacia do Paleógeno ao Quaternário. Os sedimentos são principalmente de leques aluviais, planície aluvial e lacustre e depósitos fluviais meandrantés, aluviais e colúvies (GURGUEIRA, 2013). Os

afloramentos no interior da CUASO são de rochas do embasamento pertencentes ao Complexo Embu e Suítes Graníticas Indiferenciadas, rochas sedimentares da formação Resende e São Paulo (Grupo Taubaté) e sedimentos quaternários (TAKIYA, 1991; RODRIGUEZ, 1998). A Figura 3 apresenta um mapa geológico da região da CUASO.



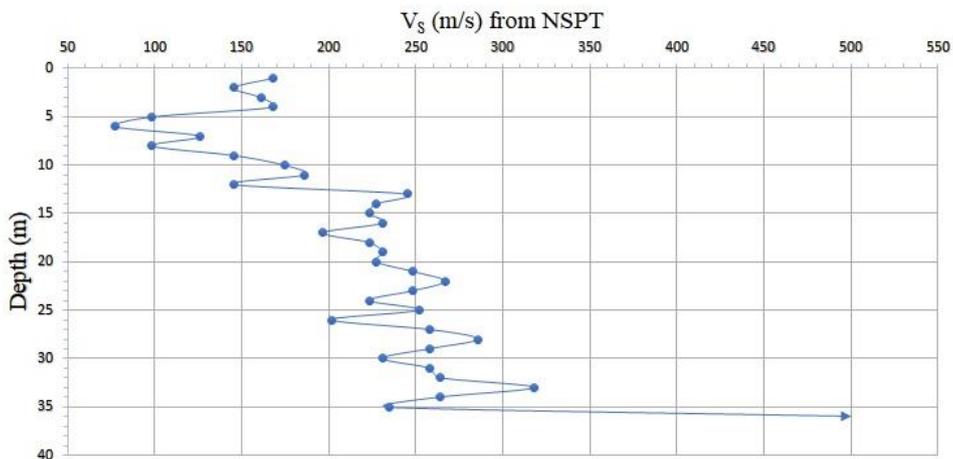
**Figura 3** - Mapa geológico da região da CUASO com indicação da área de estudo em vermelho (adaptado de Marangoni, Moura e Ferreira (2017)).

A área de estudo possui informações de sondagem mista realizada no final do ano de 2000 cujas informações relevantes para este trabalho estão sintetizadas na Figura 4. A figura apresenta uma descrição geológica da área com profundidade do nível d'água, profundidade do embasamento e valores de sondagem SPT (Apêndice B). O período chuvoso na cidade de São Paulo encontra-se no verão, ocorrendo o período de menor precipitação no inverno. Os dados obtidos na Figura 4 foram adquiridos no mês de novembro e início de dezembro de 2000, apresentando como profundidade do nível d'água o valor de 6,5m. Segundo boletim climatológico da Estação de Meteorológica do IAG (ESTAÇÃO METEOROLÓGICA - IAG-USP, 2018), para o período de novembro e dezembro do ano de 2000 houve uma precipitação de 246,9 e 266,4mm, respectivamente. Os ensaios sísmicos realizados neste trabalho ocorreram no ano de 2017 nos meses de maio e setembro, nos quais houve precipitação de 135,9 e 45,5mm, respectivamente. Assim, espera-se que o nível d'água esteja mais profundo em ambas as aquisições, em especial na de setembro.



**Figura 4** - Informações obtidas de sondagem mista realizada na área de estudo no final do ano de 2000 pela empresa Geotécnica.

A [Figura 5](#) apresenta valores de velocidade de ondas S ( $V_S$ ) convertidas dos valores NSPT da [Figura 4](#) através da fórmula empírica ([Apêndice C](#)) do trabalho de ([FATEHNA, HAYDEN e LANDSCHOOT, 2015](#)). A seta ao final do perfil indica a profundidade a partir da qual o grau de compactação do solo passou a ser significativamente maior impossibilitando a conversão de valores NSPT para  $V_S$ .



**Figura 5** - Gráfico de profundidade em função de velocidade de ondas S ( $V_S$ ) obtido por conversão dos valores NSPT ([Figura 4](#)) em  $V_S$  através de fórmula empírica ([Apêndice C](#)).

## CAPÍTULO 3 METODOLOGIA

---

---

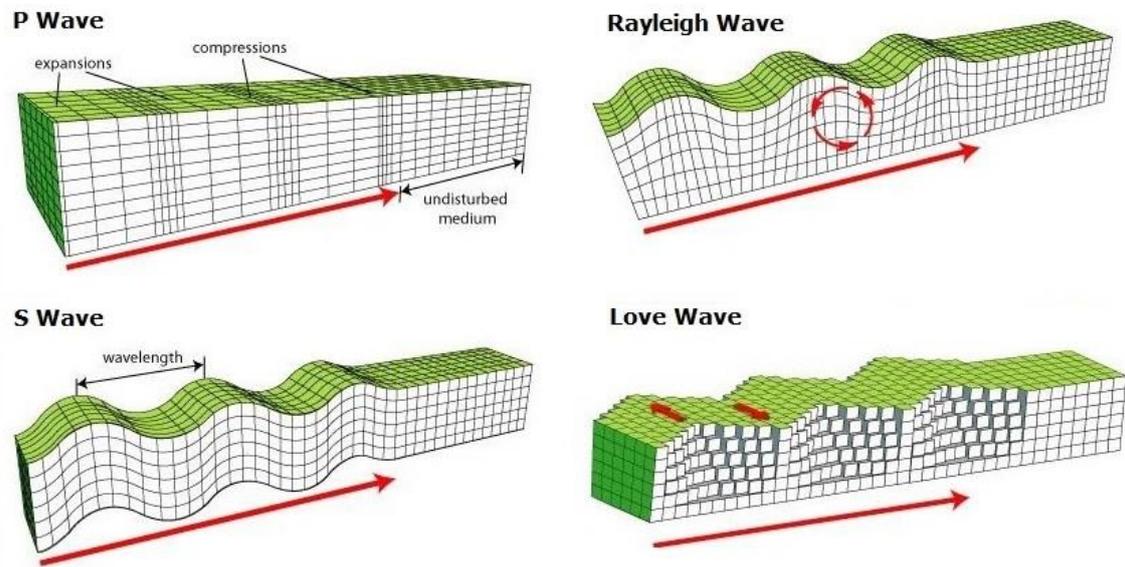
### 3.1 INTRODUÇÃO

A caracterização da subsuperfície através do estudo da dispersão das ondas de superfície teve início na sismologia para investigação do manto superior e crosta terrestre (EWING, JARDETZKY e PRESS, 1957). Aplicações na engenharia ganharam impulso com a introdução do método SASW (*Spectral Analysis of Surface Waves*) (NAZARIAN, STOKOE e HUDSON, 1983; NAZARIAN e STOKOE, 1984; STOKOE *et al.*, 1994) que utiliza um par de receptores para a aquisição dos dados. Vários tiros e diferentes espaçamentos entre receptores são necessários demandando um tempo considerável. Através da utilização da técnica multicanal, ou seja, com a utilização de vários receptores, o método tornou-se mais popular (PARK, MILLER e XIA, 1998, 1999) e passou a ser mais conhecido como Análise Multicanal de Ondas de Superfície - MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*). A partir de então passou a ser empregado não só com a utilização de fontes ativas, (PARK *et al.*, 2004; PARK e MILLER, 2006) mas também com fontes passivas e (PARK *et al.*, 2005; PARK *et al.*, 2007) com a inversão conjunta de dados gerados com o emprego de ambas as fontes. A análise das ondas de superfície se concentra principalmente nas ondas Rayleigh sendo, no entanto, também utilizadas as ondas Love. Na geofísica rasa a Análise Multicanal de Ondas Love - MALW (*Multichannel Analysis of Love Waves*), teve início com (SONG *et al.*, 1989).

### 3.2 ONDAS DE SUPERFÍCIE

Ondas de superfície, denominadas *Ground Roll* na sísmica exploratória e constituídas principalmente por ondas Rayleigh, é a denominação recebida pelas ondas sísmicas que se propagam ao longo da interface que limita dois meios, i.e., propagam-se ao longo de uma superfície livre ou ao longo da interface entre dois meios sólidos não similares. As ondas de superfície podem ser divididas em ondas Rayleigh, Love e Stoneley, sendo as de Stoneley (nome em homenagem ao professor de sismologia Dr. Robert Stoneley, 1894 - 1976), geradas somente em condições específicas que não são de interesse para este trabalho. A Figura 6 mostra como as partículas do meio se

movimentam pela passagem de ondas P (longitudinais), ondas S (transversais), Rayleigh e Love.



**Figura 6** - Movimento de partículas associado a passagem de diferentes tipos de ondas (adaptado de [Science Learning Hub \(2018\)](#)).

Na [Figura 6](#) o desenho representativo para ondas S possui polarização vertical ( $S_V$ ), ou seja, as partículas oscilam apenas na direção vertical. No entanto, as ondas S podem também ter polarização horizontal ( $S_H$ ), que são as constituintes das ondas Love, ou gerarem oscilações em qualquer ângulo desde que a oscilação das partículas ocorra em uma direção perpendicular em relação à direção de propagação da onda.

### 3.2.1 VELOCIDADE DE GRUPO E VELOCIDADE DE FASE

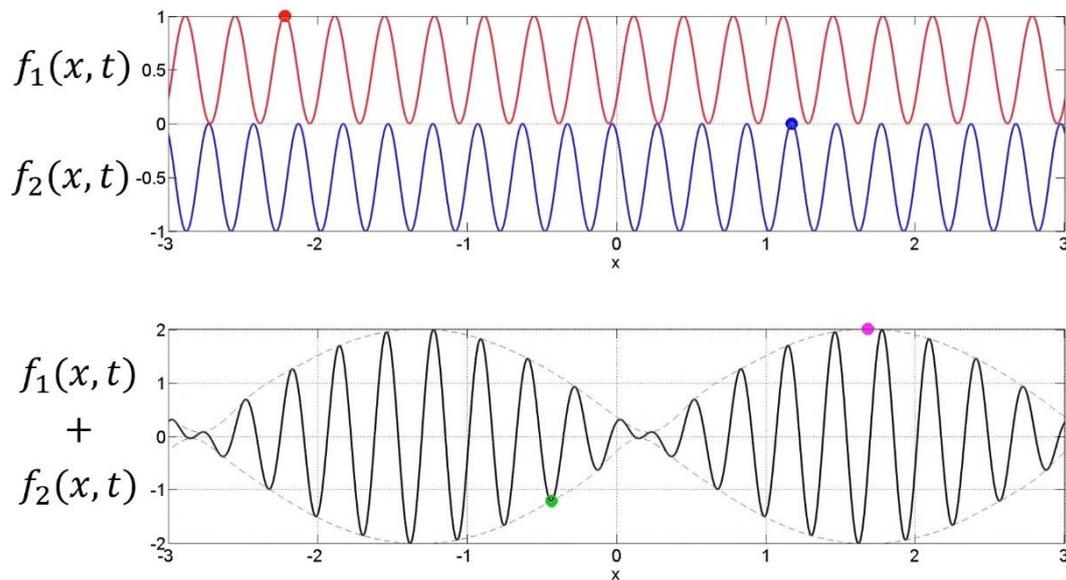
Quando uma fonte sísmica do tipo impulsiva é acionada gera-se um pulso que pode ser representado por um grupo de ondas harmônicas de diferentes frequências superpostas, podendo esse pulso ser entendido como um pacote de ondas, [Figura 7](#). Denomina-se velocidade de grupo a velocidade de propagação de um ponto fixo sobre o envelope das ondas constituintes do pacote de ondas, e velocidade de fase a velocidade de propagação de um ponto fixo sobre a onda oscilante no interior do envelope. Assim, um pulso constituído por um pacote de ondas apresenta tanto uma velocidade de grupo como uma velocidade de fase. Matematicamente a velocidade de grupo ( $V_G$ ) é definida como

$$V_G = \frac{d\omega}{dk} \quad (1)$$

e a velocidade de fase  $V_F$  como

$$V_F = \frac{\bar{\omega}}{\bar{k}} \quad (2)$$

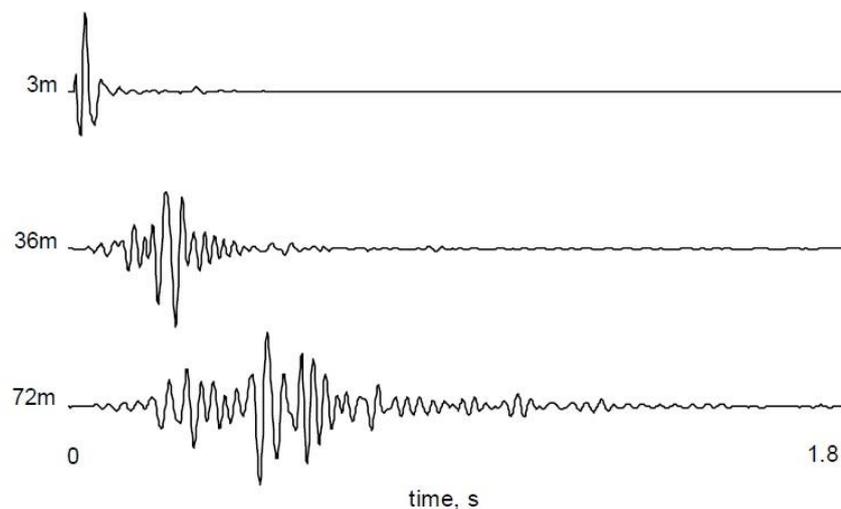
onde  $\bar{\omega}$  é a frequência angular média e  $\bar{k}$  o número de onda médio, médias essas obtidas das ondas harmônicas constituintes do pulso. Quando se fala, no entanto, de uma onda harmônica, ou seja, de frequência única, só existe a velocidade de fase, mas neste caso não será dada por médias, mas sim pela razão entre a própria frequência angular  $\omega$  e número de onda  $k$  da onda em questão. Neste trabalho, sempre quando dito velocidade de fase a referência será a velocidade de propagação de uma onda de frequência específica (harmônica) e não a velocidade de fase do pacote de ondas.



**Figura 7** - Esquema que demonstra a superposição de ondas harmônicas. **Na imagem superior** estão representadas, em vermelho e azul, duas ondas harmônicas com frequências angulares e números de ondas diferentes entre si. **Na imagem inferior**, um pacote de ondas obtido da superposição das ondas harmônicas onde o ponto lilás é o ponto fixo sobre o envelope de ondas que se propaga com velocidade igual a velocidade de grupo do pulso, e o ponto verde é o ponto fixo sobre a onda oscilante no interior do envelope e que se propaga com velocidade igual a velocidade de fase do pulso (adaptado de [Meyavuz \(2013\)](#)).

### 3.2.2 DISPERSÃO

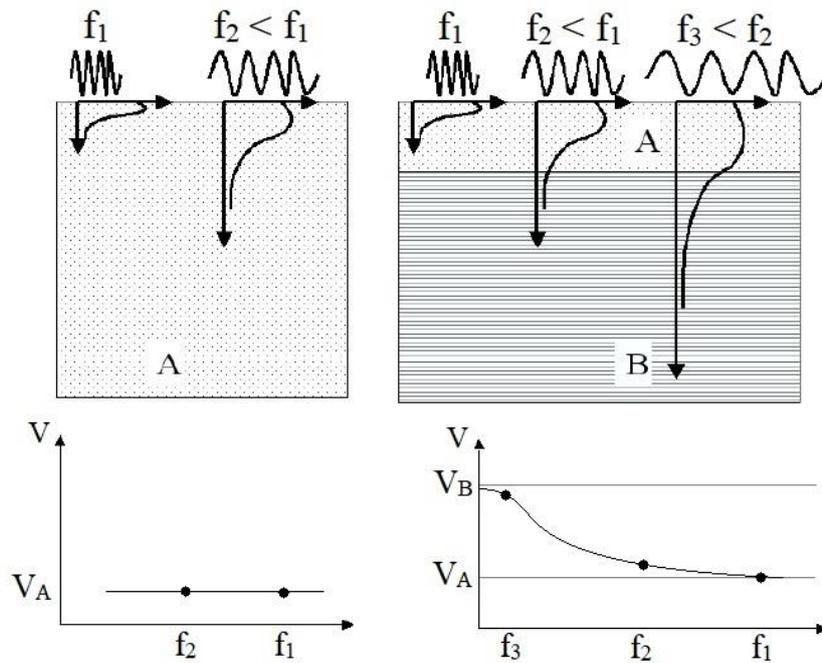
Um meio é denominado não dispersivo quando um pacote de ondas se propaga por ele e mantém a sua forma durante o deslocamento. Isso significa que as ondas harmônicas constituintes do pacote, cada qual com sua frequência, se deslocam todas com a mesma velocidade. Ao contrário, um meio é denominado dispersivo quando ondas harmônicas com diferentes frequências se propagam com velocidades distintas e, por consequência, o pacote terá sua forma alterada constantemente durante a propagação (Figura 8).



**Figura 8** - Registro de um sinal com diferentes distâncias à fonte (adaptado de Foti (2000)).

O ar é considerado um meio não dispersivo para ondas sonoras, ao contrário dos sólidos e líquidos. Para as ondas de superfície o meio geológico é um meio dispersivo, pois possui camadas com impedâncias acústicas diferentes e é isso que possibilita a aplicação de métodos sísmicos que analisam as ondas de superfície.

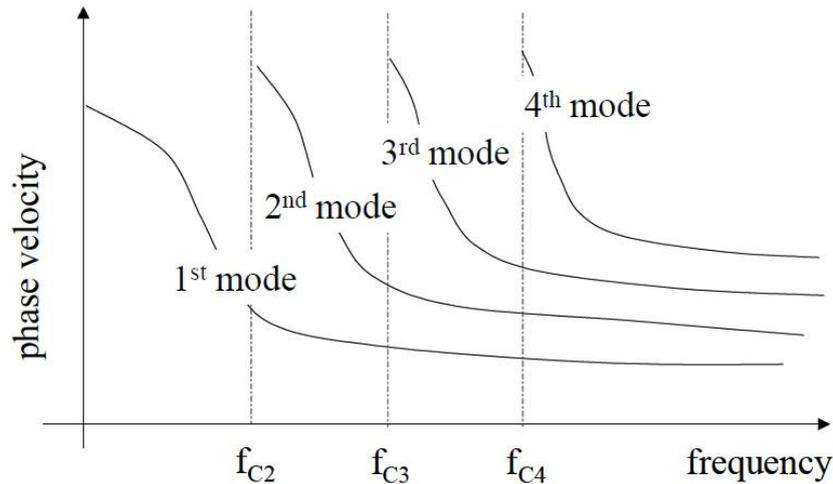
Cada frequência, ou comprimento de onda, das componentes do pacote de ondas de superfície, produz um movimento ou deformação das partículas que são significativos até uma determinada profundidade. Através da dispersão e por envolverem profundidades distintas, as velocidades das componentes são caracterizadas por diferentes velocidades de fase, dependentes da frequência (Figura 9). O gráfico que representa tal comportamento, velocidade de fase em função da frequência, é denominado de curva de dispersão. A busca pelas curvas de dispersão é uma importante etapa no método MASW.



**Figura 9** - Representação esquemática do caráter dispersivo das ondas de superfície. À esquerda, por ser um meio homogêneo todas as frequências envolvem o mesmo material em subsuperfície, resultando em uma velocidade de fase constante. À direita, diferentes frequências atingem profundidades distintas e por se tratar de um meio verticalmente heterogêneo resulta em velocidades de fase distintas (adaptado de Strobbia (2003)).

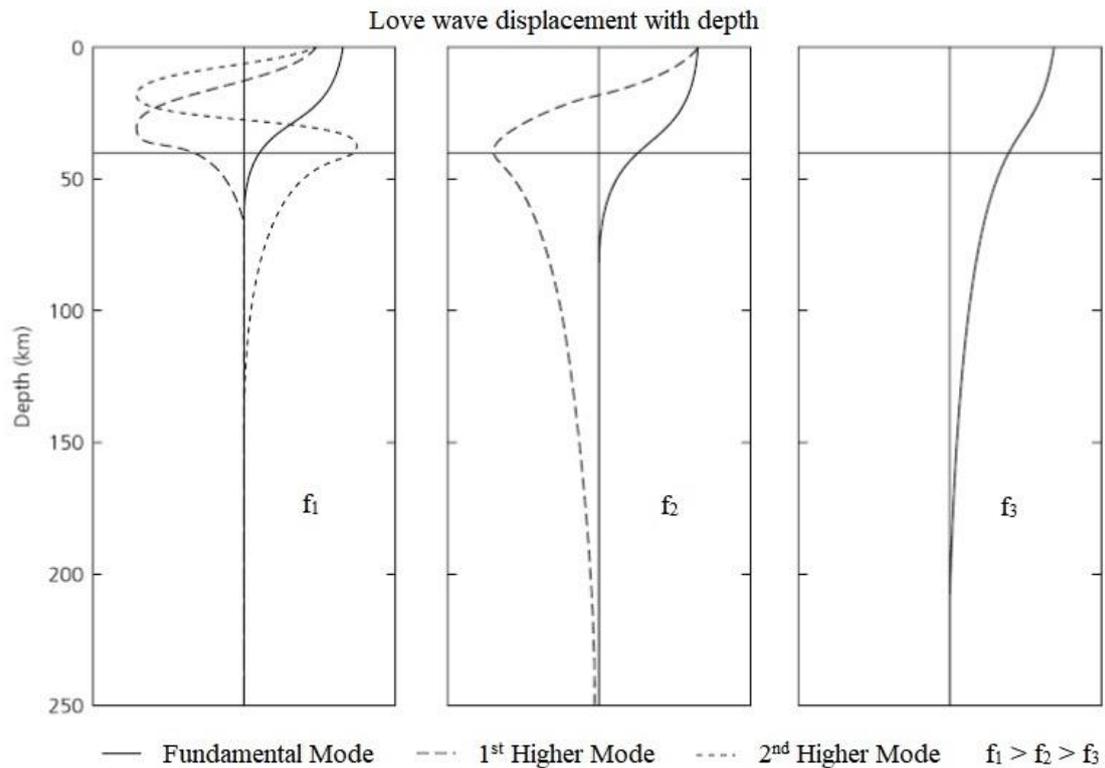
### 3.2.3 MODOS DE PROPAGAÇÃO

Em meios estratificados a propagação das ondas de superfície é um fenômeno multimodal. Isso significa que para uma mesma frequência diferentes modos de vibração podem existir. A existência dos diferentes modos pode ser explicada pela interferência construtiva que ocorre entre ondas submetidas a reflexões múltiplas com as interfaces das camadas (ACHENBACH, 1984). Cada modo só existe a partir de uma certa frequência, denominada frequência de corte (Figura 10). O primeiro modo de propagação é denominado de modo fundamental, o segundo de primeiro modo superior e assim por diante. Pode ser obtida uma curva de dispersão de cada modo de vibração, sendo que as ondas de modos maiores possuem velocidades maiores que as de modos menores, considerando um meio estratificado com velocidade crescente com a profundidade. A separação entre os modos é mais pronunciada quanto maior for a distância dos registradores à fonte. Isso ocorre devido a diferença entre as velocidades de fase e de grupo, e conseqüentemente da mudança de forma que o pulso sofre (FOTI, 2000).



**Figura 10** - Curvas de dispersão de diferentes modos de propagação, sendo  $f_{C2}$ ,  $f_{C3}$  e  $f_{C4}$  respectivamente as frequências de corte do 2º, 3º e 4º modo (adaptado de [Strobbia \(2003\)](#)).

A quantidade de modos, as frequências de corte e a energia associada a cada modo dependem de vários fatores, como: meio geológico, arranjo sísmico e fonte. As condições do meio geológico podem propiciar a geração de muitos modos, mas isso não implica necessariamente que eles estarão visíveis no espectro ( $V, f$ ) (seção 3.4.2). Um modo pode predominar em termos de energia em determinada banda de frequência enquanto em outras bandas predominam outros modos. Isso gera um dos maiores problemas envolvendo o método MASW. Se na parte interpretativa das curvas de dispersão os modos forem interpretados de forma errada o resultado final estará comprometido. Quando uma curva de dispersão não está associada ao modo correto, seja parcial ou totalmente, ela é denominada curva de dispersão aparente - sendo o oposto uma curva de dispersão modal - e o processo de inversão irá resultar em um perfil de velocidade falso. No entanto, para meios estratificados com velocidade crescente com a profundidade, que se pode considerar como sendo o padrão da maioria dos casos na investigação geológica rasa, a maior energia estará associada ao modo fundamental de propagação. Modos superiores são particularmente excitados quando há grande contraste de impedância acústica entre camadas geológicas ou na presença de uma camada de baixa velocidade entre camadas de alta ([FOTI \*et al.\*, 2017](#)). Modos superiores trazem informações adicionais importantes aos dados, especialmente por corresponderem a maiores profundidades de propagação da onda ([STEIN e WYSESSION, 2003](#)) ([Figura 11](#)).



**Figura 11** – Profundidade de penetração do modo fundamental, primeiro modo superior e segundo modo superior da onda Love para diferentes frequências (adaptado de [Stein e Wysession \(2003\)](#)).

Cada modo existente contribui para a formação da velocidade de fase real para uma dada frequência. As velocidades de fase obtidas por curvas de dispersão isoladas são, na verdade, velocidades de fase aparentes. Note que existem termos que podem gerar confusão. Uma curva de dispersão aparente é fruto de uma interpretação errada, sendo a correta a curva de dispersão modal, ou seja, associada a cada modo corretamente. Uma velocidade de fase aparente não é fruto de uma interpretação errada, ela apenas não é a velocidade de fase real daquela frequência. Se a curva de dispersão é uma curva modal, as velocidades associadas, que são as aparentes para aquele modo, são justamente as necessárias para a inversão.

### 3.2.4 ATENUAÇÃO

Quando uma onda se propaga por um meio ela sofre perda de energia conforme se afasta da fonte. As duas principais causas dessa perda são a absorção de energia pelo meio, também denominada de atenuação intrínseca ou inelástica, e o espalhamento geométrico.

Quando uma onda é gerada por uma fonte pontual no interior de um sólido ela se propaga em todas as direções formando uma frente de onda esférica, à qual existe uma determinada energia associada. Como a superfície esférica aumenta com a distância à fonte a energia por unidade de área tem que diminuir, o que caracteriza o fenômeno do espalhamento geométrico. As características do corpo e a forma como a onda movimentada as partículas do meio pelo qual se propaga (o tipo de onda) influenciam no espalhamento geométrico e, por isso, diferentes tipos de ondas possuem diferentes decréscimos de amplitude com a distância à fonte. Para um semiespaço homogêneo e isotrópico a atenuação da amplitude devido ao espalhamento geométrico é dada por (RICHART, WOOD e HALL, 1970).

$$\frac{1}{r^n} \text{ onde } n = \begin{cases} 1 & \text{para ondas de corpo} \\ 1/2 & \text{para ondas Rayleigh e Love} \end{cases} \quad (3)$$

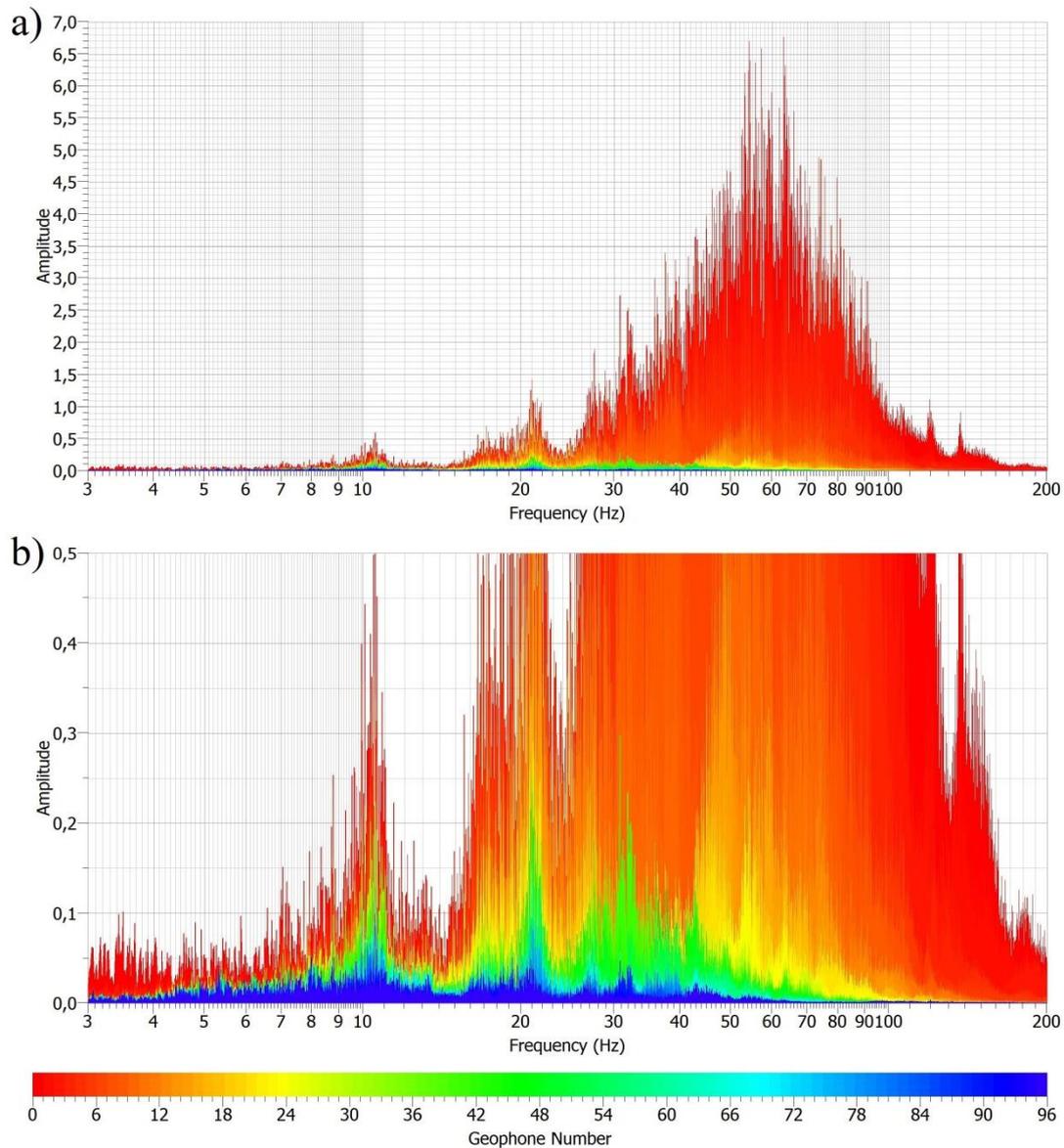
A equação (3) revela que a amplitude das ondas Rayleigh e Love decaem menos com a distância do que a das ondas de corpo e, assim, um registro sísmico distante da fonte deverá ser dominado, considerando-se apenas o espalhamento geométrico, por ondas de superfície. Em meios heterogêneos, no entanto, o espalhamento geométrico é mais complexo. Na propagação das ondas de superfície, por exemplo, por apresentar característica multimodal, cada modo sofre uma atenuação pelo espalhamento geométrico segundo a equação (3), enquanto a amplitude global é atenuada de forma mais complicada (STROBBIA, 2003).

Quando uma onda sísmica se propaga por um meio, a absorção de energia ocorre pelo fato do meio não ser perfeitamente elástico, mesmo com baixas tensões envolvidas, sendo a energia da onda absorvida pelas perdas friccionais internas. Na escala de investigação da geofísica rasa o que se percebe é que a atenuação intrínseca de altas frequências é muito maior para as ondas de superfície do que para as ondas de corpo, superando inclusive o fato das ondas de corpo serem mais atenuadas pelo espalhamento geométrico. Isso faz com que o sismograma seja dominado por ondas de corpo para registros distantes da fonte, gerando ruído nas frequências mais altas.

A Figura 12 apresenta o espectro de amplitude do sismograma de um ensaio sísmico no qual foram utilizados 96 geofones de componente vertical de 4,5Hz e um compactador de solo como fonte, ativo por 60s. Os geofones foram dispostos linearmente e espaçados de 1,5m, e os respectivos espectros dos sismogramas registrados estão

representados por cada cor da escala de cores utilizada na figura. O geofone 1 foi posicionado mais próximo da fonte (5m) e o 96 mais distante (147,5m). Através da [Figura 12](#) nota-se como a amplitude das ondas sísmicas diminui consideravelmente com a distância.

### Attenuation of Seismic Waves

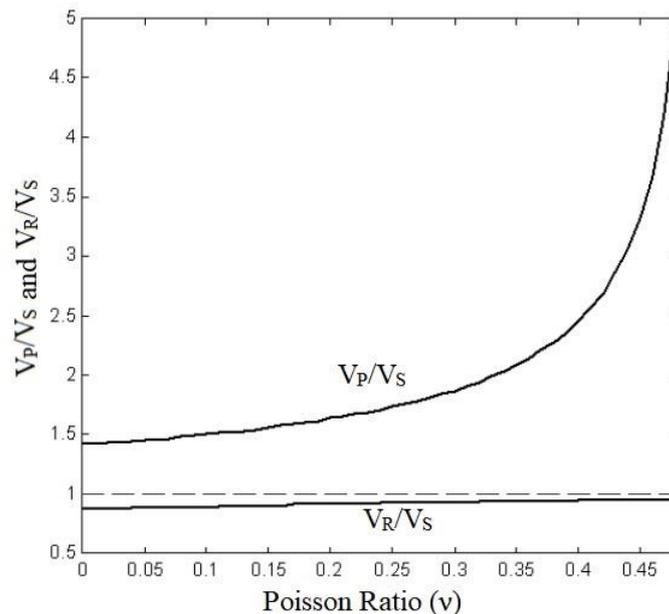


**Figura 12** - Espectro de amplitude de um ensaio sísmico no qual foram utilizados 96 geofones de componente vertical de 4,5Hz dispostos linearmente e espaçados de 1,5m. Como fonte foi utilizado um compactador de solo que permaneceu em atividade durante 60s, a 5m do geofone 1 e, portanto, a 147,5m do geofone 96. A escala de cores representa o número de cada geofone. A letra (a) apresenta o espectro de amplitude como um todo e a letra (b) um zoom em uma banda de amplitude menor.

