
Técnica H/V para determinação da elipticidade da onda Rayleigh

Danilo Portela de Oliveira¹ · Marcelo Peres Rocha¹

¹Universidade de Brasília, UnB, Brasil

Resumo Muitas técnicas geofísicas podem ser utilizadas para obter o perfil de velocidade da onda de cisalhamento para aplicação próxima à superfície. Porém, mais recentemente vem sendo utilizada uma técnica em que é realizada uma inversão conjunta da curva da razão espectral H/V e da curva de dispersão extraída a partir da análise multicanal das ondas de superfície (MASW). Contudo, em alguns casos, para obter a curva de dispersão na faixa de frequência para aplicação na engenharia (1 a 30 Hz) torna-se mais difícil. Nesse caso, a curva de dispersão pode ser indiretamente invertida de todos os pontos disponíveis da curva de frequência da onda Rayleigh para velocidade e profundidade da onda de cisalhamento. Como resultado, temos uma série de valores (velocidade e profundidade da onda s) através dos quais uma tendência de melhor ajuste pode ser passado. O melhor ajuste nos dá uma ideia da taxa de aumento da velocidade da onda de cisalhamento com a profundidade e a velocidade da onda de cisalhamento a um metro de profundidade. Com essa informação, podemos posteriormente utilizar para inverter a curva de elipticidade da onda de Rayleigh.

Palavras-chaves Sismologia · Ondas Rayleigh · Arranjos sísmicos · Razão H/V

1 Introdução

A relação de ruído espectral horizontal para vertical (relação H/V) (Nakamura, 1989) tem sido frequentemente usada para estudar a amplificação do local e a estrutura da crosta rasa e tem sido particularmente útil na avaliação de risco sísmico (por exemplo, Field and Jacob, 1993; Bonilla et al., 1997; Konno and Ohmachi, 1998; Riepl et al., 1998; Parolai et al., 2002; Bonnefoy-Claudet et al., 2006b). No entanto, a relação H/V pode ser influenciada pela composição do campo de ondas de ruído (ou seja, Rayleigh, Love e ondas de corpo; consulte Bonnefoy-Claudet et al., 2006b para uma revisão e Koper et al., 2010 para uma pesquisa global), dificultando a interpretação da relação H/V. A relação entre a elipticidade da onda Rayleigh (ou razão H/V da onda Rayleigh) com a estrutura rasa 1-D da Terra, por outro lado, está bem definida (Tanimoto and Rivera, 2008).

A extração da elipticidade da onda de Rayleigh usando técnicas de matriz de 3 componentes tem se mostrado bastante confiável (Poggi and Fäh, 2010). Recentemente, técnicas multicomponentes de correlação cruzada de ruído ambiental também foram desenvolvidas para obter medições robustas da relação de amplitude H/V da onda Rayleigh (Lin and Schmandt, 2014; Lin et al., 2014). Esta técnica mais recente usa correlações cruzadas de ruído entre pares de estações para aproximar as funções de Green da onda Rayleigh entre um par de estações onde uma estação é considerada uma fonte virtual e a outra estação é considerada um receptor. As correlações cruzadas podem então ser usadas para fazer observações da relação H/V da onda Rayleigh empregando uma força vertical ou radial na fonte virtual e medindo a relação de amplitude entre os componentes radial e vertical no receptor.

Embora a correlação cruzada de ruído tenha a vantagem de isolar as ondas de Rayleigh do ruído ambiental, a interpretação do resultado pode ser difícil se o campo de ruído não for semidifusivo. A aproximação de campo distante ajuda a garantir um campo de ruído semidifusivo, mas as estações de origem virtual devem estar a pelo menos três comprimentos de onda de distância das estações de destino. A incerteza da medição também pode ser alta se não houver estações suficientes atuando como fontes virtuais.

Então, este texto objetiva por meio de uma revisão bibliográfica (do artigo Ullah et al., 2016) exibir estudos utilizando este método em um local quase pantanoso, localizado em Colônia, na cidade de São Paulo, Brasil, para a estimativa da espessura do pacote de sedimentos não consolidados sobre o leito rochoso (embasamento neste caso).

A técnica H/V é empregada no sítio em Colônia por causa de sua configuração geológica, pois possui um pacote espesso de sedimentos não consolidados sobrepostos a rochas duras do embasamento, essa interface não consolidada do solo rochoso dá origem a uma velocidade muito alta e contraste de densidade que é muito favorável para aplicação *horizontal-over-vertical* (H/V).

