

APOIO AO DESENVOLVIMENTO TÉCNICO-CIENTÍFICO NO BRASIL

A FVD – Fundação Victor Dequech, entidade sem fins lucrativos, criada em 2001, apoia e incentiva ações e projetos de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico e Inovativo no Brasil.

Com foco na pesquisa e engenharia mineral -- bem como nas áreas de energia, óleo e gás, meio ambiente e tecnologias a elas relacionadas -- a FVD sente-se plenamente honrada por apoiar a ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental na edição de suas Diretrizes, Guias, Manuais, Boletins e outros documentos assemelhados, agora como Normas Técnicas dessa conceituada associação.

A FVD e a ABGE estão irmanadas no esforço para a educação e a capacitação continuada, que proporcionam qualificação, habilidades e competências de empresas e de profissionais, contribuindo assim com o desenvolvimento e a melhoria da qualidade de vida em nosso país.

Cumprimentamos a todos os participantes dessa iniciativa pioneira.

Antonio de Padua Vieira Chaves
Diretor Presidente da FVD



Rua São Vicente, 255. Bloco B
Bairro Olho D'água - Belo Horizonte, Minas Gerais,
Brasil. CEP 30.390-570.
Tel. +55 31 3288-1742 | www.fvd.org.br



NORMA DA ASSOCIAÇÃO
BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE
ENGENHARIA E AMBIENTAL

NÚMERO DE REFERÊNCIA:
NORMA ABGE 201/2023
1ª Edição, 2023

INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA EM TERRA – MÉTODOS SÍSMICOS



NORMA ABGE 201
1ª Edição, 2023

ABGE — AJUDANDO AS EMPRESAS A TRABALHAREM MELHOR



Copyright 2023. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental – ABGE
Todos os direitos reservados a ABGE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Souza, Luiz Antonio Pereira de
Norma ABGE 201/2023 : investigação geofísica em
terra : métodos sísmicos / Luiz Antonio Pereira de
Souza, Otávio Coaracy Brasil Gandolfo. -- 1. ed. --
São Paulo : ABGE, 2023.

Vários colaboradores.
Bibliografia.
ISBN 978-65-88460-14-6

1. Geofísica 2. Geologia 3. Geotécnica
4. Infraestrutura 5. Normas técnicas I. Gandolfo,
Otávio Coaracy Brasil. II. Título.

CDD-628
-624.15
-624.151

23-160566

Índices para catálogo sistemático:

1. Geofísica aplicada à geologia e meio ambiente :
Engenharia ambiental 628
2. Geotecnia 624.15
3. Geologia de engenharia 624.151

Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415

Sugestão de referência bibliográfica:

Souza, L. A. P.; Gandolfo, O. C. B. ABGE NORMA 201/2023 - Investigações geofísica em terra – Métodos sísmicos. Vários colaboradores. 1ª Edição. São Paulo: ABGE, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL – ABGE
Av. Prof. Almeida Prado, 532, Prédio 59. Cidade Universitária, São Paulo, SP CEP 05508-901
www.abge.org.br – abge@abge.org.br
Fones: (11) 3767.4361 (11) 9.8687.6560

A ABGE e todos os colaboradores, revisores, coordenadores, autores e editor participantes dessa Norma ou de artigos e livros utilizados como referência bibliográfica, não possuem responsabilidade de qualquer natureza por eventuais danos ou perdas pessoais ou de bens originados do uso da presente publicação. Aqueles que usam essa publicação são responsáveis por tomar suas próprias decisões quando aplicarem as informações aqui fornecidas e as cotejarem e harmonizarem com outras. Críticas e contribuições devem ser encaminhadas a Secretaria Executiva da ABGE:
abge@abge.org.br

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	5
1. INTRODUÇÃO	7
1.1 A caracterização geológica/hidrogeológica do meio físico:	7
1.2 A identificação de contaminantes e fontes de contaminação:.....	8
1.3 A caracterização de solos/rochas e ensaios em estruturas para fins de engenharia:.....	8
1.4 Aplicações para:	8
2. FINALIDADE	9
3. EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS.....	10
4. SÍSMICA DE REFRAÇÃO (REFRA).....	10
4.1 Breve descrição da técnica.....	10
4.2 Vantagens	11
4.3 Limitações.....	11
4.4 Aquisição dos dados.....	11
4.5 Processamento e apresentação dos resultados.....	12
5. SÍSMICA DE REFLEXÃO (REFLEX).....	13
5.1 Breve descrição da técnica.....	13
5.2 Vantagens	14
5.3 Limitações.....	14
5.4 Aquisição dos dados.....	15
5.5 Processamento e apresentação dos resultados.....	15
6. MÉTODOS QUE EMPREGAM ONDAS DE SUPERFÍCIE (SW)	16
6.1 Breve descrição do ensaio	16
6.2 Vantagens	17
6.3 Limitações.....	18
6.4 Aquisição dos dados.....	18
6.5 Processamento e apresentação dos resultados.....	19
7. ENSAIO <i>CROSSHOLE</i> (CH)	20
7.1 Breve descrição do ensaio	20
7.2 Vantagens	20

7.3	Limitações.....	21
7.4	Aquisição dos dados.....	21
7.5	Processamento e apresentação dos resultados.....	21
8.	ENSAIO DOWNHOLE (DH).....	22
8.1	Breve descrição do ensaio	22
8.2	Vantagens	23
8.3	Limitações.....	23
8.4	Aquisição dos dados.....	23
8.5	Processamento e apresentação dos resultados.....	23
9.	TOMOGRAFIA SÍSMICA (TOMO).....	24
9.1	Breve descrição do ensaio	24
9.2	Vantagens	25
9.3	Limitações.....	25
9.4	Aquisição dos dados.....	25
9.5	Processamento e apresentação dos resultados.....	25
10.	MICROSSÍSMICA	26
10.1	Breve descrição do ensaio	26
10.1	Vantagens	29
10.2	Limitações.....	29
10.3	Aquisição dos dados.....	29
10.5	Processamento e apresentação dos resultados	29
11.	PRINCIPAIS PARTICIPANTES.....	30
12.	REFERÊNCIAS	31
13.	REFERÊNCIAS NORMATIVAS E DIRETIVAS	31
14.	LEITURAS RECOMENDADAS.....	32

APRESENTAÇÃO

A Norma ABGE 201/2023 apresenta os **métodos sísmicos de investigações geofísicas em terra**. Essa Norma deve ser cotejada com a “Norma ABGE 200/2023 – Investigações geofísicas – Métodos e técnicas”, norma essa que fornece informações de âmbito conceitual, dentre elas as que possibilitam a escolha dos métodos mais adequados para aplicação da geofísica em estudos, projetos e obras de engenharia e as de natureza ambiental.

A Geofísica Aplicada é uma das mais importantes técnicas de investigações geológico-geotécnicas. Quando bem planejada e interpretada, conjuntamente com os demais estudos e investigações como, por exemplo, mapeamentos geológicos, sondagens mecânicas e ensaios de campo e laboratório, sua importância se torna um método de investigação não apenas eficaz, mas imprescindível às boas práticas da engenharia de obras e de natureza ambiental.

A “Norma ABGE 201/2023 possibilita aprofundar o entendimento dos métodos sísmicos utilizados em investigações geofísicas em terra. A publicação aborda sete procedimentos sísmicos: 1) sísmica de refração; 2) sísmica de reflexão; 3) métodos que empregam ondas de superfície; ensaios em furos de sondagem (tipos 4) *crosshole*; 5) *downhole* e 6) tomografia sísmica); e, 7) microssísmica.

A presente norma tem por base o conteúdo do livro “Geofísica aplicada à geologia de engenharia e meio ambiente – Manual de boas práticas” (Souza e Gandolfo, 2021), publicado pela ABGE.

A Norma ABGE possui formato próprio, mas semelhante ao publicado por entidades civis e associações técnicas e profissionais, nacionais ou estrangeiras, como ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), ASTM (American Society for Testing and Materials), API (American Petroleum Institute), ISO (international Organization for Standardization), ASCE (American Society of Civil Engineering), CDA (Canadian Dam Association), IAEG (International Association for Engineering Geology and the Environment), dentre outras. Essas entidades publicam Normas (Standards), Diretrizes (Guidelines), Boletins (Bulletins), Regras (Codes) e outros documentos assemelhados, com a finalidade de ajudar empresas e profissionais a trabalharem melhor.