### 3.2.5 ONDAS RAYLEIGH

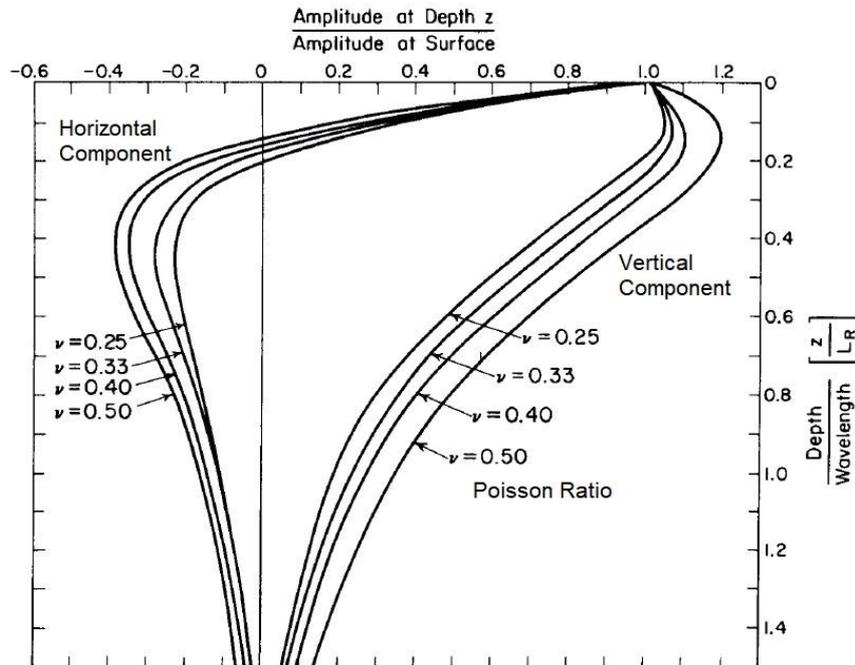
As ondas Rayleigh, assim denominadas em homenagem ao físico John William Strutt (Lord Rayleigh) (1842 – 1919), resultam da interação das ondas P (compressivas) com as ondas  $S_V$  (cisalhantes com polarização vertical). Na sua passagem as partículas se deslocam em um movimento elíptico retrógrado restrito ao plano vertical que contém a direção de propagação (Figura 6). A sua velocidade de propagação depende essencialmente da velocidade da onda  $S_V$ , independentemente do coeficiente de Poisson, como pode ser notado na Figura 13 (RICHART, WOOD e HALL, 1970). Para o seu registro são necessários apenas sensores com componente vertical, podendo, no entanto, o registro ser efetuado também através da componente radial. Para um semiespaço homogêneo a velocidade de propagação da onda Rayleigh é de aproximadamente 90% da velocidade da onda S ( $V_R \approx 0,9V_S$ ).

Uma das grandes vantagens na utilização das ondas Rayleigh deve-se ao fato de estarem sempre presentes no registro sísmico, sejam geradas por fontes ativas ou passivas, e de serem os eventos dominantes no registro. Para um semiespaço homogêneo, por exemplo, as ondas Rayleigh transportam 2/3 do total da energia gerada por fontes superficiais (RICHART, WOOD e HALL, 1970; LAY e WALLACE, 1995).



**Figura 13** - Relação entre as razões de velocidades de ondas sísmicas em função do coeficiente de Poisson para um semiespaço homogêneo (adaptado de Richart, Wood e Hall (1970)).

A amplitude da onda Rayleigh decai exponencialmente com a profundidade (Figura 14) e, por isso, sua propagação é afetada somente pelas características do meio até aproximadamente um comprimento de onda.



**Figura 14** - Comportamento da amplitude normalizada em função da profundidade normalizada da onda Rayleigh (adaptado de Richart, Wood e Hall (1970)).

### 3.2.6 ONDAS LOVE

As ondas Love, assim denominadas em homenagem ao matemático Augustus Edward Hough Love (1863 – 1940), se originam das ondas S polarizadas horizontalmente ( $S_H$ ). Na sua passagem as partículas se deslocam em um movimento no plano horizontal perpendicular à direção de propagação das ondas (Figura 6). Para o seu registro são necessários sensores com componente transversal (normalmente são utilizados sensores triaxiais). A velocidade de propagação das ondas Love é dependente apenas da velocidade de propagação das ondas S sendo, no entanto, sua velocidade menor do que a das ondas P e S, mas maior do que das ondas Rayleigh. Ondas Love não existem em meios homogêneos e só existem em determinadas condições em meios heterogêneos. É necessário que a velocidade de propagação seja crescente com a profundidade. Martin, Young e Salomone, 2014 identificaram alguns tipos de estratigrafias que podem ser mais facilmente caracterizadas usando ondas Love. São elas: locais com aumento abrupto de

velocidade em pequenas profundidades, locais com alto gradiente em relação ao aumento de velocidade e locais com camada de baixa velocidade sobreposta a camada mais rígida.

O campo de ondas Love é menos propenso à existência de modos superiores do que o de ondas Rayleigh e a superposição modal torna-se um problema menor (XIA *et al.*, 2012). Tal fato é também útil para que em inversões conjuntas o modo fundamental da onda Love ajude na correta identificação do modo fundamental da onda Rayleigh, considerando o meio analisado como sendo isotrópico.

Além disso, a implementação computacional para análise de ondas Love é mais simples que para as ondas Rayleigh (XIA *et al.*, 2012), com menor grau de não-singularidade e inversão mais estável. No entanto, é mais comum o emprego da análise de ondas Rayleigh por motivos como: necessidade do emprego de sensores com componente transversal para o registro das ondas Love (sensores mais caros) e de fontes que gerem movimento cisalhante transversal (FOTI *et al.*, 2017). Na literatura a quantidade de trabalhos sobre a análise multicanal de ondas Love é bem menor que a dos trabalhos que se baseiam na análise de ondas Rayleigh, sendo o trabalho de (MARI, 1984) um dos mais antigos que trataram da caracterização rasa com o emprego das ondas Love.

A amplitude da onda Love, da mesma forma como ocorre para a onda Rayleigh, decai exponencialmente com a profundidade sendo sua propagação afetada por uma zona com profundidade de aproximadamente um comprimento de onda. No entanto, a profundidade de penetração da onda Rayleigh em relação ao da onda Love é cerca de 33% maior para uma mesma frequência (ou comprimento de onda) (YIN *et al.*, 2014).

### 3.3 COEFICIENTE (MÓDULO OU RAZÃO) DE POISSON

Considere um cilindro de comprimento  $l$  e seção transversal  $A$ . Se esse cilindro for estirado gerando um incremento  $\Delta l$  no seu comprimento ocorrerá uma redução  $\Delta D$  em relação ao valor inicial do diâmetro  $D$ . A razão de deformação transversal pela razão de deformação longitudinal é denominada coeficiente de Poisson e pode ser escrita como

$$\nu = \frac{\Delta D/D}{\Delta l/l} \quad (4)$$

Podemos ainda escrever o coeficiente de Poisson baseado nos valores das velocidades da onda P ( $V_P$ ) e onda S ( $V_S$ ) conforme a equação

$$\nu = \frac{V_P^2/V_S^2 - 2}{2 \cdot V_P^2/V_S^2 - 1} \quad (5)$$

e efetuando um simples rearranjo na equação (5) tem-se que a razão  $V_P/V_S$  pode ser determinada apenas pelo coeficiente de Poisson, conforme a equação

$$V_P/V_S = \left[ \frac{2(1 - \nu)}{1 - 2\nu} \right]^{1/2} \quad (6)$$

Diferentes materiais possuem diferentes coeficientes de Poisson. A [Tabela 1](#) traz valores esperados da razão de Poisson, velocidades sísmicas e densidade de alguns materiais geológicos.

**Tabela 1** - Valores esperados da razão de Poisson, densidade e velocidades sísmicas para solos e rochas. Os valores em preto foram obtidos em [Foti et al., \(2017\)](#) e os valores em azul foram calculados com base nos extremos da razão de Poisson e velocidade de onda S através da equação (6).

Material Geológico	Razão de Poisson ( $\nu$ )	Velocidade de onda P ( $V_P$ ) [m/s]	Velocidade de onda S ( $V_S$ ) [m/s]	Densidade ( $\mu$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]
Solo insaturado	0,15 - 0,35	-	-	1200 - 1800
Solo saturado	0,47 - 0,49	-	-	1500 - 2100
Argila mole	-	130 - 1400	80 - 200	-
Argila dura	-	320 - 4300	200 - 600	-
Areia pouco compacta	-	130 - 1800	80 - 250	-
Areia compacta	-	320 - 3500	200 - 500	-
Rocha alterada	0,2 - 0,25	980 - 1800	600 - 1000	2100 - 2800
Rocha competente	0,2 - 0,25	2000 - 4500	1200 - 2500	2100 - 2800

A velocidade de propagação das ondas P em meio saturado tende sempre a valores maiores ou iguais ao da velocidade de propagação na água, que é de 1450m/s.

### 3.4 ANÁLISE MULTICANAL DE ONDAS DE SUPERFÍCIE - MASW

A análise do comportamento dispersivo (seção 3.2.2) das ondas de superfície (Rayleigh e Love) permite caracterizar a subsuperfície da área de estudo através de modelos de velocidades com a inversão das curvas de dispersão. O conhecimento da velocidade de propagação das ondas P e S tem diversas utilidades para diferentes áreas de estudo e aplicação. A profundidade do topo do embasamento (rocha sã), por exemplo, é uma questão importante para diferentes propósitos e um perfil de velocidade, de ondas P ou S, pode responder a essa questão. Para a obtenção dos valores dos módulos de elasticidade dinâmicos em projetos de fundações, como o módulo de Young dinâmico ( $E_{din}$ ) e o módulo de cisalhamento dinâmico ( $G_{din}$ ) (Apêndice A), também são utilizadas as velocidades de propagação das ondas P e S. Ainda no campo da engenharia geotécnica, existe uma forte relação entre o valor NSPT (número de golpes em sondagens SPT – *Standard Penetration Test*) (Apêndice B) com a velocidade de propagação de ondas S, existindo inclusive fórmulas empíricas para conversões de valores NSPT para  $V_S$  (Apêndice C) (FATEHNIA, HAYDEN e LANDSCHOOT, 2015). Normas de projetos e construção de estruturas para a resistência aos sismos, como o EC8 (*Eurocode 8*) e o IBC (*International Building Code*), utilizam o parâmetro  $V_{S,30}$  (Apêndice D) que fornece a velocidade média de propagação das ondas de cisalhamento nos primeiros 30m de profundidade, calculado a partir de um perfil de  $V_S$ .

No início dos anos 80 Nazarian, Stokoe e Hudson (1983) e Nazarian e Stokoe (1984) introduziram o método Análise Espectral de Ondas de Superfície - SASW (*Spectral Analysis of Surface Waves*). No método SASW se utilizam fontes superficiais e dois sensores para o registro dos dados. Vários tiros com diferentes aberturas entre os sensores são efetuados para que diferentes comprimentos de ondas possam ser registrados. No entanto, foi com o desenvolvimento do método Análise Multicanal de Ondas de Superfície - MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) pelo Serviço Geológico de Kansas - KGS (*Kansas Geological Survey*) (PARK, MILLER e XIA, 1996, 1998, 1999; XIA, MILLER e PARK, 1999) que a análise das ondas de superfície passou a ser mais empregada na geofísica rasa uma vez que essa nova abordagem trouxe melhorias significativas em termos de processamento e interpretação dos dados, tornando o método mais prático e de mais rápida execução.

Inicialmente o método MASW tinha como foco a análise das ondas Rayleigh geradas por fontes ativas (impacto vertical e Vibroseis) e registradas através de um arranjo

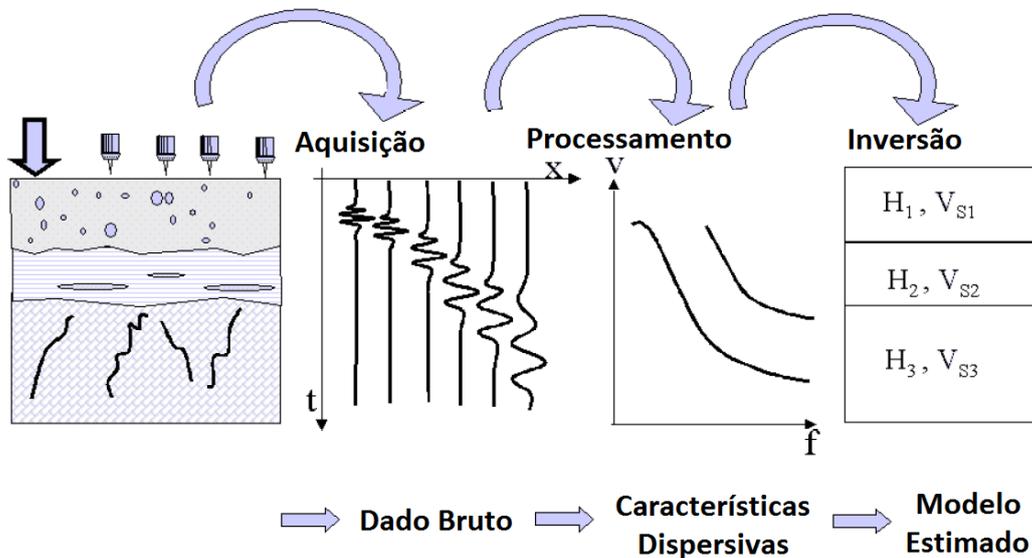
linear de sensores de componente vertical. Pouco tempo depois, aquisições com fontes passivas (ruído ambiental) que, no entanto, exigem arranjos em duas dimensões, também foram propostas e despertaram interesse por trazerem informações de profundidades maiores através do registro de frequências mais baixas (PARK *et al.*, 2004). Para as situações de espaço físico restrito, que impedem o emprego de arranjo em duas dimensões, foi proposta a técnica *Roadside Passive MASW* por Park e Miller (2006, 2008). Em paralelo, a composição das curvas de dispersão obtidas de ensaios com fontes ativas e passivas em uma única curva também passaram a ser empregadas. Nessa composição junta-se características distintas e importantes das duas aquisições: ativa para frequências mais altas (caracterização dos primeiros metros em subsuperfície) e passiva para frequências mais baixas (caracterização mais profunda) (PARK *et al.*, 2005; PARK *et al.*, 2007).

A análise das ondas Love vem ganhando espaço nos últimos anos (XIA *et al.*, 2012), mas não há muitas publicações a respeito, provavelmente devido a sua maior dificuldade de execução, pois necessita de sensores com componente horizontal, que geralmente são mais caros, e fontes que gerem movimento cisalhante transversal (FOTI *et al.*, 2017).

Portanto, através do método MASW pode ser feita a análise do comportamento dispersivo tanto das ondas Rayleigh como das ondas Love. As ondas Rayleigh são registradas tanto pela componente vertical (mais comum) como pela componente radial dos sensores, enquanto as ondas Love são registradas apenas pela componente transversal. Para aquisições com fontes ativas é necessário apenas um arranjo linear de sensores, enquanto para fontes passivas é necessário um arranjo com duas dimensões, fazendo-se exceção ao *Roadside Passive MASW*.

Independentemente das ondas analisadas, fontes ou arranjos de campo empregados, o método MASW possui as seguintes etapas básicas: aquisição, processamento e inversão (Figura 15). Na etapa de aquisição, fontes geram as ondas sísmicas que são registradas pelo arranjo de sensores (geofones) obtendo-se ao final um sismograma. Na etapa de processamento, interpreta-se ao final as curvas de dispersão, dito no plural pois diferentes ondas possuem diferentes curvas de diversos modos. Na etapa de inversão cada curva de dispersão, ou então, todas as curvas em conjunto, são invertidas para que se obtenham perfis de velocidades - gráficos de profundidade em função da velocidade - que caracterizam a subsuperfície da área de estudo segundo a velocidade de propagação das ondas P e/ou S. O perfil de ondas P é bastante dependente

do perfil de ondas S e, assim, opta-se muitas vezes em se analisar apenas o perfil de ondas S.



**Figura 15** - Esquema das etapas do método MASW onde  $H_i$  e  $V_{Si}$ , para  $i$  natural, são respectivamente a espessura e a velocidade de onda S para cada camada  $i$  (adaptado de [Strobbia \(2003\)](#)).

### 3.4.1 AQUISIÇÃO

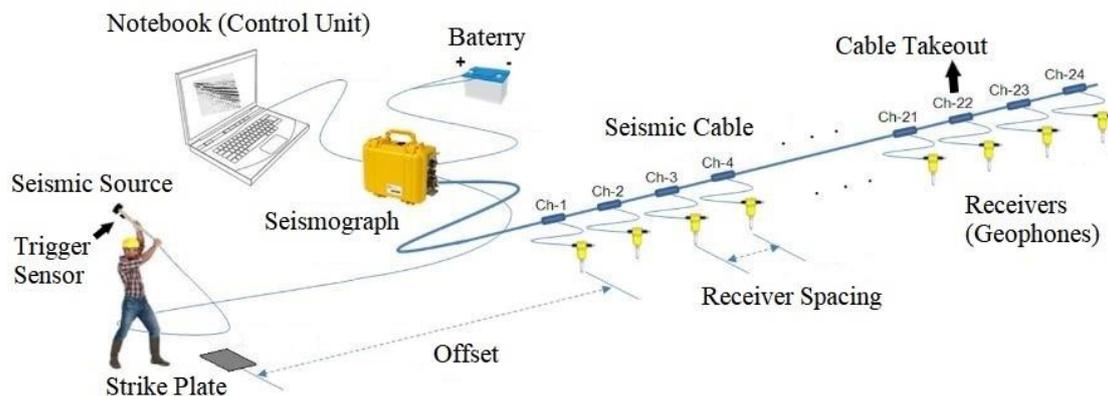
A etapa de aquisição consiste no registro da passagem das ondas de superfície, geradas por fontes ativas ou passivas, através de um arranjo de geofones. Várias questões devem ser observadas sendo algumas gerais e outras específicas para cada técnica utilizada: MASW com fonte ativa (A-MASW), MASW com fonte passiva (P-MASW) e *Roadside Passive MASW* (RP-MASW).

#### 3.4.1.1 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos utilizados em aquisições MASW consistem basicamente em ([Figura 16](#)):

- Unidade de controle (notebook);
- Sismógrafo;
- Bateria;
- Sensores sísmicos (geofones);

- Fonte sísmica;
- Base de impacto (somente para alguns tipos de aquisições ativas);
- Sensor de gatilho (*trigger sensor*) (somente para alguns tipos de aquisições ativas);
- Cabos de energia, cabos sísmicos, de sensor de gatilho e de rede.



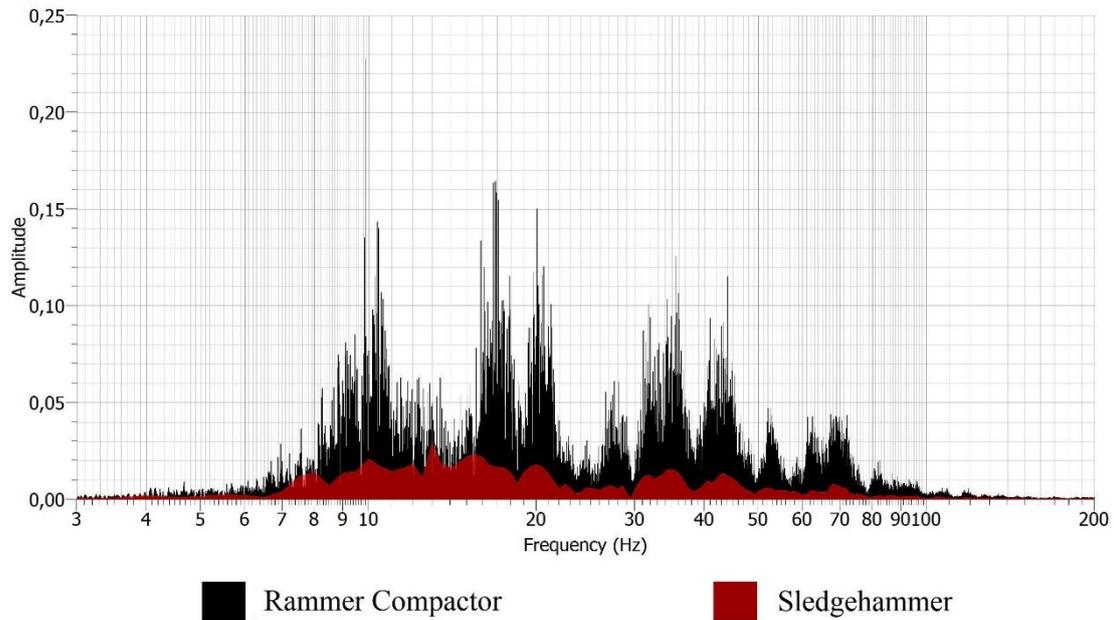
**Figura 16** - Equipamentos utilizados em aquisições MASW. Nessa figura está exemplificado um arranjo sísmico linear com a utilização de uma marreta como fonte ativa (adaptado de [Multichannel Analysis of Surface Waves \(MASW\) \(2018\)](#)).

A unidade de controle, que nada mais é que um notebook com um software de aquisição, é ligada por meio de um cabo de rede ao sismógrafo, sendo ambos alimentados por uma bateria de 12V. O sismógrafo ([Figura 17](#)) recebe o sinal sísmico analógico dos geofones, o transforma em sinal digital e o envia à unidade de controle. Existem sismógrafos com diferentes quantidades de canais sendo cada canal ligado a uma componente (vertical, transversal ou radial) do geofone por meio de um cabo sísmico. Detalhes sobre os geofones são discutidos na seção [3.4.1.1.1](#). Na manipulação do cabo sísmico em campo não é raro que os terminais de contato fiquem impregnados com partículas de solo ou sedimento. É necessário que sejam limpos antes de serem efetuadas as conexões, pois terminais sujos podem gerar ruído ou inviabilizar a transmissão do sinal elétrico. Vários sismógrafos podem ser ligados em série, aumentando assim o número de canais de registros, se necessário.



**Figura 17** - Sismógrafo Geometrics Geode de 24 canais.

Para geração do sinal é utilizada uma fonte sísmica do tipo ativa (marreta, compactador de solo, queda de peso, rifle sísmico, explosivo, Vibroseis, entre outras) ou passiva (ruído ambiental ou passagem de veículos (a última para o *Roadside Passive MASW*)). O ruído ambiental pode ter diferentes origens como fenômenos naturais (ondas oceânicas, vento, microssismicidade) e/ou atividades humanas, essas denominadas genericamente de ruído ambiental urbano (DÍAZ *et al.*, 2017). Qualquer que seja a aquisição MASW é importante que a fonte gere o tipo de onda (Rayleigh ou Love) com a energia na banda de frequência que atenda aos objetivos da pesquisa. A energia por banda de frequência gerada por uma determinada fonte não é muito dependente das condições do ensaio ou do meio, por isso, é denominada de assinatura da fonte. A Figura 18 mostra um espectro de amplitude da componente vertical de um geofone triaxial de 10Hz (onda Rayleigh) na qual é possível se comparar a energia por banda de frequência de duas aquisições: com um compactador de solo e com uma marreta, ambas com *offset* mínimo de 35m (Figura 19).

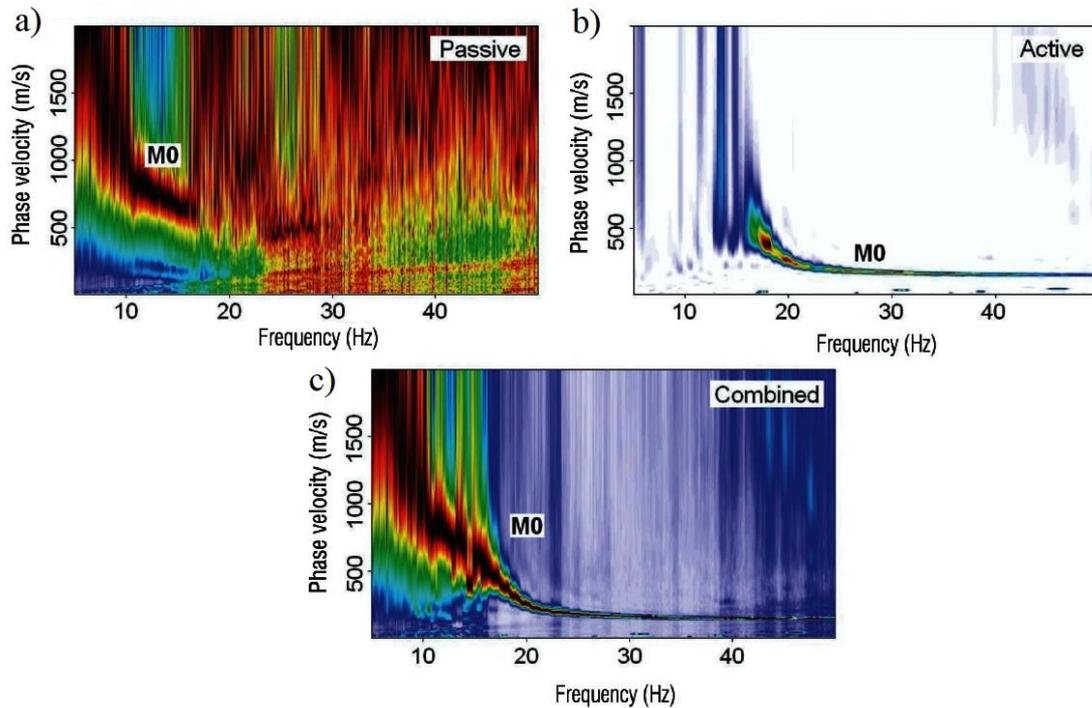


**Figura 18** - Espectros de amplitude da componente vertical de um geofone triaxial de 10Hz de duas aquisições: com emprego de compactador de solo (em preto) e com emprego de marreta (em marrom), ambas com offset mínimo de 35m.



**Figura 19** - Fontes sísmicas: marreta (**esquerda**) e compactador de solo (**direita**).

Muitas vezes, no entanto, é difícil que uma única fonte atenda a todos os objetivos e torna-se necessário trabalhar com mais de uma fonte. Fontes ativas podem gerar ondas com frequências na banda de 2-200Hz (FOTI *et al.*, 2011) e fontes passivas desde frequências extremamente baixas como 0,005Hz até 30Hz. Para o registro das frequências mais baixas é necessário um tempo grande de aquisição e sensores de banda larga, algo não usual para aplicações rasas com o método MASW. No entanto, frequências a partir de aproximadamente 1,5Hz podem ser registradas com geofones de 4,5Hz de frequência natural. A [Figura 20](#) ilustra um caso de uso combinado de fontes (ativa e passiva).



**Figura 20** - Espectros  $(V, f)$  de aquisições com fonte passiva (a) e ativa (b) para o uso combinado (c). Nas imagens, M0 se refere a curva de dispersão do modo fundamental (adaptado de [Park et al. \(2007\)](#)).

Para as fontes ativas, como a marreta, é normalmente necessário que se tenha acoplado juntamente com a fonte um sensor de gatilho (*trigger*). A função desse sensor é ativar o sismógrafo para gravação no exato instante da geração da onda (impacto da marreta).

As fontes de impacto necessitam de uma base metálica acoplada à superfície (Figura 21) do terreno para que a energia do impacto seja transformada preponderantemente em deformação elástica (reversível) e não plástica (irreversível) no local do impacto. Por isso, a área da base de impacto deverá ser suficientemente grande para distribuir a força no local gerando uma menor pressão. Fontes como o compactador de solo, por exemplo, já possuem a sua própria base de impacto.

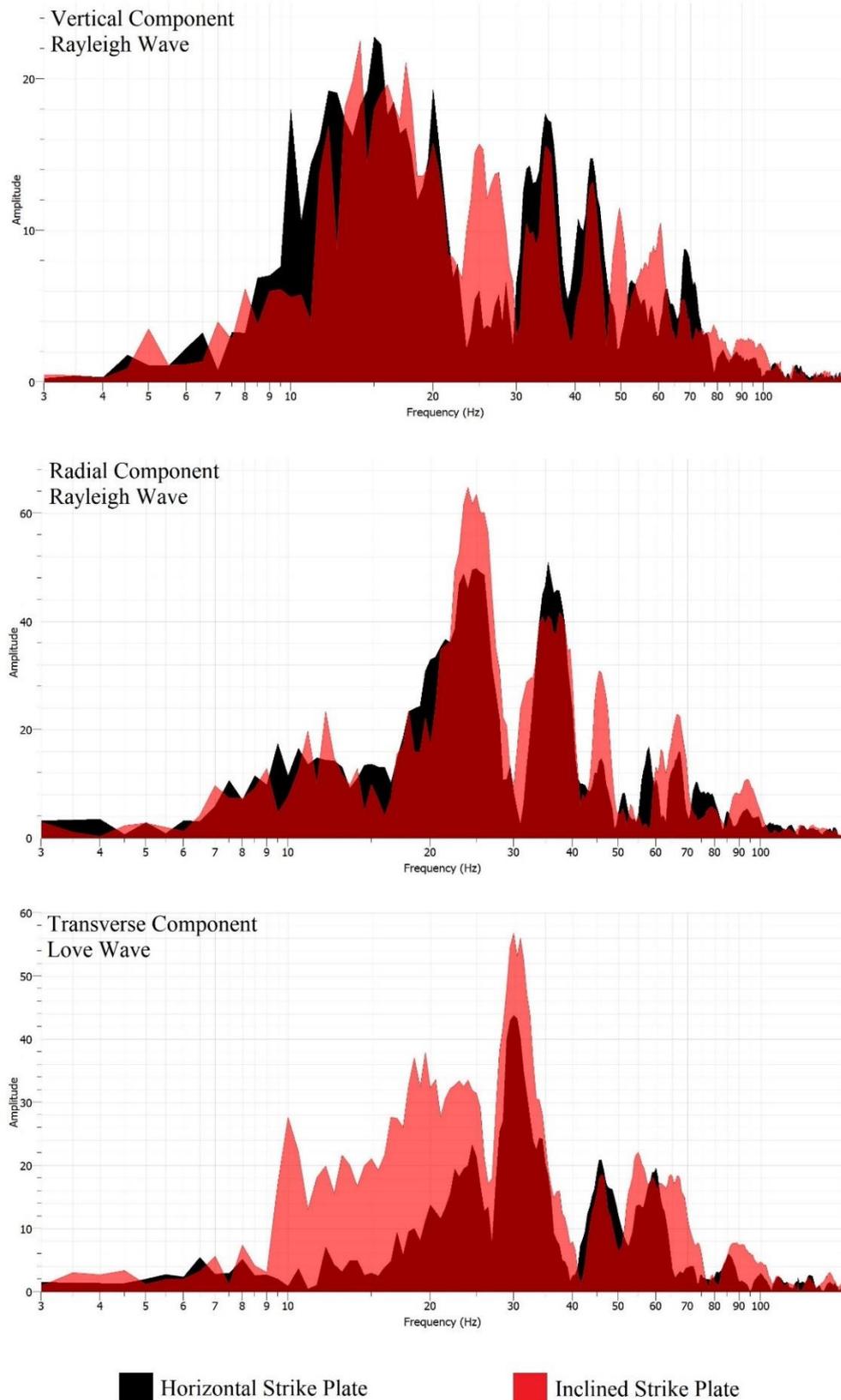


**Figura 21** - Base de impacto para a fonte marreta em posição horizontal.

Quando o objetivo da pesquisa é a análise de ondas Love, devem ser adotados procedimentos no sentido de privilegiar a sua geração. Utilizando-se a fonte marreta torna-se necessário mudar a configuração do impacto sobre o solo. Um procedimento como fazer um pequeno buraco em forma de cunha e colocar a base de impacto no plano inclinado (Figura 22) torna possível que o impacto da marreta sobre a base gere no solo tanto um movimento vertical como horizontal. A Figura 23 mostra a energia associada a cada componente de um geofone triaxial de 10Hz originada de tiros efetuados com a fonte marreta sobre a base de impacto na posição horizontal (Figura 21) e na posição inclinada (Figura 22). Cada registro, que gerou os espectros da Figura 23, resultou de um empilhamento de 5 tiros com *offset* mínimo de 35m.



**Figura 22** - Base de impacto em posição inclinada para geração de ondas Love, além de ondas Rayleigh.



**Figura 23** - Espectros de amplitude comparativos entre as energias em cada componente de um geofone triaxial de 10Hz para tiros efetuados com uma marreta sobre a base de impacto na posição horizontal (preto) (Figura 21) e na posição inclinada (vermelho) (Figura 22). Cada aquisição resulta de um empilhamento de 5 tiros com *offset* mínimo de 35m. O espectro vermelho possui transparência de 40% para que seja possível a visualização do espectro preto que se encontra atrás do espectro vermelho.

### 3.4.1.1 SENSORES SÍSMICOS (GEOFONES)

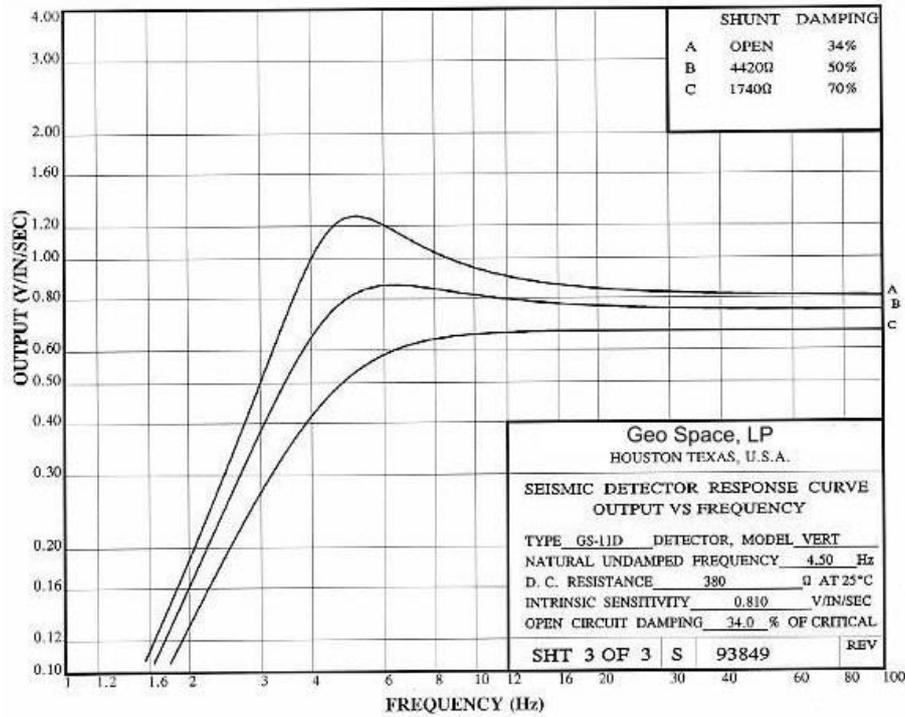
Os sensores sísmicos são equipamentos utilizados para captar as oscilações de um meio e convertê-las em sinais elétricos. Os utilizados em terra são denominados geofones e os utilizados na superfície de um meio aquático de hidrofones, sendo que neste trabalho serão abordados apenas os geofones. O movimento das partículas no solo se dá em 3 dimensões podendo, então, ser decomposto em três eixos: vertical, transversal (horizontal perpendicular à propagação) e radial (horizontal paralelo à propagação). O tipo de geofone mais utilizado é aquele capaz de registrar somente a componente vertical, mas existem geofones triaxiais que registram cada uma das três componentes separadamente (Figura 24).



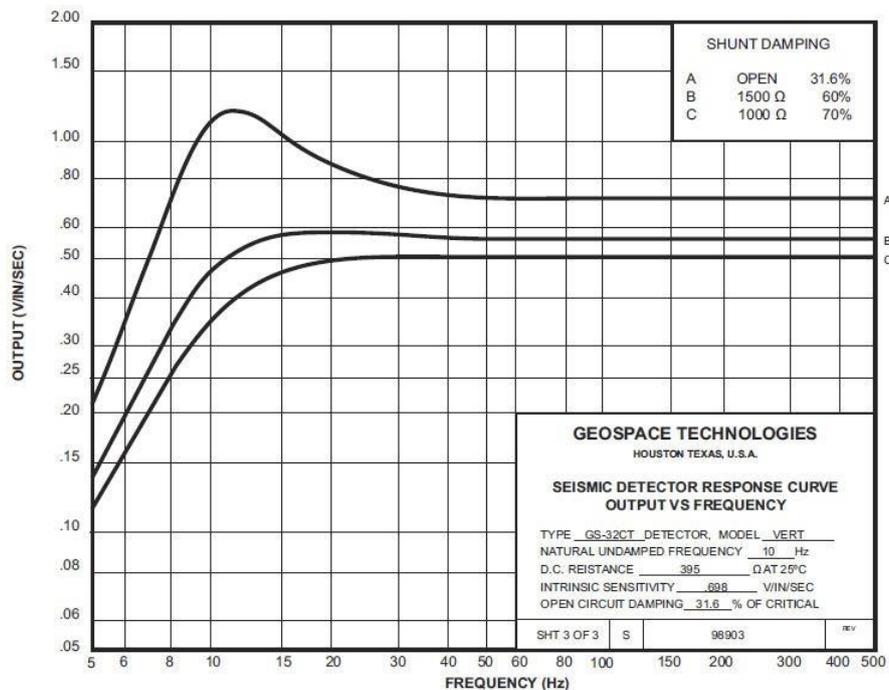
**Figura 24** - Geofones. Geofone de componente vertical (**esquerda**) e geofone triaxial (**direita**).

