



Sísmica Passiva na Prospecção Mineral

Lúcia Maria da Costa e Silva
Serviço Geológico do Brasil/Superintendência Belém

Copyright 2018, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salinópolis, 18 a 20 de setembro de 2018. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VIII SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

Sísmica passiva migrou da Sismologia para a área do risco e Geotecnia, expandindo-se a partir do desenvolvimento de sismômetros miniaturizados. No momento, migra para a área de prospecção mineral com entusiasmo que relembra a expansão do GPR (do inglês *Ground Penetrating Radar*). O método foi testado no Brasil em 2017, evidenciando sua capacidade de traçar o topo do embasamento. Essa informação é especialmente preciosa na Amazônia, onde o manto de intemperismo dificulta enormemente a investigação geológica.

Introdução

Ao longo dos tempos surgiram metodologias que permitiram a ampliação do uso da Geofísica de modo notável.

O método eletromagnético GPR (do inglês *Ground Penetrating Radar*), que permite a investigação rasa com a maior resolução atingida pela Geofísica, é o último deles. Esse método, detalhado por Daniels (2004) dentre muitos outros, ampliou, aliás, os limites de atuação da Geofísica como nenhum outro.

Muito recentemente, contudo, uma outra metodologia parece estar se firmando com essas características. Trata-se da Sísmica Passiva, mais especificamente do método HVSR (do inglês *Horizontal to Vertical Spectral Ratio*), que difere da Sísmica Passiva já utilizada na investigação de petróleo (Schmidt, 2007), mas é velha conhecida dos colegas que trabalham com Geofísica Global, os sismólogos.

Diferentemente da Sísmica tradicional, que faz uso da onda gerada a partir de uma fonte artificial que se propaga pelo meio até encontrar interface entre dois meios de diferentes impedâncias acústicas, onde sofre reflexão e retorna, a Sísmica Passiva não usa fonte artificial, mas microtremores, que são também conhecidos como ruído ambiental ou ruído sísmico, por ser a parte descartada dos dados de Sísmica e Sismologia.

Até certo tempo era inimaginável que ruído sísmico pudesse funcionar como fonte de excitação (sinal primário) para obtenção de informação (sinal secundário) de interesse para a prospecção mineral ou qualquer outro fim.

No entanto, no início da década de 70, Nogoshi & Igarashi (1970 e 1971) apresentaram metodologia para

utilização do ruído sísmico que se mostrou, pouco a pouco, ser de grande valia especialmente para investigações de risco sísmico e construções em áreas de risco.

Sismômetros de banda larga que exigem tempo significativo para instalação em arranjos de registro de dados, usados nestes trabalhos, não são atrativos para a prospecção mineral. Geofones convencionais, mais comuns em prospecção, por sua vez, são poucos efetivos nas frequências abaixo de 10 Hz, que são aquelas do ruído utilizado pela sísmica passiva.

O advento de sismômetros miniaturizados, de uso fácil e rápido, consumo de energia baixo, ausência de cabos externos, eletrônica digital de alta resolução (comparável ou melhor do que os sismômetros convencionais), mas de custo muito baixo, motivaram então o crescimento dos estudos de risco sísmico por meio de Sísmica Passiva (Mucciarelli et al. 2007).

Muito recentemente, esses trabalhos começaram a chamar a atenção da área de prospecção mineral.

A Sísmica Passiva mostrou ser capaz de estimar a espessura de coberturas com baixa velocidade sísmica, como depósitos ou rochas altamente intemperizadas, sobre rocha com alta velocidade sísmica até profundidades de 500 m, informação útil na prospecção de depósitos abaixo de coberturas diversas, inclusive em paleocanais (diamante, salmouras de potássio, etc.), prospecção de água subterrânea, estudos ambientais bem como no mapeamento geológico e investigações de estrutural/tectônica.