As normas e as publicações técnicas editadas pelas entidades acima citadas, assim como a presente NORMA ABGE, são de aceitação voluntária. A sua aplicação somente passará a ter caráter vinculante no plano legal/normativo, caso seja reconhecida e de alguma forma chancelada/acolhida pelo poder público (por exemplo, se a adoção de alguma NORMA ABGE for exigida ou referida por algum dispositivo legal); e, no plano privado, caso seja mencionada em um contrato como norma a ser observada pelas partes no cumprimento de suas obrigações (Passini & Alvares Sociedade de Advogados, 2021).

Sugerimos que os usuários das informações dessa publicação a cotejem e a harmonizem com outras sobre o mesmo tema, assim possibilitando maior consistência nos termos de referências e contratos e maior eficácia, segurança e economicidade nos estudos, projetos e obras.

Agradecimentos aos sócios, às empresas patrocinadoras da ABGE e a todos que apoiaram e colaboraram com a presente publicação, em especial aos autores e colaboradores do livro “Geofísica aplicada à geologia de engenharia e meio ambiente – Manual de boas práticas”, publicado pela ABGE em 2021.

João Jeronimo Monticelli

Editor

Fábio Soares Magalhães

Presidente da ABGE – Gestão 2023-2024

1 INTRODUÇÃO

Para aprimorar o conhecimento dos conceitos básicos e dos fundamentos e aplicabilidade dos métodos sísmicos em terra, recomenda-se a leitura das várias publicações disponíveis na literatura geofísica, como as mencionadas na NORMA ABGE 200/2023 nos itens Referências Bibliográficas, Leituras Recomendadas e Referências Normativas e Diretivas. Recomenda-se, ainda, consultar o Glossário publicado naquela Norma.

Os métodos geofísicos empregados em levantamentos terrestres (sísmica, métodos elétricos, métodos eletromagnéticos e métodos potenciais), seus principais conceitos e aplicabilidade – bem como a importância da utilização de mais de um método geofísico terrestre – foram abordados na NORMA ABGE 200/2023. Tais métodos permitem:

1.1 A caracterização geológica/hidrogeológica do meio físico:

- determinação da espessura de material inconsolidado e da profundidade do topo rochoso;
- estratigrafia geológica/geotécnica;
- localização de falhas com grande rejeito;
- localização de zonas fraturadas;
- localização de diques de rochas básicas;
- localização de matacões;
- localização de paleocanais;
- detecção de zonas carstificadas, vazios e cavidades rasas;
- análise de escorregamentos e caracterização de encostas;
- determinação da profundidade do nível d'água;
- determinação da direção do fluxo de água subterrânea e de fluxos preferenciais;
- identificação de zonas com maior percolação de água em maciços;

- identificação do contato entre água doce e salgada em regiões costeiras.

1.2 A identificação de contaminantes e fontes de contaminação:

- identificação e mapeamento de plumas de contaminantes inorgânicos;
- identificação e mapeamento de plumas de contaminantes orgânicos;
- delimitação de valas, cavas, trincheiras e aterros;
- identificação de salinidade nos solos.

1.3 A caracterização de solos/rochas e ensaios em estruturas para fins de engenharia:

- determinação de módulos elásticos dinâmicos de maciços para engenharia geotécnica e de fundações;
- determinação do grau de escarificabilidade de maciços;
- determinação da resistividade elétrica para projetos de aterramento, proteção catódica e estudos de corrosão;
- inspeção de pavimentos;
- inspeção de estruturas de concreto.

1.4 Aplicações para:

- detecção de utilidades enterradas em ambientes urbanos (dutos, galerias, adutoras, cabos);
- localização de objetos enterrados (tanques, tambores);
- identificação de fuga d'água em corpos de barragens e lagoas de rejeitos;
- identificação de alvos rasos para fins arqueológicos e forenses.

Os métodos geofísicos empregados na investigação em terra, que serão tratados nesta Norma são os Métodos Sísmicos, conforme listados a seguir:

- Sísmica de Refração (REFRA);
- Sísmica de Reflexão (REFLEX);
- Métodos que empregam ondas de superfície (SW), com destaque ao método MASW;
- Ensaios em furos de sondagem: *Crosshole* (CH), *Downhole* (DH) e Tomografia Sísmica (TOMO);
- Microssísmica.

Os métodos geofísicos terrestres elétricos, eletromagnéticos e potenciais, bem como os métodos de aplicação em ambiente aquático não constam da presente Norma e serão tratados à parte.

2 FINALIDADE

Os métodos sísmicos têm por objetivo estudar a distribuição, em profundidade, da velocidade de propagação das ondas sísmicas, parâmetro que está relacionado com as propriedades elásticas e a densidade (massa específica) dos materiais, visando identificar as características do maciço natural (solos e rochas) e de natureza antrópica (itens 1.1 a 1.4 da Introdução).

Podem ser utilizadas ondas de corpo (compressionais/ondas P, cisalhantes/ondas S) ou ondas de superfície (Rayleigh e Love). O conhecimento da velocidade de propagação das ondas P e S (V_p e V_s), e da densidade do maciço (ρ), permite a estimativa de seus parâmetros elásticos dinâmicos: módulo de Young (E), coeficiente de Poisson (ν), módulo de cisalhamento ou rigidez (G) e módulo de incompressibilidade (K).

A utilização do módulo de cisalhamento máximo, conhecido na engenharia civil como G_0 ou $G_{m\acute{a}x}$, permite que sejam reconhecidas algumas propriedades dos solos que os tradicionais ensaios SPT (*Standard Penetration Test*), rotineiramente utilizados, não permitem avaliar.

3 EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS

Os métodos sísmicos utilizam fontes de energia consideradas “ativas” (explosivos, marreta, rifle sísmico, compactadores de solo, queda de pesos) e “passivas” (ruídos urbanos, microssismos), que geram ondas sísmicas que se propagam através das camadas geológicas. Um sismógrafo capta os sinais recebidos por sensores (geofones), gravando-os em registros denominados sismogramas. Existem vários modelos e marcas de sismógrafos disponíveis no mercado. Em uso, no Brasil, destacam-se os modelos das marcas DMT, Geometrics e OYO.

4 SÍSMICA DE REFRAÇÃO (REFRA)

4.1 Breve descrição da técnica

Com o ensaio de Sísmica de Refração (**Figura 1**), determinam-se as velocidades (usualmente das ondas P) e as espessuras de estratos sísmicos por meio da análise das ondas refratadas nas interfaces de camadas com diferentes velocidades sísmicas. Estes ensaios são empregados em situações em que a velocidade de propagação das ondas sísmicas nos estratos aumenta com a profundidade. A profundidade de investigação depende do comprimento da base sísmica (arranjo linear de geofones) que, em geral, deve ser equivalente a aproximadamente cinco vezes a profundidade que se deseja investigar. A resolução lateral é função do espaçamento entre geofones, distância que também controla o detalhe com o qual as camadas em subsuperfície podem ser mapeadas. Por meio deste ensaio é possível investigar profundidades de no máximo 30 m – 40 m, se for utilizada uma fonte de baixa energia, por exemplo, uma marreta. No caso de maiores profundidades, o uso de fontes sísmicas mais potentes torna-se necessário, por exemplo, fontes mecânicas de grande porte ou explosivos.

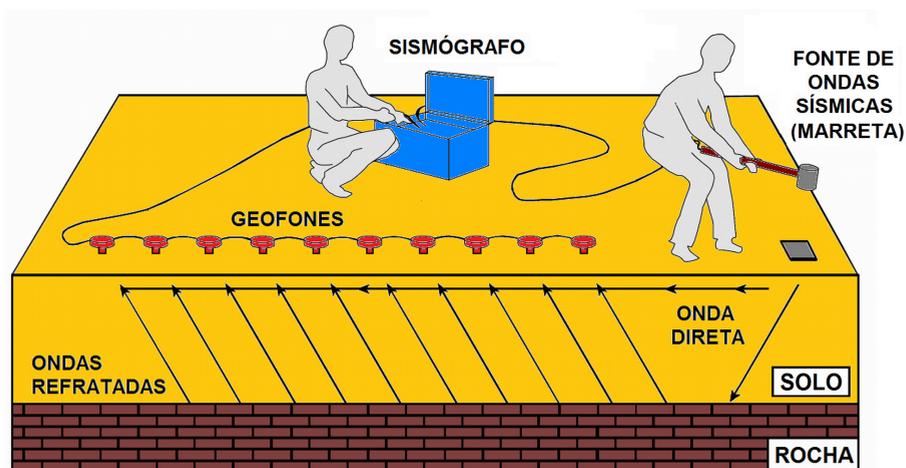


Figura 1 – Método da Sísmica de Refração.