2 Geologia do local

A estrutura da Colônia está localizada na periferia sul da cidade de São Paulo, Brasil (Fig. 1). Tem uma geometria circular (diâmetro de 3,6 km) compreendendo um anel anular de colinas que circundam uma depressão. A estrutura é majoritariamente um pântano. Sua origem é atribuída a um impacto de meteorito (Riccomini et al., 1989). A estrutura é formada em rochas do embasamento cristalino de idade neoproterozóica e a depressão é preenchida principalmente por sedimentos ricos em matéria orgânica de idade quaternária. Os principais tipos rochosos do embasamento compreendem xisto, quartzito, gnaiss, migmatito, diorito, quartzo-diorito (Sadowski, 1974).

A profundidade total, estimada por investigação de reflexão sísmica (Fig. 1), que não atingiu a parte central da estrutura (Riccomini et al., 2011) é de cerca de 340 m (preenchimento sedimentar mais brecha). A função de velocidade de empilhamento nesta investigação (Fig. 2) mostrou um incremento contínuo da velocidade da onda P com a profundidade, começando de aproximadamente 1500 m/s para 2150 m/s, o que é consistente com o aumento esperado da compactação dos sedimentos.

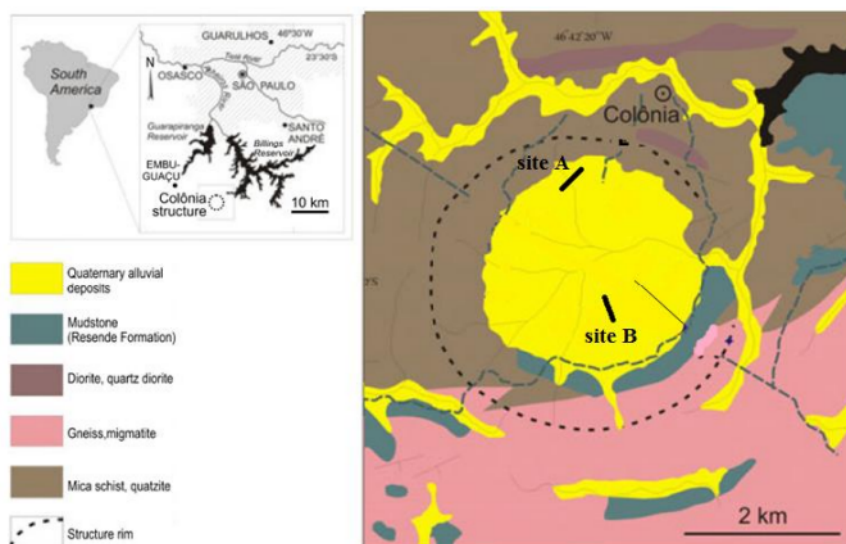


Figura 1: Localização (esquerda) e mapa geológico da estrutura da Colônia. As linhas grossas pretas indicam os locais dos testes MASW, enquanto as linhas finas indicam a linha de reflexão. (Modificado de Riccomini et al., 2011).

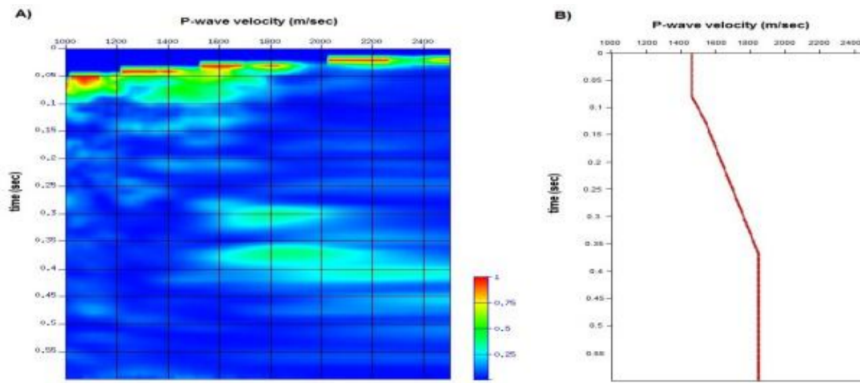


Figura 2: Figura com painel (A) e (B), onde a função de velocidade de empilhamento cdp é adquirido a 750 ms da investigação de reflexão sísmica de Colônia (onda P) (modificado de Riccomini et al., 2011).