Na América Latina, a técnica com uso de instrumental miniaturizado vem sendo aplicada apenas no Chile, mas na área de risco. Em 2017 foi testada no Brasil na seguinte ordem: São Paulo, São Luís, Pará (Belém e na área do Projeto Estudos dos Granitoides da Região Nordeste do Pará para Produção de Brita (PA), no prelo) e Brasília. Em São Paulo teve o apoio de profissionais da USP. No Pará, do Serviço Geológico do Brasil. Finalmente, em Brasília, de pessoal da UNB. O teste foi coordenado pelo professor William August Sauck da Western University (USA) (Sauck, 2017). É interessante notar que o prof. Sauck foi também responsável pela introdução do GPR no nosso país a partir de estudos realizados em Belém do Pará com a participação do prof. José Gouvêa Luiz e da autora, então professores da Universidade Federal do Pará.

Este trabalho reúne informações de interesse para o breve conhecimento do método baseado na compilação de Silva (2018), mostra resultados e discorre sobre sua atual pequena trajetória no país.

Ruído Sísmico

Ruído sísmico é um evento sísmico de pequena intensidade que não ultrapassa, na escala de Mercalli, o grau I (imperceptível – não é sentido; apenas registrado instrumentalmente). Está presente em qualquer local.

O ruído com frequência inferior a 2 Hz é gerado por variações oceânicas e atmosféricas (ondas do mar, vento, chuva, etc.). Esse ruído natural varia com as estações do ano.

O ruído com frequência superior a 2 Hz, por sua vez, tem em geral origem antropogênica (indústrias, tráfego de carros, trens, motos, etc.). Esse ruído varia com a atividade humana durante o dia, sendo menor durante a noite.

Os microssismos fazem com que o subsolo (e as construções) atue como um oscilador (um sistema massa-mola), que vibra a frequência específica. Em outras palavras, toda a Terra atua como fonte de excitação para a ressonância do subsolo (e das construções). O fenômeno guarda analogia com a incidência da luz branca em um objeto e subsequente reflexão, pelas moléculas do objeto, de ondas de frequência específica que determinam sua cor.

No caso de terremotos, episódio que provoca grande ruído, se a frequência de ressonância do solo é a mesma da edificação, eles entram em ressonância e o movimento da edificação é amplificado. Essa é a principal causa de destruição pelos terremotos. Por esse motivo, a sísmica passiva vem sendo muito utilizada em áreas sujeitas a terremotos, como é o caso do Chile.

Os microssismos são importantes na detecção de atividade de falhas que podem gerar sismos fortes, mas, por longos períodos, produzem apenas microssismos, bem como de pequenos movimentos associados com vulcanismo e com movimentos de massa. Auxiliam no conhecimento da estrutura da Terra (em especial os microssismos resultantes de tremores distantes). Finalmente, sua utilidade para a prospecção mineral, como anteriormente mencionado, está em fase de consolidação.

O método HVSR

Várias metodologias de sísmica passiva diferem em detalhes da aquisição e do processamento dos dados, mas são conceitualmente análogas (Foti et al., 2014). Essencialmente correspondem ao chamado Método de Nakamura, que é baseada na utilização de microtremores detectados em uma única estação.

Em realidade, o método não foi proposto por Nakamura, mas por Nogoshi e Igarashi (Nogoshi and Igarashi, 1970 e 1971), mas só se tornou conhecida após Nakamura mostrar em 1989 a obtenção de resultados confiáveis (Nakamura 1989). Sua padronização, por outro lado, foi realizada pelo Projeto SESAME (2004).

A técnica consiste no registro em uma estação do ruído sísmico nas três direções ortogonais (norte-sul, leste-oeste, vertical ao terreno), por meio de sismômetro,

sendo o tempo de registro tanto maior quanto mais profundo o embasamento.

A razão espectral entre as componentes horizontal H e a vertical V é, então, obtida. O primeiro pico observado na razão espectral corresponde à frequência de ressonância fundamental do local de medição.