Fonte: modificada de Benson, Glaccum e Noel (1984).

4.2 Vantagens

Ensaio de Sísmica de Refração fornecem dados que, após serem processados, geram seções 2D com as profundidades e os valores da velocidade de propagação das ondas sísmicas em cada uma das camadas – parâmetros que podem ser correlacionados diretamente com as informações das sondagens. A aquisição de campo é mais rápida e de menor custo, se for comparada com o método da Sísmica de Reflexão.

4.3 Limitações

As velocidades de propagação das ondas nas camadas devem aumentar com a profundidade para que, dessa forma, atendam aos fundamentos do método (refração crítica). O método, portanto, não identifica camadas que apresentem velocidades baixas em relação à camada sobrejacente (inversão de velocidades). Além disso, este método não permite o mapeamento de camadas muito delgadas, e tem a capacidade de fornecer um modelo composto de duas a quatro camadas. É sensível à presença de ruídos vibratórios.

4.4 Aquisição dos dados

Para os levantamentos de campo, deve ser utilizado um sismógrafo com pelo menos 12 canais de registro, embora 24 seja a quantidade mais

recomendada. O posicionamento da linha sísmica no terreno deve evitar topografia excessivamente acidentada. Cada base sísmica deverá ter, no mínimo, três pontos de tiro, sendo um na posição central e dois nos extremos do arranjo. Um número maior de pontos de tiros por base, incluindo tiros externos ao arranjo de geofones, é recomendado. Várias bases sísmicas deverão ser efetuadas sequencialmente, de modo a cobrir toda a linha programada para o levantamento, a fim de se manter uma continuidade, com o final de uma base coincidindo com o início da base seguinte. O levantamento planialtimétrico da linha sísmica é necessário para obter a posição e a altitude (cota) de cada geofone na base sísmica.

4.5 Processamento e apresentação dos resultados

O processamento dos dados da Sísmica de Refração consiste, primeiramente, em identificar as primeiras chegadas das ondas sísmicas (no caso do emprego da onda P) e construir gráficos do tipo tempo x distância. A interpretação destes gráficos fornece um modelo (seção 2D) composto de estratos sísmicos com suas respectivas velocidades e, também, as espessuras/profundidades das camadas abaixo de cada posição de geofone (**Figura 2**).

Caso existam sondagens mecânicas na linha ou nas proximidades, estas informações deverão constar no perfil para uma melhor correlação das camadas geológicas/geotécnicas com os estratos sísmicos interpretados, identificando se possível: a profundidade do topo rochoso são, a espessura de solo/rocha alterada e a interface solo saturado/solo não saturado.

Alternativamente, o dado pode ser apresentado em uma seção 2D obtida por algoritmos de inversão tomográfica, que mostra a variação contínua das velocidades sísmicas em subsuperfície em uma escala de cores (**Figura 2**). Esta apresentação é propícia para realçar, com mais detalhes, variações horizontais e verticais de velocidade. Em locais com presença de estruturas complexas, as quais fogem do padrão de camadas aproximadamente horizontais e com pouca variação lateral de velocidade, também é recomendado esse modo de apresentação. Deve(m) ser reportado(s) o(s) método(s) de processamento utilizado(s) para a obtenção do(s) modelo(s). Informações mais detalhadas sobre

o método das sísmica de Refração podem ser obtidas em ASTM – D5777 (Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation, 2006).

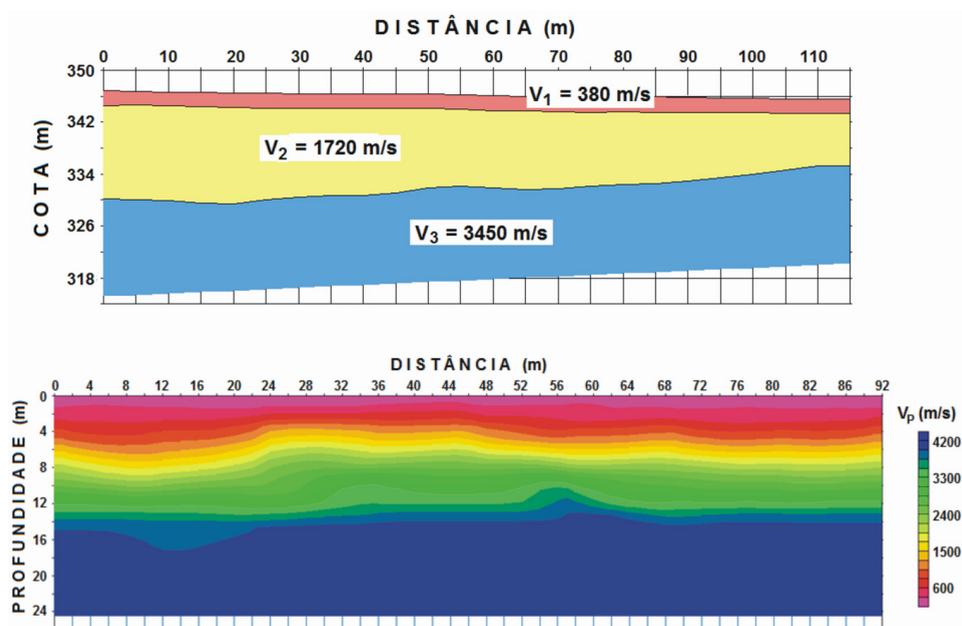


Figura 2 – Seções processadas de Sísmica de Refração: por modelo de camadas (acima); e por técnica de inversão tomográfica (abaixo).

Fonte: elaborada pelos autores.

5 SÍSMICA DE REFLEXÃO (REFLEX)

5.1 Breve descrição da técnica

A Sísmica de Reflexão registra o tempo de percurso das ondas emitidas na superfície após serem refletidas em interfaces com contraste de impedância acústica, utilizando um arranjo de campo e equipamento semelhantes aos empregados na Sísmica de Refração (Figura 3). Geralmente são utilizadas as ondas P podendo também serem utilizadas as ondas S.

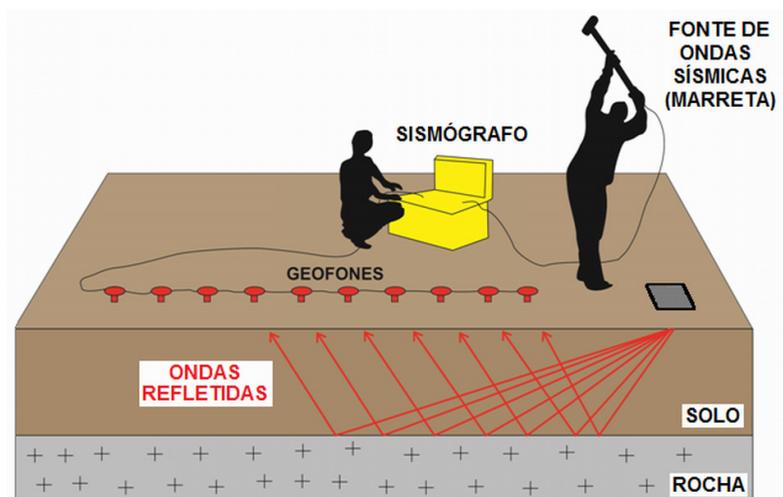


Figura 3 – Método da Sísmica de Reflexão.

Fonte: modificada de Benson, Glaccum e Noel (1984).