3 Metodologia

3.1 Ondas Rayleigh

As ondas Rayleigh são ondas de superfície que movimentam as partículas do meio de maneira polarizada ao longo de uma elipse vertical em sentido oposto ao da propagação (retrogrado). A razão entre as dimensões dos eixos horizontal e vertical da elipse de movimento de partícula define a elipticidade da onda Rayleigh, que é, sobre certas circunstâncias, dependente da estrutura local abaixo das estações (Berbellini et al., 2019).

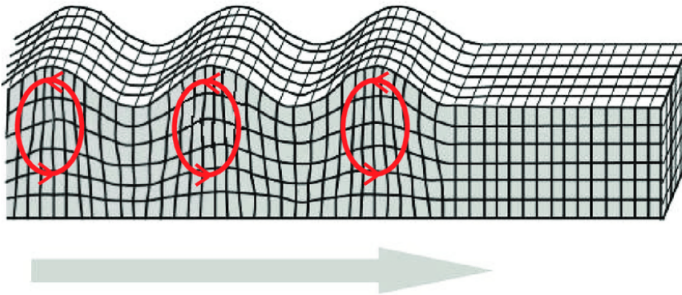


Figura 3: Comportamento das ondas Rayleigh na superfície terrestre (DE OLIVEIRA, 2009).

3.2 Elipticidade das Ondas Rayleigh

Essa técnica, também chamada de Razão H/V da onda Rayleigh (Workman et al., 2017), pode ser utilizada tanto para uma única estação, quanto para um arranjo de estações. A desvantagem conceitual da aplicação desse método para uma única estação é que, apesar de ser possível obter a elipse de movimento das partículas, não conseguem resolver a ambiguidade de 180 graus relacionada com a determinação do azimute reverso (backazimuth), não sendo possível identificar se o movimento é retrogrado ou não, e consequentemente, a direção de chegada das ondas Rayleigh (Workman et al., 2017, Berbellini et al., 2019).

3.3 inversão

A partir de medidas do espectro H/V para diferentes períodos, é construída a curva de elipticidade média para as estações pertencentes ao arranjo. A curva de elipticidade é invertida para obtenção do modelo 1D de velocidade da onda S em relação à profundidade, logo abaixo do arranjo das estações (no centro do arranjo). Esse modelo pode ser interpretado em termos das descontinuidades existentes sob o arranjo das estações.

Para a inversão da elipticidade e para amostrar o espaço de parâmetros, utilizou-se o *neighborhood algorithm* (NA) (Wathelet et al., 2008) que é um método livre de derivadas em comparação com o método linearizado (Menke, 1989). Este método (NA) auto-adaptativo amostra o espaço do modelo para encontrar um conjunto de modelos que melhor se ajusta aos dados reais. Para cada modelo amostrado, o algoritmo de inversão compara dados previstos com dados reais (usando a abordagem de modo normal de Herrmann (2013) para calcular curvas de elipticidade e avaliar uma função de custo).

Dessa forma, o cálculo da função de custo leva em consideração o desajuste entre os dados reais e os valores previstos e geralmente também contém um termo para regularizar as soluções. Um termo de regularização é necessário quando a parametrização é feita de muitas camadas finas para promover os modelos mais suaves. A função custo é definida como:

$$c = \sum_{i=1}^{N_m} \frac{[d_{obs}^i - g^i(m)]^2}{(\sigma_D^i)^2} + A \cdot N_m \sum_{j=1}^{N_L} [v_s^{j-1} - 2v_s^j + v_s^{j+1}]^2 \quad (1)$$

Onde d_{obs}^i são os dados observados, $g^i(m)$ são valores teóricos de elipticidade calculados usando um formalismo de modo normal para o modelo amostrado m , σ_D^i é a variância da medição, N_m é o número de medições, N_L é o número de camadas, A é um fator de escala e v_s é a velocidade da onda de cisalhamento.

O primeiro termo é o desajuste entre os dados observados e previstos, o segundo é o termo de regularização. A é um fator de escala determinado por tentativa e erro: se A for muito pequeno, os dados observados serão superajustados, enquanto o modelo resultante mostrará descontinuidades muito

irrealistas. Por outro lado, se A for muito grande, o modelo será plano e os dados observados não serão bem ajustados. Um bom fator A produz modelos realistas enquanto ajusta bem os dados observados.