Uma característica importante de um geofone é a sua frequência natural (ou de ressonância). Abaixo da frequência natural o geofone perde exponencialmente a sensibilidade de captar as oscilações do meio. Acima, também há uma pequena perda de sensibilidade que, no entanto, se estabiliza em um valor ainda alto que vai até frequências bem mais elevadas em relação à sua frequência natural. É importante, portanto, planejar adequadamente quais geofones utilizar em um ensaio MASW, tanto em relação a quais componentes deseja-se registrar bem como a banda de frequência importante para o estudo. A Figura 25 e a Figura 26 mostram, respectivamente, as curvas características dos

elementos sensores dos geofones GS-11D de frequência natural 4,5Hz e GS-32CT de 10Hz, ambos da marca Geospace.

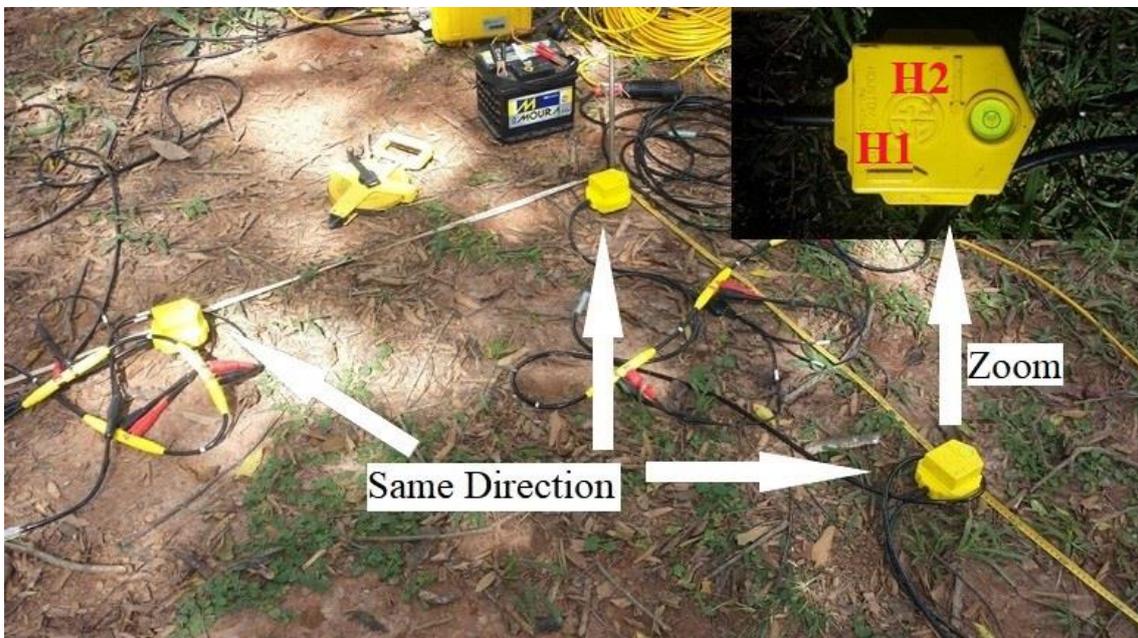


**Figura 25** - Curva característica do geofone GS-11D da marca Geospace de frequência natural de 4,5Hz (Geospace Technologies, 1980).



**Figura 26** - Curva característica do geofone GS-32CT da marca Geospace de frequência natural de 10Hz (Geospace Technologies, 1980).

Na montagem do arranjo de campo é necessário que os geofones estejam bem acoplados ao solo em posição vertical. Os geofones triaxiais possuem uma bolha de nível para facilitar o nivelamento uma vez que é importante que as bobinas horizontais estejam bem niveladas. Um cuidado importante que deve existir com os geofones triaxiais é que todos devem ter a mesma orientação no campo. Além disso, se a aquisição for com fonte ativa uma das componentes horizontais deverá estar perpendicular em relação à direção de propagação da onda e a outra, por consequência, paralela (Figura 27). O mesmo cuidado deve ser tomado nas conexões, pois cada geofone triaxial possui um cabo específico para cada componente.



**Figura 27** - Arranjo sísmico em L com todos os geofones posicionados verticalmente com mesmas direções e sentidos.

### 3.4.1.2 GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO - RESOLUÇÃO VERTICAL E PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO

Ao se planejar o arranjo de campo buscamos responder às seguintes questões:

- Qual espaçamento entre geofones deverá ser utilizado?
- Quantos geofones devem ser utilizados?
- Qual deverá ser a geometria do arranjo?

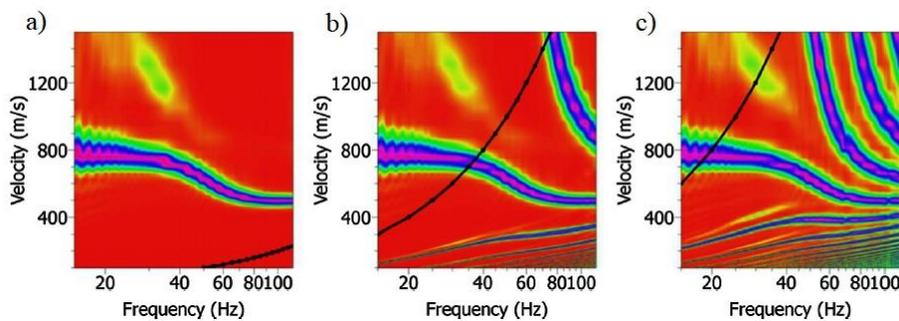
Em um mesmo arranjo diferentes aberturas entre geofones consecutivos podem ser adotadas (Figura 31). No planejamento deve-se ter em conta o espaçamento mínimo entre geofones ( $\Delta x_{\min}$ ) e o comprimento do arranjo sísmico ( $L$ ). Em arranjos bidimensionais  $L$  é a maior distância existente entre dois geofones. Diferentes aberturas entre geofones são utilizadas quando para um dado número de geofones disponíveis é desejável que se obtenha um registro com uma banda de frequência maior (FOTI *et al.*, 2017). De forma geral podemos dizer que

$$\Delta x_{\min} \approx \frac{\lambda_{\min}}{2} = \frac{V_{\min}}{2f_{\max}} \quad (7)$$

e

$$L \approx \lambda_{\max} = \frac{V_{\max}}{f_{\min}} \quad (8)$$

onde  $\lambda_{\min}$  é o mínimo comprimento de onda registrado,  $\lambda_{\max}$  o máximo,  $V_{\min}$  a mínima velocidade de fase vinculada à máxima frequência  $f_{\max}$  e,  $V_{\max}$  e  $f_{\min}$ , o equivalente inverso (PARK, MILLER e XIA, 1999; FOTI *et al.*, 2017). Comprimentos de onda menores que  $2 \cdot \Delta x_{\min}$  sofrem falseamento espacial dificultando a identificação de curvas de dispersão nas altas frequências (Figura 28). O máximo e o mínimo comprimento de onda registrados não dependem somente do arranjo sísmico, mas também da fonte geradora e das condições geológicas do meio. É necessário, no entanto, que o arranjo de campo seja adequado para o eventual registro dos comprimentos de onda desejáveis.



**Figura 28** - Influência do espaçamento mínimo entre geofones no falseamento espacial. As figuras foram obtidas através de experimentos numéricos sendo em (a) utilizado um espaçamento constante entre geofones de 1m com 190 geofones, em (b) 10m com 19 geofones e em (c) 20m com 10 geofones. A curva preta indica o limite inferior de comprimento de onda para o qual não ocorre falseamento espacial (FOTI *et al.*, 2017).

Na fase de planejamento do arranjo devem ser consideradas a resolução vertical e profundidade de investigação ( $z_{m\acute{a}x}$ ) desejadas, de acordo com os objetivos da investigação. A resolução vertical é inversamente proporcional ao menor valor de espessura esperado para as camadas geológicas ( $Esp_{m\acute{i}n}$ ).  $\Delta x_{m\acute{i}n}$  e  $L$  podem ser estimados através das equações empíricas a seguir.

$$Esp_{m\acute{i}n} \geq \Delta x_{m\acute{i}n} \quad (9)$$

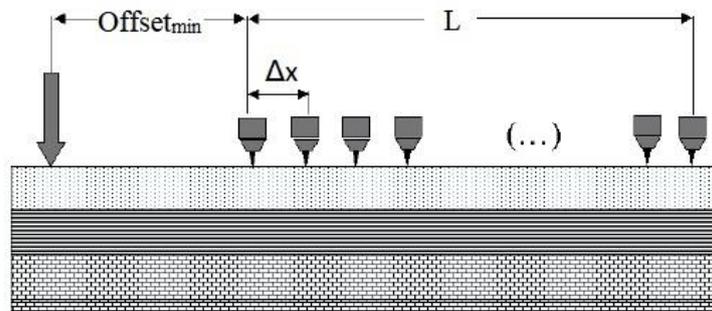
e

$$z_{m\acute{a}x} \leq \frac{L}{2} \quad (10)$$

Não havendo limitações quanto ao número disponível de canais de registro e sensores, o número de geofones será definido com base em  $\Delta x_{m\acute{i}n}$  e  $L$ . Uma maior quantidade de geofones leva a uma melhor resolução das curvas de dispersão no espectro ( $V, f$ ). Normalmente são utilizados 12, 24, 48 ou 96 geofones. A geometria de aquisição é particular para cada técnica e será abordada nas seções que seguem.

#### 3.4.1.2.1 MASW COM FONTE ATIVA (A-MASW)

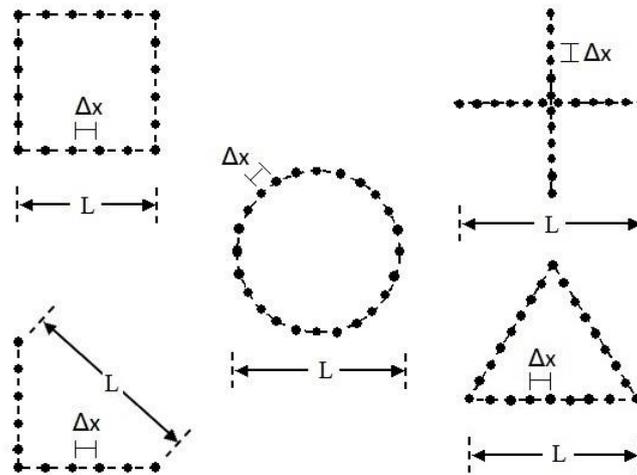
A geometria de aquisição do A-MASW é normalmente linear podendo o espaçamento entre geofones ser constante ou não. Os pontos de tiros são dispostos de forma colinear ao arranjo sísmico. A [Figura 29](#) apresenta um desenho de um arranjo linear com  $\Delta x$  constante entre geofones.



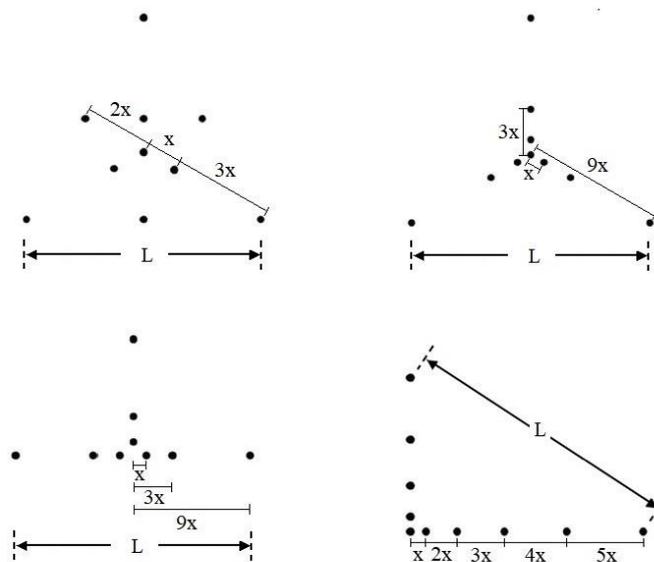
**Figura 29** - Arranjo linear de aquisições MASW com fontes ativas onde  $L$  e  $\Delta x$  são, respectivamente, o comprimento do arranjo e o espaçamento entre os geofones (adaptado de [Strobbia \(2003\)](#)).

### 3.4.1.2.2 MASW COM FONTE PASSIVA (P-MASW)

As aquisições com fontes passivas necessitam de arranjos em duas dimensões devido ao desconhecimento da localização da fonte. Através de um arranjo 2D torna-se possível a obtenção da direção de propagação da frente de onda em relação ao arranjo (seção 3.4.2.2). A [Figura 30](#) e a [Figura 31](#) mostram exemplos de algumas geometrias que podem ser adotadas. Na [Figura 30](#) o espaçamento entre geofones é constante e na [Figura 31](#) crescente.



**Figura 30** - Exemplos de geometrias para arranjos 2D com espaçamento entre geofones constante (adaptado de [Surfseis MASW Software \(2018\)](#)).



**Figura 31** - Exemplos de geometrias para arranjos 2D com espaçamento crescente entre geofones (adaptado de [\(FOTI et al., 2017\)](#)).

### 3.4.1.2.3 PASSIVE ROADSIDE MASW (RP-MASW)

Devido à impossibilidade de se utilizar em determinadas áreas um arranjo de campo em duas dimensões foi proposta por [Park e Miller \(2006, 2008\)](#) a técnica RP-MASW que utiliza um arranjo em uma dimensão para aquisições com fontes passivas. No entanto, a técnica foi desenvolvida para ser empregada em condições específicas. Um arranjo linear é utilizado paralelamente a uma rua, avenida, estrada ou equivalente, onde a passagem de um veículo, preferencialmente por alguma irregularidade da via, faz o papel da fonte passiva. Através dessa técnica usualmente tem-se como resultado final da inversão velocidades superestimadas, normalmente com erros menores que 10% ([PARK e MILLER, 2006](#)). O arranjo deve ser alocado paralelamente à rua, não havendo necessidade de estar muito próximo a ela ([Figura 32](#)).

O tempo de gravação deve ser de 10 a 30s e o veículo escolhido como fonte deve estar, durante o registro, o mais colinear possível em relação ao arranjo. Deve-se assegurar que o tempo de gravação seja suficiente para que todo o pacote de ondas passe pelo arranjo sísmico. O tempo mínimo de registro pode ser estimado com base na maior distância do veículo ao último geofone do arranjo e considerando uma velocidade mínima de fase da ordem de 100m/s. Para facilitar a aquisição de dados deve-se escolher dois pontos de referência na rua, sendo a gravação iniciada quando o veículo passar pelo primeiro ponto e interrompida ao passar pelo segundo.

A passagem do veículo sobre buracos, valetas ou quebra-molas (lombadas) durante a aquisição favorece a geração das ondas. Outros veículos ou pedestres não devem estar passando muito próximos ao local do arranjo de geofones no momento da gravação para se evitar o registro de frentes de ondas com azimutes diferentes. Por este motivo, longos tempos de registro são desaconselhados. Os dados de aquisições RP-MASW podem ser processados tanto como dados de ativa, através da técnica *f-k transform*, como de passiva, pela técnica *f-k beamforming* (seção [3.4.2.2.2](#)).



**Figura 32** - Exemplo de arranjo de campo para aquisições *Roadside Passive MASW*, onde  $\Delta x$  é o espaçamento entre geofones e  $L$  o comprimento do arranjo (Google Maps).

### 3.4.1.3 PARÂMETROS DE GRAVAÇÃO

A definição do intervalo de amostragem ( $\Delta t$ ) e do tempo de gravação ( $T$ ) é importante na programação da aquisição. O intervalo de amostragem está diretamente relacionado com a frequência de Nyquist  $f_n$  dada por

$$f_n = \frac{1}{2\Delta t} \quad (11)$$

A frequência de Nyquist é a maior frequência que pode ser amostrada corretamente com o  $\Delta t$  escolhido para se evitar falseamento (*aliasing*). Em aquisições MASW normalmente se utiliza um  $\Delta t$  de 0,5ms que implica em uma frequência de Nyquist de 1000Hz, ou seja, bem acima das frequências dos sinais de interesse na maioria das aquisições. Se, no entanto, o sinal de interesse possuir frequências maiores, o intervalo de amostragem deverá ser recalculado com base na equação (11).

O tempo de gravação  $T$  deverá ser escolhido de acordo com a técnica MASW utilizada: MASW com fonte ativa (A-MASW), MASW com fonte passiva (P-MASW) ou *Roadside Passive MASW* (RP-MASW). Para aquisições A-MASW o tempo  $T$  deverá ser longo o suficiente, normalmente 2s, para que todo o pacote de ondas de superfície passe pelo arranjo sísmico. Em campo, uma simples inspeção visual do sismograma permite avaliar se o tempo de gravação está adequado. Aquisições P-MASW exigem um

tempo de gravação mais longo, idealmente de minutos a horas (FOTI *et al.*, 2017) para o emprego do algoritmo de processamento implementado no *software* Geopsy (seção 3.4.2.2), utilizado neste estudo. Quanto maior for o tempo de gravação mais bem definidas ficarão as curvas de dispersão no espectro ( $V, f$ ), sendo a razão discutida na seção 3.4.2.2.2. Na técnica RP-MASW é utilizado um tempo de gravação que varia de 10 a 30s, considerando o exposto na seção 3.4.1.2.3.

#### 3.4.1.4 EMPILHAMENTO VERTICAL

Um procedimento comum adotado na etapa de aquisição é o denominado empilhamento vertical (*vertical stacking*) que tem como objetivo aumentar a razão sinal ruído (S/R) dos dados. Esse procedimento é aplicado somente com o emprego de fontes ativas que liberam toda a energia de uma só vez, como fontes de impacto e explosão. Diversos tiros são efetuados na mesma posição sem que haja alteração na geometria do arranjo. O sismograma final registrado é o resultante da soma de todos registros obtidos a cada impacto. Com este procedimento, chamado de empilhamento vertical, o sinal de interesse sofre interferência construtiva e o ruído, por ser aleatório, interferência destrutiva. Assim, o procedimento deve ser repetido até que se obtenha uma boa razão sinal ruído ou até que a mesma se estabilize. Normalmente o empilhamento é feito em campo e para isso é indispensável um sistema de gatilho (*trigger*) (seção 3.4.1.1) eficiente, podendo, no entanto, ser feito na etapa de processamento também.

#### 3.4.1.5 EFEITO DE CAMPO PRÓXIMO E REMOTO

Efeitos indesejáveis podem ocorrer no espectro de energia e/ou na definição da curva de dispersão. O primeiro efeito denomina-se efeito de campo próximo (*near field effect*) e ocorre devido à quebra da premissa de que a frente de onda registrada possa ser considerada plana. Tal efeito pode ser notado na curva de dispersão através da existência de velocidades menores nas baixas frequências. Para que o efeito não ocorra é necessário que a fonte esteja a uma distância mínima do primeiro geofone do arranjo (*offset* mínimo) (STROBBIA, 2003).

O outro efeito indesejado é o de campo remoto (*far field effect*) que ocorre pelo fato das altas frequências das ondas de superfície serem mais rapidamente atenuadas com a distância do que as ondas de corpo. Se um conjunto de geofones estiver localizado muito

distante da fonte, nas altas frequências do espectro o campo registrado será dominado pelas energias das ondas de corpo e não a das ondas de superfície. Esse fenômeno também é perceptível na curva de dispersão. Essa é a principal razão pela qual aquisições com fontes passivas são boas para o registro de ondas de superfície de frequências baixas, mas não altas.

Não existe um consenso na literatura sobre uma regra para a determinação de valores para o *offset* mínimo, com a finalidade de se evitar efeitos de campo próximo, e *offset* máximo, para efeitos de campo remoto. Ambos podem ser corrigidos na etapa de processamento através da remoção de traços sísmicos relativos aos geofones que estavam mais próximos ou distantes da fonte. No entanto, para que se tenha alguma orientação em termos de valores, sugere-se que o *offset* mínimo seja de três a cinco vezes o espaçamento entre geofones (FOTI *et al.*, 2017) e o *offset* máximo equivalente à profundidade de investigação almejada (seção 3.4.1.2).

#### 3.4.1.6 HETEROGENEIDADE LATERAL

A ausência de heterogeneidade lateral (horizontal) significativa é também uma premissa que deve ser satisfeita em cada aquisição com o método MASW. No entanto, se o arranjo de campo for deslocado um certo número de vezes (para que se obtenha uma seção de velocidades) e se em toda extensão do levantamento esta premissa não for válida, isso não constitui um problema necessariamente, pois as curvas de dispersão de diferentes trechos ou aquisições não serão invertidas em conjunto.

Independentemente do tipo de aquisição, seja com fontes passivas ou ativas, arranjo 1D ou 2D, para que seja verificada a validade dessa premissa é aconselhável o seguinte procedimento: para arranjos 1D, disparar uma fonte ativa em lados opostos do arranjo (FOTI *et al.*, 2017); para arranjos 2D, disparar tiros em diferentes direções. Deve-se, então, avaliar os espectros ( $V, f$ ) resultantes pelos seguintes critérios:

- Grau de similaridade entre eles, comparando-se os espectros obtidos por componentes iguais (vertical, radial ou transversal).
- Convergência das curvas de dispersão interpretadas/extraídas dos espectros, também se comparando curvas obtidas por componentes iguais (vertical, radial ou transversal).

Em relação ao primeiro critério, se os espectros forem semelhantes em uma determinada banda de frequência para uma dada componente analisada, a premissa é satisfeita para a componente e banda de frequência em questão. Se, no entanto, ainda restarem dúvidas, o segundo critério pode ser utilizado. Neste caso são avaliados comparativamente as interpretações feitas, ou seja, as curvas de dispersão extraídas. É possível que se obtenham curvas semelhantes mesmo que os espectros comparados não sejam, a rigor, tão parecidos. Como as inversões são feitas a partir das curvas de dispersão, e não dos espectros  $(V, f)$ , interpretações convergentes podem ser consideradas como uma validação da premissa. Um recurso indicado é a obtenção de curvas de dispersão médias das curvas obtidas pelos espectros comparados, cuja inversão pode levar a um modelo de velocidades mais unívoco.

#### **3.4.1.7 PARÂMETROS DE AQUISIÇÃO MASW (RESUMO)**

A [Tabela 2](#) apresenta uma compilação do exposto na seção [3.4.1](#) tendo como finalidade orientar de forma prática o planejamento dos parâmetros de aquisições de ensaios MASW. Na tabela estão reunidas principalmente informações de [Park, Miller e Xia, \(1999\)](#), [Strobbia \(2003\)](#) e [Foti \*et al.\* \(2017\)](#).

**Tabela 2** - Tabela de orientação para o planejamento dos parâmetros de aquisições de ensaios MASW. Essa tabela apresenta uma compilação de informações de [Park, Miller e Xia, \(1999\)](#), [Strobbia \(2003\)](#) e [Foti et al., \(2017\)](#).

Profundidade de investigação ( $z_{m\acute{a}x}$ ) [m] / Comprimento do arranjo ( $L$ ) [m]	Espessura mínima de camada ( $ESP_{min}$ ) [m] / Espaçamento entre geofones ( $\Delta x$ ) [m] (considerado constante)	Número de geofones ( $N_{geo}$ )	Frequência natural dos geofones ( $f_{nat}$ ) [Hz]	Offset mínimo ( $Offset_{min}$ ) [m]
--/--	--/--	--/--	--/--	--/--
Implicação - qualidade do espectro ( $V, f$ )	Implicação - falseamento espacial	Implicação - profundidade de investigação	Implicação - efeito de campo próximo e remoto	
$z_{m\acute{a}x} \leq \frac{L}{2}$	$ESP_{min} \geq \Delta x$	$N_{geo} \geq \frac{L}{2} + 1$	$z_{m\acute{a}x} \leq 1 \rightarrow f_{nat} = 4,5 \text{ a } 100$ $z_{m\acute{a}x} = 1 \text{ a } 5 \rightarrow f_{nat} = 4,5 \text{ a } 40$ $z_{m\acute{a}x} = 5 \text{ a } 20 \rightarrow f_{nat} \leq 10$ $z_{m\acute{a}x} = 20 \text{ a } 50 \rightarrow f_{nat} \leq 4,5$	3 a 5 vezes $\Delta x$  Recomenda-se testar diferentes $Offset_{min}$
Intervalo de amostragem ( $\Delta t$ ) [ms]	Tempo de gravação ( $T$ ) [s]	Empilhamento vertical (somente para aquisições com fontes ativas de impacto e explosão)		
--/--	--/--	--/--		
Implicação - frequência máxima (frequência de Nyquist ( $f_n$ ))	Implicação - registro do pacote de ondas	Implicação - razão sinal ruído (S/R)		
0,5 a 1,0	Ativa $\rightarrow 0,5 \text{ a } 3$ Passiva $\rightarrow$ minutos a horas Roadside Passive $\rightarrow 10 \text{ a } 30$	Pouco ruído   Médio ruído   Muito ruído		
$\Delta t = \frac{1}{2f_n}$		1 a 3   3 a 5   5 a 10		
<b>Recomenda-se avaliar a existência de heterogeneidade lateral na área de estudo através de tiros com fontes ativas em diferentes lados de arranjos lineares e diferentes direções em arranjos bidimensionais. A existência de heterogeneidade lateral significativa pode inviabilizar a utilização do método MASW.</b>				

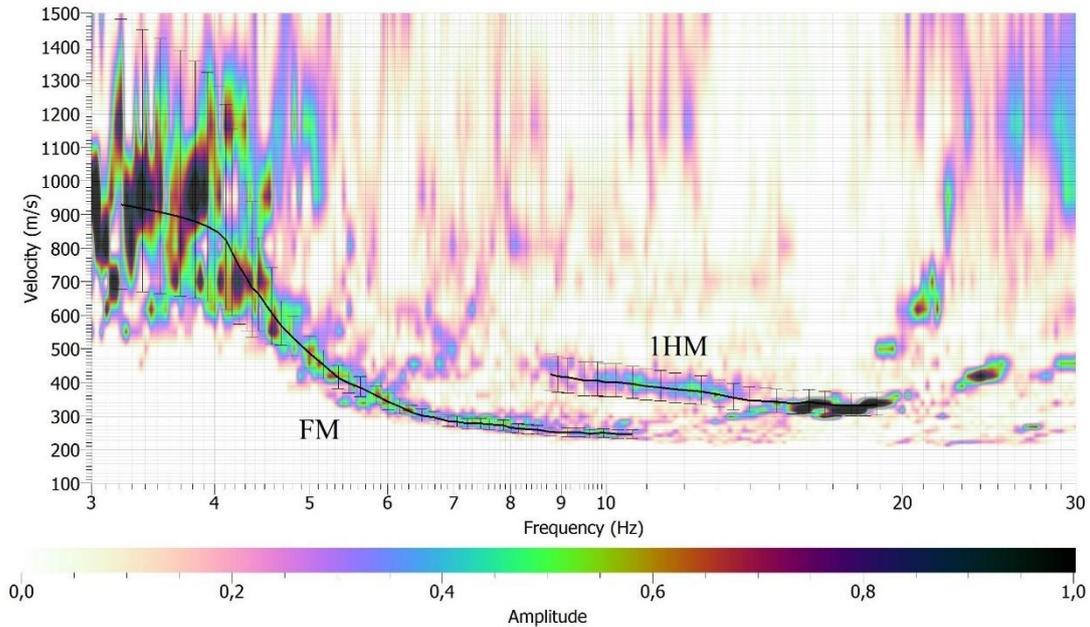
### 3.4.2 PROCESSAMENTO

O processamento visa à obtenção da curva de dispersão a partir do sismograma de campo. Neste trabalho foram utilizados os *softwares* livres Geopsy e Dinver ([GEOPSY PROJECT, 2005](#)) e, assim, o que será abordado em termos de processamento estará diretamente relacionado a esses *softwares*.

Com o objetivo de se obter as características dispersivas das ondas de superfície várias técnicas de processamento têm sido propostas. [Nolet e Panza \(1976\)](#) apresentaram a técnica *f-k transform* que se tornou a mais popular e base de outras. A *f-k transform* é a base de processamento do software Geopsy e, excetuando algumas particularidades, também do *software* Surfseis onde o algoritmo recebe o nome de *Overtone*. Detalhes sobre o *Overtone* podem ser encontrados em [Park, Miller e Xia \(1998\)](#).

O processamento dos dados ocorre de duas maneiras distintas, dependendo de como os dados foram adquiridos. Para dados obtidos com arranjos de campo 1D - onde normalmente são utilizadas fontes ativas e, portanto, se conhece sua localização - os dados são processados utilizando-se a técnica *f-k transform*. Para os dados obtidos com arranjos 2D - onde normalmente são utilizadas fontes passivas e não se conhece suas localizações - a técnica *f-k beamforming* é utilizada. Um caso no qual é possível se utilizar as duas técnicas é com o emprego do *Passive Roadside MASW* ([PARK e MILLER, 2006, 2008](#)).

Ao final da etapa de processamento o que se deseja é a obtenção de um espectro, mais especificamente no caso do *software* Geopsy, o espectro  $(V, f)$ , através do qual é possível se interpretar e extrair as curvas de dispersão de cada modo visível com base nos máximos de energia [Figura 33](#).



**Figura 33** - Exemplo de um espectro  $(V, f)$  com densidade de energia associada (*software* Geopsy).

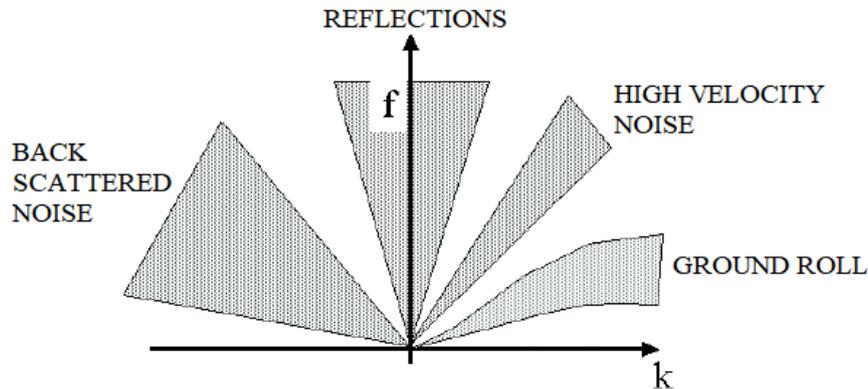
### 3.4.2.1 *F-K TRANSFORM*

A utilização mais comum da transformada de Fourier é para a transformação dos dados do domínio do tempo para o domínio da frequência. Essa é sem dúvida a base de todas as técnicas de análise de sinais. No entanto, o mesmo conceito pode ser estendido para a transformação do domínio do espaço para o domínio do número de onda. Quando ambos os processos ocorrem tem-se a dupla transformada de Fourier, ou transformada de Fourier bidimensional. A técnica *f-k transform* (NOLET e PANZA, 1976), na qual se baseia o algoritmo implementado no *software* Geopsy, utiliza uma transformada de Fourier bidimensional para que os dados sejam transformados do domínio distância - tempo  $(x, t)$  para o domínio frequência - número de onda  $(f, k)$ , conforme a equação

$$U(f, k) = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} u(x, t) e^{-i2\pi(ft-kx)} dx dt \quad (12)$$

onde  $u(x, t)$  é o conjunto de traços sísmicos,  $f$  frequência,  $k$  número de onda,  $x$  espaço e  $t$  tempo. Esta transformação permite separar e filtrar eventos com características diferentes que não se apresentam separadas no domínio  $(x, t)$ . Com a aplicação da transformada bidimensional tem-se uma imagem de densidade de energia em função da frequência e do número de onda, [Figura 34](#). Considerando que a amplitude do sinal decai

com o aumento da distância do sensor à fonte, geralmente é efetuada, ainda no domínio  $(x, t)$ , uma normalização do sinal obtido por cada sensor (FOTI *et al.*, 2017).



**Figura 34** - Esquema geral de eventos sísmicos no domínio  $(f, k)$  (adaptado de Strobbia (2003)).

Neste domínio as energias associadas às ondas de superfície são geralmente o principal evento observável. As propriedades dispersivas ficam evidenciadas e os diferentes modos de propagação se apresentam separadamente (FOTI, 2000). A partir da equação

$$V = \frac{2\pi f}{k} \quad (13)$$

os dados são, então, convertidos para o domínio velocidade de fase - frequência  $(V, f)$ , que também exhibe a densidade de energia associada a cada ponto  $(V, f)$ . São, então, interpretadas as curvas de dispersão.

### 3.4.2.2 F-K BEAMFORMING

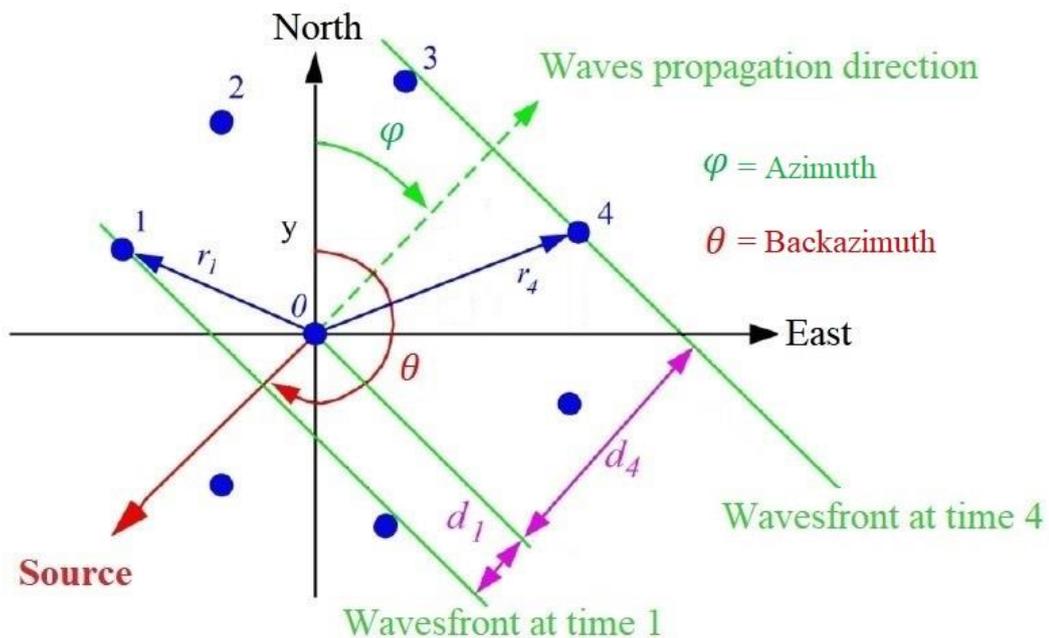
Um dos problemas inerentes à aplicação do método MASW com fonte passiva é o do desconhecimento da direção de propagação da frente de onda em relação ao arranjo sísmico. Se o arranjo for linear e a frente de onda não se propagar paralelamente em relação ao arranjo, as velocidades obtidas estarão superestimadas. Neste sentido, a técnica de processamento *f-k beamforming* (em tradução livre “formação de feixe”) é uma excelente ferramenta para a obtenção do *backazimuth* ( $\theta$ ) e *slowness* ( $S$ ) (lentidão) das ondas registradas e, com isso, da curva de dispersão, fazendo-se necessário, no entanto,

o emprego de um arranjo em duas dimensões (Bormann, 2012). Em determinadas condições, como no caso do *Passive Roadside MASW* (PARK e MILLER, 2006, 2008) a técnica também pode ser utilizada com arranjos lineares. Esta técnica é baseada em “atraso e soma” de traços sísmicos, ou seja, cada traço sísmico deve sofrer um atraso no tempo de forma que ao somá-los se obtenha um único traço com maior razão sinal ruído, ou seja, é um procedimento semelhante ao de empilhamento vertical (*vertical stacking*) utilizado na etapa de aquisição. Os tempos de atraso de cada traço sísmico, necessários para obtenção da maior coerência, são utilizados para a obtenção do *backazimuth* ( $\theta$ ) e *slowness* ( $S$ ) das ondas registradas. Uma premissa para o uso da técnica é que as ondas registradas possam ser consideradas planas.