5.2 Vantagens

O ensaio de Sísmica de Reflexão fornece resultados com melhor resolução lateral e vertical, alcançando maiores profundidades de investigação, se for comparado com o ensaio de Sísmica de Refração, mesmo usando fontes sísmicas de baixa energia (marreta, por exemplo). O método da Sísmica de Reflexão tem especial aplicação em situações nas quais ocorre a inversão de velocidades nas camadas geológicas. Observa-se ainda que não há relação direta entre a profundidade de investigação e o comprimento do arranjo, ou seja, podem ser investigadas profundidades maiores que a extensão do arranjo de geofones, diferenciando-se do método da Sísmica de Refração.

5.3 Limitações

Os custos envolvidos nestes ensaios são superiores aos da Sísmica de Refração, pois o levantamento de campo e o processamento dos dados são mais complexos e laboriosos. Este método é sensível à presença de ruídos vibratórios e a obtenção das velocidades de propagação das ondas acústicas é mais complexa, o que pode comprometer a determinação precisa das profundidades.

5.4 Aquisição dos dados

A aquisição dos dados deve ser feita preferencialmente em terrenos pouco acidentados. É recomendada a utilização de um sismógrafo com pelo menos 48 canais. A escolha dos parâmetros geométricos a serem utilizados no arranjo, principalmente a distância ótima entre a fonte sísmica e o primeiro geofone, deve ser definida em um ensaio de campo, denominado de “análise de ruído”, que deve ser realizado antes do levantamento propriamente dito (aquisição CDP – *Common Depth Point*).

5.5 Processamento e apresentação dos resultados

A Sísmica de Reflexão é a técnica geofísica que exige o processamento de dados mais elaborado, sendo importante que o cliente seja informado da rotina de processamento adotada. O dado processado é apresentado na forma de seção de reflexão 2D (distância x tempo ou profundidade), denominada de seção empilhada (**Figura 4**).

No caso da apresentação da seção sísmica em profundidade, considerada como a mais recomendada para correlações com os estratos geológicos/geotécnicos, deve ser especificado o procedimento empregado para determinar as velocidades utilizadas na conversão tempo-profundidade. Os dados de campo devem ser fornecidos em algum dos formatos padrões estabelecidos pela SEG: SEG-2 ou SEG-Y.

Informações mais detalhadas sobre o método da Sísmica de Reflexão podem ser obtidas em ASTM-D7128 (Standard Guide for Using the Seismic-Reflection Method for Shallow Subsurface Investigation, 2005).

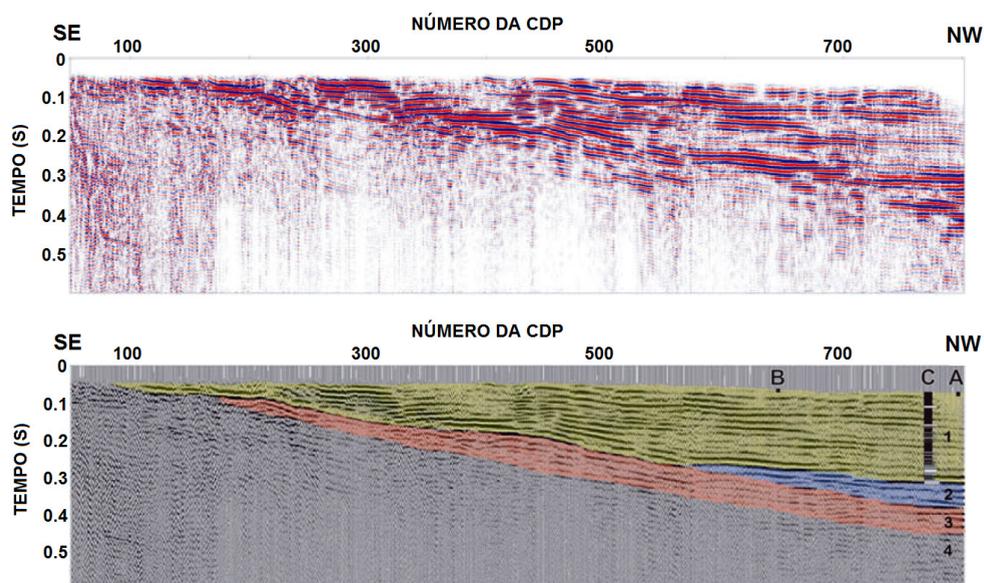


Figura 4 – Seção processada de Sísmica de Reflexão, sem a interpretação (acima) e interpretada (abaixo).

Fonte: Riccomini *et al.* (2011).

6 MÉTODOS QUE EMPREGAM ONDAS DE SUPERFÍCIE (SW)

6.1 Breve descrição do ensaio

Estudos revelam que cerca de dois terços de toda energia de uma onda sísmica se propagam na forma de ondas de superfície. Apesar disso, estas ondas são consideradas indesejáveis (ruídos) pelos métodos da Sísmica de Refração e Reflexão apresentados anteriormente. No início dos anos de 1980, a mesma abordagem adotada por sismólogos, que utilizavam ondas de superfície para estudar camadas profundas do interior da Terra, passaram a ser empregadas para fins geotécnicos, como a determinação de perfis de velocidade da onda S no solo e na investigação de camadas de pavimentos (rodovias e aeroportos). Nesses métodos utiliza-se o registro das ondas sísmicas de superfície (Rayleigh e Love) para se obter o perfil de velocidade da onda de cisalhamento (onda S).

Uma metodologia de aquisição pioneira, conhecida como SASW (*Spectral Analysis of Surface Waves*), utilizava apenas dois geofones e apresentava limitações técnicas/operacionais nos ensaios de campo e no processamento dos dados.

O método MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) que utiliza um arranjo linear com múltiplos geofones, similar ao utilizado na Sísmica de Refração (e Reflexão), foi desenvolvido para superar as limitações do SASW (Figura 5). O perfil 1D, obtido do processamento, apresentando a variação da velocidade da onda S (V_s) em profundidade, é atribuído ao centro do arranjo de geofones.

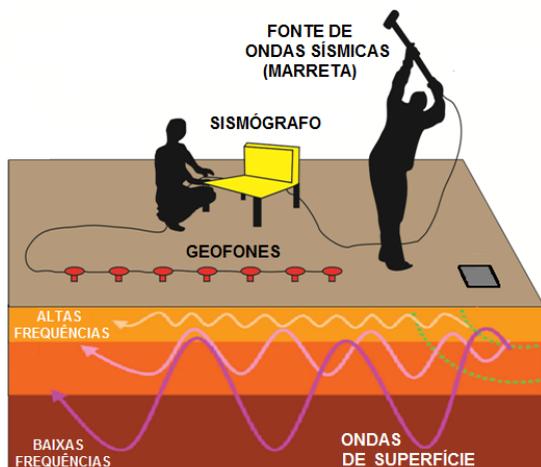


Figura 5 – Método MASW.

Fonte: modificada de Benson, Glaccum e Noel (1984).

6.2 Vantagens

O método do MASW permite obter, de maneira rápida, o perfil de V_s com a profundidade, sem a necessidade de furos, conforme exigido para a execução dos ensaios *Crosshole* e *Downhole*. Este método permite ainda identificar as camadas de menor velocidade sotopostas a camadas de maior velocidade (inversão de velocidades), resolvendo assim, uma das limitações do método da Sísmica de Refração.

Por trabalhar com ondas de superfície é possível empregar este método com êxito, mesmo sob condições com elevado nível de ruído ambiental, como, por exemplo, em áreas urbanas. Dessa forma, o MASW supera esta limitação que existe na aplicação em ambientes urbanos de outros métodos sísmicos que registram as ondas de corpo P e S (Refração e Reflexão).

6.3 Limitações

Ensaio SW fornecem perfis de “ V_s x profundidade” menos precisos do que os fornecidos pelos ensaios realizados em furos (*Crosshole* e *Downhole*). A interpretação está sujeita a ambiguidades, pois o resultado é obtido por meio de processo de inversão de dados. A profundidade de investigação é rasa, geralmente inferior a 30 m, se for utilizada uma marreta para a geração das ondas sísmicas (fonte ativa). Para alcançar maiores profundidades de penetração, deverão ser utilizadas técnicas que empregam fontes passivas, que registram o ruído vibratório ambiental (microtremores), como, por exemplo, as técnicas ReMi (*Refraction Microtremor*) e HVSR (*Horizontal Vertical Spectral Ratio*). Não se recomenda utilizar este método em terrenos íngremes ou com muita oscilação topográfica.