4 Resultados

As técnicas de curva H/V são fortemente condicionadas pelas propriedades (isto é, contraste de profundidade e impedância) da interface entre o sedimento não consolidado e o leito rochoso (Parolai et al., 2005), embora sejam pouco informativas sobre a velocidade da onda s das camadas sedimentares. Por outro lado, as curvas de dispersão provenientes da técnica de matriz (ou seja, MASW, análise multicanal de ondas de superfície Park et al., 1999) restringem principalmente a estrutura de velocidade da onda s do solo subterrâneo. Porém, a curva de dispersão fornece informações incertas sobre a subsuperfície mais profunda, especialmente abaixo da frequência fundamental do local devido ao efeito de filtragem da média; portanto, quando H/V ou curvas de dispersão são usadas individualmente para a recuperação da estrutura da subsuperfície, há um *trade-off* solucionável entre os parâmetros do modelo (velocidade e espessura das camadas do solo) que dificulta os resultados da análise de inversão.

Além disso, adquirir MASW e gravação de ruído ambiental no mesmo local pode não ser possível devido a alguns problemas locais em configurações de campo, como acessibilidade, como na estrutura da Colônia, onde a maior parte da estrutura é coberta por vegetação densa e água, dificultando na gravação do MASW e ruído ambiental nos mesmos locais, para mapear a estimativa da espessura do pacote de sedimentos. Dessa forma, abordaram que a tendência média de aumento da velocidade da onda de cisalhamento com a profundidade pode ser obtida a partir da inversão direta da curva de dispersão, ou seja, a abordagem foi que em qualquer local acessível da estrutura uma curva de dispersão experimental pode ser obtida através do MASW (Fig. 1).

Para a estimativa da curva H/V, precisaram do registro do ruído ambiental em três componentes (dois horizontais e um vertical) que obtiveram a partir de 7 medições do ruído ambiental em 6 locais diferentes mostrados na (Fig. 4) com um sismômetro de 3 componentes de banda larga *Nanometrics Trillium* compacto de 120 s. Realizaram a gravação do ruído ambiental por 5 horas em cinco locais, enquanto que nas estações CLN4 e CLN5 a gravação foi de 24 horas (Fig. 4). A gravação foi aumentada para evitar ruído cultural, pois havia atividade agrícola próxima.

A gravação do ruído ambiental foi feita seguindo as diretrizes desenvolvidas nas recomendações do Acerra et al. (2004). Para obter a frequência fundamental do local, foi processada uma janela de gravação de uma hora e seguiu-se a condição de confiabilidade proposta pelo Acerra et al. (2004) para a curva H/V e pico, (Fig. 6) indica as curvas H/V de todas as estações. A curva de dispersão recuperada do MASW analisando todos os dados (Fig. 5) é obtida apenas em uma banda de frequência estreita (1.1 - 3.8 Hz) Fig. 5d. O levantamento MASW desses dois locais diferentes A e B (Fig. 1) são analisados, a

imagem de dispersão das matrizes MASW é fornecida na Fig. 5a, b, c. Em A, os dados da fonte ativa não fornecem uma imagem de dispersão clara, por isso são omitidos da análise. A curva de dispersão exponencial obtida a partir dos dados é ampliada (para uma visibilidade clara na escala vertical) (Fig. 5d).

Tabela 1: Parâmetros de aquisição MASW para fonte ativa e passiva.

Tipo de MASW	Ativo	Passivo
Fonte	Marreta 10 Kg	Ruído cultural
Deslocamento mínimo (m)	1, 5, 6	
Intervalo entre Geofones (m)	1	1
Número de geofones	96	96
Tamanho do arranjo	95	95
Intervalo de amostragem (ms)	0.5	
Duração do(s) registro(s)	1	15, 20, 30