Essa normalização H/V para cada frequência é eficaz para eliminar o efeito da fonte de ruído dos dados e aumentar a resposta do caminho atravessado no subsolo pelo microtremor. O pico H/V é invariável no tempo.

Qualquer que seja a origem do pico na razão H/V, ele sempre permite uma boa estimativa da frequência de ressonância fundamental (para uma subsuperfície unidimensional) (Bonney-Claudet, 2004). O estudo dos microssismos levou a considerá-las ondas do tipo Love e Rayleigh, portanto ondas sísmicas superficiais. Abaixo da frequência de ressonância não ocorre amplificação significativa durante um terremoto. Para a prospecção, contudo, importa que a espessura da camada superficial h(m) está relacionada à frequência de ressonância f_0 (Hz) e à velocidade das ondas V_s (m/s) por meio da seguinte relação:

$$h \cong \frac{V_s}{4f_0}.$$

Medindo-se ou inferindo-se adequadamente a velocidade média da onda de cisalhamento, a estimativa obtida pela equação acima é considerada uma ferramenta bastante útil para mapeamento abaixo de coberturas, como mostra a comparação de resultados diversos com resultados de perfurações.

Levantamento de dados

Comumente, as medições são realizadas em estações ao longo de locais com acesso fácil, como margens de rios, caminhos, etc (Fig. 1).

O equipamento é sempre colocado no terreno natural, não coberto por qualquer capeamento (pavimentação asfáltica, cimento, etc.) quando isto é possível, pois, a rigidez do capeamento atenua a curva H/V da alta frequência até 1-2 Hz.

A orientação do instrumento com o Norte geográfico é desnecessária (exceto nos estudos em larga escala de microzoneamento sísmico).



Figura 1 – Levantamento em estrada do Pará. Seta: equipamento, mostrado em detalhe ao lado.

A duração do registro varia de 5 a 40 minutos, em geral, de acordo com a profundidade do embasamento.

Processamento

Inicialmente, os trechos do registro no tempo com sinal de ruídos culturais são eliminados (Fig. 2).

O sinal é então corrigido (remoção de *trend*, *tapering* e suavização).

Em seguida, o registro é dividido em janelas (30 s de comprimento) e transformada cada janela para o domínio da frequência.

Os espectros horizontais (norte-sul e leste-oeste) são então transformados, através de média geométrica ou da raiz média quadrada, em um só espectro horizontal H, que é normalizado pelo espectro da componente vertical V (ou seja, é calculada a razão espectral H/V) (fig. 3).