6.4 Aquisição dos dados

O levantamento de campo de MASW é semelhante ao utilizado no método da Sísmica de Refração e de Reflexão, empregando também uma base sísmica com espaçamento constante entre geofones, usualmente, nunca superior a 2 m. Recomenda-se utilizar geofones com frequência de ressonância inferiores aos utilizados na Sísmica de Refração, como, por exemplo, igual ou menor que 4,5 Hz.

A aquisição de dados nos ensaios MASW gera uma informação 1D representada por um perfil de V_s em função da profundidade. A integração de diversos perfis 1D permite a obtenção de uma seção 2D, que possibilita a melhor visualização da distribuição espacial de V_s em subsuperfície. Vale ressaltar que a obtenção de uma seção 2D de MASW implica em trabalho de campo bem mais laborioso, que exige a realização de várias bases ao longo da linha de investigação.

6.5 Processamento e apresentação dos resultados

No processamento de dados de MASW, os registros sísmicos (sismogramas) passam por uma análise espectral, de maneira a se obter as propriedades dispersivas das ondas de Rayleigh. O resultado deste processo é uma imagem de dispersão que representa os máximos energéticos para cada frequência. A curva de dispersão, oriunda desta imagem, passa por um processo matemático de inversão de dados, onde se obtém um modelo de camadas com diferentes espessuras e velocidades da onda S (V_s). No caso de diversas aquisições 1D ao longo de uma linha, também poderá ser apresentada a seção 2D (Figura 6).

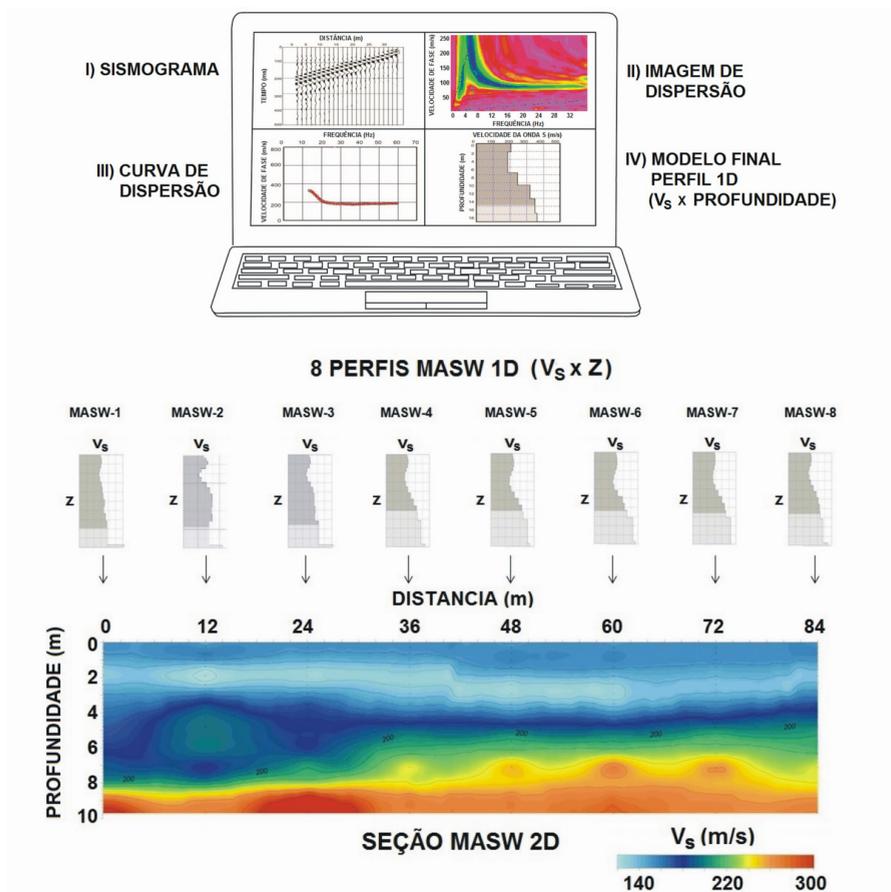


Figura 6 – Fluxo do processamento de dados de MASW e o resultado, mostrando uma seção 2D obtida a partir de oito levantamentos 1D.

Fonte: elaborada pelos autores.

7 ENSAIO CROSSHOLE (CH)

Os ensaios sísmicos em furos de sondagem do tipo Crosshole (e Downhole e Tomografia sísmica) são realizados quando há necessidade de obter informações precisas e detalhadas da variação da velocidade das ondas sísmicas (ondas P e S) com a profundidade.

7.1 Breve descrição do ensaio

O ensaio sísmico *Crosshole* pode ser considerado um “ensaio de laboratório” realizado *in situ*, pois mede, de forma precisa, as velocidades sísmicas das ondas P e S do maciço. Tais grandezas, como já mencionado, são fundamentais na estimativa dos parâmetros elásticos dinâmicos, como: módulo de Young (E), coeficiente de Poisson (ν), módulo de cisalhamento ou rigidez (G) e módulo de incompressibilidade (K).

Esta técnica é baseada na geração de ondas P e S em um furo, e no registro do tempo de chegada destas ondas em um ou mais furos adjacentes. Portanto, para a realização do ensaio *Crosshole*, são necessários dois (no mínimo) ou três furos (recomendado) devidamente preparados para a sua execução, inclusive com o controle de verticalidade. A fonte de ondas sísmicas é posicionada em um furo e o(s) geofone(s) no(s) furo(s) adjacente(s), sempre na mesma profundidade (**Figura 7**). Registra-se o tempo de propagação das ondas P e S em vários níveis de profundidade ao longo de todo o furo. Recomenda-se enfaticamente que a fonte de onda S seja polarizada, ou seja, tenha a capacidade de produzir impactos em sentidos opostos.

7.2 Vantagens

O ensaio *Crosshole* é o método que fornece a melhor resolução vertical pois possibilita a execução de dezenas de medidas ao longo do furo. É também o ensaio que fornece o mais preciso perfil da velocidade das ondas P e S, pois a resolução não diminui com a profundidade.

7.3 Limitações

Dentre os ensaios em furos de sondagem, o *Crosshole* é o mais caro, pois necessita de dois a três furos, preparados e revestidos, para a sua execução.

7.4 Aquisição dos dados

Os registros da onda S e da onda P devem ser efetuados em duas etapas, utilizando duas fontes distintas e adequadas para a geração preferencial de um e de outro tipo de onda. As medidas são geralmente efetuadas em intervalos de 1 m, podendo variar de acordo com a resolução vertical exigida e a profundidade dos furos. O geofone de furo deve ser de modelos constituídos por componentes verticais e horizontais (triaxiais).

7.5 Processamento e apresentação dos resultados

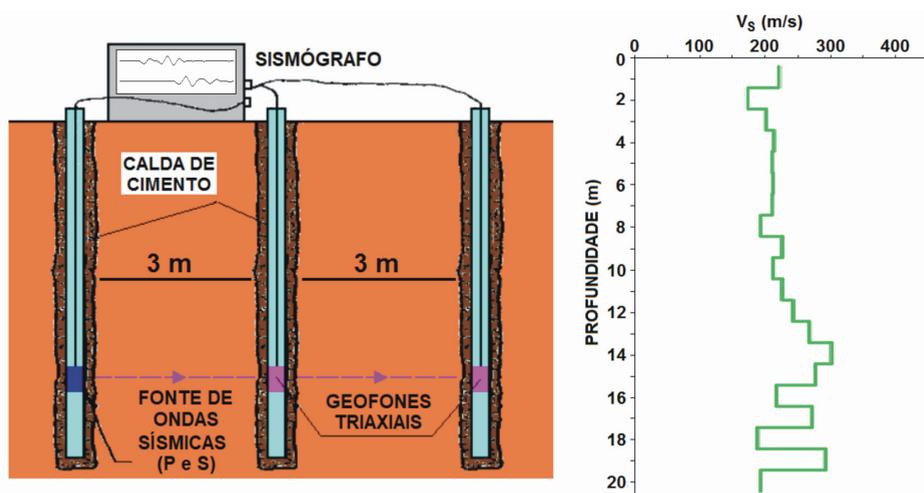


Figura 7 – Ensaio *Crosshole* (esquerda) e o resultado obtido (direita), mostrando um perfil da variação da velocidade da onda S (V_s) com a profundidade ao longo do furo.