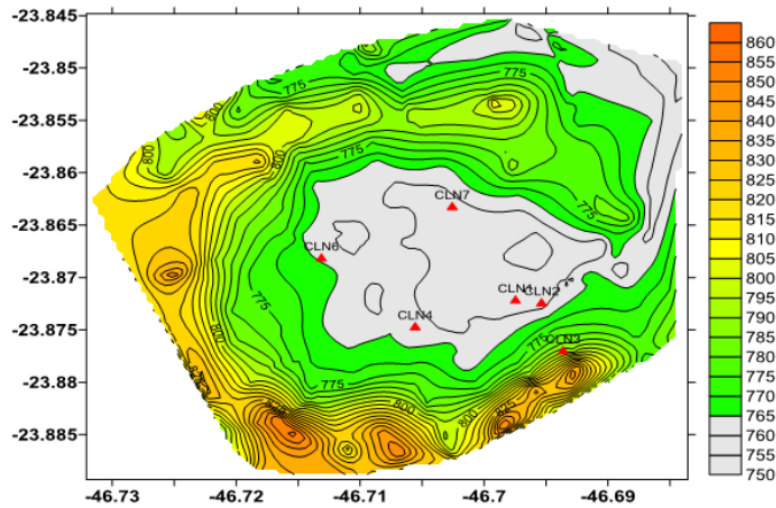


Figura 4: Mapa de contorno topográfico (intervalo de contorno 5m) da estrutura de Colônia. Os triângulos indicam a localização das estações usadas para gravação de ruído ambiental. CLN4 e CLN5 estão no mesmo local, por isso é mostrado apenas CLN4. (A barra de legenda à direita mostra a escala dos contornos em m).

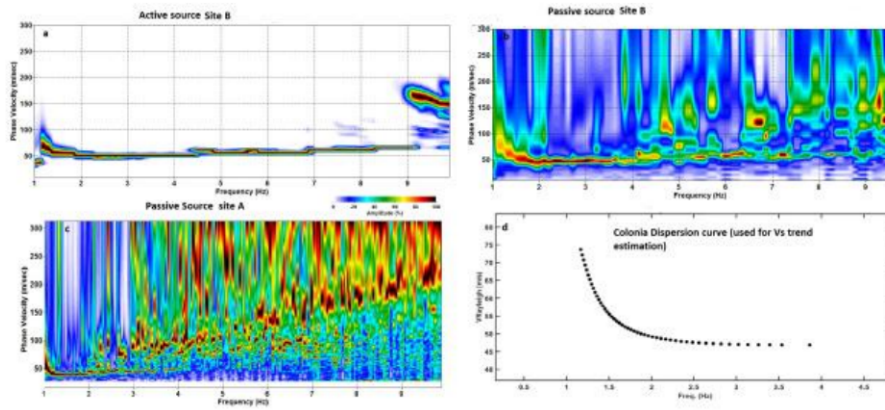


Figura 5: Mostra as imagens da curva de dispersão dos registros experimentais do local B (a velocidade nas imagens da curva de dispersão é em m/s). (b) Fonte passiva das imagens da curva de dispersão no local B (c). Imagens da curva de dispersão da fonte passiva do local (d). A curva de dispersão experimental obtida dos dados em Colônia é mostrada na parte inferior (usada para estimativa de tendência v_s).

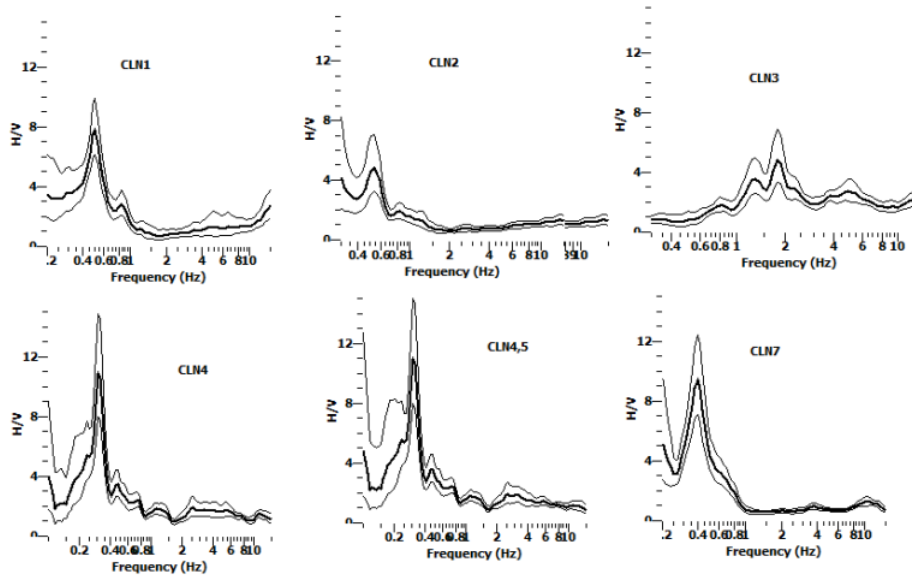


Figura 6: Curvas H/V de todas as estações. Todas as curvas são obtidas cumprindo os critérios para curva clara e pico, a linha em negrito é a curva H/V, as linhas estreitas inferior e superior indicam o limite superior e inferior do desvio padrão.