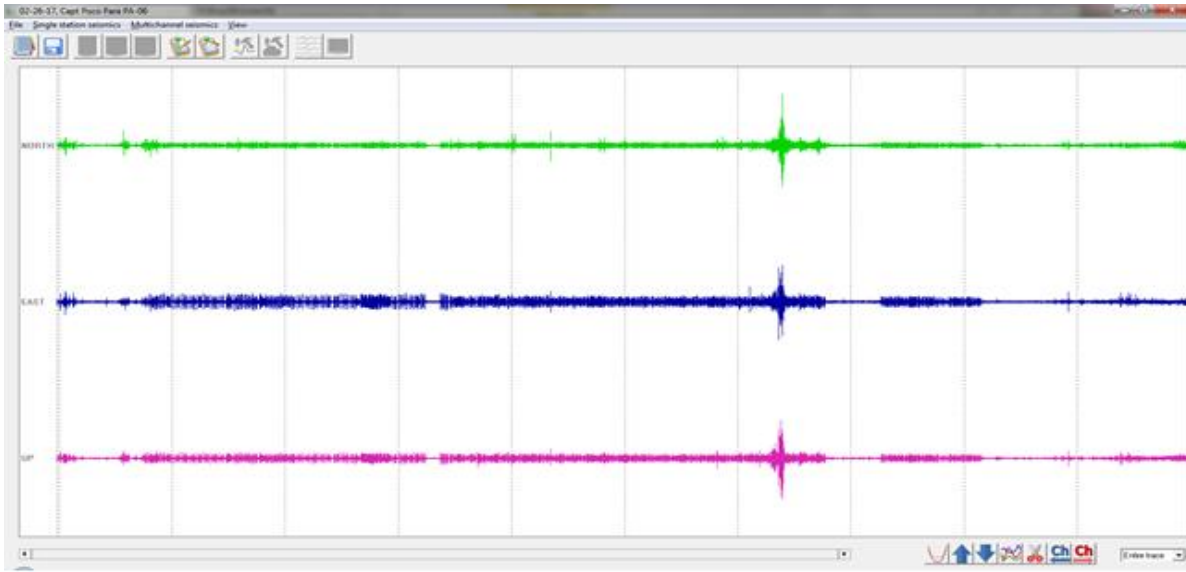


Figura 2 – Exemplo de séries de tempo medidas (PA-06). Picos nas séries gerados pela passagem de veículo.

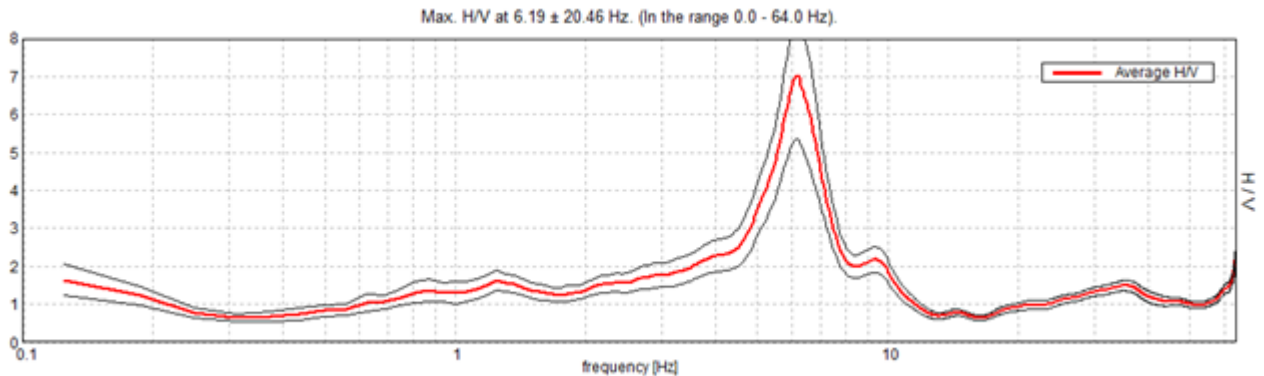


Figura 3 - Exemplo de resultado do processamento (PA-06). Razão espectral H/V (vermelho) com desvio padrão (preto). Pico fornece a frequência de ressonância.

Interpretação

Antes da interpretação geofísica-geológica dos dados, a qualidade das curvas HVSR é avaliada segundo critérios de consenso internacional (SESAME, 2004).

As curvas H/V guardam as seguintes indicações: 1) a presença de pico indica a existência de camada rígida (impedância acústica), 2) a frequência do pico, a profundidade da camada rígida e 3) a sua variação no espaço, a existência de heterogeneidade lateral. Em outras palavras, assim como nas conhecidas sondagens elétricas verticais (SEVs), a investigação estação por estação unidimensional (ou seja, que varia com a profundidade), quando reunida ao longo de perfis permite identificar variações bidimensionais (variação com a profundidade e com uma das dimensões horizontais) e até tridimensionais (variação em todas as direções).

A figura 3 apresenta um exemplo de resultado final obtido no Pará para uma área de manto de intemperismo pouco espesso, em que se encontra a profundidade do embasamento indicada pelas colunas. Na cidade de Belém, a profundidade é superior a 200 m.