Fonte: elaborada pelos autores.

O processamento de dados de *Crosshole* consiste na determinação do tempo de chegada das ondas P e S e, posteriormente, o cálculo das velocidades. Devem ser apresentados os sismogramas de campo e o perfil de V_p e V_s com a

profundidade, na forma de tabelas e/ou gráficos. Se as informações da densidade (massa específica) dos materiais forem disponibilizadas, devem também ser apresentados os módulos elásticos dinâmicos (E, G, K), calculados a partir das velocidades determinadas.

Informações mais detalhadas sobre o ensaio *Crosshole* podem ser obtidas em ASTM-D4428 (Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing, 2007).

8 ENSAIO DOWNHOLE (DH)

Os ensaios sísmicos em furos de sondagem do tipo Downhole (e Crosshole e Tomografia sísmica) são realizados quando há necessidade de obter informações precisas e detalhadas da variação da velocidade das ondas sísmicas (ondas P e S) com a profundidade.

8.1 Breve descrição do ensaio

No ensaio *Downhole*, a fonte de ondas sísmicas deve estar posicionada na superfície do terreno e os geofones no interior do furo (**Figura 8**). São registrados os traços sísmicos correspondentes à propagação das ondas (P e S), desde a fonte até o geofone, posicionado em diversas profundidades, possibilitando a determinação dos tempos de chegada destas ondas e, conseqüentemente, das velocidades de propagação. Podem ser também utilizados hidrofones, sendo que, neste caso, o furo deverá estar preenchido com água, permitindo, nestas condições, apenas o registro da onda P.

O ensaio *Uphole* utiliza a fonte de ondas sísmicas no interior do furo e geofones na superfície do terreno, o qual fornece resultados similares ao do *Downhole*. Entretanto, trata-se de um ensaio menos utilizado, devido à maior dificuldade em gerar ondas sísmicas no interior de um furo com quantidade suficiente de energia.

8.2 Vantagens

O ensaio *Downhole* é uma alternativa ao ensaio *Crosshole*, porque utiliza apenas um furo, o que reduz seu custo.

8.3 Limitações

O ensaio *Downhole* fornece resultados menos precisos que o ensaio *Crosshole* e necessita, também, para a sua execução, de um furo de sondagem devidamente preparado.

8.4 Aquisição dos dados

Assim como no ensaio *Crosshole*, devem ser utilizadas, para o registro da onda P e da onda S, fontes distintas que gerem, preferencialmente, um e outro tipo de onda. As medidas são comumente efetuadas em intervalos de 1 m (deslocamento do geofone ao longo do furo), podendo variar para mais ou menos, de acordo com a resolução vertical exigida e a profundidade do furo.

8.5 Processamento e apresentação dos resultados

Assim como no ensaio *Crosshole*, o processamento dos dados consiste na determinação do tempo de chegada das ondas P e S e o cálculo das velocidades intervalares. Devem ser apresentados: os sismogramas com os traços sísmicos adquiridos (onda P e onda S); os gráficos “profundidade x tempo”, com os tempos das primeiras chegadas e as velocidades das camadas identificadas nestes gráficos, que são obtidas pelo alinhamento dos pontos correspondente aos tempos das primeiras chegadas. Devem ser também apresentados os perfis com as velocidades intervalares determinadas e os respectivos módulos elásticos dinâmicos calculados.

Informações mais detalhadas sobre o ensaio *Downhole* podem ser obtidas em ASTM-D7400 (Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing, 2008).

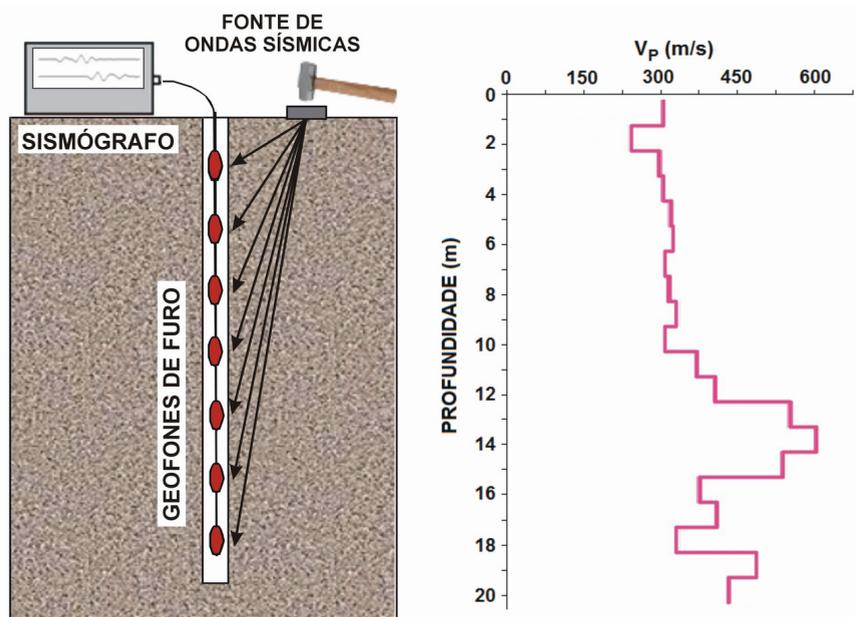


Figura 8 – Ensaio *Downhole* (esquerda) e o resultado obtido (direita), mostrando um perfil da variação da velocidade da onda P (V_p) com a profundidade, ao longo do furo.

Fonte: elaborada pelos autores.

9 TOMOGRAFIA SÍSMICA (TOMO)

Os ensaios sísmicos em furos de sondagem do tipo Tomoografia sísmica (e *Crosshole* e *Downhole*) são realizados quando há necessidade de obter informações precisas e detalhadas da variação da velocidade das ondas sísmicas (ondas P e S) com a profundidade.

9.1 Breve descrição do ensaio

A Tomografia Sísmica é um ensaio que utiliza dois ou mais furos de sondagens. De forma semelhante ao ensaio *Crosshole*, a fonte de ondas sísmicas é posicionada em um furo e os geofones nos furos adjacentes (Figura 9). A

aquisição de dados é efetuada com múltiplas posições da fonte e dos geofones nos furos, de modo a se obter uma ampla cobertura dos raios sísmicos que atravessam o plano do maciço compreendido entre os dois furos.

9.2 Vantagens

A Tomografia Sísmica fornece com muito detalhe a distribuição, lateral e em profundidade, de V_p e V_s na porção do maciço investigado.

9.3 Limitações

É um método cujo processo de aquisição de dados é lento e o resultado é restrito ao volume de maciço investigado entre os furos, que não podem ser muito distantes um do outro, comumente inferiores a 10 m.

9.4 Aquisição dos dados

Assim como nos ensaios *Crosshole* e *Downhole*, a fonte e o(s) geofone(s) devem estar bem acoplados ao furo onde estão inseridos. Adicionalmente, a colocação de geofones ou fontes também na superfície do terreno contribui para a melhoria dos resultados do ensaio.

9.5 Processamento e apresentação dos resultados

No processamento de dados de Tomografia Sísmica são utilizados algoritmos de inversão dos dados. O produto é um modelo 2D com a distribuição da velocidade da onda sísmica no plano compreendido entre os dois furos. Os resultados são comumente apresentados na forma de curvas de contorno ou em escala de cores.