Para um melhor entendimento vamos dividir o *f-k beamforming* em: *beamforming* e *f-k beamforming*.

### 3.4.2.2.1 BEAMFORMING

Para que se entenda como a técnica funciona consideremos um arranjo sísmico 2D, conforme Figura 35, onde no centro do arranjo tem-se um sensor de referência localizado nas coordenadas  $x = 0$  e  $y = 0$ , sendo  $\vec{r}_j$  o vetor posição de cada sensor com índice  $j$  referente ao número do sensor.



**Figura 35** - Ilustração em planta de um arranjo sísmico, em azul, e dos parâmetros necessários para o entendimento da técnica *f-k beamforming* (adaptado de Bormann (2012)).

O atraso de tempo  $\tau_j$  é definido como a diferença de tempo entre a passagem da frente de onda entre um sensor  $j$  e o sensor de referência, sendo  $d_j$  a distância percorrida pela frente de onda entre os dois sensores. Assim, podemos definir

$$\tau_j = \frac{d_j}{V_f} \quad (14)$$

onde  $V_f$  é a velocidade de fase de uma onda harmônica (com frequência única). O atraso  $\tau_j$  em função das coordenadas dos sensores  $(x_j, y_j)$ , *backazimuth* ( $\theta$ ) e velocidade de fase ( $V_f$ ) é dado por

$$\tau_j = \frac{-x_j \cdot \sin \theta - y_j \cdot \cos \theta}{V_f} \quad (15)$$

Escrevendo-se a equação 4 em notação vetorial obtém-se

$$\tau_j = \vec{r}_j \cdot \vec{S} \quad (16)$$

onde  $\vec{S}$ , o vetor *slowness*, é dado por

$$\vec{S} = \frac{1}{V_f} \quad (17)$$

No processo de “atraso e soma”, define-se que atrasos negativos são de fato atrasos, enquanto atrasos positivos correspondem a sinais registrados em determinados sensores antes de serem registrados no sensor de referência. Sendo  $w_j(\vec{r}_j, t)$  o sismograma em formato digital, o *beam* (feixe) de todo o registro é definido como

$$b(t) = \frac{1}{M+1} \sum_{j=0}^M w_j(t + \tau_j) = \frac{1}{M+1} \cdot \sum_{j=0}^M w_j(t + \vec{r}_j \cdot \vec{S}) \quad (18)$$

sendo a equação (18) denominada de *beamforming*, onde  $M+1$  é a quantidade de sensores referindo-se o índice  $j=0$  ao sensor de referência. Utilizando-se o correto

atraso  $\tau_j$  para todos os sensores obtém-se, através da equação (18), um sinal  $b(t)$  que será a superposição de todos os sinais registrados, ocorrendo interferências construtivas na parte que se refere ao sinal sísmico propriamente dito e interferências destrutivas na parte do ruído aleatório, aumentando dessa forma a razão sinal ruído. No entanto, para o método MASW com fonte passiva a principal questão é achar o correto valor de velocidade de fase ( $V_f$ ). Quando se obtém, através da equação (18), a máxima coerência entre os sinais tem-se também o correto valor de atraso para cada sensor e, assim, o correto valor de *backazimuth* ( $\theta$ ) e velocidade de fase ( $V_f$ ) que se utiliza na equação (15). O que pode ser feito, então, é se testar combinações de *backazimuth* ( $\theta$ ) e velocidade de fase ( $V_f$ ) e se analisar a coerência obtida em  $b(t)$ . Para isso, é necessária uma forma de quantificar esta coerência. Uma forma simples é calcular a energia de  $b(t)$ , dada pela equação

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} b^2(t) dt \quad (19)$$

Pensando em  $b(t)$  como uma função, o que a equação (19) faz é tornar toda a parte negativa, em relação ao eixo das ordenadas, positiva e elevar todos os valores de ordenadas ao quadrado. Em seguida, toda a área entre a função e o eixo das abscissas é calculada através da integração. Quanto maior a área do gráfico mais coerente é o sinal e maior será o valor de  $E$ . Assim, os máximos de energia obtidos pela equação (19) nos levam ao correto valor de velocidade de fase ( $V_f$ ).

#### 3.4.2.2.2 F-K BEAMFORMING

Como já posto, quando se trabalha com o método MASW estamos lidando com o fenômeno dispersivo das ondas de superfície onde ondas com diferentes frequências, todas constituintes do mesmo pacote de ondas gerado pela fonte, percorrem a superfície com velocidades de fase distintas. Assim, utilizar a técnica *beamforming* no domínio da frequência é mais recomendável, recebendo a técnica a denominação de *f-k beamforming*. A equação (19) quando transformada para o domínio f-k, utilizando-se para isso a transformada de Fourier e suas propriedades de atraso no tempo e teorema de Parseval, pode ser escrita na forma

$$BP(f, \vec{k}) = \sum_{f=f_l}^{f_h} \left| \sum_{j=0}^M W_j(f) e^{i\vec{k}\vec{r}_j} \right|^2 \quad (20)$$

onde  $f$  é frequência,  $f_l$  a menor frequência,  $f_h$  a maior frequência a ser analisada em passos definidos pelo usuário e  $\vec{k}$  o vetor número de onda, podendo ser escrito em valor absoluto como

$$k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (21)$$

A equação (20) é denominada de *Beam Power* e a obtenção da velocidade de fase  $V_f$  é dada pela equação (13) onde para cada valor  $V_f$  se terá uma energia associada. O valor do *backazimuth*  $\theta$  para uma dada frequência  $f$  e número de onda  $k$  pode ser obtido por

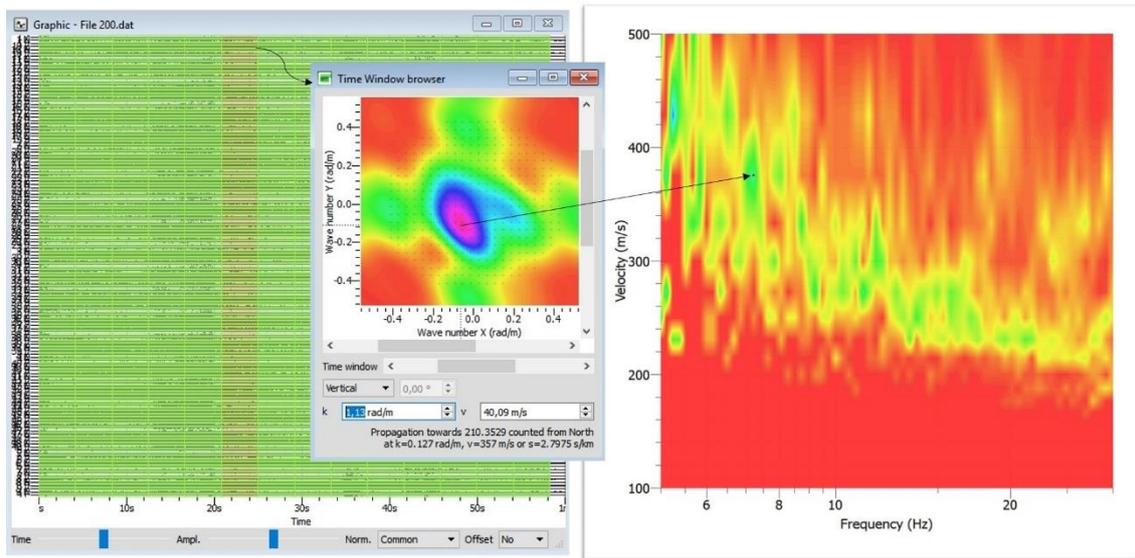
$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{k_y}{k_x} \right) \quad (22)$$

O software Geopsy se utiliza da equação (20). Após estabelecidas as frequências a serem analisadas, através do número de amostras do sinal, esse é dividido em janelas temporais para cada frequência. Estas janelas podem ou não ser dependentes da frequência, dependendo da escolha do usuário e das configurações disponíveis no *software*. De acordo com a documentação do *software* Geopsy ([GEOPSY PROJECT DOCUMENTATION, 2005](#)), uma configuração razoável são janelas temporais dependentes da frequência com 20 a 50 ciclos do período  $P$  por janela, lembrando que

$$f = \frac{1}{P} \quad (23)$$

sendo a configuração padrão do software a de  $30 P$ . Cada janela temporal apresenta um gráfico de  $k_y$  em função de  $k_x$  e energia associada. Através de uma varredura neste domínio e das equações (21) e (13) é obtido um gráfico de velocidade de fase por frequência (espectro  $(V, f)$ ) através do qual torna-se possível a obtenção das curvas de dispersão. A [Figura 36](#) exemplifica o exposto. Quando se utiliza a técnica  $f-k$

*beamforming* para o processamento de dados obtidos com o *Roadside Passive MASW* a varredura no domínio  $(k_y, k_x)$  fica restrita a uma varredura em  $k_x$ , visto que o arranjo linear empregado não possibilita a obtenção de informações sobre  $k_y$  e, por isso, deve-se assegurar que a fonte passiva esteja aproximadamente colinear ao arranjo.



**Figura 36** - Exemplo do processo de obtenção do gráfico de velocidade de fase  $V_f$  por frequência  $f$  e energia associada (espectro  $(V, f)$ ).

É importante notar que várias janelas temporais devem estar disponíveis para que se tenha dados suficientes para uma boa análise das frequências. Assim, para a análise das baixas frequências é necessário mais tempo de aquisição, podendo este tempo chegar a vários minutos ou horas (FOTI *et al.*, 2017). Por exemplo, utilizando-se para as janelas temporais a configuração de 30  $P$  e analisando-se a frequência de 5Hz são obtidas janelas temporais de 6s. Se o dado tiver apenas 30s de aquisição estarão disponíveis apenas 5 janelas.

Em relação à equação (20), uma alternativa para o processamento do dado implementada no *software* Geopsy é a utilização da equação

$$Semb(f, \vec{k}) = \frac{\sum_{f=f_l}^{f_h} \left| \sum_{j=0}^M W_j(f) e^{i\vec{k}\vec{r}_j} \right|^2}{(M+1) \sum_{f=f_l}^{f_h} \sum_{j=0}^M \left| W_j(f) e^{i\vec{k}\vec{r}_j} \right|^2} \quad (24)$$

denominada coeficiente *Semblance* (KVAERNA e RINGDAHL, 1986) diferindo-se da equação *Beam Power* (20) por ser uma média normalizada.

### 3.4.2.3 INTERPRETAÇÃO DAS CURVAS DE DISPERSÃO

A interpretação das curvas de dispersão a partir do espectro, neste trabalho o espectro  $(V, f)$ , é talvez o passo mais delicado do método MASW por ser um processo dependente da interpretação do operador. Se nessa etapa as curvas não forem interpretadas corretamente o resultado final estará comprometido. O principal aspecto que permite a interpretação das curvas no espectro  $(V, f)$  são os máximos de energia e o conhecimento de como as curvas de dispersão normalmente se comportam (Figura 10). É esperado que os máximos de energia estejam vinculados, na maior parte das frequências, ao modo fundamental e que a curva de dispersão se comporte de forma suave, sem mudanças abruptas. No entanto, em situações reais a interpretação pode não ser tão simples e os modos podem não ser tão fáceis de serem distinguidos e classificados, podendo haver inclusive superposição dos mesmos. Por exemplo, se o modelo geológico apresenta uma camada de baixa velocidade entre camadas de alta, a curva de dispersão resultante do modo fundamental pode apresentar uma pequena deflexão para velocidades menores. Ao contrário, se existe uma camada de alta velocidade entre camadas de baixa ocorrerá a formação de uma deflexão para cima que, no entanto, não deve ser confundida com um caso no qual ocorre uma superposição modal. Na Figura 37 é mostrado um exemplo de como pode ser difícil a correta interpretação das curvas de dispersão.

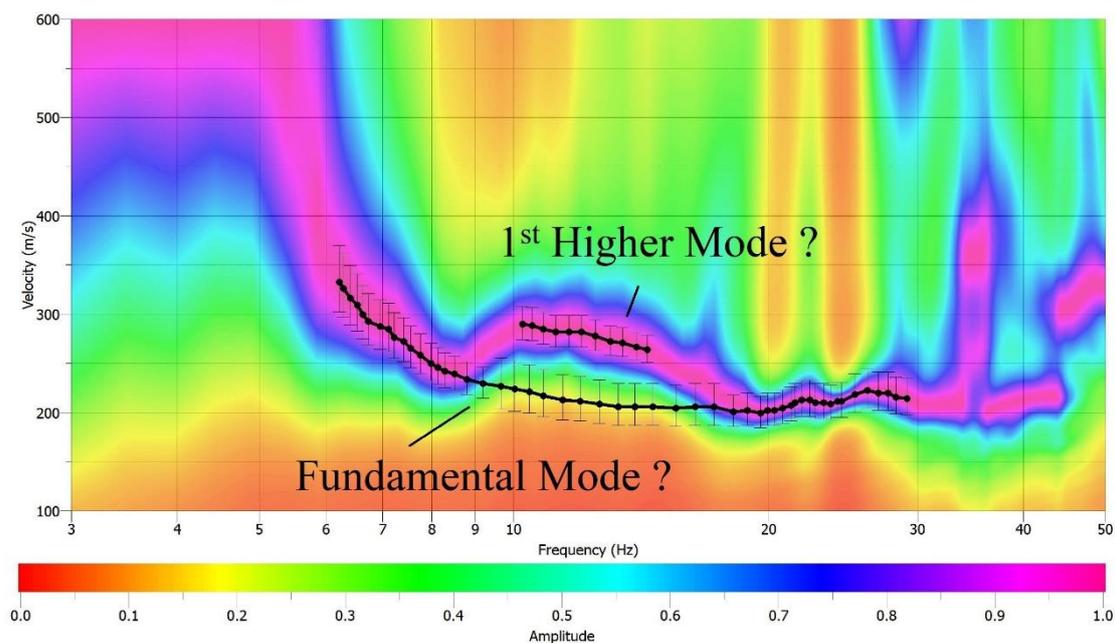


Figura 37 – Espectro  $(V, f)$  com uma possível interpretação para as curvas de dispersão.

Primeiramente é importante que se organize todas as informações que já existem sobre a área de estudo como, por exemplo, informações de sondagem que contenham a descrição do material, ensaios SPT (*Standard Penetration Test*), mapas geológicos, dados geofísicos etc. Quanto mais informações e mais detalhadas elas forem, melhor se pode deduzir como será o comportamento da curva de dispersão.

A forma de visualização do espectro ( $V, f$ ) também pode influenciar bastante a interpretação. Uma escala de cor apropriada deve ser utilizada e o eixo das frequências deverá estar preferencialmente em escala logarítmica. Quando se utiliza uma escala linear a banda de frequência de 10 a 30Hz, que corresponde a aproximadamente os primeiros 5m de profundidade, está sendo representada com mais detalhes do que a banda de 2 a 10Hz, que corresponde a profundidades que variam de 5 a 60m. Por essa razão a escala logarítmica é a mais indicada (FOTI *et al.*, 2017).

No caso de ensaios MASW com sensores triaxiais, comparações entre os dados obtidos pelas componentes vertical (ondas Rayleigh), radial (ondas Rayleigh) e transversal (ondas Love) podem ser feitas no intuito de se tirar eventuais dúvidas de interpretação. É esperado que os modos das ondas Rayleigh estejam aproximadamente na mesma posição no espectro ( $V, f$ ) que os das ondas Love. Ondas Love possuem velocidades ligeiramente maiores que as das ondas Rayleigh que, no entanto, apresentam profundidade de penetração cerca de 30% maior do que das ondas Love. Se o meio é estratificado com velocidades crescentes com a profundidade um fato acaba levando a uma situação contrária em relação ao outro em termos de velocidade de propagação e isso faz com que as curvas estejam, aproximadamente na mesma posição. As seções 3.2.3 e 3.2.6 trazem mais informações sobre a questão.

### 3.4.3 INVERSÃO

Para o método MASW a inversão é a etapa na qual são obtidos os perfis de velocidades a partir das curvas de dispersão, ou seja, os gráficos de profundidade em função da velocidade de propagação de ondas. O processo de inversão busca o melhor modelo de subsuperfície cuja resposta se ajusta às curvas de dispersão experimentais. Porém, como em todos os métodos geofísicos, a inversão não tem resposta única e, assim, os resultados são normalmente acompanhados de valores de *misfit* (desajuste) que revelam o quão bem - ou melhor, o quão mal, por se tratar de um desajuste - o resultado obtido se ajusta aos dados experimentais. No entanto, o resultado final é também

dependente do algoritmo utilizado para inversão, bem como dos parâmetros do modelo inicial de subsuperfície exigido para que a inversão tenha início.

### 3.4.3.1 PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO INICIAL

A maioria dos algoritmos de inversão para dados geofísicos exige um modelo inicial com parâmetros da subsuperfície para que a inversão tenha início. A escolha de um modelo coerente é importante para um bom resultado da inversão e, por isso, as informações existentes sobre a área de estudo devem ser utilizadas.

No *software* Dinver, software de inversão do pacote Geopsy ([GEOPSY PROJECT, 2005](#)) utilizado neste trabalho, o modelo inicial deve possuir um determinado número de camadas e essa escolha é importante. Tanto um número excessivo quanto um número insuficiente de camadas, considerando o modelo geológico real, levarão a inversões irreais. Para um número excessivo de camadas as curvas de dispersão não apresentam informações suficientes e se o número for insuficiente, informações sobre as curvas não estarão sendo aproveitadas. Em qualquer um dos casos os resultados finais apresentarão altos valores de *misfit*, demonstrando um ajuste ruim dos perfis gerados. Algumas vezes testes através de inversões com diferentes modelos iniciais devem ser feitos para que se obtenha um número razoável em relação a quantidade de camadas a serem utilizadas.

Outros parâmetros importantes são as espessuras das camadas e a profundidade máxima de investigação. De forma geral, pode-se dizer que a espessura de cada camada deve ser sempre maior ou igual à metade do menor comprimento de onda disponível no registro (equações (7) e (9)) e a profundidade máxima de investigação menor ou igual à metade do maior comprimento de onda (equações (8) e (10)).

Para cada camada os seguintes parâmetros são exigidos: velocidade da onda P ( $V_p$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), velocidade da onda S ( $V_s$ ) e densidade ( $\mu$ ). Para cada parâmetro pode ser utilizado um valor fixo ou um intervalo de valores possíveis que podem ainda ser ajustados como uniformes, lineares, lineares crescentes ou lineares decrescentes para cada camada. Informações existentes sobre a área de estudo devem ser utilizadas na parametrização do modelo inicial e na escassez ou ausência dessas a [Tabela 1](#) ou equivalente deve ser utilizada.

### 3.4.3.2 ALGORITMO DE INVERSÃO

O *software* Dinver, software do pacote Geopsy utilizado neste trabalho, utiliza o algoritmo de inversão *Neighborhood* (SAMBRIDGE, 1999), modificado por (WATHELET, 2008). O algoritmo é baseado em busca direta estocástica para encontrar modelos com ajustes aceitáveis dentro de um espaço de parâmetros multidimensionais e faz parte da mesma família dos algoritmos genéticos e de recozimento simulado (*simulated annealing*). São utilizadas amostras anteriores para orientar a busca de modelos melhorados com base nas restrições dos parâmetros do modelo inicial introduzido pelo operador, utilizando o conceito de células de Voronoi para encontrar e investigar os elementos mais promissores de um espaço de parâmetros.

A comparação entre a curva de dispersão modelada com a curva de dispersão experimental fornece um valor de *misfit* (desajuste) que indica o quão bem (ou mal) ajustado o modelo está em relação ao dado experimental. O valor de *misfit* é obtido pela equação

$$misfit = \sqrt{\sum_{i=0}^{n_F} \frac{(V_{Ei} - V_{Mi})^2}{\sigma_i^2 \cdot n_F}} \quad (25)$$

onde  $V_{Ei}$  corresponde ao valor de velocidade da curva de dispersão experimental para a frequência  $f_i$ ,  $V_{Mi}$  a velocidade da curva modelada para a mesma frequência  $f_i$ ,  $\sigma_i$  a incerteza das frequências e  $n_F$  o número de amostras de frequências. A velocidade  $V_i$ , seja da onda P ou da onda S, a uma profundidade  $z_i$ , é dada pela equação

$$V_i = V_0((z_i + 1)^\alpha - (z_0 + 1)^\alpha + 1) \quad (26)$$

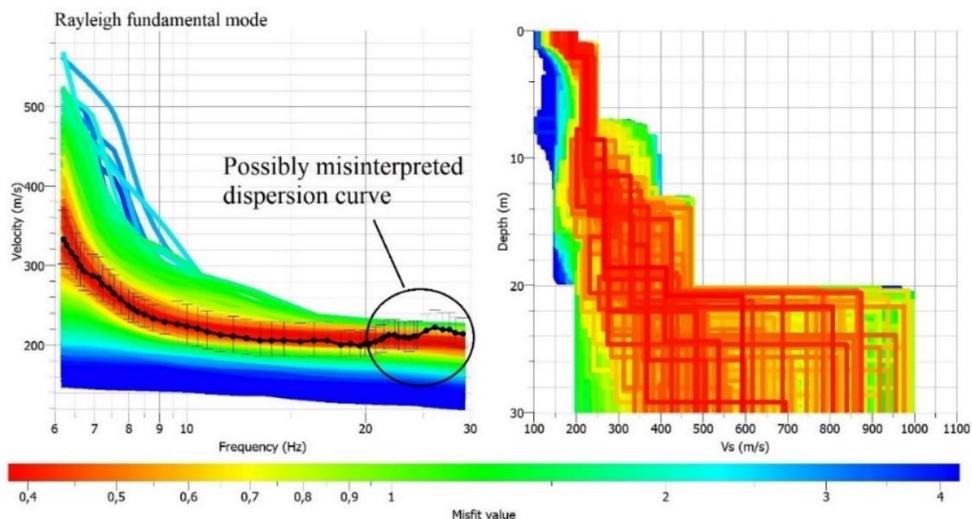
onde  $V_0$  é a velocidade na profundidade  $z_0$  e  $\alpha$  um expoente que varia entre 0 e 1 (WATHELET, JONGMANS e OHRNBERGER, 2004).

A robustez do resultado final da inversão pode ser testada através de várias inversões idênticas executadas com “sementes” aleatórias diferentes (valor inteiro que inicia o gerador pseudoaleatório). Essa “semente” não é controlada pelo usuário do *software*. Cada inversão tem um ponto de partida diferente e se os resultados das inversões estão convergindo aproximadamente para o mesmo lugar – diz-se aproximadamente pois

através desse tipo de algoritmo as inversões não convergem exatamente para o mesmo resultado final - é um indicativo que o resultado final possui uma boa qualidade.

Ao final do processo de inversão é obtido um perfil de velocidades acompanhado de uma escala de *misfit* para centenas de modelos gerados, conforme [Figura 38](#). O perfil deve ser avaliado como um todo. Não é porque um determinado modelo apresenta o menor valor de *misfit* que esse modelo é o que representa de maneira mais fiel a subsuperfície da área de estudo. O menor valor de *misfit* significa apenas que o modelo apresenta o melhor ajuste matemático. É claro que a ideia é que os modelos mais bem ajustados devem caracterizar de maneira mais fiel a área de estudo, mas não devemos focar em um modelo isolado e sim em um conjunto de modelos bem ajustados para uma representação média da área de estudo.

No *software* Dinver existe ainda a possibilidade de visualizarmos, além do perfil de velocidade de onda S, o perfil de onda P, perfil de densidade e o ajuste dos modelos gerados em comparação com as curvas de dispersão experimentais. É interessante que seja avaliada essa última parte para que se tenha uma visão clara se existe alguma parte da curva de dispersão experimental que não está conseguindo ser modelada pelas inversões ([Figura 38](#)). Se isso ocorre, a interpretação da curva de dispersão em questão deve ser reavaliada. O perfil de onda P é bastante dependente do perfil de onda S e, por isso, opta-se muitas vezes em se visualizar apenas o perfil de onda S ([LUCENA e TAIOLI, 2014](#)).



**Figura 38** - Exemplo de resultado obtido no processo de inversão pelo *software* Dinver. À esquerda a curva de dispersão do modo fundamental da onda Rayleigh com os modelos gerados pela inversão em diversas cores e à direita o perfil de velocidade da onda S. Abaixo os valores de *misfit* para os modelos gerados com escala de cores.



---

## CAPÍTULO 4 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS

---

Neste trabalho foram realizados 2 ensaios sísmicos na área de estudo apresentada no [CAPÍTULO 2](#) para posterior tratamento e análise dos dados através do método MASW. Em cada um dos ensaios sísmicos foi realizado um conjunto de aquisições empregando-se a mesma disposição geométrica dos geofones. No primeiro ensaio foi utilizada uma configuração de campo em duas dimensões (Ensaio Sísmico 2D) e no segundo uma configuração linear do arranjo (Ensaio Sísmico 1D).

### 4.1 ENSAIO SÍSMICO 2D

Este ensaio foi realizado em maio de 2017 com o emprego de geofones triaxiais dispostos em duas dimensões. O principal objetivo foi o de se avaliar a contribuição que os dados das componentes radial (ondas Rayleigh) e transversal (ondas Love) trazem ao modelo de inversão final quando comparado aos obtidos somente a partir da componente vertical (ondas Rayleigh), forma tradicional de aquisição. O propósito da geometria 2D foi a de viabilizar a obtenção de dados através do ruído ambiental (fonte passiva), como também o de se avaliar a contribuição desses quando integrados aos dados obtidos com fontes ativas. Para que fossem geradas ondas Love com energias suficientes foi analisado o emprego do compactador de solo, desejável neste estudo por gerar ondas de maior amplitude e por motivos que serão discutidos na etapa de processamento. Para possibilitar esse estudo comparativo foi verificada, anteriormente, a inexistência de heterogeneidade lateral (seção [3.4.1.6](#)) significativa na área de disposição do arranjo de campo.

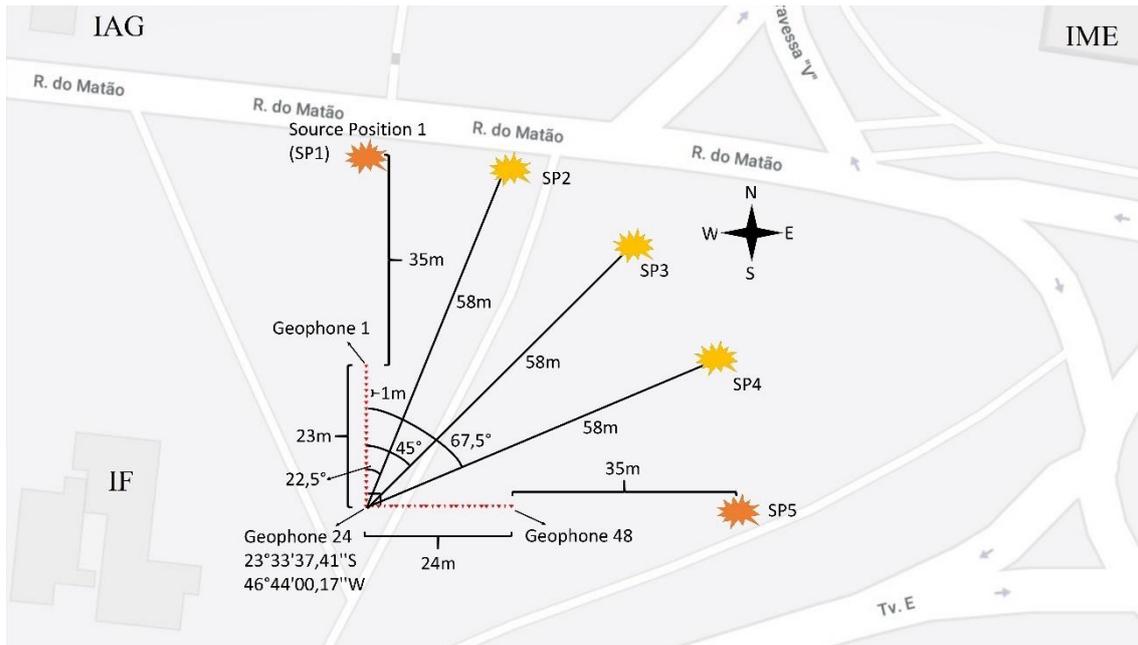
#### 4.1.1 AQUISIÇÃO

No ensaio sísmico 2D desejava-se uma resolução vertical de aproximadamente 1m e uma profundidade de investigação que fosse de pelo menos 45m, que é a profundidade aproximada do embasamento no local. Pela equação (9) seria necessário um espaçamento mínimo entre geofones igual ou menor a 1m, e pela equação (10) uma distância máxima entre geofones igual ou superior a 90m. No entanto, apenas 48 geofones triaxiais de 10Hz estavam disponíveis e, portanto, utilizando-se um arranjo 2D ou a resolução vertical ou a máxima profundidade de investigação teria que ser diminuída.

Ressalta-se que as equações mencionadas são empíricas podendo os valores de resolução vertical e profundidade máxima de investigação ser diferentes. Como a frequência natural dos geofones já se apresentava como um empecilho para o registro de frequências muito inferiores a 10Hz, diminuindo a profundidade de investigação, o espaçamento de 1m entre os geofones foi mantido. Assim, foram empregados os seguintes parâmetros de aquisição e equipamentos:

- **Sismógrafos:** 2 Geometrics Geode de 24 canais cada (Figura 17);
- **Geofones:** 48 geofones triaxiais de 10Hz (Figura 24), modelo GS-32CT da marca Geospace;
- **Orientação dos geofones:** componente vertical = vertical, componente H1 = EW e componente H2 = NS (Figura 27);
- **Espaçamento entre geofones:** constante de 1m;
- **Fontes Ativas:** marreta de 6kg e compactador de solo (Figura 19);
- **Base de impacto para a fonte marreta:** base metálica (Figura 22);
- **Fonte Passiva:** ruído ambiental.

Os geofones foram dispostos com geometria em L com um segmento NS (norte sul) e outro EW (leste oeste) (Figura 39). O segmento NS possuía 24 geofones e o segmento EW 25 geofones, sendo que o geofone de número 24, estabelecido nas coordenadas  $23^{\circ}33'37,41''S$  e  $46^{\circ}44'00,17''W$ , fazia parte dos dois segmentos. Os geofones foram numerados de 1 a 48 com numeração crescente para sul e depois para leste, estando o geofone de número 1 posicionado na porção norte do arranjo e o de número 48 na porção leste.



**Figura 39** - Arranjo de campo do ensaio sísmico 2D.

Para as aquisições com fontes ativas foram estabelecidas 5 posições de tiro, SP1 (*Source Position 1*) a SP5, conforme [Figura 39](#). O *offset* mínimo para as posições SP1 e SP5 foi de 35m sendo que todas as posições de tiro possuíam uma distância de 58m do geofone de número 24, formando o raio de uma circunferência.

As aquisições foram divididas em grupos conforme [Tabela 3](#), onde também podem ser verificados os parâmetros de aquisição. As siglas utilizadas servem para todas as aquisições deste trabalho possuindo cada parte da sigla os seguintes significados: geometria de aquisição - fonte - configuração geométrica do impacto sobre o solo ou sobre a base de impacto no solo - posição da fonte, se houver - quantidade de empilhamento vertical, se houver. Para cada parte da sigla as seguintes abreviaturas foram adotadas:

- **Geometria de aquisição:** 1D ou 2D;
- **Tipo de fonte:** M (para marreta), C (para compactador), RA (para ruído ambiental) ou PR (para *Passive Roadside*).
- **Configuração geométrica do impacto sobre o solo ou sobre a base de impacto no solo:** V (para vertical) ou I (para inclinada).
- **Posição da fonte (se houver):** SP1, SP2 e assim por diante.
- **Quantidade de empilhamento vertical (se houver):** “Número”

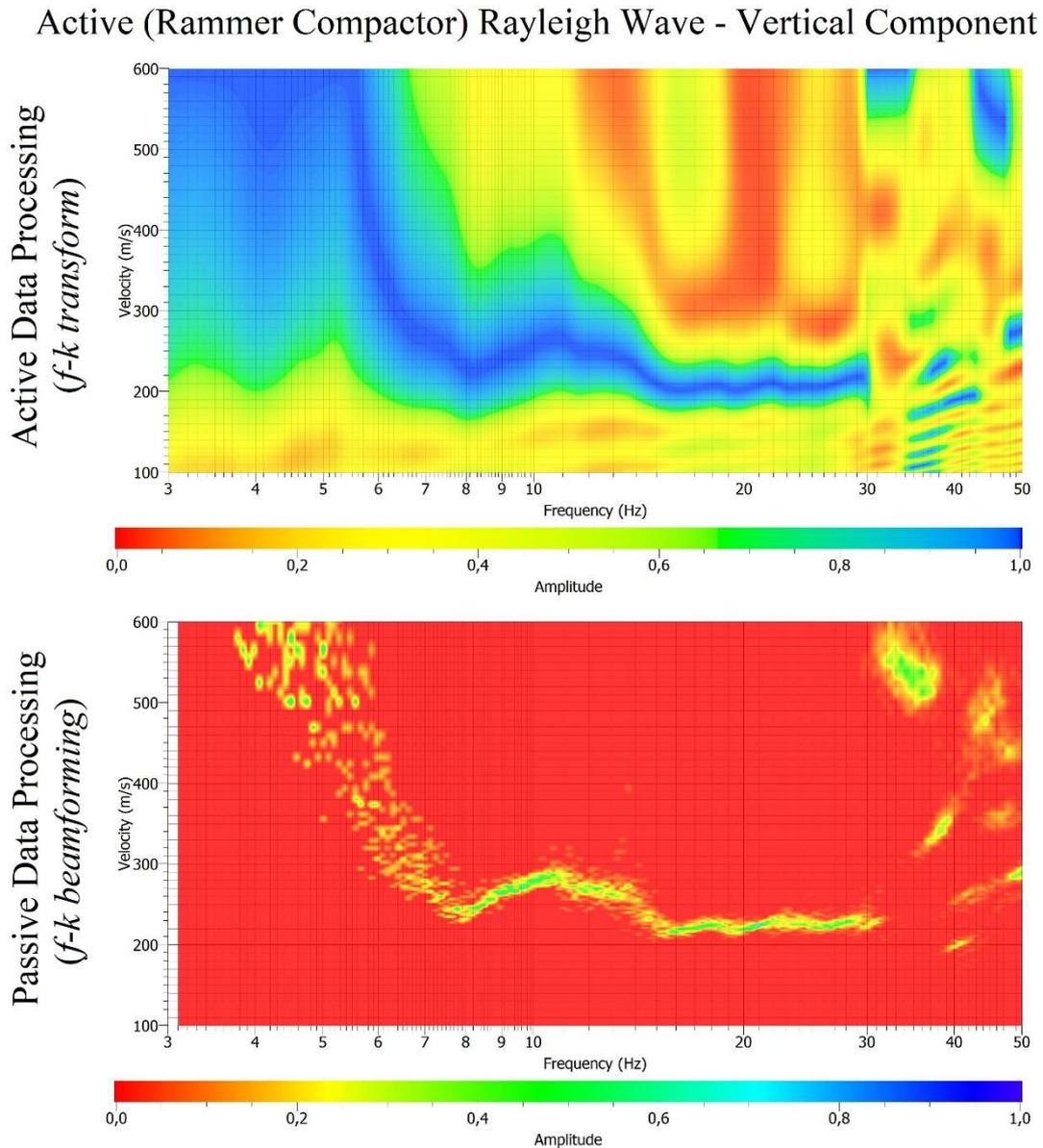
Tabela 3 - Aquisições do ensaio sísmico 2D.