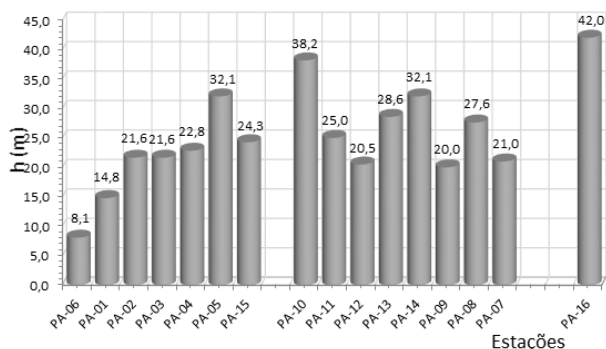


Figura 3 – Exemplo de resultados obtidos no Pará, mostrando profundidade do embasamento com variações consideráveis resultantes de falhamento.

Aplicação no Brasil, em especial na Amazônia

Os testes realizados no nosso país mostram que o método pode ser muito útil devido ao manto de intemperismo que dificulta o trabalho geológico, especialmente na Amazônia. Nesta região, por exemplo mesmo em Belém, inexistente furo estratigráfico, ou seja, não se sabe a profundidade do embasamento.

O Serviço Geológico do Brasil, seguindo entidades análogas de diversos países, adquiriu equipamento para sísmica passiva para trabalho na Amazônia. No entanto, dado a sua potencialidade para a área do risco, o equipamento será usado em testes na área do risco, mais especificamente para mapeamento de risco no caso Maceió, onde houve trincamento de residências no bairro Pinheiro após tremor de terra em Março/2018.

Conclusões

O trabalho de campo com a sísmica passiva não é destrutivo e nem invasivo do meio e muito rápido (a maioria das estações medidas no Pará exigiram 10 minutos). Seu custo, assim como o do equipamento utilizado, é considerado o mais baixo do portfólio de ferramentas oferecidas pela geofísica para a prospecção. Os resultados obtidos pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB), por sua vez, mostraram que o potencial do método para ajudar a desvendar a geologia abaixo do manto de intemperismo é muito grande. A metodologia tende a se firmar no nosso país para trabalhos em larga escala.

Referências

- BONNEFOY-CIAUDET, S. 2004. Nature du bruit de fond sismique : implications pour les études des effets de site. PhD. Thesis, Grenoble University, France, 241 p.
- DANIELS, DJ. 2004. Ground Penetrating Radar. The Institution of Electrical Engineers. 2nd ed. London, 734 pp.
- FOTI, S., G. C. LAI, G. J. RIX, and C. STROBBIA, 2014, Surface wave methods for near-surface site characterization: CRC Press Boca Raton. 487 p.
- MUCCIARELLI, M.; HERAK, M. & CASSIDY, J. Ed. 2007. Increasing Seismic Safety by Combining Engineering Technologies and Seismological Data. Springer, Dordrecht. 381 p.
- NOGOSHI, M. & T. IGARASHI, 1970, On the propagation characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface: Journal of the Seismological Society of Japan, 23: 264–280.
- NOGOSHI, M. & T. IGARASHI, 1971, On the amplitude characteristics of microtremor (part 2): Journal of the Seismological Society of Japan, 24: 26–40.
- SAUCK, W.A. 2017. The HVSR passive seismic method evaluated in several regions of Brazil. In: 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro. 2/Agosto/2017.
- SCHMIDT, J. 2007. Sísmica Passiva. Boletim da SBGF, 4: 12-15.
- SESAME Project, 2004, Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: Measurements, processing and interpretation, SESAME European Research Project WP12, deliverable no. D23.12, http://sesame.geopsy.org/Papers/HV_User_Guidelines.pdf, accessed em 14 março 2017. 62 p.
- SILVA, L. M. C. 2018. Sísmica passiva (HVSR) no mapeamento da espessura do manto de intemperismo da área do projeto “Pesquisa de Áreas Potenciais para Brita no NE do Pará” - (Teste de Metodologia Geofísica). Serviço Geológico do Brasil/SUREG-BE. Inédito.