

**GEOFÍSICA APLICADA À GEOLOGIA
DE ENGENHARIA E MEIO AMBIENTE**
MANUAL DE BOAS PRÁTICAS

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	22
GENERALIDADES	24
CAPÍTULO 1	
INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA EM TERRA	29
1.1 Métodos sísmicos	32
A) Sísmica de Refração (REFRA)	33
B) Sísmica de Reflexão (REFLEX).....	36
C) Métodos que empregam ondas de superfície (SW).....	38
D) Ensaio em furos de sondagem (CH, DH e TOMO).....	41
E) Microssísmica	47
1.2 Métodos elétricos.....	50
A) Eletrorresistividade	50
B) Potencial Espontâneo (SP)	55
C) Polarização Induzida (IP).....	56
1.3 Métodos eletromagnéticos	58
A) Radar de Penetração no Solo (GPR)	58
B) EM no domínio da frequência (FDEM)	60
C) EM no domínio do tempo (TDEM).....	62
1.4 Métodos potenciais.....	63
A) Magnetometria (MAG)	63
B) Microgravimetria (GRAV)	65
1.5 Perfilação de poços (PERF).....	67

CAPÍTULO 2	
INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA EM ÁGUA	75
2.1 Investigação rasa	78
2.2 A importância dos ambientes submersos rasos	78
2.3 Vantagens do emprego da geofísica na investigação de ambientes submersos....	79
2.4 Métodos acústicos aplicados na investigação de áreas submersas.....	81
2.4.1 Investigação de superfícies submersas	85
A) Batimetria	87
B) Sonar de Varredura Lateral	97
2.4.2 Investigação de subsuperfícies submersas	107
A) Perfilagem Sísmica Contínua.....	107
2.5 Outros métodos geofísicos aplicados na investigação de ambientes submersos....	119
A) Radar de Penetração no Solo (GPR)	119
B) Método da Eletrorresistividade	123
C) Métodos potenciais: Magnetometria.....	126
2.6 Outros métodos empregados na investigação de áreas submersas	133
A) Câmeras Acústicas	134
B) Laser Scanner Subaquático	135
C) ROV e Filmagem	137
PERSPECTIVAS DA GEOFÍSICA APLICADA	139
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141
LEITURAS RECOMENDADAS	143
GLOSSÁRIO	147

APRESENTAÇÃO

Este documento é destinado aos profissionais não especialistas em geofísica, constituindo-se em uma tentativa de construção de um roteiro, cuja finalidade é auxiliar e orientar profissionais que contratam serviços de geofísica aplicada na área de geologia de engenharia e ambiental.

Produzido pela ABGE, tem por objetivo dar suporte às empresas contratantes na construção de critérios para a escolha dos métodos geofísicos mais adequados à melhor solução para uma demanda específica de um determinado projeto. Objetiva, também, contribuir com colegas geofísicos, na medida em que discute procedimentos operacionais e controle de qualidade na aquisição e no processamento de dados, visando ao melhor desempenho dos métodos geofísicos. Estudantes das ciências da Terra e do mar certamente farão bom proveito do material aqui apresentado.

Este manual está organizado em duas partes:

CAPÍTULO 1 – Investigação geofísica em terra.

CAPÍTULO 2 – Investigação geofísica em água.

Este manual inclui também a apresentação de recomendações das melhores práticas para execução dos ensaios de campo e a forma como os resultados podem ser apresentados, a fim de garantir a qualidade dos serviços oferecidos na área da geofísica aplicada e o registro adequado dos dados coletados.

O Brasil ainda é carente em relação a normas e procedimentos relacionados à área da geofísica aplicada. Nos Estados Unidos, por exemplo, existem organizações que elaboram e publicam normas, destacando-se a The American Society of Testing and Material (ASTM). No Brasil, somente no ano de 2011, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a norma NBR 15935 – “Investigações Ambientais - Aplicação de Métodos Geofísicos” com o intuito de auxiliar os profissionais

a aprofundarem seus conhecimentos a respeito das características e da utilização dos diversos métodos geofísicos.

Esta publicação da ABGE pretende ser um manual de consulta para os profissionais contratantes de serviços de geofísica, que costumam fazer a seguinte pergunta: “qual(ais) o(s) método(s) geofísico(s) que melhor atende(m) à demanda do meu projeto?”.

GENERALIDADES

A geofísica aplicada constitui-se em um conjunto de métodos indiretos de investigação do subsolo, sendo, portanto, métodos não destrutivos que, a partir de ensaios de campo, fornecem um rápido conhecimento das principais características físicas da área de interesse. Possuem boa relação custo/benefício, sendo capazes de investigar as propriedades físicas dos materiais geológicos em seu estado *in situ*.

O sucesso da aplicação dos métodos geofísicos está diretamente relacionado com a amplitude dos contrastes das propriedades físicas entre o “alvo” e o seu “entorno”. Dessa forma, eventuais casos de insucesso na investigação geofísica ocorrem devido à inexistência de contrastes suficientemente expressivos entre as propriedades físicas dos diferentes meios geológicos da área investigada, de forma a garantir que o alvo seja identificado e mapeado. Ressalta-se que, os contrastes entre as propriedades físicas dos meios estão diretamente relacionados à natureza do meio geológico e, portanto, são independentes do operador ou do equipamento geofísico empregado. Contudo, por se tratar de ensaios indiretos, a solução – isto é, obter um modelo a partir dos dados – nem sempre é única, podendo envolver alta equivalência dos modelos resultantes, com conseqüente ambigüidade na interpretação, mas que pode ser minimizada com o aporte de informações provenientes de investigações diretas (sondagens, testemunhagens, coleta de amostra etc.) ou mesmo com a utilização de mais de um método geofísico na área investigada.