Sigla da aquisição	2D-M-I-SP1-5	2D-C-V-SPX (podendo X variar de 1 a 5)	2D-RA
Fonte	Marreta	Compactador	Ruído Ambiental
Configuração geométrica do impacto sobre o solo ou sobre a base de impacto no solo	Inclinada	Vertical	-
Posição da fonte	SP1	SP1, SP2, SP3, SP4 e SP5	-
Quantidade de empilhamento vertical	5	-	-
Intervalo de amostragem ( $\Delta t$ ) [ms]	0,5	1	1
Tempo de gravação ( $T$ ) [s]	2	60	180

#### 4.1.2 PROCESSAMENTO

Na etapa de processamento foi utilizado o software Geopsy ([GEOPSY PROJECT, 2005](#)). Para geração de dados com fonte ativa foram empregadas duas fontes: a marreta de 6kg e o compactador de solo. Para o ensaio sísmico 2D a utilização do compactador era desejável por dois motivos. O primeiro se deve ao fato do dado poder ser processado como um dado de passiva, ou seja, através da técnica *f-k beamforming* (seção 3.4.2.2), que necessita de mais tempo de registro que não só 1 ou 2s, como é o caso para a aquisição com a marreta. A vantagem do emprego da técnica *f-k beamforming* é que todo o arranjo 2D poder ser utilizado com o compactador disparado de qualquer posição para o registro das três componentes das ondas, visto que o algoritmo calcula automaticamente, para cada posição e frequência, o que é componente vertical, radial ou transversal. Tal processo não é tão simples quando se utiliza o processamento de ativa, ou seja, empregando-se a técnica *f-k transform* (seção 3.4.2.1). Através desse último, se a fonte é disparada da posição SP1, por exemplo, a componente horizontal H1 (EW) dos geofones do segmento NS será a responsável pelo registro da componente transversal das ondas (ondas Love). No entanto, para o segmento EW do arranjo o mesmo já não ocorre, pois, a frente de onda formará um ângulo com o alinhamento dos geofones e, assim, só seria possível separar o que é componente radial e transversal através de um processo de correção por rotação dos eixos dos geofones, consistindo em um processo mais elaborado

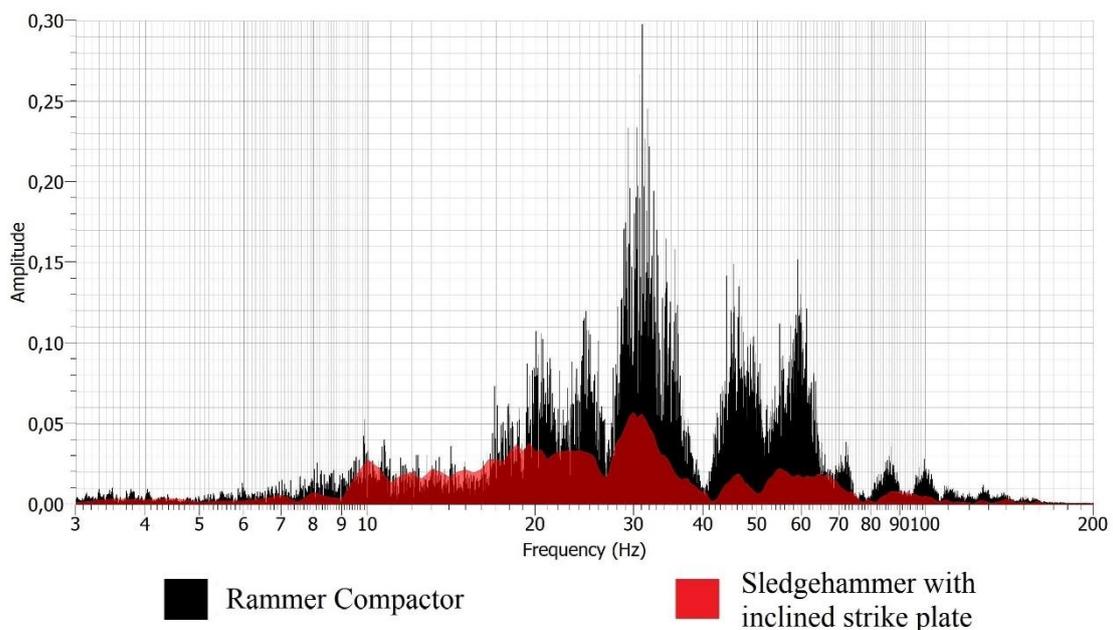
e trabalhoso. Assim, pelo processamento *f-k transform*, ficaríamos restritos a aproveitar a fonte ativa apenas nas posições SP1 e SP5 utilizando-se somente os segmentos NS e EW, respectivamente. Além do exposto, o processamento por *f-k beamforming* gera espectros  $(V, f)$  mais “limpos”. Quando a fonte é acionada, usualmente, a maior energia registrada está na banda de frequências característica da fonte ativa. No entanto, existem outras frentes de ondas incidindo sobre o arranjo originadas, principalmente, no ambiente urbano, e que chegam ao alinhamento de geofones com diferentes ângulos. No processamento pela técnica *f-k transform* não é feita nenhuma correção considerando-se os diferentes ângulos de chegadas das frentes de ondas, mas pela técnica *f-k beamforming*, sim. A [Figura 40](#) mostra dois espectros  $(V, f)$  de uma mesma aquisição (2D-C-V-SP1) cujos dados foram processados de formas distintas. Percebe-se claramente como o espectro obtido através da técnica *f-k beamforming* é mais “limpo” e de mais clara identificação das curvas de dispersão do que o obtido pela técnica *f-k transform*. O segundo motivo para a utilização do compactador como fonte ativa é por esse propiciar a geração de ondas de maior amplitude, pelo menos para a componente vertical das ondas ([Figura 18](#)). Os filtros passa banda utilizados em todo trabalho foram sempre os mesmos das bandas de frequência apresentadas nas figuras dos espectros  $(V, f)$ .



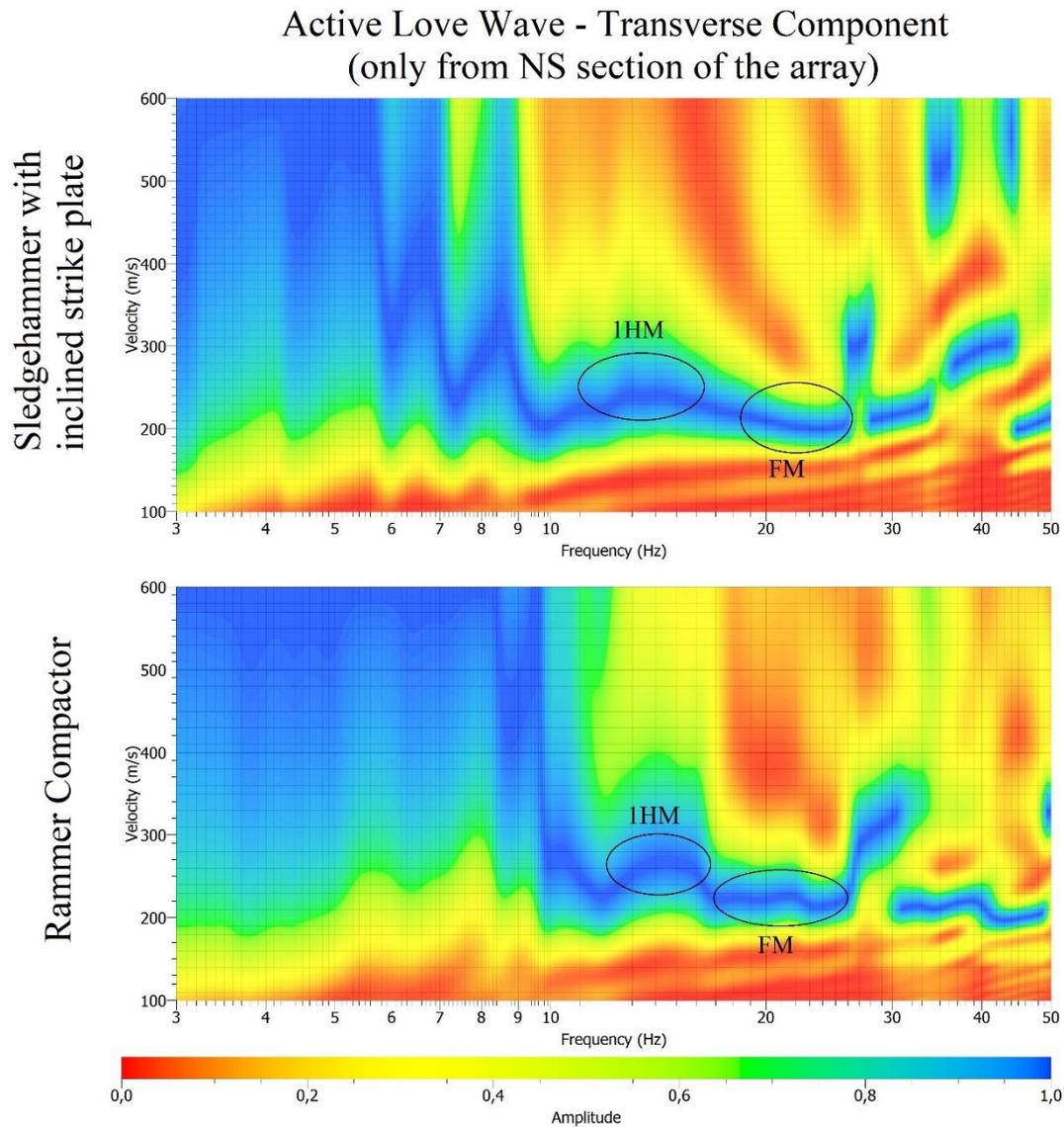
**Figura 40** - Espectros  $(V, f)$  da componente vertical (ondas Rayleigh) do ensaio sísmico 2D de uma aquisição com a fonte compactador (aquisição 2D-C-V-SP1) obtidos por processamentos distintos. O espectro **superior** foi obtido pela técnica *f-k transform* e o **inferior** pela técnica *f-k beamforming*.

No entanto, uma vantagem em se empregar a marreta é a de se poder dispor a base de impacto de forma inclinada (Figura 22) para a produção de movimento horizontal do meio visando à geração de ondas Love, o que não é possível com a utilização do compactador, que possui base própria e trabalha com impactos verticais sobre o meio. Assim, antes de se iniciar as aquisições de dados havia a dúvida se o compactador geraria energia suficiente na componente transversal para que fosse possível o registro de ondas Love. Foi realizado, então, um teste comparativo entre as fontes marreta e compactador através das aquisições 2D-M-I-SP1-5 e 2D-C-V-SP1 (Tabela 3). A Figura 41 apresenta

os espectros de amplitude da componente transversal (ondas Love) registrada pelo geofone 1 com o emprego da marreta e do compactador. Nota-se que, apesar de impactar verticalmente o solo, o compactador gera movimento horizontal do meio com energia maior do que a marreta sobre a base inclinada. No entanto, um espectro de amplitude com maior energia não garante que o dado seja de melhor qualidade e, por isso, foram comparados os espectros  $(V, f)$  dessas mesmas aquisições (Figura 42) utilizando-se apenas o segmento NS do arranjo, por motivo discutido anteriormente. Os espectros foram obtidos por processamento  $f-k$  transform e nesses foram interpretadas partes de duas curvas de dispersão: modo fundamental e 1º modo superior. Ao se comparar os espectros se nota que os modos estão mais claramente separados no obtido com a fonte compactador. Esses resultados validaram o emprego do compactador como fonte ativa para a caracterização da área de estudo.

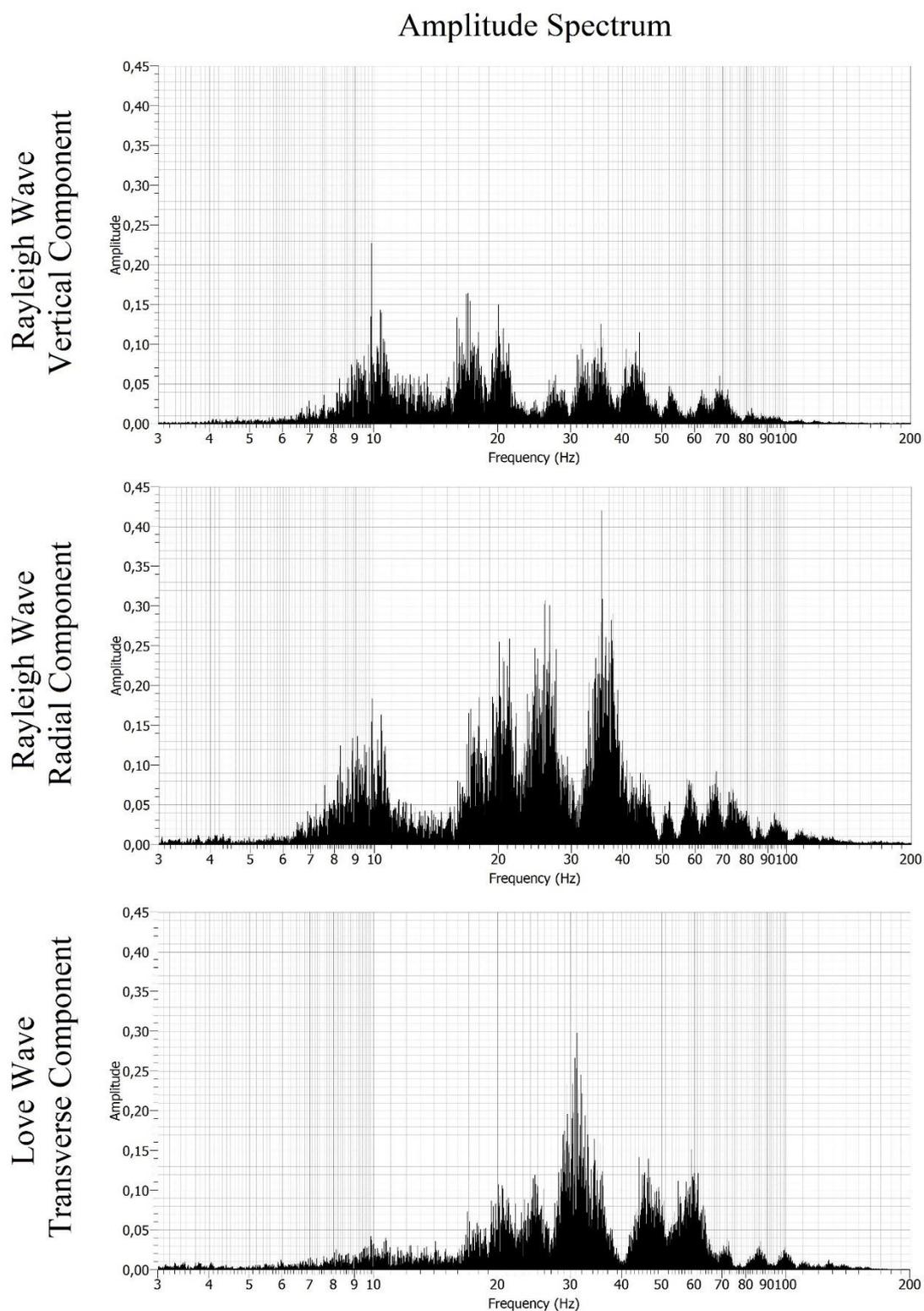


**Figura 41** - Espectros de amplitude da componente transversal (ondas Love) do geofone 1 (triaxial de 10Hz) do ensaio sísmico 2D para duas aquisições: com um compactador de solo incidindo verticalmente sobre o solo (aquisição 2D-C-V-SP1) (em preto) e com uma marreta incidindo sobre uma base inclinada (aquisição 2D-M-I-SP1-5) (em vermelho), ambas com *offset* mínimo de 35m.



**Figura 42** - Espectros ( $V, f$ ) da componente transversal (ondas Love) do geofone 1 (triaxial de 10Hz) do ensaio sísmico 2D para duas aquisições: **na imagem superior** com uma marreta incidindo sobre uma base inclinada (aquisição 2D-M-I-SP1-5) e **na imagem inferior** com um compactador de solo incidindo verticalmente sobre o solo (aquisição 2D-C-V-SP1). Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1° modo superior.

A seguir foram obtidos os espectros de amplitude das componentes vertical (ondas Rayleigh), radial (ondas Rayleigh) e transversal (ondas Love) dos sismogramas da aquisição 2D-C-V-SP1 registrados pelo geofone 1 (Figura 43). Verifica-se, em todos os espectros, que a energia do sinal se concentra na banda de frequência de aproximadamente 6,5 a 100Hz.

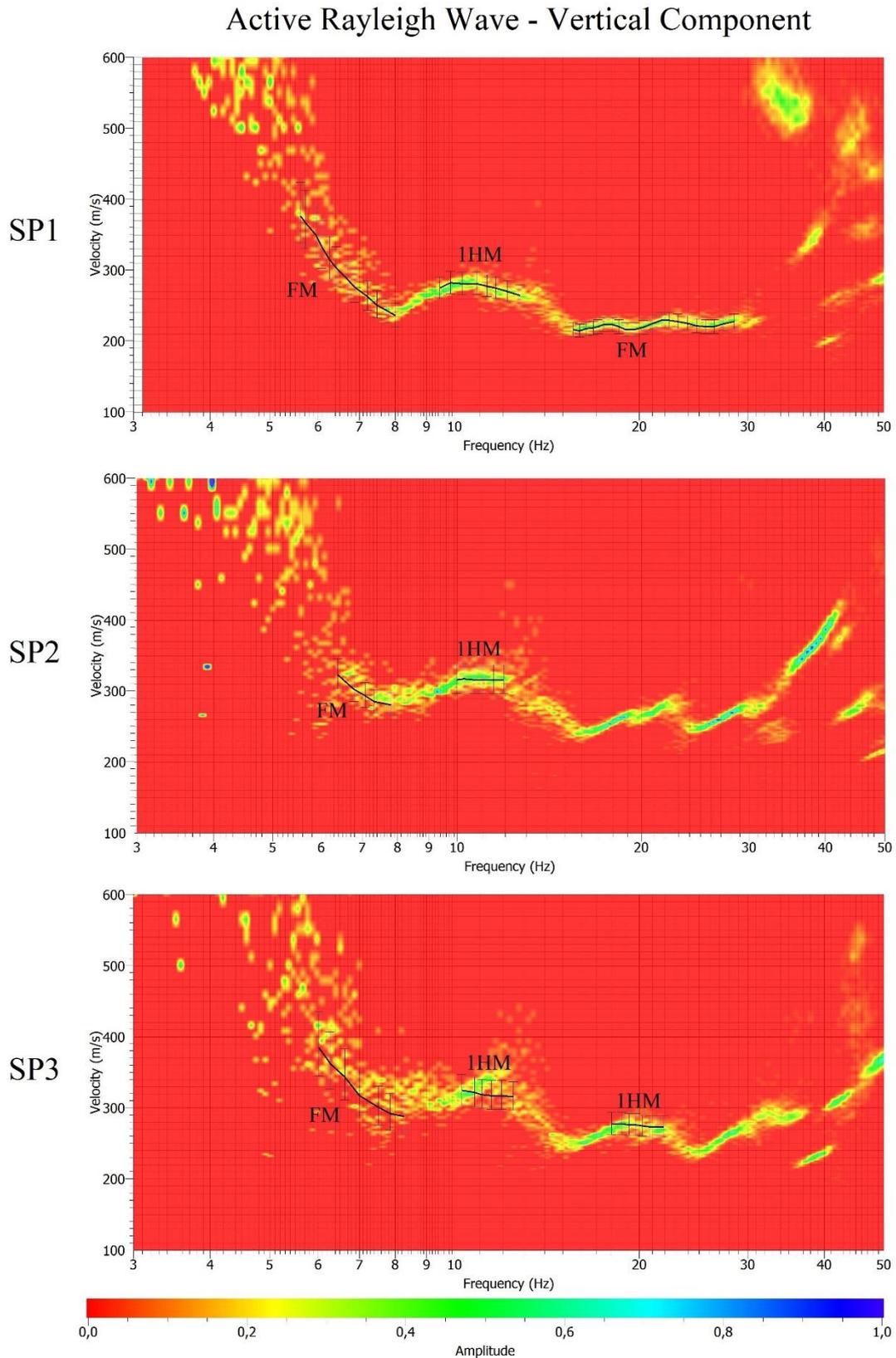


**Figura 43** - Espectros de amplitude das componentes vertical (ondas Rayleigh), radial (ondas Rayleigh) e transversal (ondas Love) obtidos do registro do geofone 1 da aquisição 2D-C-V-SP1 (compactador) do ensaio sísmico 2D.

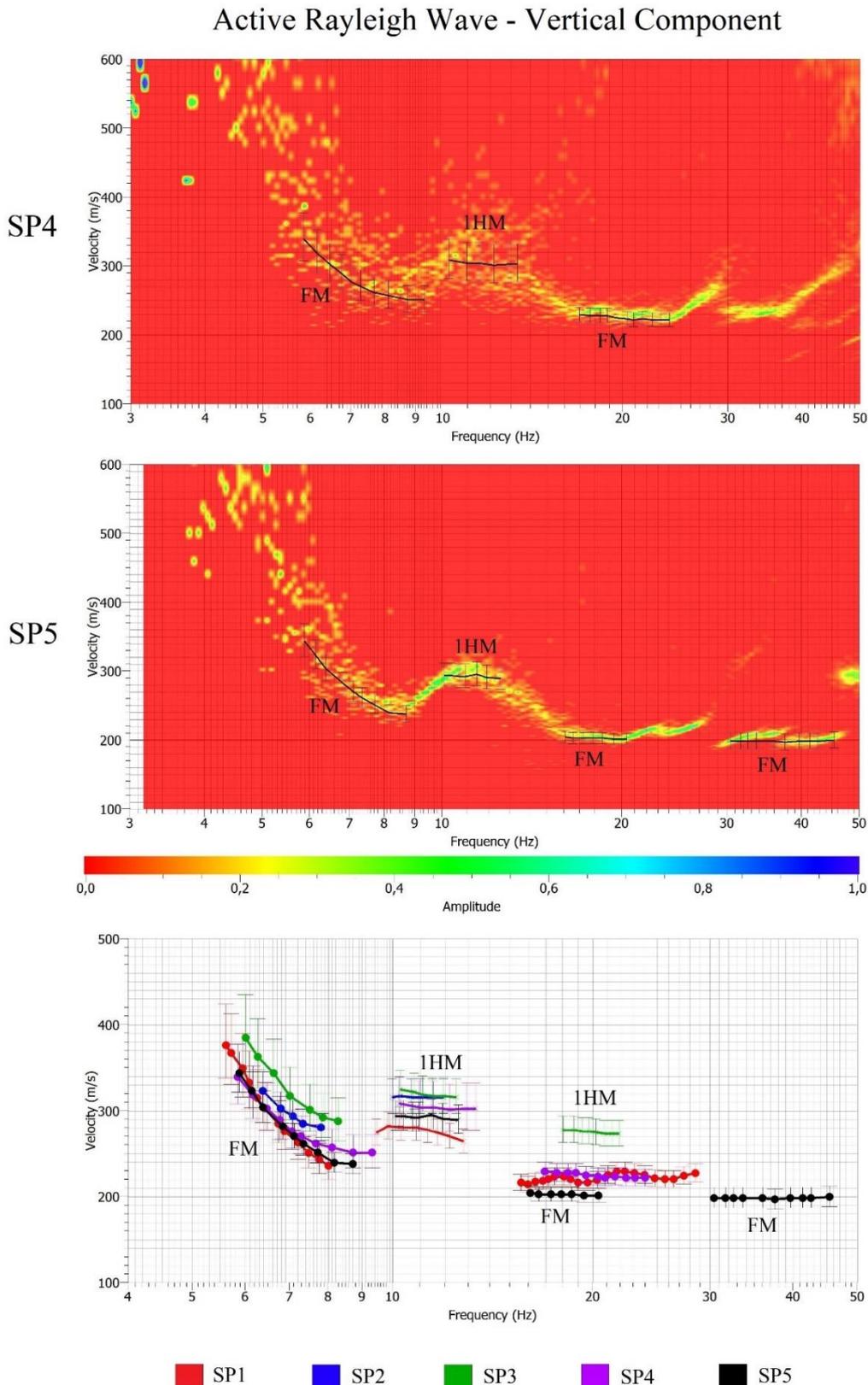
O passo seguinte buscou avaliar a ocorrência ou não de heterogeneidade lateral significativa na área. Assim, foram gerados os espectros  $(V, f)$  de todas as componentes das ondas dos registros obtidos nas posições de SP1 a SP5 (aquisições 2D-C-V-SP1, 2D-C-V-SP2, 2D-C-V-SP3, 2D-C-V-SP4 e 2D-C-V-SP5). Em todos os espectros foram interpretadas as curvas de dispersão, quando possível, e para cada componente as curvas extraídas foram dispostas em conjunto em um gráfico  $(V, f)$  para se avaliar a convergência entre as interpretações (Figura 44 à Figura 49).

Somente através de uma avaliação comparativa dos espectros, realizada sempre entre espectros de uma mesma componente, dúvidas ainda persistiam sobre o comportamento homogêneo da área, principalmente no que diz respeito às componentes radial (ondas Rayleigh) e transversal (ondas Love). Isso se deveu a não observância de semelhança entre alguns espectros de uma mesma componente. Os espectros mais concordantes foram os relativos à componente vertical (ondas Rayleigh). No entanto, alguns espectros das componentes radial e transversal não permitiram, inclusive, nenhuma interpretação com extração de curvas de dispersão (Figura 46 SP2 e Figura 48 SP3). Assim, o segundo critério de avaliação foi utilizado, relativo a convergência entre as curvas interpretadas em cada componente (Figura 45, Figura 47 e Figura 49). Por esse critério, apesar de diferenças da ordem de 50m/s, as interpretações das curvas dos modos fundamental e 1º modo superior de cada componente foram consideradas convergentes e, assim, para uma interpretação mais geral, foram obtidas as curvas médias para cada modo de cada componente (Figura 50). As curvas médias foram obtidas pela composição das curvas de um mesmo modo e componente, com o cálculo de uma média dos dados em regiões de ocorrência de mais de uma curva.

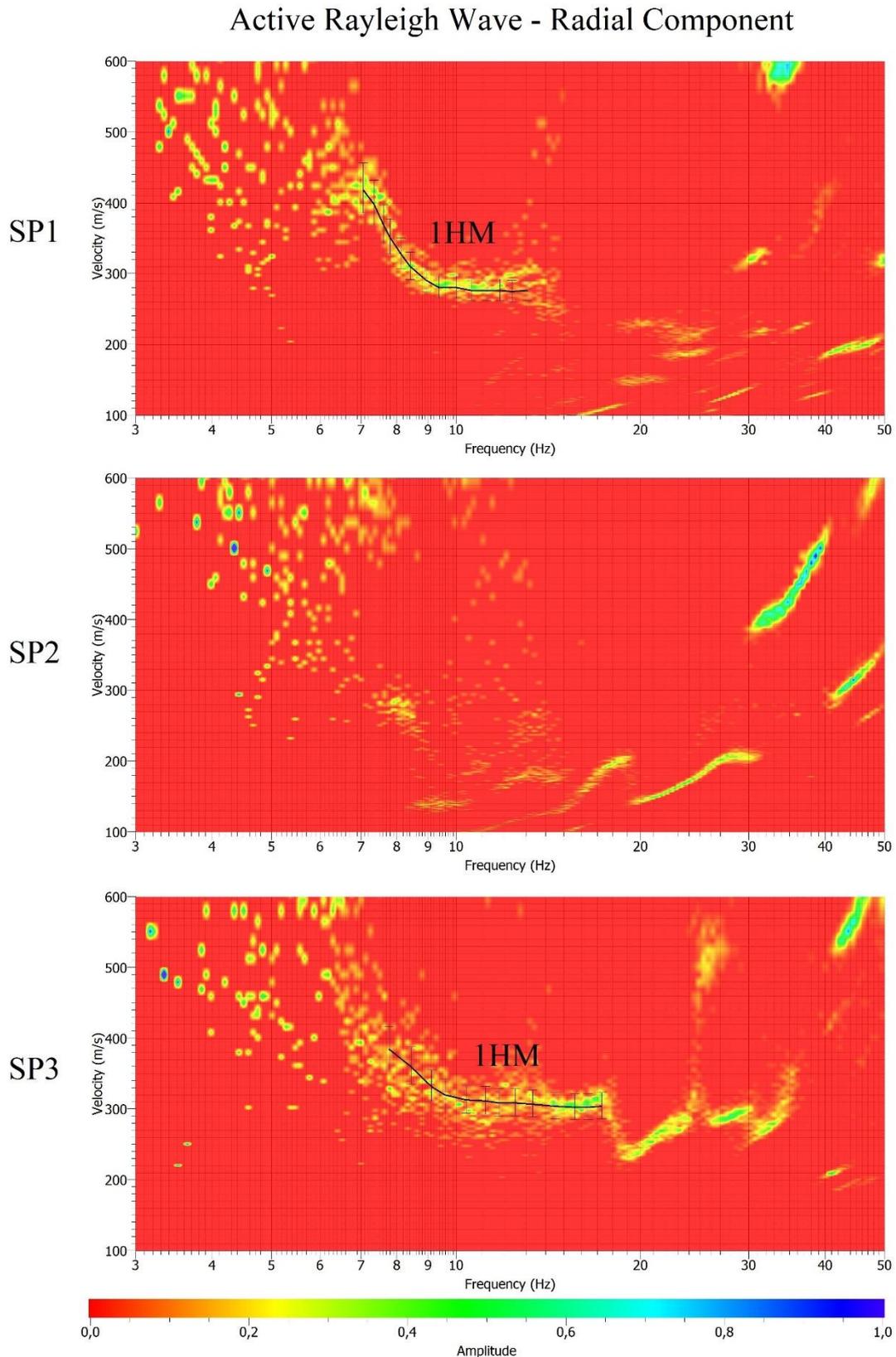
Pelo menos duas interpretações possíveis dos espectros poderiam ser levantadas em relação ao que foi considerado curva de dispersão do modo fundamental e do 1º modo superior. Em uma primeira interpretação do primeiro espectro (SP1) da Figura 44, por exemplo, os máximos de energia em toda a banda de 5,5 a 30Hz poderiam ser considerados como relativos ao modo fundamental. No entanto, isso significaria a existência de uma camada de alta velocidade entre duas camadas de baixa. Porém, não existe nenhuma informação ou dado sobre a área de estudo, principalmente no que se refere a sondagem SPT (Figura 4), que leve a essa conclusão. Assim, o mais provável é que o 1º modo superior esteja mais excitado na banda de 9 a 15Hz e o modo fundamental no restante, sendo essa a interpretação adotada nesse estudo.



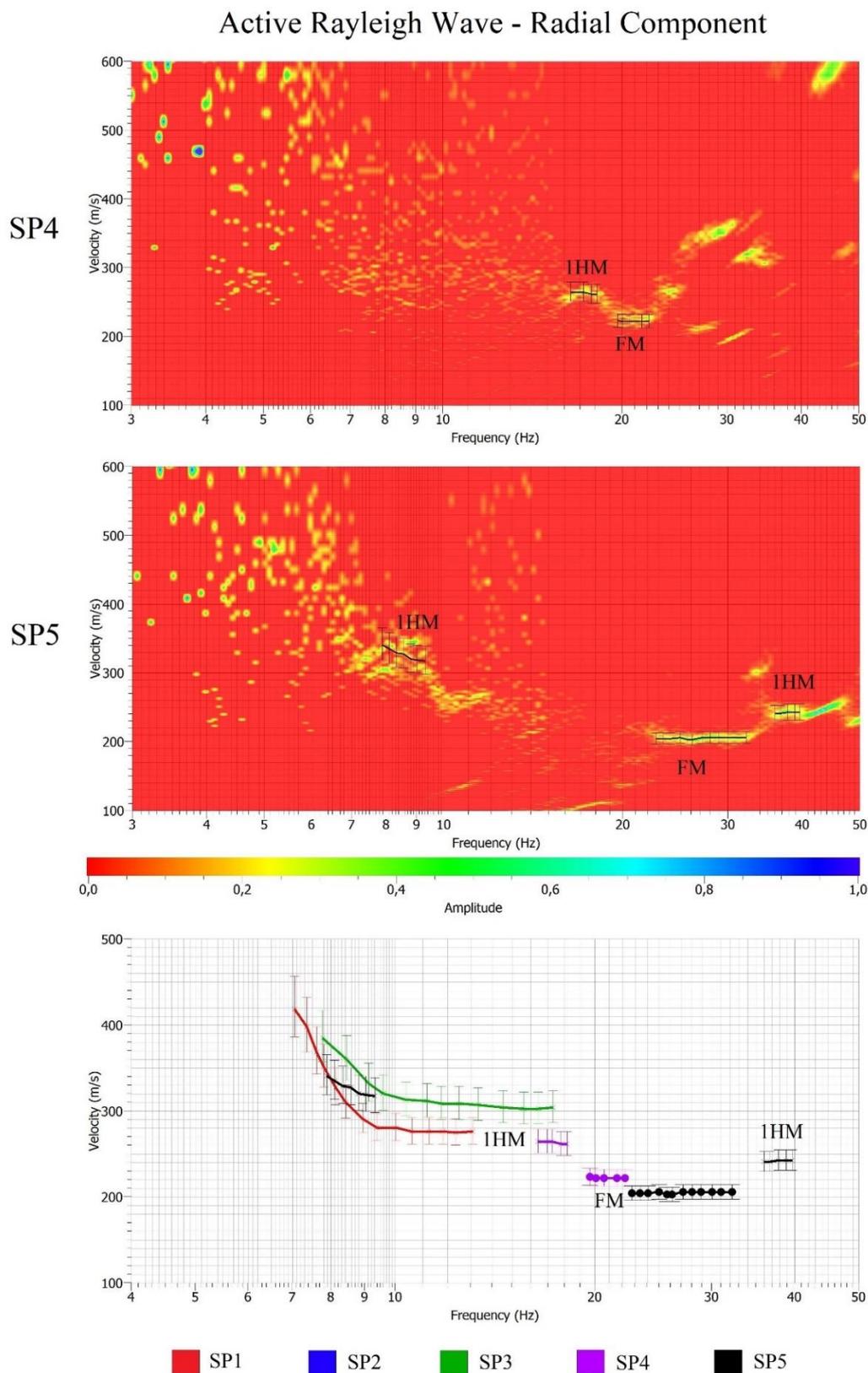
**Figura 44** - Espectros ( $V, f$ ) da componente vertical (ondas Rayleigh) do ensaio sísmico 2D obtidos pelas aquisições realizadas com a fonte compactador em diferentes posições (aquisições 2D-C-V-SP1, 2D-C-V-SP2 e 2D-C-V-SP3). Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1º modo superior.