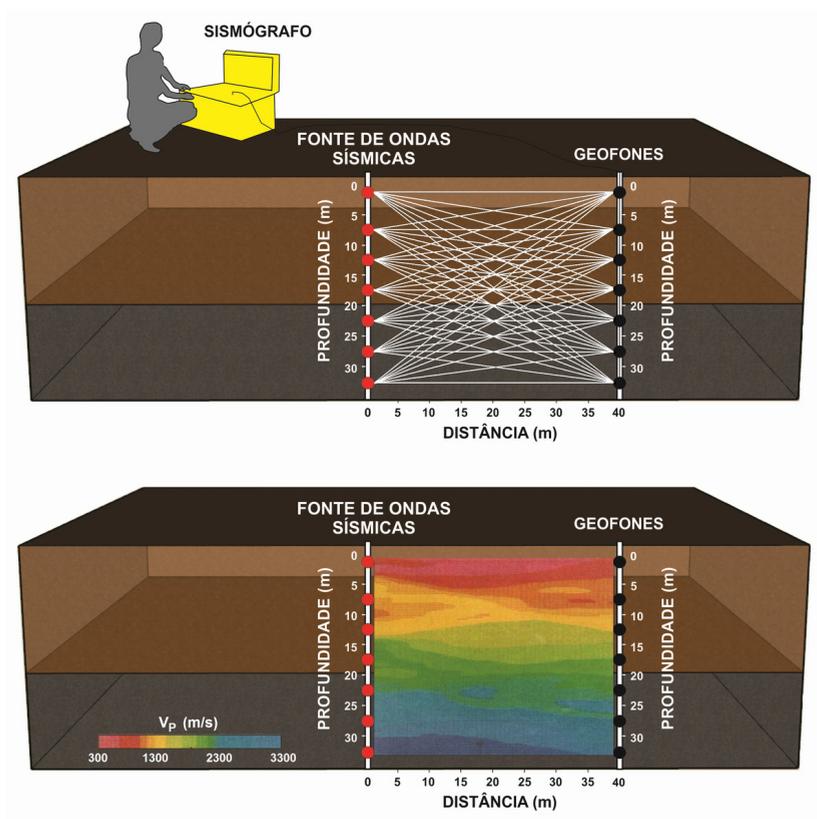


Figura 9 – Tomografia Sísmica (acima) e o resultado obtido (abaixo), mostrando a distribuição 2D da velocidade da onda P (V_p) no plano compreendido entre os dois furos.

Fonte: elaborada pelos autores.

10 MICROSSÍSMICA

10.1 Breve descrição do ensaio

A Microssísmica é um método geofísico cujos princípios são os mesmos utilizados na Sismologia. O termo microssismo se aplica a eventos com magnitudes da ordem de -2 a 0 e, portanto, um sistema de monitoramento microssísmico é capaz de registrar eventos com magnitudes muito baixas, superiores a -2 (Tabela 1).

Tabela 1 – Classificação de eventos sísmicos baseados na magnitude. RITA: PODE DIMINUIR UM POUCO O TAMANHO DA TABELA

Mag-ni-tude	Classe	Escala						Momento sísmico
		Distância		Deslocamento		Frequência		
8 a 10	terremoto muito forte	100 – 1000	(km)	4 – 40	(m)	0,001 – 0,1	(Hz)	1 kAk – 1 MAk
6 a 8	terremoto grande	10 – 100	(km)	0,4 – 4	(m)	0,01 – 1	(Hz)	1 Ak – 1 kAk
4 a 6	terremoto moderado	1 – 10	(km)	4 – 40	(cm)	0,1 – 10	(Hz)	1 mAk – 1 Ak
2 a 4	terremoto pequeno	0,1 – 1	(km)	4 – 40	(mm)	1 – 100	(Hz)	1 μ Ak – 1 mAk
0 a 2	milissismo (micro terremoto)	10 – 100	(m)	0,4 – 4	(mm)	10 – 1000	(Hz)	1 nAk – 1 μ Ak
-2 a 0	microssismo	1 – 10	(m)	40 – 400	(μ m)	0,1 – 10	(kHz)	1 pAk – 1 nAk
-4 a -2	nanossismo	0,1 – 1	(m)	4 – 40	(μ m)	1 – 100	(kHz)	1 fAk – 1 pAk
-6 a -4	picossismo	1 – 10	(cm)	0,4 – 4	(μ m)	10 -1000	(kHz)	1 aAk – 1 fAk
-8 a -6	femtossismo	1 – 10	(mm)	0,04 – 0,4	(μ m)	1 – 100	(MHz)	1 zAk – aAk

Fonte: modificada de Eaton, Baan e Van Der (2016).

* 1 Ak (Aki) = 1018 Nm (unidade padrão para tamanho de terremoto, recomendada pela Associação Internacional de Sismologia e Física do Interior da Terra).

A Microssísmica permite a medição de movimentações do terreno (*ground motions*) geradas por eventos sísmicos naturais (terremotos) ou antrópicos (detonações), utilizando sensores (geofones de 4,5 Hz) de alta sensibilidade.

Um sistema de monitoramento microssísmico utiliza geofones de alta sensibilidade conectados a uma estação sísmica. Os dados registrados passam por uma conversão analógica digital (NetADC) e, posteriormente, são pré-processados e enviados para um servidor sísmico por meio de uma rede de comunicação. Adicionalmente, o sistema conta com um GNSS para assegurar que todos os componentes do sistema estejam na mesma escala horária (**Figura 10**).

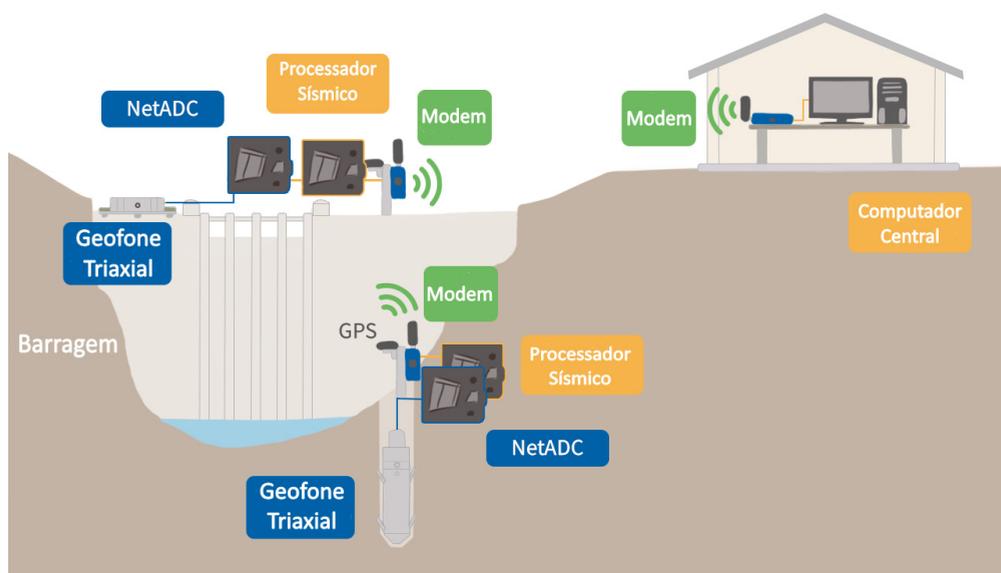


Figura 10 – Sistema de monitoramento microsísmico.

Fonte: Tetra Tech

Um mesmo arranjo de geofones possibilita duas metodologias de aquisição de dados: a Microsísmica convencional (*Passive Microseismic*) e a Interferometria sísmica do ruído ambiente (*Ambient Noise Seismic Interferometry* – ANSI).

A Microsísmica convencional registra as movimentações do terreno (*ground motions*), as quais indicam a ocorrência de pequenos deslocamentos internos da estrutura, com a identificação da localização e dos parâmetros da fonte sísmica (magnitude, potência e energia), além de permitir a análise dos picos de velocidade e aceleração observados.

A Interferometria sísmica se baseia na utilização do ruído ambiente, continuamente monitorado, para a elaboração de uma série temporal da variação da velocidade de propagação das ondas sísmicas no meio. Essa variação de velocidade pode ser associada diretamente ao ganho ou à perda de rigidez do meio investigado.

A Interferometria sísmica do ruído ambiente tem sido empregada em diversas aplicações para monitorar o comportamento geotécnico de taludes, minas subterrâneas, zonas de falhas ativas, barragens de rejeitos entre outros.

10.1 Vantagens

A Microsísmica é um método que permite o monitoramento contínuo de microtremores de magnitudes muito baixas (negativas), obtendo-se a localização dos eventos, e sua caracterização (natural ou antrópico). A instrumentação utilizada no monitoramento do corpo de uma barragem detecta alterações internas em evolução, informações estas que podem constituir-se em alertas prévios (dias ou semanas) de um mau funcionamento da estrutura.