4.1 Inversão para recuperação da velocidade da onda de cisalhamento

Para realizar a inversão da elipticidade, utilizou-se o algoritmo de vizinhança (NA) (Wathelet et al., 2008) que é um método livre de derivadas em comparação com o método linearizado (Menke, 1989). NA pertence à família de estratégias de inversão de otimização global, como algoritmo genético. Sambridge and Mosegaard (2002) reviu em detalhes o aspecto teórico e a aplicação dessa abordagem de inversão. A NA é considerada uma estratégia de inversão melhor porque tem vantagem sobre as outras abordagens, pois utiliza todas as informações do modelo anterior para amostrar o novo modelo (Sambridge, 1999). O desajuste é estimado usando a eq. (2)

$$misfit_{Ellipticity} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\log(Emod) - \log(Exp)}{\sigma_i^2} \right)^2} \quad (2)$$

Onde Exp é uma curva de elipticidade experimental na frequência f , $Emod$ é a curva de elipticidade modelada na frequência f , σ_i são os erros de medição associados e N é o número da amostra de frequência.

A curva H/V é considerada como a curva de elipse da onda Rayleigh, que é empregada em quase todos os algoritmos de inversão de curva H/V , porém a curva H/V não é a verdadeira representação da elipticidade da onda Rayleigh, pois ambas as ondas Rayleigh e Love contribuem para o espectro H/V (Bonnefoy-Claudet et al., 2006a) e a presença de ambos os tipos de onda de superfície devem ser considerados para algoritmos de inversão.

Portanto, a proporção entre as ondas Rayleigh e Love no campo de ondas de ruído deve ser inferida ou assumida antes da inversão. Para solucionar esse problema e minimizar a contribuição da onda Love para o componente horizontal da curva H/V , Hobiger et al. (2009) propôs uma técnica conhecida como RayDec para a estimativa da elipticidade da onda Rayleigh a partir de um único sensor de três componentes, utilizando a componente vertical como um gatilho mestre e empilhando um grande número de componentes horizontais. (ver detalhes Hobiger et al., 2009).

Utilizaram o RayDec para obter a curva de elipticidade para cada local de registro do ruído ambiental. O flanco direito da elipticidade é usado para análise de inversão (Hobiger et al., 2013). No entanto, o flanco esquerdo é considerado para colocar restrições na frequência de pico da curva de elipticidade (H/V). Usaram 30% do comprimento da frequência de pico no flanco esquerdo e o dobro da frequência de pico no flanco direito. A parte restante da curva de elipticidade não é considerada para inversões. A tendência de aumento da velocidade da onda de cisalhamento e a espessura do pacote sedimentar (h) são entradas para a inversão da curva de elipticidade e os perfis de inversão são obtidos. (Fig. 7).

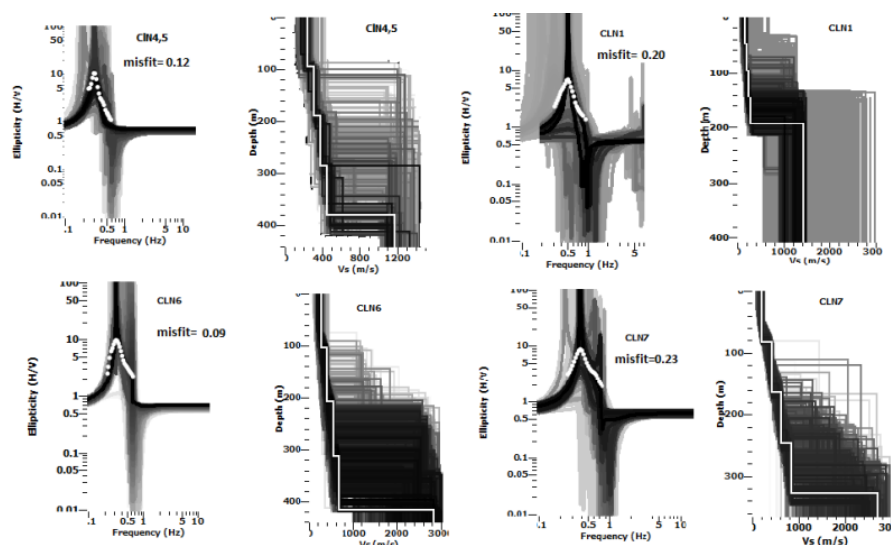


Figura 7: Perfis de inversão e valores desajustados para CLN4,5, CLN1, CLN6 e CLN7. O perfil do modelo desajustado mais baixo do VS é mostrado em branco para todas as estações.