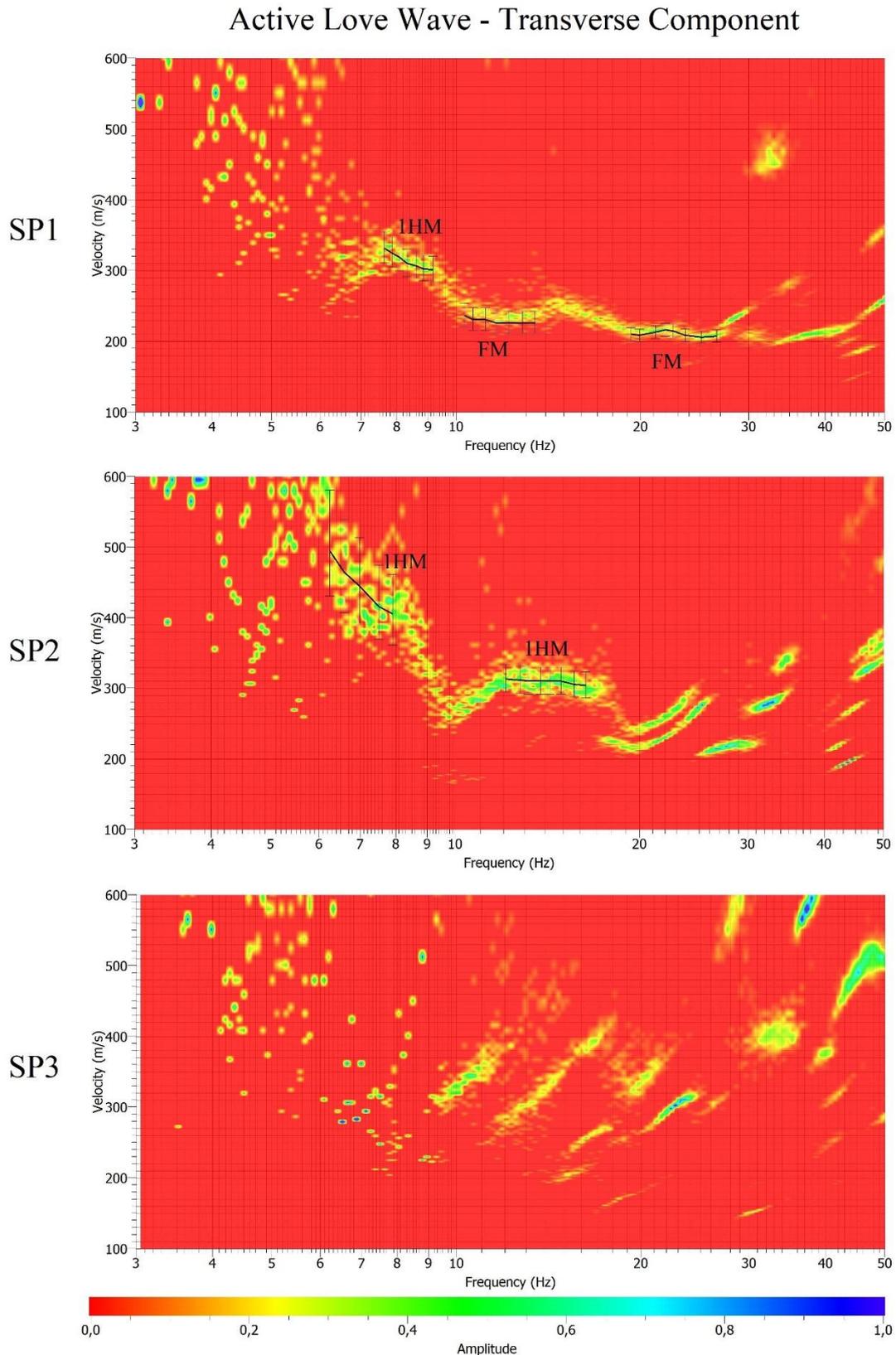
**Figura 45** - Espectros ( $V, f$ ) da componente vertical (ondas Rayleigh) do ensaio sísmico 2D obtidos pelas aquisições realizadas com a fonte compactador em diferentes posições (aquisições 2D-C-V-SP4 e 2D-C-V-SP5) (**imagem superior e central**) e gráfico ( $V, f$ ) com as curvas de dispersão interpretadas dos espectros da [Figura 44](#) e da presente figura (**imagem inferior**). Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1° modo superior.



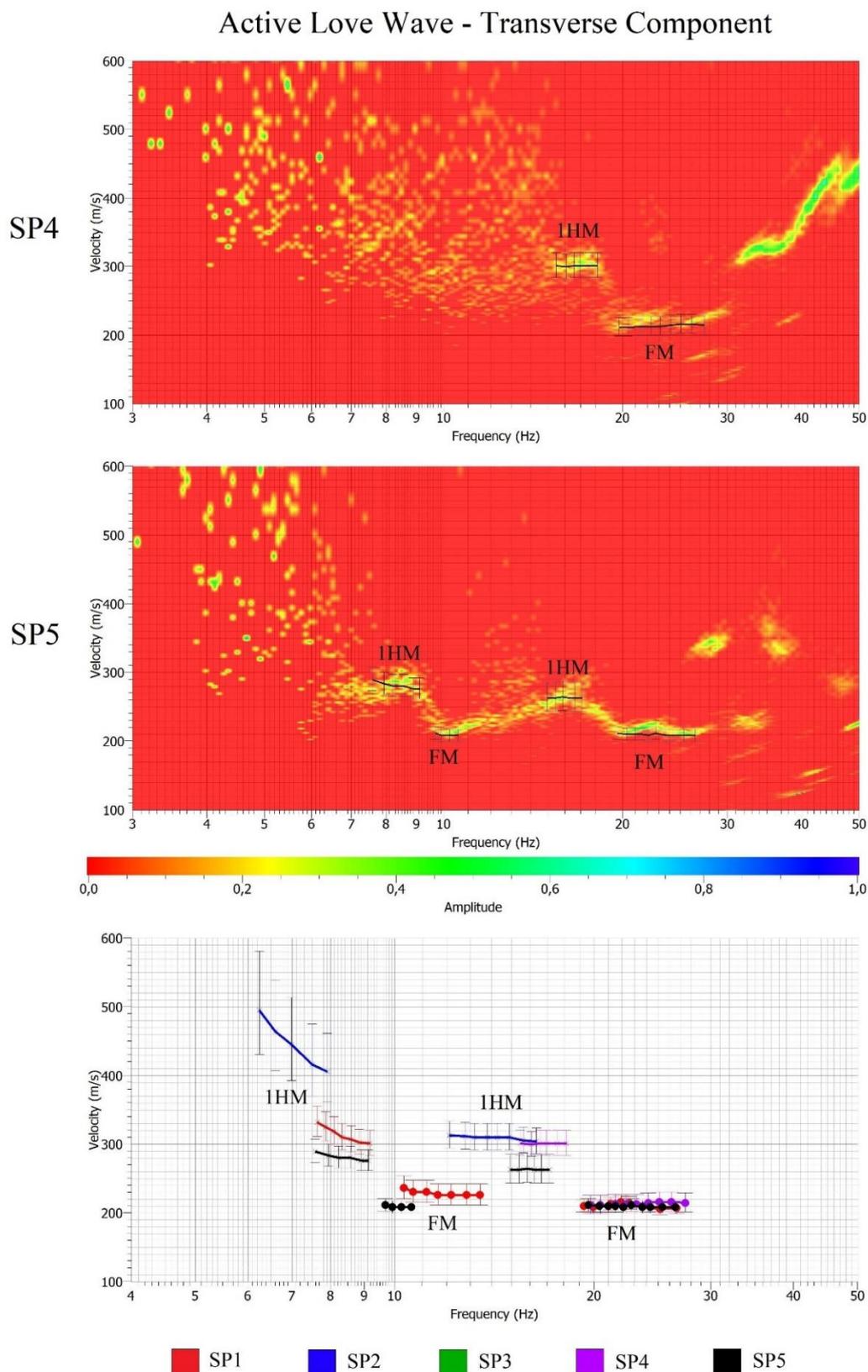
**Figura 46** - Espectros ( $V, f$ ) da componente radial (ondas Rayleigh) do ensaio sísmico 2D obtidos pelas aquisições realizadas com a fonte compactador em diferentes posições (aquisições 2D-C-V-SP1, 2D-C-V-SP2 e 2D-C-V-SP3). Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1° modo superior.



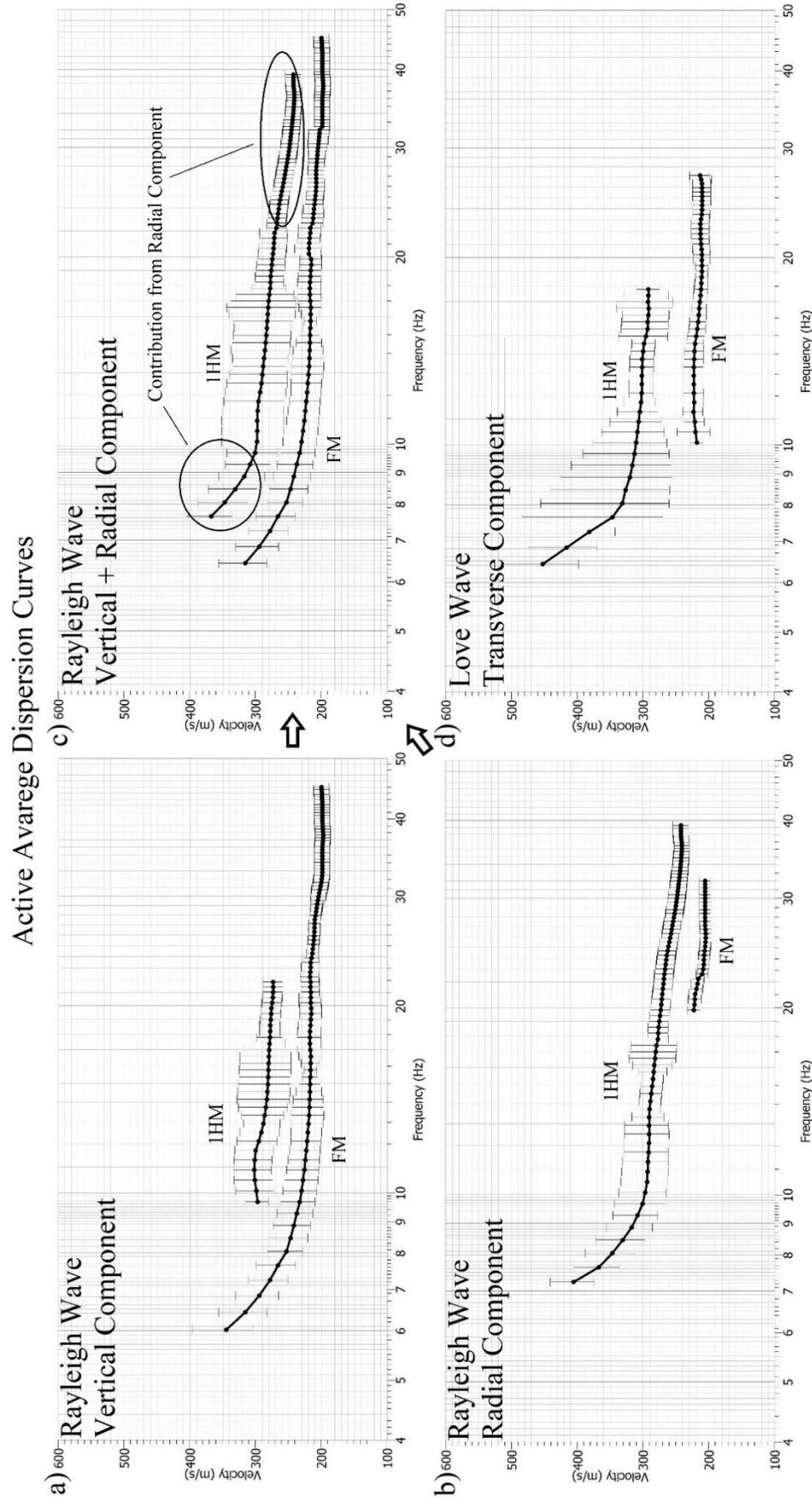
**Figura 47** - Espectros ( $V, f$ ) da componente radial (ondas Rayleigh) do ensaio sísmico 2D obtidos pelas aquisições realizadas com a fonte compactador em diferentes posições (aquisições 2D-C-V-SP4 e 2D-C-V-SP5) (**imagem superior e central**) e gráfico ( $V, f$ ) com as curvas de dispersão interpretadas dos espectros da [Figura 46](#) e da presente figura (**imagem inferior**). Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1° modo superior.



**Figura 48** - Espectros ( $V, f$ ) da componente transversal (ondas Love) do ensaio sísmico 2D obtidos pelas aquisições realizadas com a fonte compactador em diferentes posições (aquisições 2D-C-V-SP1, 2D-C-V-SP2 e 2D-C-V-SP3). Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1º modo superior.



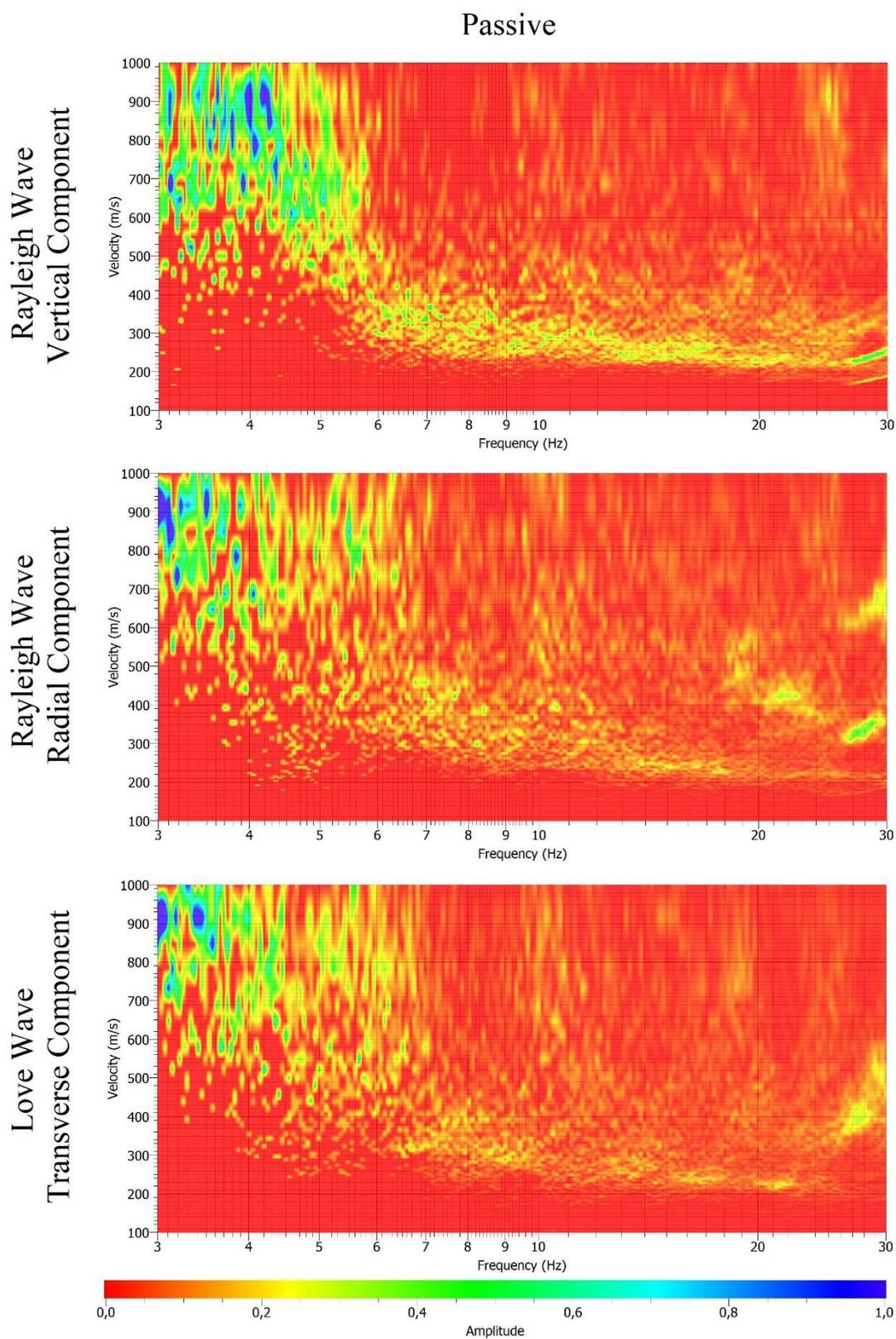
**Figura 49** - Na imagem de cima e do meio, espectros ( $V, f$ ) da componente transversal (ondas Love) do ensaio sísmico 2D obtidos pelas aquisições realizadas com a fonte compactador em diferentes posições (aquisições 2D-C-V-SP4 e 2D-C-V-SP5) (imagem superior e central) e gráfico ( $V, f$ ) com as curvas de dispersão interpretadas dos espectros da Figura 48 e da presente figura (imagem inferior). Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1° modo superior.



**Figura 50** - Gráficos ( $V, f$ ) das curvas de dispersão médias obtidas no ensaio sísmico 2D das aquisições com a fonte compactador em diferentes posições (aquisições 2D-C-V-SP1, 2D-C-V-SP2, 2D-C-V-SP3, 2D-C-V-SP4 e 2D-C-V-SP5). As curvas do gráfico (c) foram obtidas pelas composições e nova média das curvas dos gráficos (a) e (b). Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1° modo superior.

Das curvas de dispersão médias dos modos fundamental e 1° modo superior de cada componente, apresentadas na [Figura 50](#), as componentes vertical e radial, por serem ambas associadas à propagação das ondas Rayleigh, foram compostas através de uma média dos valores de velocidade nos intervalos de sobreposição, resultando no gráfico (c). Nota-se que a componente radial contribuiu para o aumento da banda de frequência do 1° modo superior. Dos 4 gráficos presentes na [Figura 50](#) as curvas de dispersão de três foram utilizadas na etapa de inversão: (a), (c) e (d).

Após as aquisições com fontes ativas foi realizada uma aquisição com fonte passiva (ruído ambiental) (2D-RA), que normalmente traz uma contribuição aos dados através do registro de frequências mais baixas. No entanto, isso não foi observado no experimento, provavelmente em razão da utilização de geofones de frequência natural de 10Hz, que trouxe uma limitação no registro das energias nas baixas frequências (seção [3.4.1.1.1](#)). O dado foi processado com a técnica *f-k beamforming* e os espectros ( $V, f$ ) de cada componente das ondas são apresentados na [Figura 51](#). Dos espectros obtidos, o único no qual seria possível alguma interpretação foi o da componente vertical (ondas Rayleigh) que, no entanto, apresentou o modo fundamental e o 1° modo superior indistinguíveis, e não contribuiria com a expansão da banda de frequência obtida pelos dados de ativa. Atribui-se a falta de definição das curvas de dispersão ao baixo tempo de aquisição utilizado (180s). Assim, os dados de passiva não foram utilizados no restante do estudo.



**Figura 51** - Espectros ( $V, f$ ) das três componentes do ensaio sísmico 2D obtidos pela aquisição 2D-RA realizada com fonte passiva (ruído ambiental).

### 4.1.3 INVERSÃO

Apesar das curvas de dispersão apresentarem valores de velocidade de fase aparentes, para que se possa inferir uma resolução vertical e profundidade máxima de investigação esperada, valores de mínimo e máximo comprimento de onda foram obtidos pela curva do modo fundamental da [Figura 50a](#) e das equações (7) e (8). Considerando  $f_{máx} \approx 45\text{Hz}$  e  $V_{mín} \approx 200\text{m/s}$  foi obtido  $\lambda_{mín} \approx 4,5\text{m}$  pela equação (7). Para  $f_{mín} \approx 6\text{Hz}$  e  $V_{máx} \approx 350\text{m/s}$  resultou  $\lambda_{máx} \approx 58\text{m}$  pela equação (8). Com o valor de  $\lambda_{mín}$  e pelas equações (7) e (9) se obteve  $Esp_{mín} \geq 2,35\text{m}$  e com o valor de  $\lambda_{máx}$  e as equações (8) e (10),  $z_{máx} \leq 29\text{m}$ . Com base nos valores obtidos se considera que o modelo inicial da inversão não deverá apresentar camadas com espessuras menores que 2,35m, e a profundidade do modelo deverá superar o valor de 29m.

Para a obtenção dos perfis  $V_S$  na etapa de inversão foi utilizado o software Dinver, também um software do pacote Geopsy ([GEOPSY PROJECT, 2005](#)). Para o modelo inicial do processo foram considerados os parâmetros descritos na [Tabela 4](#). Os parâmetros foram escolhidos com base nas informações da [Tabela 1](#) e da área de estudo, com velocidades de ondas P ( $V_P$ ) calculadas pela equação (6) através dos limites de valores de razão de Poisson ( $\nu$ ) e velocidades de ondas S ( $V_S$ ).

As curvas de dispersão utilizadas para inversão foram as dos gráficos (a), (c) e (d) da [Figura 50](#), ou seja, da componente vertical (ondas Rayleigh), vertical e radial (ondas Rayleigh) e transversal (ondas Love). Para efeito comparativo foram consideradas 6 inversões conforme [Tabela 5](#). Os resultados das inversões do ensaio sísmico 2D são apresentados na seção de resultados [5.1](#).

**Tabela 4** - Parâmetros do modelo inicial da inversão.

Nº da Camada	Profundidade [m]	Razão de Poisson ( $\nu$ )	Velocidade de onda P ( $V_P$ ) [m/s]	Velocidade de onda S ( $V_S$ ) [m/s]	Densidade ( $\mu$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]
1	0 - 7	0,15 - 0,35	Uniforme 130 - 450	Uniforme 80 - 200	Uniforme 1200 - 1800
2	7 - 13	0,35 - 0,49	Uniforme 170 - 1800	Uniforme 80 - 250	Uniforme 1500 - 2100
3	13 - 20	0,47 - 0,49	Uniforme $V_{P_3} > V_{P_2}$ 630 - 2900	Uniforme $V_{S_3} > V_{S_2}$ 150 - 400	Uniforme $\mu_3 > \mu_2$ 1500 - 2100
4	20 - 35	0,47 - 0,49	Uniforme $V_{P_4} > V_{P_3}$ 840 - 4280	Uniforme $V_{S_4} > V_{S_3}$ 200 - 600	Uniforme $\mu_4 > \mu_3$ 1500 - 2500
5	35 - 42	0,47 - 0,49	Uniforme $V_{P_5} > V_{P_4}$ 840 - 4280	Uniforme $V_{S_5} > V_{S_4}$ 200 - 600	Uniforme $\mu_5 > \mu_4$ 1500 - 2500
6	42 - $\infty$	0,20 - 0,25	Uniforme $V_{P_6} > V_{P_5}$ 2000 - 4500	Uniforme $V_{S_6} > V_{S_5}$ 1200 - 2500	Uniforme $\mu_6 > \mu_5$ 2100 - 2800

**Tabela 5** - Inversões realizadas no ensaio sísmico 2D.

	Modo Fundamental	Modo Fundamental + 1º Modo Superior
<b>Ondas Rayleigh</b>	Inversão (a)	Inversão (b)
<b>Componente Vertical</b>		
<b>Ondas Rayleigh</b>	Inversão (c)	Inversão (d)
<b>Componentes Vertical + Radial</b>		
<b>Ondas Rayleigh + Love</b>	Inversão (e)	Inversão (f)
<b>Componentes Vertical + Radial + Transversal</b>		

## 4.2 ENSAIO SÍSMICO 1D

Em setembro de 2017 foi realizado na área de estudo um ensaio sísmico com disposição linear de geofones de componente vertical. O principal objetivo desse ensaio consistiu em se avaliar a contribuição de dados adquiridos através da técnica *Passive Roadside MASW* aos dados obtidos por fontes ativas. Foi realizado um estudo comparativo entre as fontes marreta e compactador com a finalidade de se escolher a fonte ativa a ser utilizada para a caracterização da área. Possíveis efeitos de campo próximo e

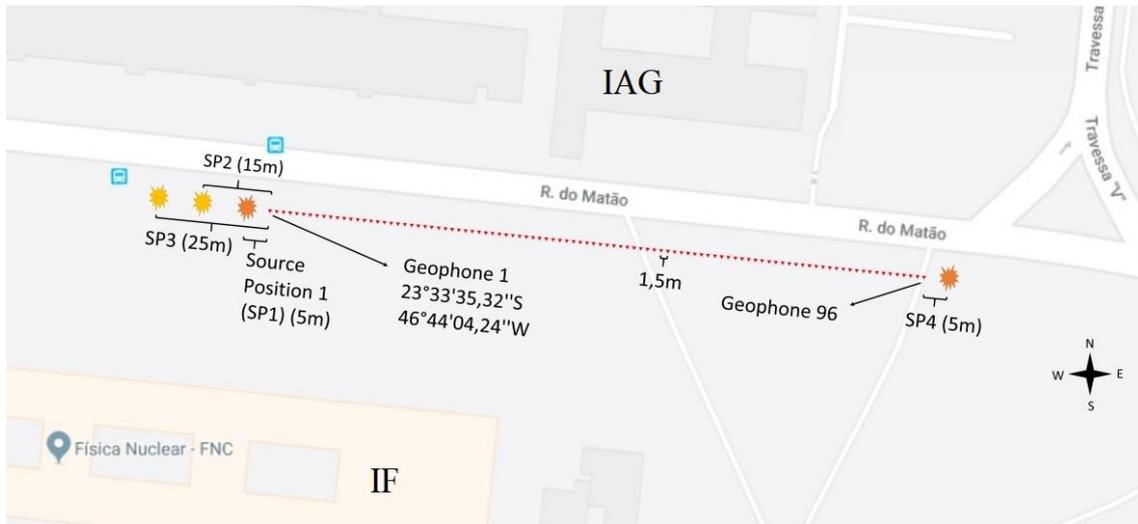
remoto (seção 3.4.1.5) foram verificados através de aquisições ativas com diferentes posições de tiro e examinada a inexistência de heterogeneidade lateral significativa (seção 3.4.1.6) na área para a viabilização do estudo.

#### 4.2.1 AQUISIÇÃO

O ensaio sísmico 1D visava à obtenção de resolução vertical de aproximadamente 1,5m e profundidade de investigação de pelo menos 45m, profundidade aproximada do embasamento. Assim, segundo a equação (9) seria necessário em espaçamento mínimo entre geofones igual ou menor a 1,5m, e pela equação (10) uma distância máxima entre geofones igual ou superior 90m. Foram adotados os seguintes parâmetros de campo e utilizados os seguintes equipamentos:

- **Sismógrafos:** 4 Geometrics Geode de 24 canais cada (Figura 17);
- **Geofones:** 96 geofones de componente vertical de 4,5Hz (Figura 24), modelo GS-11D da marca Geospace;
- **Espaçamento entre geofones:** constante de 1,5m;
- **Fontes Ativas:** marreta de 6kg e compactador de solo (Figura 19);
- **Base de impacto para a fonte marreta:** base metálica (Figura 21);
- **Fonte Passiva:** tráfego de veículos.

Os geofones foram dispostos linearmente e numerados de 1 a 96 conforme Figura 52, encontrando-se o geofone 1 nas coordenadas 23°33'35,32''S e 46°44'04,24''W.



**Figura 52** - Arranjo de campo do ensaio sísmico 1D.

Para as aquisições com fontes ativas foram estabelecidas 4 posições de tiro, de SP1 (*Source Position 1*) a SP4 (Figura 52). O *offset* mínimo para as posições SP1 e SP4 foi de 5m, e de 15 e 25m para as posições SP2 e SP3, respectivamente.

As aquisições realizadas no ensaio foram divididas em grupos conforme Tabela 6, onde também podem ser verificados os parâmetros de aquisição. Da mesma forma como no ensaio sísmico 2D as siglas utilizadas para nomear cada aquisição segue o padrão apresentado na seção 4.1.1.

**Tabela 6** - Aquisições do ensaio sísmico 1D.

Sigla da aquisição	1D-M-V-SP1-5	1D-C-V-SPX (podendo X variar de 1 a 4)	1D-PR
Fonte	Marreta	Compactador	<i>Passive Roadside</i>
Configuração geométrica do impacto sobre o solo ou sobre a base de impacto no solo	Vertical	Vertical	-
Posição da fonte	SP1	SP1, SP2, SP3 e SP4	Figura 54
Quantidade de empilhamento vertical	5	-	-
Intervalo de amostragem ( $\Delta t$ ) [ms]	1	1	1
Tempo de gravação ( $T$ ) [s]	2	60	70 (total de 5 aquisições)

A aquisição 1D-PR foi obtida através de 5 registros com tempos de gravação de 10 a 20s que foram concatenados de forma a gerar um registro total de 70s. Cada um dos 5 registros foi obtido durante a passagem de uma caminhonete Toyota Hilux do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) (Figura 53) pelo segmento caracterizado de verde na Figura 54. Durante a passagem por esse segmento da via o motorista da caminhonete executava movimentos seguidos de aceleração e frenagem para que ondas de maiores amplitudes fossem geradas. Além disso, há um quebra-molas (lombada) localizado aproximadamente no meio do segmento que também ajudou na geração das ondas sísmicas.



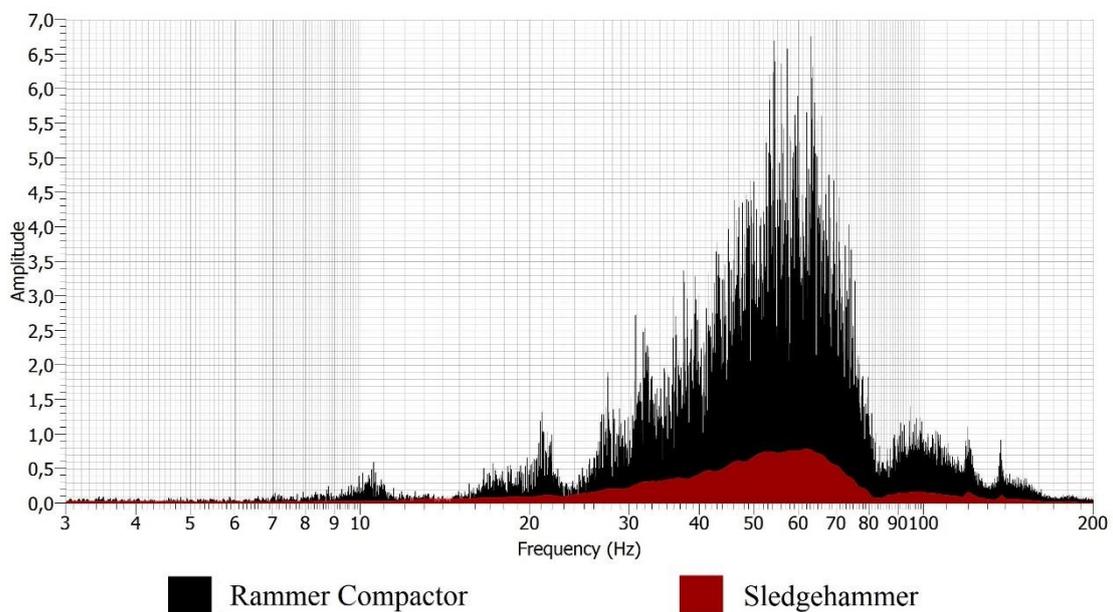
Figura 53 - Caminhonete Toyota Hilux utilizada na aquisição *Passive Roadside MASW*.



Figura 54 - Mapa do local da aquisição *Passive Roadside MASW* com posição dos lugares de geração de ondas e arranjo de geofones.

#### 4.2.2 PROCESSAMENTO

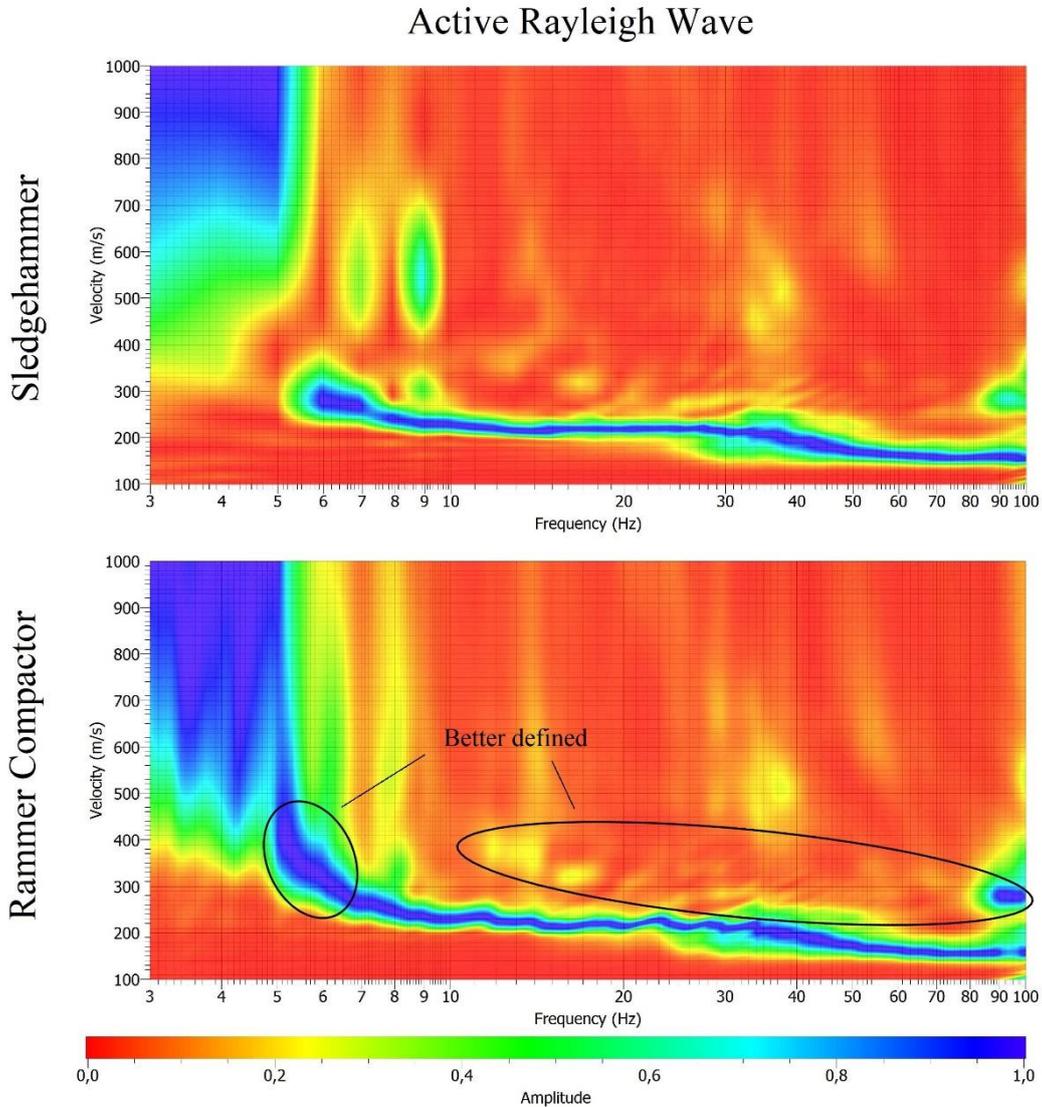
Na etapa de processamento foi utilizado o software Geopsy ([GEOPSY PROJECT, 2005](#)). Inicialmente foram avaliadas as duas fontes ativas disponíveis, uma marreta de 6kg e um compactador de solo, para uma ser utilizada como fonte ativa do ensaio sísmico 1D. O primeiro passo foi o da avaliação comparativa entre os espectros de amplitude dos sismogramas obtidos com o emprego das duas fontes ([Figura 55](#)). Para isso foram utilizadas as aquisições 1D-M-V-SP1-5 e 1D-C-V-SP1. Os filtros passa banda utilizados em todos os ensaios foram sempre os mesmos das bandas de frequência apresentadas em cada figura.