10.2 Limitações

A implantação de sistemas de monitoramento microsísmicos requer a importação dos equipamentos, além do desenvolvimento de complexa infraestrutura física de engenharia, comunicação eficiente dos dados e de uma estrutura para suportar o processamento contínuo das informações. Isso faz com que a implantação desse tipo de solução tenha custos relativamente elevados.

10.3 Aquisição dos dados

A aquisição de dados é realizada a partir da instalação de um arranjo de geofones em campo, onde a quantidade de sensores irá depender do tipo e das dimensões da estrutura a ser monitorada e da expectativa do grau de sensibilidade (magnitude e localização de evento) que se deseje monitorar. Os dados são continuamente enviados para um servidor central para armazenamento e acesso de softwares dedicados.

10.5 Processamento e apresentação dos resultados

Os dados são processados por softwares dedicados à Sismologia, com os quais, a partir dos sismogramas, são calculados os tempos de chegadas das ondas P e S, e desenvolvidas as análises sismológicas correspondentes. Os dados da Interferometria sísmica do ruído ambiente passam por um processo de inversão geofísica, empilhamento e geração de gráficos de variação de velocidade ao longo do tempo (**Figura 11**).

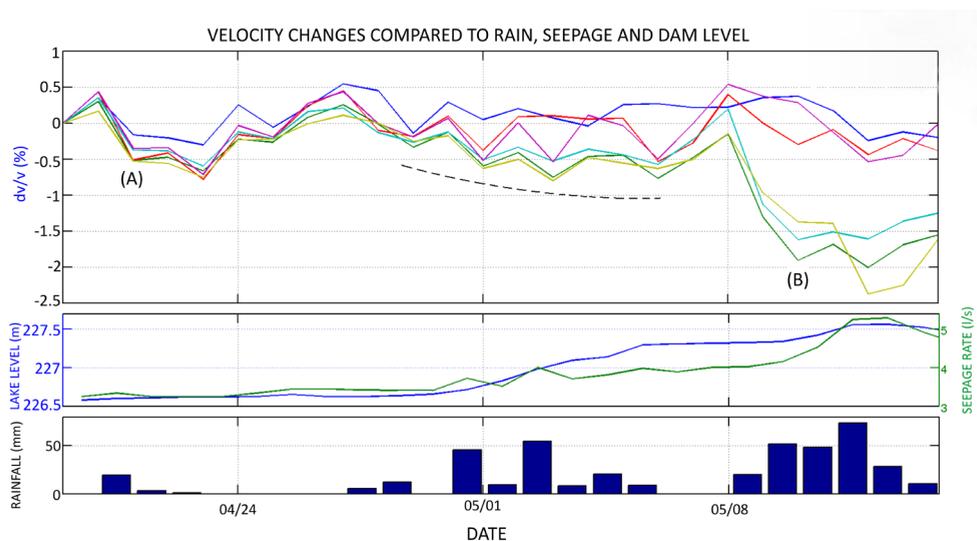


Figura 11 – Exemplo de gráfico de variação da velocidade de propagação de onda sísmica no meio ao longo do tempo. As linhas em queda (05/08) ocorreram devido à presença de percolações de água em uma barragem de rejeito.

Fonte: Olivier et al. (2017). Cortesia da Tetra Tech e do Institute of Mine Seismology (IMS).

11 PRINCIPAIS PARTICIPANTES

Editor: João Jeronimo Monticelli

Autores: Luiz Antonio Pereira de Souza e Otávio Coaracy Brasil Gandolfo

Colaboradores: Adalberto Aurélio Azevedo (Consultor), Adriano Marchioreto (Alta Resolução), Aluizio Oliveira Júnior (Delfos Marítima), Anita Gomes Oliveira (UFBA), Antonio Celso de Oliveira Braga (Consultor), Arthur Ayres Neto (UFF), Augustinho Rigoti (Gideon), César Alexandre Félix (Tessec Serviços Marítimos), Debora Silveira Carvalho, (Geofísica Consultoria), Deborah Durgin e Carol A. Morrissey (Klein Marine Systems), Eduardo Rodrigues e Hasan Aktarakçi (AGI), Fábio Novais e Kayque Bergamaschi (Rural Tech), Garry Kozak (Edgetech), Geraldo Cunha (Microars), Gerrit Olivier e Tjaart de Wit (IMS), John Gann e Ashley Chan (Chesapeake), José Domingos Faraco Gallas (IGc-USP), Juliano Vitorino e Fábio Miranda (Neogeo), Kim Olá e Tom Olá (Meridata), Kinoshita Yasumasa (Serviço Geológico do Japão – GSJ) – *in memoriam*, Leonardo Santana, Eduardo Yassuda, Camila Rodrigues e Lorena

Andrade Oliveira (Tetra Tech), Lisa Brisson e Damon Wolfe (Echo81), Luis Américo Conti (USP Leste), Marco Ianniruberto (UNB), Marcos Saito de Paula (JS Geologia Aplicada), Mariucha da Silva (Consultora), Mascimiliano de los Santos Maly (IO-USP), Michel Michaelovitch de Mahiques (IO-USP), Mike Brissette (R2Sonic), Moysés Gonzales Tessler (Consultor), Nabil Alameddine (Ministério Público do Estado de São Paulo), Oleg Bokhonok (UNISANTOS), Régis Gonçalves Blanco (*in memoriam*), Carlos Alberto Birelli, Vicente Luiz Galli e Leonides Gureli Netto (IPT), Renato Luiz Prado (IAG-USP), Roberto Bianco (INPH), Rodolfo Jasão Soares Dias (Subgeo), Sérgio Augusto Palazzo (SAP Service Engenheiros Consultores) e Sérgio Correia (Belov).

12 REFERÊNCIAS

BENSON, R. C.; GLACCUM, R.; NOEL, M. **Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration**. Las Vegas: U.S. EPA Environmental Monitoring Systems Laboratory, 1984. 236 p. (NTIS PB84-198449).

EATON, D. W.; VAN DER BAAN, M.; INGELSON, A. Terminology for fluid-injection induced seismicity in oil and gas operations. **CSEG Recorder**, p. 24–28, Apr. 2016.

OLIVIER, G. *et al.* Monitoring the stability of tailings dam walls with ambient seismic noise. **The Leading Edge**, v. 36, n. 4, p. 350a1-350a6, Apr. 2017.

RICCOMINI, C. *et al.* The Colônia structure, São Paulo, Brazil. **Meteoritics & Planetary Science**, v. 46, n. 11, p. 1630–1639, 2011.

13 REFERÊNCIAS NORMATIVAS E DIRETIVAS

Cabe ao usuário da presente publicação cotejar a mesma com outras normas (diretrizes, guias, manuais, boletins técnicos, instruções e artigos técnicos, em geral), nacionais e estrangeiras, visando harmonização e melhor aplicação

prática nos projetos. No presente caso, recomenda-se considerar, dentre outras, as seguintes publicações:

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-D4428**: Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing. West Conshohocken, 2007. 11 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-D5777**: Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation. West Conshohocken, 2006. 14 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-D7128**: Standard Guide for Using the Seismic-Reflection Method for Shallow Subsurface Investigation. West Conshohocken, 2005. 25 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-D7400**: Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing. West Conshohocken, 2008. 11 p.

NORMA ABGE 100/2023. **Investigações geológico-geotécnicas para obras de infraestrutura – Métodos e técnicas**. São Paulo: ABGE, 2023.

SOUZA, L. A. P.; GANDOLFO, O.C.B. **NORMA ABGE 200/2023. Geofísica aplicada – Métodos e técnicas**. Vários colaboradores. 1ª Edição. São Paulo: ABGE, 2023.

14 LEITURAS RECOMENDADAS

SOUZA, L. A. P. ; GANDOLFO, O.G. B. **Geofísica aplicada à geologia de engenharia e ambiental**. 1ª Ed. São Paulo: ABGE, 2021.

SOUZA, L. A. P. ; GANDOLFO, O.G.B. Geofísica aplicada. *In*: Oliveira, A.M.S.; Monticelli, J.J.(Editores.): **Geologia de engenharia e ambiental, Volume 2 – Métodos e Técnicas, Cap. 15**. São Paulo: ABGE, 2018.