5 Discussões e Conclusões

O resultado obtido para as curvas H/V segue a tendência do ambiente geológico local (Colônia). Temos que as estações CLN4,5 e 6 mostraram a mesma frequência de ressonância fundamental que, com base nesse tipo de abordagem de interpretação, nos dá a espessura do solo não consolidado em torno de 400 m. Riccomini et al. (2011) mostra que a espessura do sedimento não consolidado encontra-se em torno de 340 m usando sísmica de reflexão, mas quase na mesma posição periférica da estrutura circular de Colônia. A espessura do sedimento em direção à borda da estrutura em forma de “tigela” diminui, o que é identificável a partir da estação CLN3, que mostrou uma espessura de 15 metros. Como discutido anteriormente, uma inversão de elipticidade sozinha produz resultados ambíguos. Então, se forem adicionadas informações que restringem a estrutura da onda de cisalhamento superficial, a inversão de elipticidade pode então ser usada para restringir a parte mais profunda da estrutura. Contudo, no caso de leito rochoso muito profundo, a curva de dispersão experimental obtida mostra apenas uma parte de toda a curva de dispersão e não a curva completa devido ao ambiente geológico local. Para restringir a velocidade da onda de cisalhamento superficial nessas situações, pode-se adicionar à inversão descobrindo a tendência do aumento da velocidade da onda de cisalhamento com a profundidade a partir da utilização dessa curva de dispersão experimental de banda de frequência estreita

pelo melhor ajuste dos valores de profundidade V_s . O que fornece informações sobre a tendência de aumento da velocidade a um metro de profundidade. A frequência fundamental junto com a tendência de aumento da onda s e a velocidade da onda s a um metro de profundidade são usadas para encontrar a espessura composta (h) do pacote de sedimentos. Todas essas informações podem ser fornecidas para a inversão da curva de elipticidade no final para obter o perfil 1D da velocidade da onda de cisalhamento.

Portanto, utilizaremos essa técnica no projeto de pesquisa do mestrado com o objetivo de estudar a estrutura crustal sob a região da Província Mineral de Carajás e áreas adjacentes. Esperamos alcançar níveis de resolução suficientes para definir as interfaces entre a crosta e o manto (Moho), e eventualmente entre a litosfera e a astenosfera (LAB). Esperamos também que outras descontinuidades possam ser identificadas, como a entre a crosta superior e inferior (Conrad), ou outras mais rasas.

Referências

- Acerra, C., G. Aguacil, A. Anastasiadis, K. Atakan, R. Azzara, P.-Y. Bard, R. Basili, E. Bertrand, B. Bettig, F. Blarel, et al., 2004, Guidelines for the implementation of the h/v spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation: European Commission–EVG1-CT-2000-00026 SESAME.
- Berbellini, A., M. Schimmel, A. M. Ferreira, and A. Morelli, 2019, Constraining s-wave velocity using rayleigh wave ellipticity from polarization analysis of seismic noise: *Geophysical Journal International*, **216**, 1817–1830.
- Bonilla, L. F., J. H. Steidl, G. T. Lindley, A. G. Tumarkin, and R. J. Archuleta, 1997, Site amplification in the san fernando valley, california: variability of site-effect estimation using the s-wave, coda, and h/v methods: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **87**, 710–730.
- Bonnefoy-Claudet, S., C. Cornou, P.-Y. Bard, F. Cotton, P. Moczo, J. Kristek, and D. Fäh, 2006a, H/v ratio: A tool for site effects evaluation. results from 1-d noise simulations: *Geophysical Journal International*, **167**, 827–837.
- Bonnefoy-Claudet, S., F. Cotton, and P.-Y. Bard, 2006b, The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review: *Earth-Science Reviews*, **79**, 205–227.
- DE OLIVEIRA, V. Q., 2009, Filtragem de eventos lineares nos dados sísmicos utilizando derivada direcional bidimensional.
- Field, E., and K. Jacob, 1993, The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise: *Geophysical research letters*, **20**, 2925–2928.
- Herrmann, R. B., 2013, Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research: *Seismological Research Letters*, **84**, 1081–1088.
- Hobiger, M., P.-Y. Bard, C. Cornou, and N. Le Bihan, 2009, Single station determination of rayleigh wave ellipticity by using the random decrement technique (raydec): *Geophysical Research Letters*, **36**.
- Hobiger, M., C. Cornou, M. Wathelet, G. D. Giulio, B. Knapmeyer-Endrun, F. Renalier, P.-Y. Bard, A. Savvaidis, S. Hailemichael, B. N. Le, et al., 2013, Ground structure imaging by inversions of rayleigh wave ellipticity: sensitivity analysis and application to european strong-motion sites: *Geophysical Journal International*, **192**, 207–229.
- Konno, K., and T. Ohmachi, 1998, Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **88**, 228–241.
- Koper, K. D., K. Seats, and H. Benz, 2010, On the composition of earth’s short-period seismic noise field: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**, 606–617.
- Lin, F.-C., and B. Schmandt, 2014, Upper crustal azimuthal anisotropy across the contiguous us determined by rayleigh wave ellipticity: *Geophysical Research Letters*, **41**, 8301–8307.
- Lin, F.-C., V. C. Tsai, and B. Schmandt, 2014, 3-d crustal structure of the western united states: application of rayleigh-wave ellipticity extracted from noise cross-correlations: *Geophysical Journal International*, **198**, 656–670.