**Figura 55** - Espectros de amplitude da componente vertical (ondas Rayleigh) do geofone 1 (vertical de 4,5Hz) do ensaio sísmico 1D obtidos pelas aquisições 1D-M-V-SP1-5 (em marrom) e 1D-C-V-SP1 (em preto), com as fontes marreta e compactador, respectivamente.

Como esperado, a energia gerada pelo compactador foi maior do que a gerada pela marreta em toda a banda de frequência apresentada. Foi avaliado, então, o espectro ( $V, f$ ) de cada aquisição ([Figura 56](#)) obtido por processamento através da técnica *f-k transform* (seção 3.4.2.1). Nota-se que existe uma grande banda de frequência na qual não há uma diferença significativa entre ambos. No entanto, duas regiões do espectro obtido pela fonte compactador, destacadas na figura, mostram uma melhor definição. A primeira, apresenta uma melhor definição da curva de dispersão do modo fundamental em uma banda de frequência de 5 a 7Hz. A outra apresenta de forma um pouco mais clara o que

poderia ser interpretado como o 1º modo superior. Assim, a fonte compactador foi escolhida para servir como fonte ativa do ensaio.



**Figura 56** - Espectros  $(V, f)$  da componente vertical (ondas Rayleigh) do ensaio sísmico 1D obtidos pelas aquisições 1D-M-V-SP1-5 e 1D-C-V-SP1, com as fontes marreta e compactador, respectivamente.

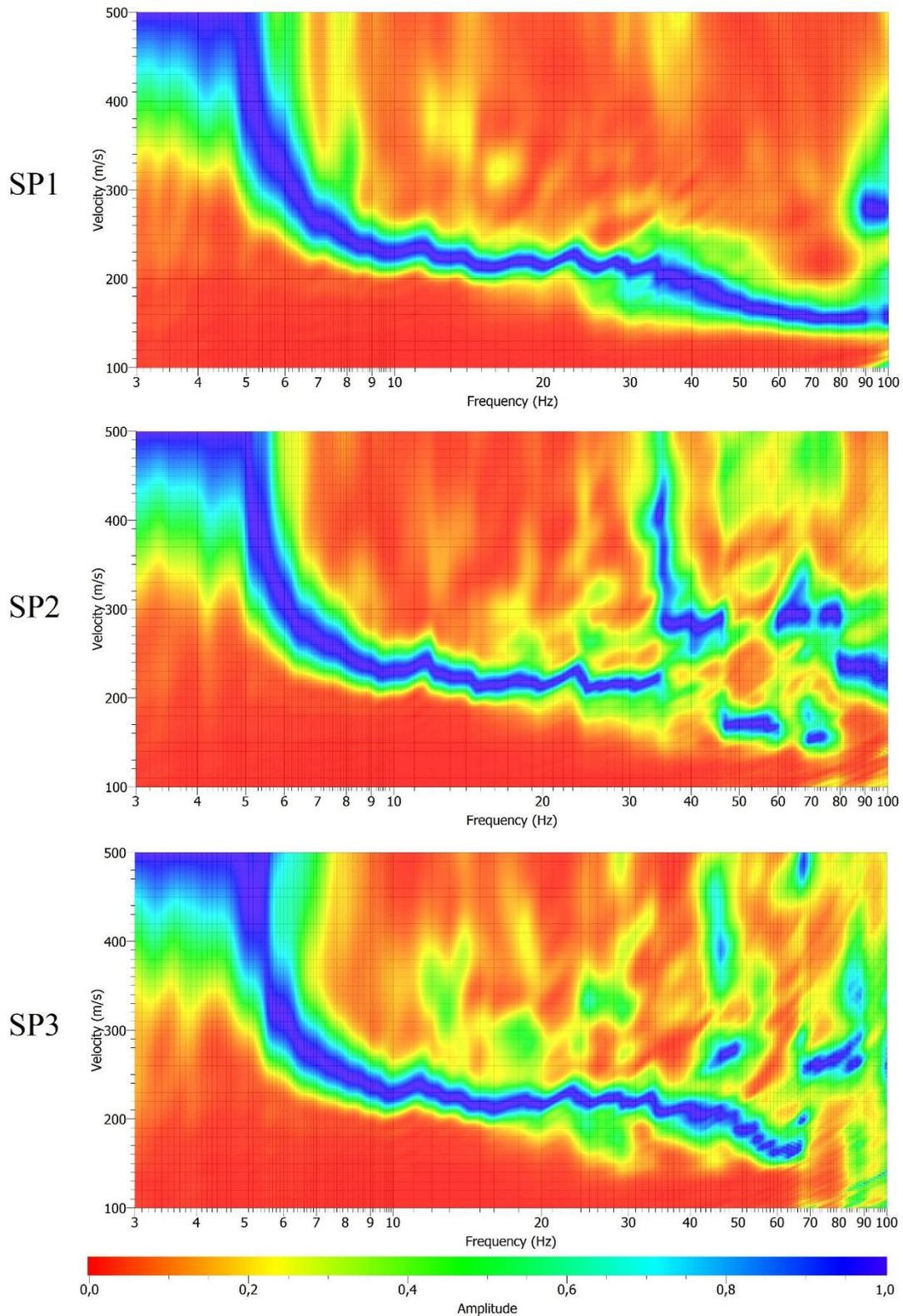
A etapa seguinte consistiu em se avaliar eventuais efeitos de campo próximo e remoto através de diferentes posições de tiro para que fosse obtida a melhor posição para a fonte. Três aquisições foram utilizadas: 1D-C-V-SP1, 1D-C-V-SP2 e 1D-C-V-SP3, respectivamente com *offsets* mínimos de 5, 15 e 25m. Foram gerados os espectros  $(V, f)$  através de processamento *f-k transform* e comparados (Figura 57). Nas baixas frequências, onde eventualmente ocorre o efeito de campo próximo, não se notou nenhuma diferença significativa nos espectros. Nas frequências acima de 35Hz, no

entanto, os espectros apresentam diferenças, o que poderia sugerir a ocorrência do efeito de campo remoto. Para avaliar tal suposição foram eliminados os últimos traços das aquisições 1D-C-V-SP2 e 1D-C-V-SP3 para que seus sismogramas passassem a ter o mesmo *offset* máximo da aquisição 1D-C-V-SP1. No entanto, nenhuma modificação foi notada nos espectros após um novo processamento e, assim, foi descartada a hipótese de efeito de campo remoto. Uma segunda hipótese levantada foi a de uma forte presença de ruído com frentes de ondas incidindo sobre o arranjo com diferentes ângulos. Essa hipótese, no entanto, não pode ser confirmada sem uma verificação de azimute por banda de frequência, impossível de ser realizada no presente ensaio. Optou-se pelo espectro da aquisição 1D-C-V-SP1 (primeiro espectro da [Figura 57](#)) de *offset* mínimo de 5m para extração da curva de dispersão.

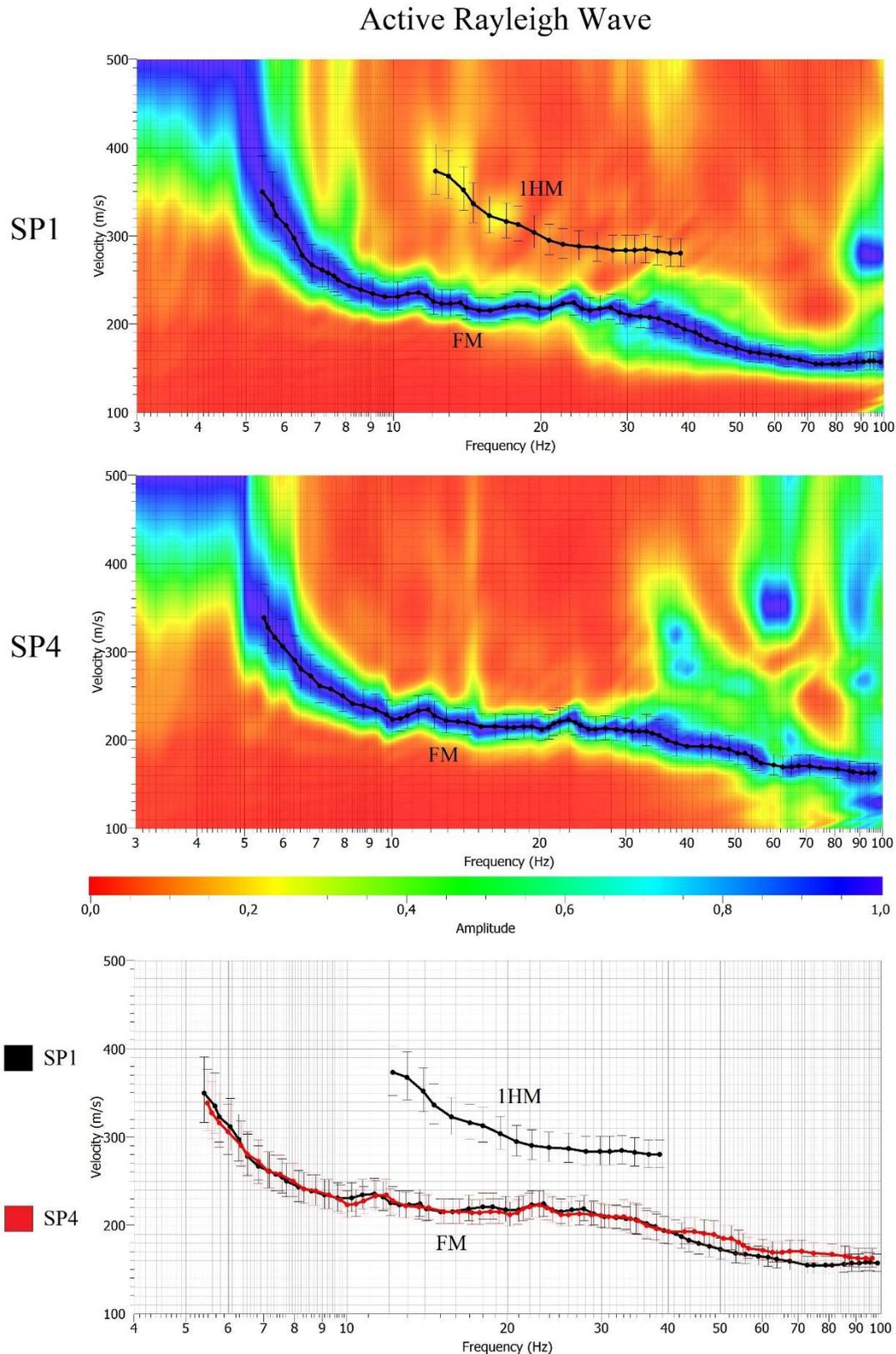
Antes, porém, foi realizada a verificação da inexistência de heterogeneidade lateral na área da linha de aquisição. Foi realizada uma aquisição na ponta oposta do arranjo, aquisição 1D-C-V-SP4, e comparada com a aquisição 1D-C-V-SP1 dos espectros ( $V, f$ ) ([Figura 58](#)). Os espectros são semelhantes em toda a banda de frequência e, assim, concluiu-se que não existe uma heterogeneidade lateral significativa na área. Foram extraídas em ambos os espectros as curvas de dispersão do modo fundamental, e no espectro da posição SP1, também a do 1º modo superior. Essa última, não tão visível, foi interpretada com o auxílio do resultado da aquisição *Passive Roadside* que será apresentado adiante. Embora ocorra um aumento de velocidade na curva do modo fundamental de 50 para 30 Hz, o emprego da escala logarítmica utilizada no eixo das frequências mostra esse aumento de forma exagerada.

As curvas interpretadas nos espectros são apresentadas em gráficos ( $V, f$ ) na [Figura 58](#), mostrando a convergência entre elas e, assim, corroborando a premissa da inexistência de heterogeneidade lateral significativa da área. Ao contrário do que foi feito no ensaio sísmico 2D, as curvas do gráfico ( $V, f$ ) não foram compostas e calculadas as médias, pois as duas curvas do modo fundamental já apresentavam grande semelhança. Em relação as aquisições com fontes ativas, somente as curvas interpretadas no espectro da posição SP1 (aquisição 1D-C-V-SP1) foram utilizadas na etapa de inversão.

## Active Rayleigh Wave

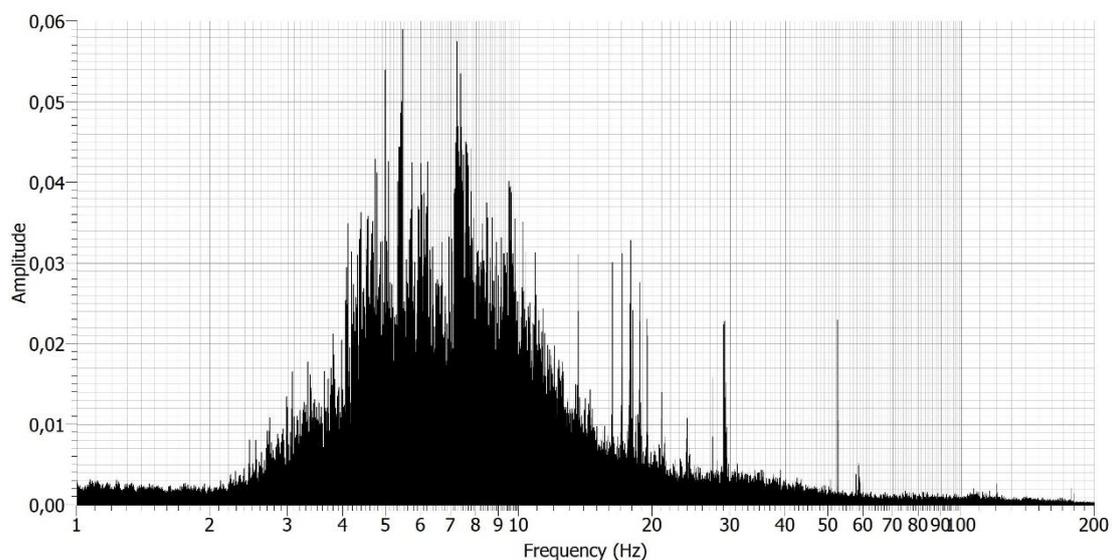


**Figura 57** - Espectros ( $V, f$ ) da componente vertical (ondas Rayleigh) do ensaio sísmico 1D obtidos das aquisições 1D-C-V-SP1, 1D-C-V-SP2 e 1D-C-V-SP3, com *offsets* mínimos de 5, 15 e 25m, respectivamente.



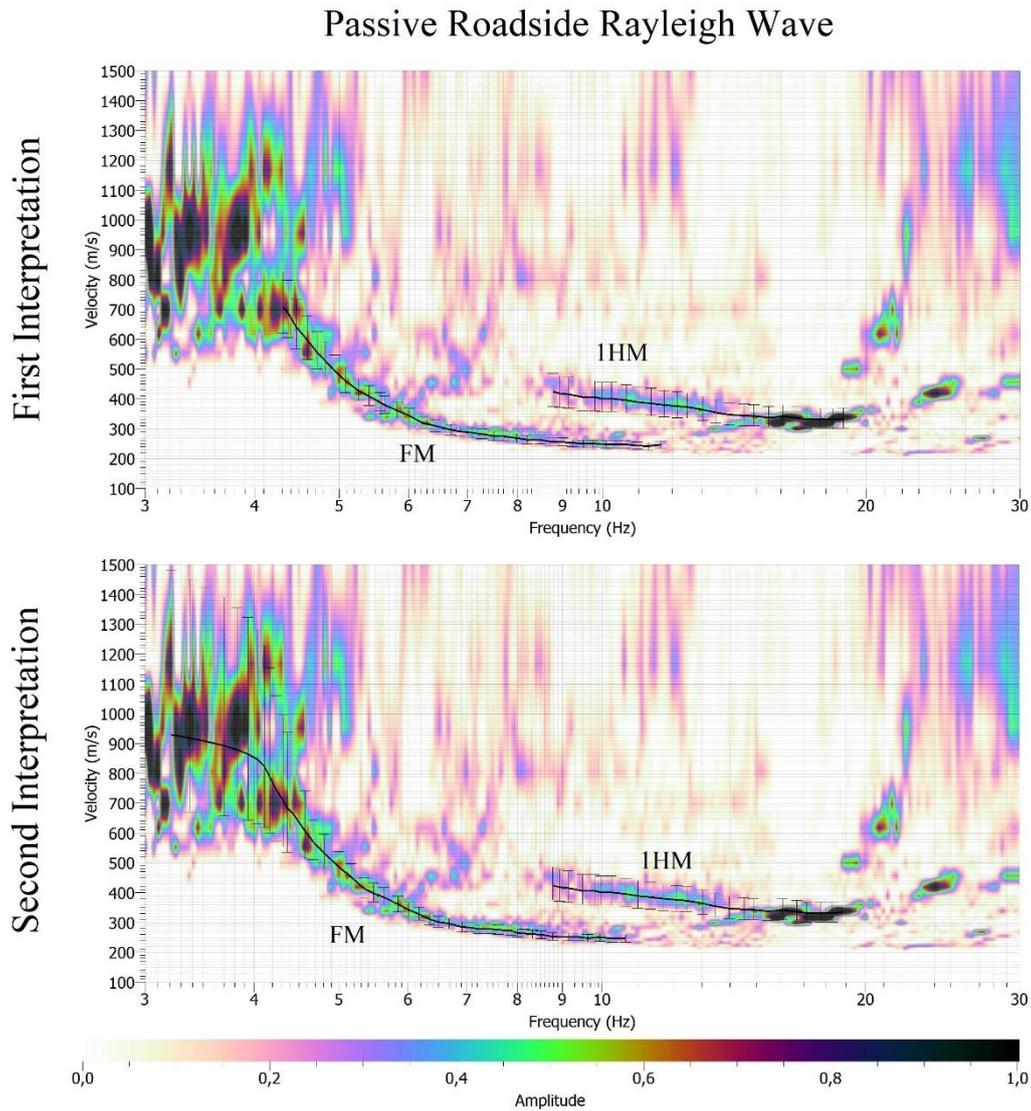
**Figura 58** - Espectros ( $V, f$ ) da componente vertical (ondas Rayleigh) do ensaio sísmico 1D obtidos pelas aquisições realizadas com a fonte compactador em lados opostos do arranjo com *offsets* mínimos de 5m (aquisições 1D-C-V-SP1 e 1D-C-V-SP4) (**imagens superior e central**) e gráfico ( $V, f$ ) com as curvas de dispersão interpretadas nos espectros da própria figura (**imagem inferior**). Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1° modo superior.

Da mesma forma como ocorre em aquisições passivas de ruído ambiental a técnica *Passive Roadside MASW* tem como propósito trazer informações adicionais aos dados de ativa através do registro de frequências mais baixas, aumentando a profundidade de investigação, e foi essa a motivação para se realizar a aquisição 1D-PR no estudo do ensaio sísmico 1D. A [Figura 59](#) apresenta o espectro de amplitude da aquisição 1D-PR realizada através da técnica *Passive Roadside*. Trata-se da sobreposição dos espectros de todos os traços sísmicos da aquisição. No gráfico se pode identificar que a energia se concentra na banda de frequência de 3 a 20Hz aproximadamente.



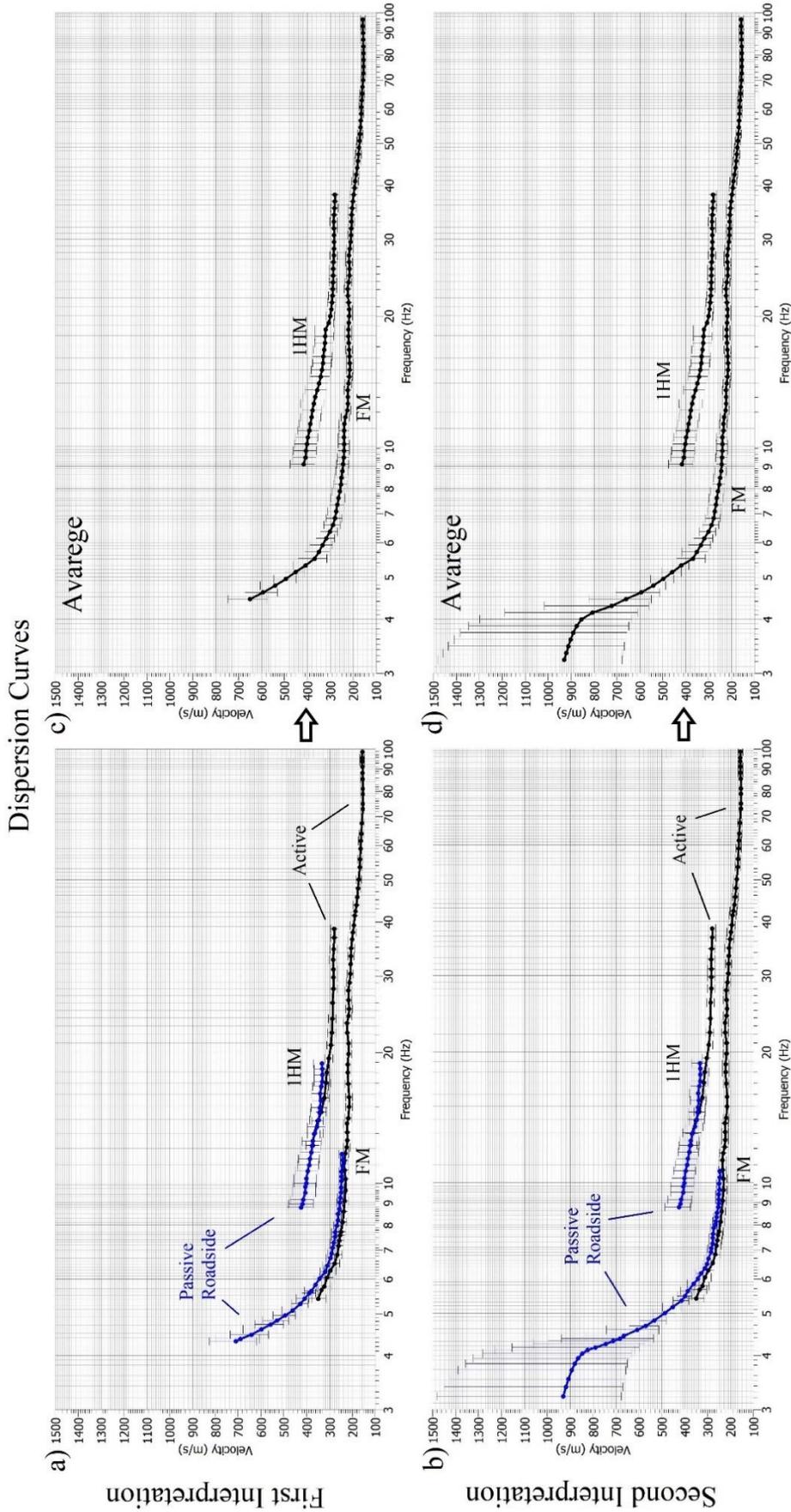
**Figura 59** - Espectros de amplitude de todos os traços sísmicos da componente vertical (ondas Rayleigh) (geofones verticais de 4,5Hz) do ensaio sísmico 1D aquisição 1D-PR.

No espectro  $(V, f)$  da aquisição 1D-PR ([Figura 60](#)) foi possível identificar as curvas de dispersão do modo fundamental e do 1º modo superior. A [Figura 60](#) apresenta duas interpretações possíveis. Na primeira, a curva de dispersão do modo fundamental tem início apenas em 4,2Hz. Na segunda interpretação, mesmo com uma grande incerteza, se considerou que a energia do modo fundamental também está presente na banda de frequência de 3,2 a 4,2Hz. As curvas de ambas as interpretações foram utilizadas na etapa de inversão e são apresentadas na [Figura 61](#).



**Figura 60** – Espectro  $(V, f)$  da aquisição 1D-PR obtida através da técnica *Passive Roadside* com duas interpretações distintas para a banda de frequência de 3,2 a 4,2Hz. **Na imagem superior** a curva do modo fundamental tem início em 4,2Hz e **na imagem inferior** em 3,2Hz. Na figura FM significa modo fundamental e 1HM 1° modo superior.

Na **Figura 61** (a) e (b) são apresentadas as curvas interpretadas das aquisições 1D-C-V-SP1 e 1D-PR, ativa com compactador e *Passive Roadside*, respectivamente. No gráfico (a) a curva do modo fundamental de origem passiva é a da primeira interpretação e no gráfico (b) a da segunda. As curvas de cada modo dos gráficos (a) e (b) foram compostas através do cálculo das médias nas regiões de sobreposição e os resultados são apresentados nos gráficos (c) e (d), respectivamente.



**Figura 61** – Gráficos ( $V, f$ ) das curvas de dispersão obtidas no ensaio sísmico 2D das aquisições ativa, com a fonte compactador (aquisição C-V-SP1), e passiva, com a técnica *Passive Roadside* MASW (aquisição ID-PR). Nos gráficos (a) e (b) constam as curvas das aquisições ativa (em preto) e passiva (em azul), apresentando o gráfico (a) a primeira interpretação e o gráfico (b) a segunda. Os gráficos (c) e (d) apresentam as composições das curvas de (a) e (b), respectivamente, obtidas por cálculo de médias das regiões de sobreposição das curvas. Na figura FM significa modo fundamental e IHM 1° modo superior.

Na etapa de inversão foram utilizadas as curvas da aquisição ativa (C-V-SP1) e as apresentadas nos gráficos (c) e (d) da [Figura 61](#).

### 4.2.3 INVERSÃO

Adotou-se aqui o mesmo procedimento da seção 4.1.3 do ensaio sísmico 2D para se inferir a resolução vertical e profundidade máxima de investigação esperada. Considerou-se o modo fundamental da curva de dispersão da [Figura 61c](#) e se assumiu  $f_{máx} \approx 98\text{Hz}$  e  $V_{mín} \approx 160\text{m/s}$  resultando  $\lambda_{mín} \approx 1,63\text{m}$  pela equação (7). Para  $f_{mín} \approx 4,4\text{Hz}$  e  $V_{máx} \approx 650\text{m/s}$  se obteve  $\lambda_{máx} \approx 148\text{m}$  pela equação (8). Com o valor de  $\lambda_{mín}$  e pelas equações (7) e (9) foi obtido  $Esp_{mín} \geq 0,82\text{m}$  e com  $\lambda_{máx}$  e as equações (8) e (10),  $z_{máx} \leq 92\text{m}$ . Com base nos valores obtidos se considera que o modelo inicial da inversão não deverá apresentar camadas com espessuras menores que 0,82m, e a profundidade do modelo deverá superar o valor de 92m. No entanto, foram feitos testes de inversão com modelos iniciais com profundidades até 102m que mostravam que para profundidades maiores que 40m os resultados divergiam demasiadamente, mostrando que a profundidade máxima de investigação era na verdade bem menor. Assim, foi utilizado para apresentação dos resultados de inversão deste ensaio o mesmo modelo inicial de inversão do ensaio sísmico 2D com parâmetros descritos na [Tabela 4](#), visto que a área de estudo não mudou. O software Dinver ([GEOPSY PROJECT, 2005](#)) foi o utilizado na etapa de inversão.

As curvas de dispersão utilizadas na etapa de inversão foram as de ativa, presentes tanto no gráfico (a) como no gráfico (b) da [Figura 61](#) (aquisição C-V-SP1), e as curvas dos gráficos (c) e (d). Para efeito comparativo foram consideradas 6 inversões conforme [Figura 63](#). Os resultados das inversões do ensaio sísmico 1D são apresentados na seção de resultados 5.2.

**Tabela 7** - Inversões realizadas no ensaio sísmico 1D.

	<b>Modo Fundamental</b>	<b>Modo Fundamental + 1° Modo Superior</b>
<b>Fonte Ativa (Compactador)</b>	Inversão (a)	Inversão (b)
<b>Fontes Ativa + Passive Roadside (Interpretação 1)</b>	Inversão (c)	Inversão (d)
<b>Fontes Ativa + Passive Roadside (Interpretação 2)</b>	Inversão (e)	Inversão (f)



## CAPÍTULO 5 RESULTADOS

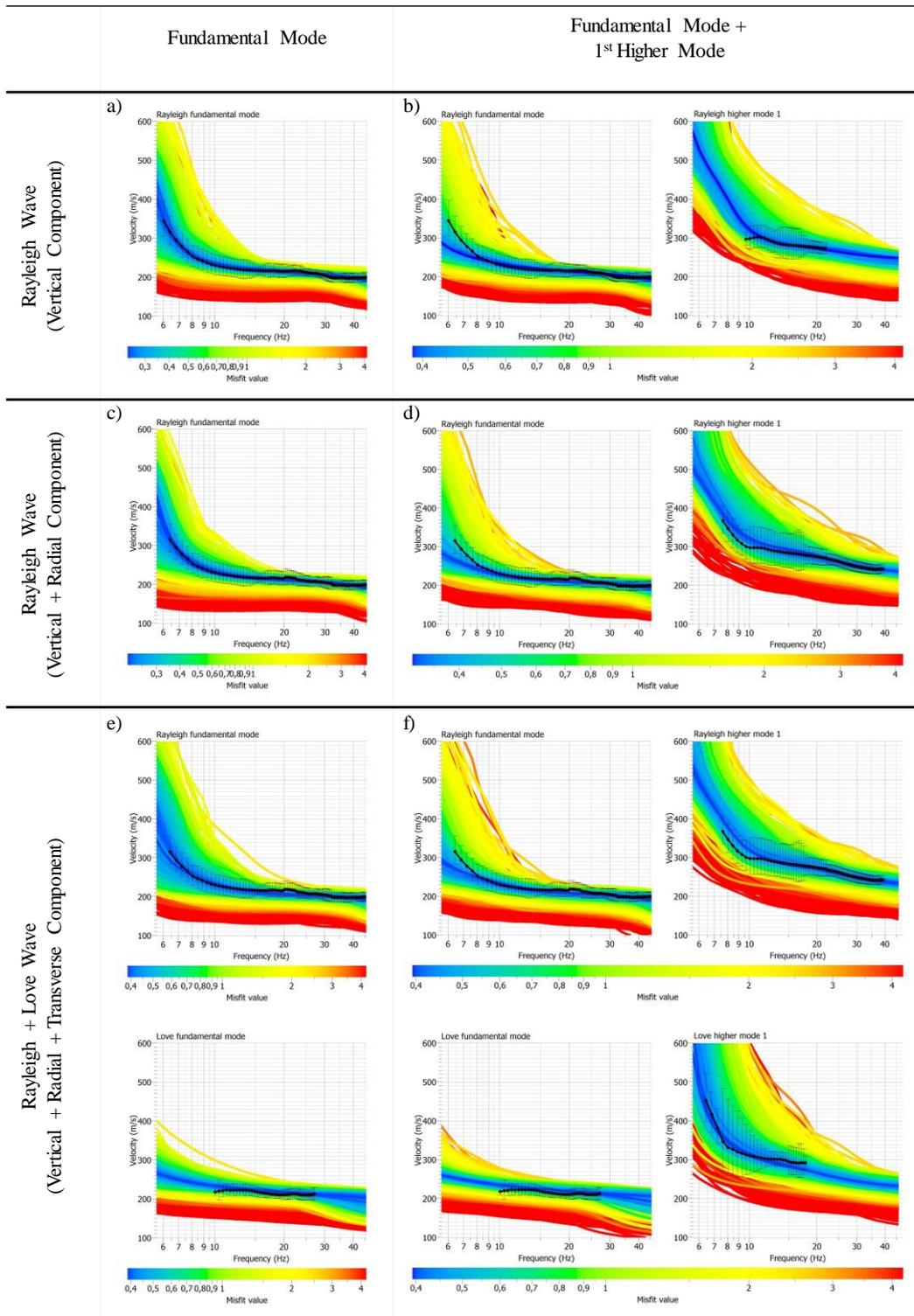
---

---

### 5.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO SÍSMICO 2D

Na [Figura 62](#) são apresentados os gráficos  $(V, f)$  das inversões descritas na [Tabela 5](#) onde são exibidas as curvas experimentais acompanhadas das curvas modeladas com diferentes cores, as quais se relacionam com os valores de *misfit* (desajuste). Todas as inversões resultaram em valores mínimos de *misfit* entre 0,2 e 0,4, que significam bons ajustes. Pequenos desajustes ocorrerem nas frequências mais baixas da curva do modo fundamental quando realizada a inversão conjunta com a curva do 1° modo superior (inversões (b), (d) e (f)), com a geração de modelos com velocidades menores. Nota-se, através dos modelos com melhores ajustes das inversões com a inclusão da curva do 1° modo superior (inversões (b) e (d)), que a contribuição da componente radial, no que se refere ao aumento da banda de frequência, contribuiu para que fossem gerados modelos com velocidades menores tanto na banda de frequência baixa quanto alta. Com a introdução da componente transversal (ondas Love) verifica-se uma pequena diminuição nas velocidades das menores frequências do modo fundamental na comparação entre as inversões (c) e (e). Entre as inversões (d) e (f) não se nota nenhuma mudança significativa nos modelos do modo fundamental, mas na inversão (f) há um pequeno aumento nas velocidades das frequências baixas do 1° modo superior da onda Rayleigh.

Na [Figura 63](#) são apresentados os perfis  $V_S$  gerados pelas inversões da [Tabela 5](#). Vale ressaltar que um pequeno valor de *misfit* não representa necessariamente o modelo de velocidade mais verossímil para a área estudada. É necessário que o intérprete analise os perfis modelados como um todo e em conjunto com as informações disponíveis da geologia local. Os perfis (b), (d) e (f), que foram considerados os melhores resultados por motivos que serão discutidos adiante, também apresentam em preto, para efeito de comparação, o perfil de velocidade da [Figura 5](#), convertido dos valores NSPT da sondagem mista da área de estudo através da relação empírica apresentada no [Apêndice C](#). A seta ao final do perfil em preto representa a profundidade a partir da qual o grau de compactação do solo passou a ser significativamente maior e não foi mais possível a conversão de valores NSPT para  $V_S$ .



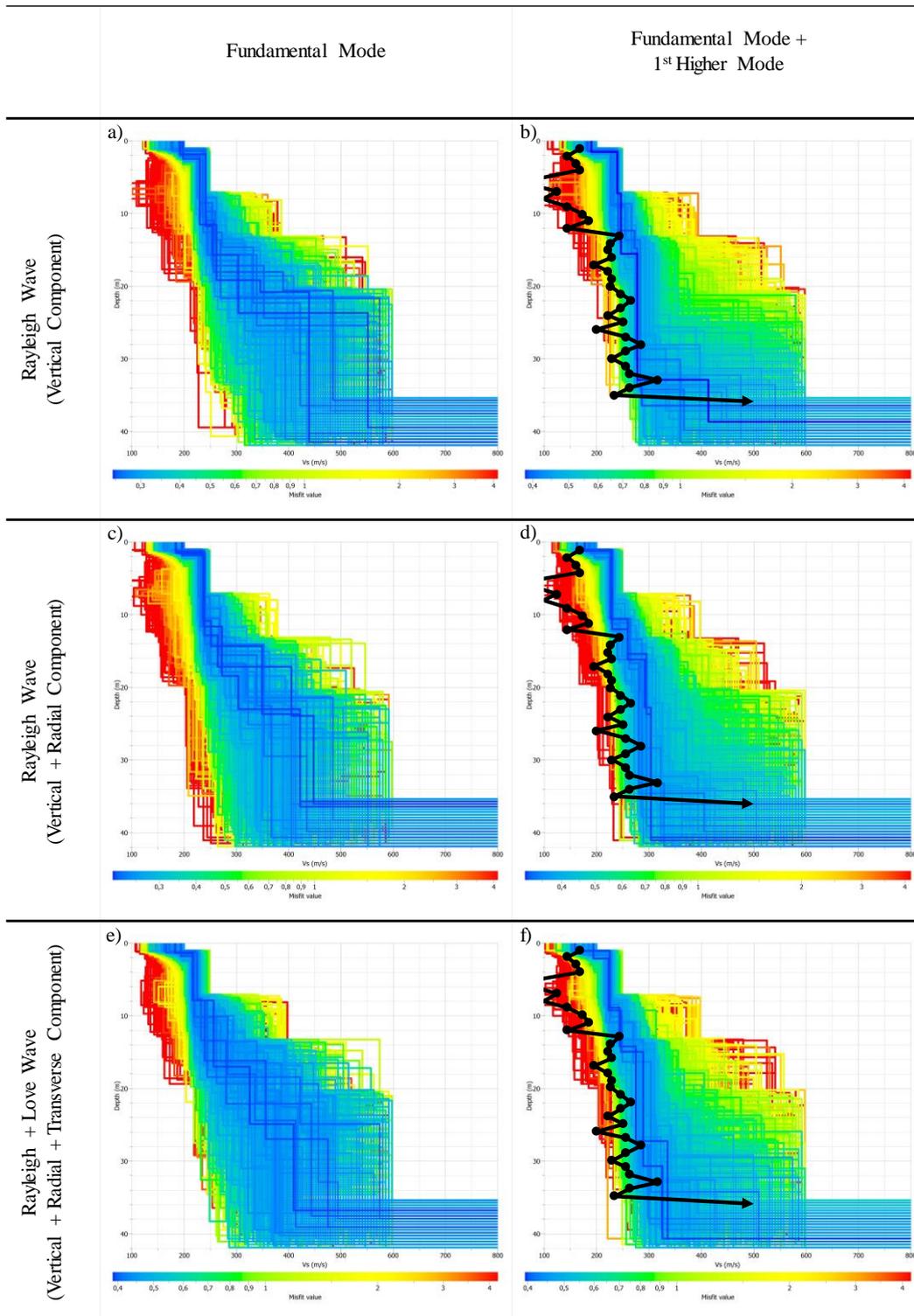
**Figura 62** - Gráficos  $(V, f)$  das curvas de dispersão experimentais acompanhadas das curvas modeladas pelas inversões da Tabela 5, onde a escala de cores representa valores de *misfit* (desajuste). Essa figura tem como referência o ensaio sísmico 2D.

Na avaliação geral dos perfis modelados levou-se em consideração a convergência entre os modelos com os melhores ajustes, que na escala de cor utilizada são aqueles em tons em azul. Quando os perfis começam a apresentar uma grande ambiguidade torna-se

difícil avaliar  $V_S$  e este pode ser um critério para assumir a máxima profundidade de investigação alcançada pelo método. No entanto, esse é um critério subjetivo. Como pode ser observado em todos os perfis, mesmo após a existência da divergência mencionada, há um abrupto aumento de velocidade a partir da profundidade de 35m condizente com o aumento significativo do grau de compactação do solo apresentado pelo ensaio SPT (Figura 4). Em uma avaliação geral dos perfis gerados merece destaque o fato das inversões com a inclusão da curva do 1º modo superior (inversões (b), (d) e (f)) apresentarem perfis mais convergentes. Observa-se apenas pequenas melhoras em termos de convergência dos modelos quando são utilizadas as informações da componente radial (ondas Rayleigh) e transversal (ondas Love).

Ao se analisar a concordância entre o perfil  $V_S$  - obtido de valores NSPT (em preto) - com os perfis gerados pelas inversões, verifica-se que o perfil em preto apresenta sistematicamente valores menores de velocidade. No entanto, considerando as incertezas envolvidas, que não estão presentes em forma de barras de erro, pode-se considerar que os modelos mais bem ajustados das inversões (b), (d) e (f) apresentam boa convergência com o modelo derivado dos dados NSPT da área de estudo, com exceção dos primeiros metros de profundidade. A divergência nos primeiros metros pode ser justificada pela presença de uma maior heterogeneidade na subsuperfície mais rasa e pelo fato da sondagem SPT fornecer informação pontual, enquanto o ensaio MASW fornece valores médios.

Conclui-se que melhoras significativas foram obtidas nas inversões conjuntas com a utilização de curvas de dispersão do 1º modo superior com as curvas do modo fundamental. A incorporação de informações da componente radial (ondas Rayleigh) e transversal (ondas Love) aos dados da componente vertical (ondas Rayleigh) não produziu melhores resultados. Em todas as inversões o método foi sensível e preciso na delimitação da profundidade na qual ocorre um aumento significativo de compactação do solo. O ensaio com fonte passiva não foi utilizado no estudo pela falta de qualidade do espectro  $(V, f)$  que impossibilitou as interpretações das curvas de dispersão, provavelmente pelo pouco tempo de aquisição.



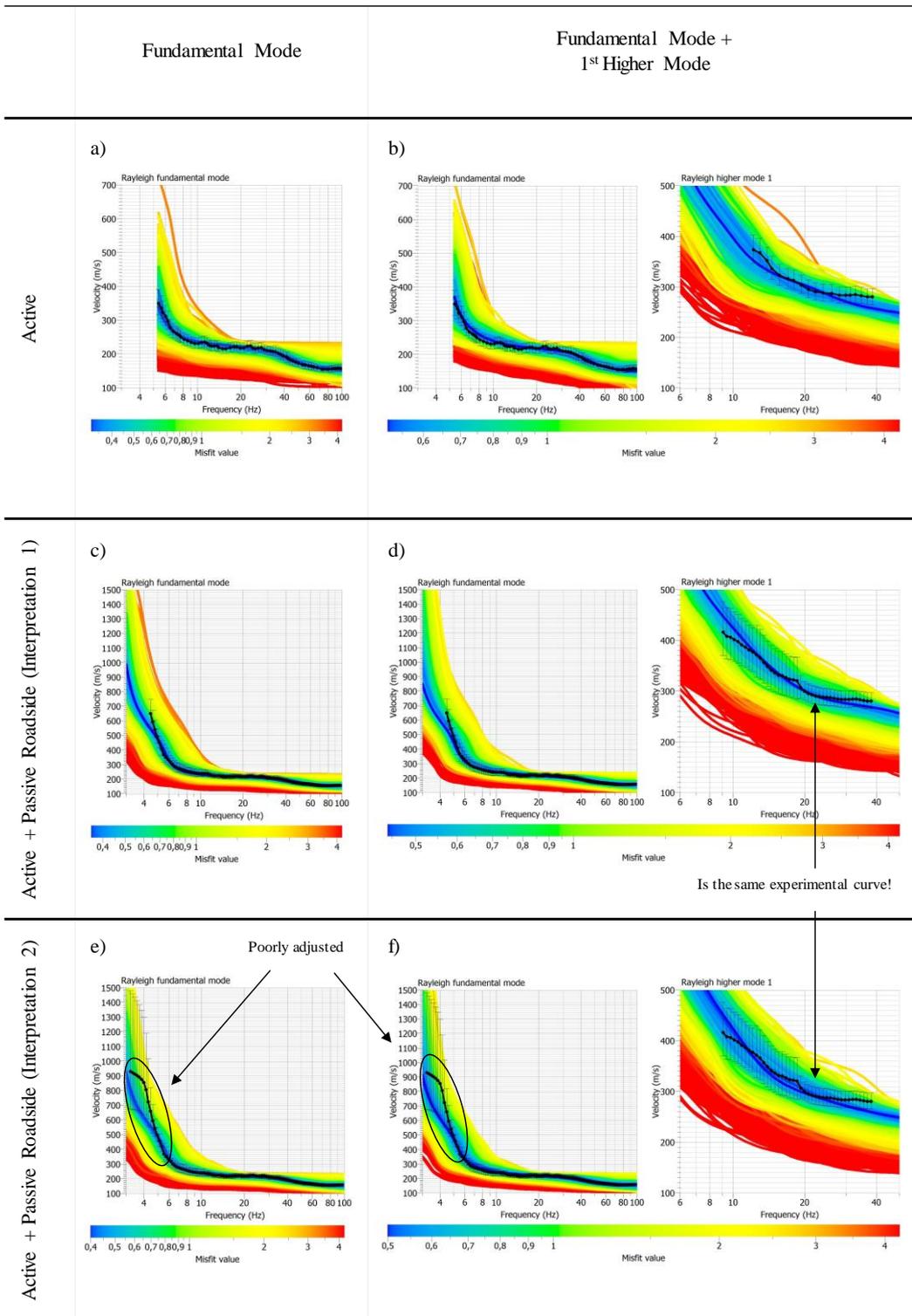
**Figura 63** - Perfis de velocidade de ondas S ( $V_S$ ) obtidos pelas inversões da Tabela 5. Diferentes cores representam modelos com diferentes valores de *misfit* (desajuste). As inversões (b), (d) e (f) exibem o perfil  $V_S$  obtido por conversão dos valores NSPT da sondagem da área de estudo (Figura 5) através de equação empírica. Essa figura tem como referência o ensaio sísmico 2D.

## 5.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO SÍSMICO 1D

Na [Figura 64](#) são apresentados os gráficos  $(V, f)$  das inversões descritas na [Tabela 7](#) onde são exibidas as curvas experimentais acompanhadas das curvas modeladas com valores de *misfit* (desajuste). Todas as inversões geraram modelos com bons ajustes apresentando valores mínimos de *misfit* entre 0,3 e 0,5. Não foram notadas diferenças entre os modelos gerados para o modo fundamental comparando-se (a) e (b). Como esperado, a introdução de dados de passiva, com o aumento da banda de frequência tanto para o modo fundamental como para o 1º modo superior, permitiu que as inversões gerassem modelos também com maiores bandas de frequência como pode ser notado pela comparação do modo fundamental em (a) e (b) com (c) e (d). Ao se comparar as interpretações 1 e 2, (c) e (d) com (e) e (f), percebe-se na interpretação 2 um desajuste significativo nas baixas frequências do modo fundamental em relação a curva experimental e os modelos gerados. Assim, se considerou como mais apropriada a inversão da curva da interpretação 1.

Na [Figura 65](#) são apresentados os perfis  $V_S$  gerados pelas inversões mencionadas na [Tabela 7](#). Da mesma forma como foi exposto na discussão do ensaio sísmico 2D, deve-se analisar conjuntamente os perfis modelados e, por isso, são apresentados todos os modelos gerados pela inversão.

Os perfis (b) e (d) foram considerados melhores por apresentarem os modelos mais bem ajustados e convergentes. Por isso, essas inversões são acompanhadas, para efeito de comparação, do perfil de velocidade da [Figura 5](#), em preto, convertido dos valores NSPT. Novamente, a seta ao final do perfil em preto representa a profundidade a partir da qual o grau de compactação do solo passou a ser significativamente maior e não foi mais possível a conversão de valores NSPT para  $V_S$ .

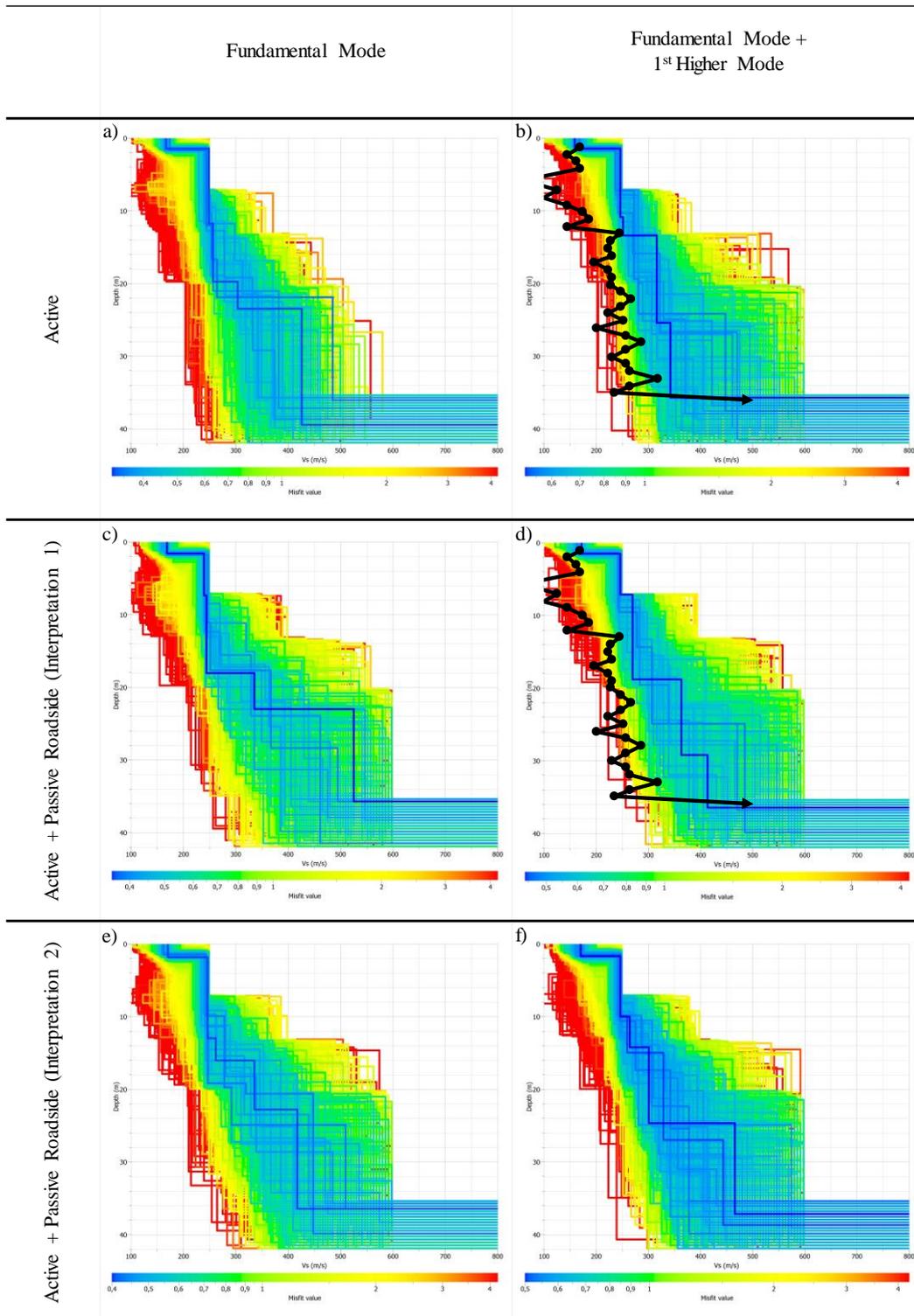


**Figura 64** - Gráficos  $(V, f)$  das curvas de dispersão experimentais acompanhadas das curvas modeladas pelas inversões da Tabela 7, onde a escala de cores representa valores de *misfit* (desajuste). Essa figura tem como referência o ensaio sísmico 1D.

Todas as inversões mostraram-se sensíveis na delimitação da profundidade a partir da qual o grau de compactação do solo passa a ser significativamente maior, ou seja, 35m. Neste ensaio a utilização do 1º modo superior também propiciou uma melhora nos modelos gerados, apesar dessa melhora não ter sido tão relevante como se deu com os dados do ensaio 2D. A utilização dos dados de passiva obtidos pela técnica *Passive Roadside* MASW não gerou uma melhora na convergência dos modelos nem uma maior profundidade de investigação. No entanto, os dados de passiva tiveram um importante papel na interpretação do 1º modo superior não só no espectro  $(V, f)$  passivo, mas também no ativo. Como o 1º modo superior se apresentou claramente no espectro  $(V, f)$  passivo (Figura 60) essa visualização ajudou na identificação do 1º modo superior no espectro da ativa (Figura 58).

Em relação à concordância entre o perfil  $V_S$  obtido a partir dos dados NSPT e os modelos mais bem ajustados das inversões (b) e (d) cabe aqui a mesma discussão realizada anteriormente (5.1).

Conclui-se do ensaio sísmico 1D que, apesar de pequena, a contribuição da inversão conjunta do 1º modo superior com o modo fundamental é a mais relevante, propiciando melhoras na convergência dos modelos gerados. Não houve melhora na profundidade de investigação e na resolução dos perfis através da introdução dos dados de passiva obtidos pela técnica *Passive Roadside* MASW. No entanto, os dados de passiva desempenharam um papel importante na identificação do 1º modo superior no espectro  $(V, f)$  da ativa. Em todas as inversões o método foi sensível e preciso na delimitação da profundidade na qual ocorre um aumento significativo de compactação do solo.



**Figura 65** - Perfis de velocidade de ondas S ( $V_S$ ) obtidos pelas inversões da Tabela 7. Diferentes cores representam modelos com diferentes valores de *misfit* (desajuste). As inversões (b) e (d) exibem o perfil  $V_S$  obtido por conversão dos valores NSPT da sondagem da área de estudo (Figura 5) através de equação empírica. Essa figura tem como referência o ensaio sísmico 1D.

---

## CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

---

Nos ensaios deste trabalho foram avaliados comparativamente os desempenhos das fontes ativas compactador de solo e marreta. O compactador propiciou a geração de maior energia tanto na componente vertical (ondas Rayleigh) como na transversal (ondas Love) das ondas geradas, mesmo quando se comparou com a marreta incidindo sobre uma base de impacto alocada de forma inclinada no solo. Os espectros gerados por processamento *f-k transform* das aquisições com o compactador também demonstraram ser de melhor qualidade, com maior banda de frequência aproveitável para interpretações, melhor resolução e distinção entre curvas de diferentes modos. Ademais, aquisições com o compactador apresentam a vantagem de poderem ser processadas através da técnica *f-k beamforming*, que em ensaios 2D geram espectros  $(V, f)$  mais limpos e na presença de geofones triaxiais torna-se possível a utilização da fonte em diversas posições com o registro de todas as componentes das ondas por todos os geofones presentes.

Tinha-se como um dos objetivos iniciais a aquisição de dados do ruído ambiental (fonte passiva) no ensaio sísmico 2D com geofones triaxiais. No entanto, devido ao pequeno tempo de aquisição, que foi de 180s, os espectros  $(V, f)$  obtidos por todas as componentes não possuíam definição suficiente para interpretação das curvas de dispersão. Recomenda-se que para uma aquisição de dados do ruído ambiental e processamento através da técnica *f-k beamforming* se utilize um tempo de aquisição bem maior, até de horas, se o equipamento possibilitar.

Foi avaliada a contribuição de dados obtidos pela técnica *Passive Roadside MASW* aos dados obtidos com fonte ativa, no caso, o compactador. Esse expediente permitiu um aumento na banda de frequência tanto da curva do modo fundamental como do 1° modo superior, especialmente com o registro de frequências mais baixas. Tal contribuição, no entanto, não propiciou a obtenção de resultados melhores nos perfis de velocidade das ondas S. Ressalta-se, porém, que a identificação do 1° modo superior no espectro  $(V, f)$  dos dados *Passive Roadside* possibilitou a sua identificação no espectro  $(V, f)$  dos dados de ativa, no qual não se apresentava de forma clara. Como a inversão conjunta com a curva do 1° modo foi caracterizada por um melhor resultado, os dados *Passive Roadside* acabaram por contribuir de forma indireta. Recomenda-se que para o processamento dos dados *Passive Roadside* através da técnica *f-k beamforming* se concatene vários registros menores, de 20 ou 30s, para geração de um registro maior pois,

assim, mais janelas temporais estarão disponíveis para uma boa análise das baixas frequências.

Em ambos os ensaios sísmicos deste trabalho a inversão da curva do modo fundamental com a do 1º modo superior mostrou gerar melhores resultados do que a inversão do modo fundamental somente. Com este procedimento os perfis de velocidade de ondas S que apresentaram os melhores ajustes compareciam de forma mais convergentes, diminuindo a incerteza dos modelos de velocidade da camada e aumentando a profundidade de investigação.

A contribuição dos dados das componentes radial (ondas Rayleigh) e transversal (ondas Love) foi avaliada no ensaio sísmico 2D com geofones triaxiais, comparativamente com dados obtidos pela componente vertical (ondas Rayleigh). A componente radial contribuiu com um aumento de banda de frequência do 1º modo superior obtido pela componente vertical. No entanto, inversões conjuntas das curvas dessas componentes não apresentaram melhores resultados quando comparadas com a inversão de curvas obtidas apenas da componente vertical.

Na comparação dos melhores resultados obtidos pelas inversões com os dados existentes sobre a área de estudo conclui-se que, apesar de certas diferenças, todas podem ser justificadas e considerando-se as incertezas envolvidas os dados são convergentes. O método foi sensível na delimitação da profundidade na qual ocorre um aumento significativo de compactação do solo.

No seu atual estágio de desenvolvimento o método MASW apresenta etapas bastante dependentes do operador. Na interpretação das curvas de dispersão diferentes modos de visualização dos dados em um espectro  $(V, f)$  podem fazer diferença. Por exemplo, a utilização de uma escala linear ao invés de uma escala logarítmica no eixo das abscissas, ou a utilização de diferentes escalas de cores para visualização das amplitudes, pode ajudar ou dificultar significativamente a interpretação das curvas de dispersão. Recomenda-se, inclusive, que testes sejam feitos neste sentido ao se utilizar o método. Nos perfis de velocidade modelados pela inversão pode-se estabelecer, através da divergência entre os perfis mais bem ajustados, uma incerteza de velocidade para uma dada camada e a máxima profundidade de investigação. Esse procedimento, no entanto, é dependente do conhecimento e experiência do operador com o método. Neste sentido, os estudos realizados neste trabalho contribuem para um melhor entendimento sobre o método aplicado.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ACHENBACH, J. D. **Wave Propagation in Elastic Solids**. Amsterdam: North Holland, 1984. 440 p.

ALMEIDA, F. F. M. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. In: **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 48, n. SUPPL, 1976. p. 15-26.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6484: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2001. 22 p.

BORMANN, P. **New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)**. Potsdam: Deutsches GeoForschungszentrum GFZ; IASPEI, 2012.

DÍAZ, J.; RUIZ, M.; SÁNCHEZ-PASTOR, P. S.; ROMERO, P. Urban Seismology: on the origin of earth vibrations within a city. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1-11, 2017. doi: 10.1038/s41598-017-15499-y

ESTAÇÃO METEOROLÓGICA - IAG-USP. **Boletim Climatológico**, São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.estacao.iag.usp.br/boletim.php>>. Acesso em: 03 fev. 2018.

EWING, W. M.; JARDETZKY, W. S.; PRESS, F. **Elastic waves in layered media**. New York: McGraw Hill Book Co. Inc., 1957. 380 p.

FATEHNIA, M.; HAYDEN, M.; LANDSCHOOT, M. Correlation between Shear Wave Velocity and SPT-N Values for North Florida Soils. **EJGE**, v. 20, n. 22, p. 12421-12430, 2015.

FOTI, S. **Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves**. 2000. 230 f. Tese (Doutorado) - Politecnico di Torino, Torino, 2000. doi: 10.6092/polito/porto/2497212

FOTI, S.; HOLLENDER, F.; GAROFALO, F.; ALBARELLO, D.; ASTEN, M.; BARD, P. Y.; COMINA, C.; CORNOU, C.; COX, B.; GIULIO, G.; FORBRIGER, T.; HAYASHI, K.; Lunedei, E.; MARTIN, A.; MERCERAT, D.; OHRNBERGER, M.; POGGI, V.; RENALIER, F.; SICILIA, D.; SOCCO, V. Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project. **Bull Earthquake Eng**, p. 1-54, 2017. doi: 10.1007/s10518-017-0206-7

FOTI, S.; PAROLAI, S.; ALBARELLO, D.; PICOZZI, M. Application of Surface-Wave Methods for Seismic Site Characterization. **Surveys in Geophysics**, v. 32, n. 6, p. 777-825, 2011. doi: 10.1007/s10712-011-9134-2

GEOPSY PROJECT DOCUMENTATION. **Open source software for geophysical research and application**. 2005. Disponível em: <<http://www.geopsy.org/wiki/index.php/FK>>. Acesso em: 25 jan. 2018.

GEOPSY PROJECT. **Open source software for geophysical research and application**. 2005. Disponível em: <<http://www.geopsy.org>>. Acesso em: 22 jan. 2018.

GEOSPACE TECHNOLOGIES. **Geophysical Products**, 1980. Disponível em: <<http://www.geospace.com/product-listings/geophysical-products/>>. Acesso em: 23 jan. 2018.

GURGUEIRA, M. D. **Correlação de dados geológicos e geotécnicos na Bacia de São Paulo**. 2013. 80 f. Dissertação (Mestrado em Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. doi: 10.11606/D.44.2013.tde-14112013-104040

IRITANI, M. A. **Potencial hidrogeológico da Cidade Universitária de São Paulo**. 1993. 97 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociência, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. doi: 10.11606/D.44.1993.tde-31032015-093153

KVAERNA, T.; RINGDAHL, F. Stability of various f-k estimation techniques. **Semmiannual technical summary, NOR SAR Scientific Report, 1-86/87**, Kjeller, Norway, p. 29-40, 1986.

LAY, T.; WALLACE, T. C. **Modern Global Seismology**. 1. ed. [S.l.]: Academic Press, v. 58, 1995. 521 p.

LUCENA, R. F.; TAIOLI, F. Rayleigh wave modeling: A study of dispersion curve sensitivity and methodology for calculating an initial model to be included in an inversion algorithm. **Journal of Applied Geophysics**, v. 108, p. 140-151, 2014. doi: 10.1016/j.jappgeo.2014.07.007

MARANGONI, Y. R.; MOURA, D. S.; FERREIRA, H. Mapas de anomalias gravimétricas da Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira – USP/SP. **Geologia USP. Série Científica**, v. 17, n. 2, p. 257-268, 2017. doi: 10.11606/issn.2316-9095.v17-120698

MARI, J. L. Estimation of static corrections for shear-wave profiling using the dispersion properties of Love waves. **Geophysics**, v. 49, n. 8, p. 1169-1179, 1984. doi: 10.1190/1.1441746

MARTIN, A.; YOUNG, A.; SALOMONE, L. Advantages of active Love wave techniques in geophysical characterization of seismographic station sites – case studies in California and the Central and Eastern United States. **Network for Earthquake Engineering Simulation (NEES)**, p. 11, 2014. doi: 10.4231/d36h4cr1k

MEYAVUZ. **Group Velocity / Phase Velocity Animation**, 2013. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=tlM9vq-bepA>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (MASW). 2018. Disponível em: <<http://www.masw.com/Hardware.html>>. Acesso em: 22 jan. 2018.

NAZARIAN, S.; STOKOE, K. H. In situ shear wave velocity from spectral analysis of surface waves. **Proc 8th Conference on Earthquake Engineering**, San Francisco, v. 3, 1984. p. 31-38.

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**, v. Pavement design, performance, and rehabilitation, n. 930, p. 38-45, 1983.

NOLET, G.; PANZA, G. F. Array analysis of seismic surface waves: limits and possibilities. **Pure and Applied Geophysics**, v. 114, n. 5, p. 776-790, 1976. doi: 10.1007/BF00875787

PARK, C. B.; MILLER, R. D. ROADSIDE PASSIVE MASW. **Proceedings of the SAGEEP**, Seattle, Washington, 2-6 April 2006.

PARK, C. B.; MILLER, R. D. Roadside Passive Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). **JEEG**, v. 13, n. 1, p. 1-11, 2008. doi: 10.2113/JEEG13.1.1

PARK, C. B.; MILLER, R. D.; RYDEN, N.; XIA, J.; IVANOV, J. Combined Use of Active and Passive Surface Waves. **JEEG**, p. 323-334, 2005.

PARK, C. B.; MILLER, R. D.; XIA, J. H. Multichannel analysis of surface waves. **Geophysics**, v. 64, n. 3, p. 800-808, 1999. doi: 10.1190/1.1444590

PARK, C. B.; MILLER, R. D.; XIA, J. Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. **SEG Technical Program Expanded Abstracts**, p. 1377-1380, 1998. doi: 10.1190/1.1820161

PARK, C. B.; MILLER, R. D.; XIA, J. Multi-channel Analysis of Surface Waves using Vibroseis (MASWV). **SEG Technical Program Expanded Abstracts 1996**, p. 68-71, 1996. doi: 10.1190/1.1826742

PARK, C. B.; MILLER, R. D.; XIA, J.; IVANOV, J. Multichannel analysis of surface waves (MASW) - active and passive methods. **The Leading Edge**, v. 26, n. 1, p. 60-64, 2007. doi: 10.1190/1.2431832

PARK, C.; MILLER, R.; LAFLÉN, D.; NEB, C.; IVANOV, J.; BENNETT, B.; HUGGINS, R. Imaging dispersion curves of passive surface waves. **SEG Technical Program Expanded Abstracts**, p. 1357-1360, 2004. doi: 10.1190/1.1851112

RICCOMINI, C. **O rift continental do Sudeste do Brasil**. 1989. 305 f. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989. doi: 10.11606/T.44.1990.tde-18032013-105507

RICHART, F. E. J.; WOOD, R. D.; HALL, J. R. J. **Vibration of Soils and Foundations**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1970. 414 p.

- RODRIGUEZ, S. K. **Geologia Urbana da Região Metropolitana de São Paulo**. 1998. 196 f. Teses (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. doi: 10.11606/T.44.1998.tde-19112015-093141
- SAMBRIDGE, M. Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm: I. Searching a parameter space. **Geophysical Journal International**, v. 138, p. 479–494, 1999. doi: 10.1046/j.1365-246X.1999.00876.x
- SCIENCE LEARNING HUB. **Media - Earth Waves**, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencelearn.org.nz/images/353-earth-waves>>. Acesso em: 17 jan. 2018.
- SONG, Y. Y.; CASTAGNA, J. P.; BLACK, R. A.; KNAPP, R. W. Sensitivity of near-surface shear-wave velocity determination from rayleigh and love waves. **SEG Technical Program Expanded Abstracts**, p. 509-512, 1989. doi: 10.1190/1.1889669
- STEIN, S.; WYSESSION, M. **Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure**. [S.l.]: Blackwell Publishing, 2003. 512 p.
- STOKOE, K. H.; WRIGHT, S. G.; BAY, J. A.; ROESSET, J. M. Characterization of geotechnical sites by SASW method. **Technical Review: Geophysical Characterization of Sites, ISSMFE Technical Committee 10**, New Delhi, p. 15-25, 1994.
- STROBBIA, C. **Surface Wave Method. Acquisition, Processing and Inversion**. 2003. 317 f. Tese (Doutorado) - Politecnico di Torino, Torino, 2003.
- SURFSEIS MASW SOFTWARE. **Passive Remote MASW**, 2018. Disponível em: <<http://www.kgs.ku.edu/software/surfseis/remote.html>>. Acesso em: 27 jan. 2018.
- TAKIYA, H. **Aplicação de métodos quantitativos espaciais a dados geológicos da Bacia de São Paulo**. 1991. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991. doi: 10.11606/D.44.1991.tde-03062015-090908

WATHELET, M. An improved neighborhood algorithm: parameter conditions and dynamic scaling. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 9, 2008. doi: 10.1029/2008GL033256

WATHELET, M.; JONGMANS, D.; OHRNBERGER, M. Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements. **Near Surface Geophysics**, v. 2, n. 4, p. 211-221, 2004. doi: 10.3997/1873-0604.2004018

XIA, J.; MILLER, R. D.; PARK, C. B. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. **Geophysics**, v. 64, n. 3, p. 691-700, 1999. doi: 10.1190/1.1444578

XIA, J.; XU, Y.; LUO, Y.; MILLER, R. D.; CAKIR, R.; ZENG, C. Advantages of Using Multichannel Analysis of Love Waves (MALW) to Estimate Near-Surface Shear-Wave Velocity. **Surveys in Geophysics**, v. 33, n. 5, p. 841-860, 2012. doi: 10.1007/s10712-012-9174-2

YIN, X.; XIA, J.; SHEN, C.; XU, H. Comparative analysis on penetrating depth of high-frequency Rayleigh and Love waves. **Journal of Applied Geophysics**, p. 86-94, 2014. doi: 10.1016/j.jappgeo.2014.09.022

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – MÓDULOS DE ELASTICIDADE DINÂMICOS

Módulo de Young dinâmico ( $E_{din}$ ):

$$E_{din} = \rho \cdot V_P^2 \cdot \frac{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}{(1 - \nu)} \quad (27)$$

Módulo de cisalhamento dinâmico ( $G_{din}$ ):

$$G_{din} = \rho \cdot V_S^2 \quad (28)$$

Nas equações apresentadas  $\rho$  é a densidade do meio,  $\nu$  coeficiente de Poisson e  $V_P$  e  $V_S$  a velocidade de propagação das ondas P e S, respectivamente.

### APÊNDICE B – SONDAGEM SPT (*STANDARD PENETRATION TEST*)

O *Standard Penetration Test* (SPT), também conhecido como sondagem SPT ou sondagem a percussão é um processo de caracterização do grau de compactação do solo em diferentes profundidades, sendo largamente utilizado na engenharia civil para obtenção de informações para cálculo de fundações.

A sondagem SPT consiste na cravação no solo de um cilindro amostrador padrão (barrilete) através de golpes de uma massa de 65kg solta em queda livre de uma altura de 75cm, onde são anotados o número de golpes necessários para que o barrilete penetre uma determinada profundidade. Resumidamente, o ensaio tem início a uma profundidade de 1m sendo o trecho de 45cm seguinte dividido em 3 partes de 15cm. São, então, anotados o número de golpes necessários para penetração do barrilete em cada trecho, sendo o valor de resistência a penetração (NSPT) a somatória do número de golpes para os 2 trechos finais (30cm). Ao se notar que mesmo após repetidos golpes não se obtém uma penetração significativa, não sendo, portanto, atingida a profundidade do trecho, o número de golpes é anotado em conjunto com a profundidade penetrada como, por exemplo, 30/8 que significa 30 golpes para penetração de 8cm. Ao final de cada etapa o amostrador é retirado do furo e são extraídas amostras do material até o próximo metro

inteiro seguinte onde é repetido o processo. De forma geral o ensaio termina ao se atingir o embasamento ou sob as seguintes condições:

- quando, em 3 m sucessivos, se obtiver 30 golpes para penetração dos 15 cm iniciais do amostrador;
- quando, em 4 m sucessivos, se obtiver 50 golpes para penetração dos 30 cm iniciais do amostrador-padrão;
- quando, em 5 m sucessivos, se obtiver 50 golpes para a penetração dos 45 cm do amostrador-padrão.

Informações mais detalhadas sobre a sondagem SPT podem ser obtidas em [\(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS \(ABNT\), 2001\)](#).

### APÊNDICE C – FÓRMULA EMPÍRICA DE CORRELAÇÃO ENTRE VALORES NSPT E $V_S$

Fórmula empírica de correlação entre valores *NSPT* ([Apêndice B](#)) e velocidades de ondas S ( $V_S$ ) ([FATEHNIA, HAYDEN e LANDSCHOOT, 2015](#)).

$$V_S = 77,1 \cdot (NSPT)^{0,355} \quad (29)$$

A equação apresentada possui um coeficiente de correlação de 0,893 e um valor de RMSE (*Root Mean Square Error*) de 26,50m/s.

### APÊNDICE D – VELOCIDADE MÉDIA DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS S NOS PRIMEIROS 30m ( $V_{S,30}$ )

Velocidade média de propagação de ondas S nos primeiros 30m de profundidade ( $V_{S,30}$ ):

$$V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{H_i}{V_{S,i}}} \quad (30)$$

onde  $N$  é o número de camadas geológicas, o índice  $i$  o número de referência da camada,  $H_i$  a espessura da camada  $i$  e  $V_{S,i}$  a velocidade de propagação de ondas S na camada  $i$ .