- Menke, W., 1989, Geophysical data analysis: Discrete inverse theory, volume 45 of: International geophysics series.
- Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of sub-surface using microtremor on the ground surface: Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, **30**.
- Park, C. B., R. D. Miller, and J. Xia, 1999, Multichannel analysis of surface waves: *Geophysics*, **64**, 800–808.
- Parolai, S., P. Bormann, and C. Milkereit, 2002, New relationships between v_s , thickness of sediments, and resonance frequency calculated by the h/v ratio of seismic noise for the cologne area (germany): *Bulletin of the seismological society of America*, **92**, 2521–2527.
- Parolai, S., M. Picozzi, S. Richwalski, and C. Milkereit, 2005, Joint inversion of phase velocity dispersion and h/v ratio curves from seismic noise recordings using a genetic algorithm, considering higher modes: *Geophysical research letters*, **32**.
- Poggi, V., and D. Fäh, 2010, Estimating rayleigh wave particle motion from three-component array analysis of ambient vibrations: *Geophysical Journal International*, **180**, 251–267.
- Riccomini, C., A. P. Crosta, R. L. Prado, M.-P. LEDRU, B. J. Turcq, L. G. SANT’ANNA, J. A. Ferrari, and W. U. Reimold, 2011, The colônia structure, são paulo, brazil: *Meteoritics & Planetary Science*, **46**, 1630–1639.
- Riccomini, C., B. Turcq, and L. Martin, 1989, The colônia astrobleme excursion field guide: Presented at the International Symposium on Global Changes in South America During the Quaternary: Past, Present and Future. Sao Paulo: ABEQUA/ INQUA.
- Riepl, J., P.-Y. Bard, D. Hatzfeld, C. Papaioannou, and S. Nechtschein, 1998, Detailed evaluation of site-response estimation methods across and along the sedimentary valley of volvi (euro-seistest): *Bulletin of the Seismological Society of America*, **88**, 488–502.
- Sadowski, G., 1974, *Tectônica da serra de cubatão*: São Paulo.
- Sambridge, M., 1999, Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm—i. searching a parameter space: *Geophysical journal international*, **138**, 479–494.
- Sambridge, M., and K. Mosegaard, 2002, Monte carlo methods in geophysical inverse problems: *Reviews of Geophysics*, **40**, 3–1.
- Tanimoto, T., and L. Rivera, 2008, The zh ratio method for long-period seismic data: sensitivity kernels and observational techniques: *Geophysical Journal International*, **172**, 187–198.
- Ullah, I., R. L. Prado, and Y. Hussain, 2016, Thickness and shear wave velocity measurement of sediment package at meteorite impact crater site of colonia, sao paulo city, brazil: VII SimBGf.
- Wathelet, M., D. Jongmans, M. Ohrnberger, and S. Bonnefoy-Claudet, 2008, Array performances for ambient vibrations on a shallow structure and consequences over v_s inversion: *Journal of Seismology*, **12**, 1–19.
- Workman, E., F.-C. Lin, and K. D. Koper, 2017, Determination of rayleigh wave ellipticity across the earthscope transportable array using single-

station and array-based processing of ambient seismic noise: Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **208**, 234–245.