Os ensaios geofísicos são comumente realizados na etapa inicial de caracterização geral (viabilidade), precedendo as atividades de investigação detalhada da área de interesse. Não raramente, são empregados também na fase executiva dos projetos, quando há necessidade de serem obtidas informações específicas e mais detalhadas.

A geofísica aplicada tem evoluído desde os primeiros trabalhos apresentados no início do século 20, como conseqüência do avanço tecnológico, em especial, da

eletrônica. Observa-se uma tendência de atuação da geofísica aplicada no campo do monitoramento em tempo real de variações das diversas propriedades físicas dos terrenos. O monitoramento de barragens, por meio dos métodos de Microsísmica, Eletroresistividade e Potencial Espontâneo, ilustra algumas das inúmeras possibilidades neste vasto potencial campo de atuação da geofísica aplicada.

Algumas boas práticas e recomendações gerais, para que bons resultados sejam alcançados com a aplicação de todos os métodos geofísicos abordados nesse manual, estão listadas nos itens a seguir:

- Os ensaios geofísicos de campo são realizados com medidas efetuadas ao longo de perfis lineares ou em pontos discretos no terreno, que devem ser distribuídos na área de interesse de forma representativa. Os perfis devem ser preferencialmente orientados em direção perpendicular à feição linear a ser mapeada ou ao *strike* da estrutura geológica. Muito comumente, torna-se necessária a execução de perfis em direções perpendiculares entre si (formando uma malha ou um *grid*), especialmente recomendada quando a orientação da estrutura, objeto da investigação, for desconhecida. No caso de levantamentos geofísicos em terra, salvo em situações e demandas específicas, não se recomenda desenvolver levantamentos em terrenos demasiadamente acidentados, ou em terrenos com solos extremamente moles, tendo em vista a complexidade operacional, bem como o inerente comprometimento da geometria do método geofísico empregado. O acesso à área deve estar garantido para o deslocamento da equipe e dos equipamentos, comumente sendo necessária a abertura de picadas com conseqüente remoção da vegetação.
- É de extrema relevância, para o aprimoramento do modelo geológico a ser elaborado a partir dos ensaios geofísicos, que sejam disponibilizadas, para a empresa geofísica contratada, todas as informações existentes sobre a área onde será realizado o levantamento: dados de sondagens e de poços, estudos geológicos, investigações geotécnicas existentes e resultados de levantamentos geofísicos anteriormente executados na área.
- O espaçamento entre os pontos de medidas, extensão dos arranjos lineares, a potência dos equipamentos utilizados, frequências de operação dos sistemas e os demais parâmetros aplicáveis aos diversos métodos e às técnicas geofísicas, deverão ser dimensionados, de modo que as profundidades de investigação e o nível de resolução horizontal (lateral) e vertical sejam efetivamente alcançados, de acordo com as premissas estabelecidas pelo contratante.

- O correto posicionamento dos pontos e das linhas onde foram realizados os ensaios geofísicos é fundamental para todas as etapas subsequentes do projeto. Todos os levantamentos de campo devem ser executados com apoio de sistemas de posicionamento global (Global Navigation Satellite System - GNSS), com precisão ao menos submétrica, e/ou estação total, visando a garantir o devido e preciso posicionamento dos pontos e/ou das linhas. No caso da não utilização de GNSS ou estação total, o procedimento utilizado para o posicionamento dos pontos e/ou os perfis deve ser informado. Por exemplo, em levantamentos terrestres pode ser utilizada uma trena associada a uma planta de detalhe da área investigada. Recomenda-se utilizar o *datum* SIRGAS-2000 ou WGS-84. No caso da não adoção destes, deverá ser mencionado qual foi o *datum* utilizado e o motivo de seu emprego.
- O posicionamento dos dados adquiridos em campo, seja sob a forma de perfis ou pontos discretos no terreno, deverá ser apresentado no relatório sobre uma planta, mapa ou qualquer outro tipo de base cartográfica. No caso de os resultados serem apresentados como curvas de contornos, é obrigatória a plotagem da localização dos pontos sobre os quais as linhas de isovalores foram geradas, de forma a evitar interpretações equivocadas nas regiões onde não existem informações.
- Os equipamentos, acessórios e arranjos geométricos de campo utilizados no processo de aquisição de dados devem ser informados no relatório entregue ao cliente. Qualquer problema relacionado ao funcionamento do equipamento, à qualidade dos dados e ao posicionamento dos perfis e/ou pontos de medida devem ser reportados. Devem também ser informados quais os softwares que foram utilizados para o processamento dos dados.
- Os dados de campo originais (dados brutos), hoje em sua maioria em formato digital (original do equipamento), devem ser disponibilizados para o contratante. Os dados deverão ser fornecidos no seu formato original para que possam ser, eventualmente, reprocessados ou simplesmente conferidos por terceiros. Podem também ser fornecidos, adicionalmente, em outros formatos acessíveis aos usuários, como por exemplo, imagens, tabelas com dados numéricos etc., possibilitando que sejam visualizados em softwares de uso comum no mercado.
- Os resultados de um levantamento geofísico, dependendo do método utilizado, podem ser apresentados na forma de gráficos, plantas, mapas de contornos,

seções 2D e, eventualmente, em blocos diagramas 3D. São amplas as possibilidades de visualização dos dados, se considerarmos a evolução dos softwares de processamento de dados disponíveis atualmente no mercado.

- Os dados de imageamento (seções 2D de GPR, de Sísmica de Reflexão e de Eletrorresistividade) devem ser apresentados em um formato “limpo” (dado original, sem a interpretação) e “interpretado” (**Figura 4**, **Figura 22** e **Figura 43**), no qual estejam indicadas as feições delineadas na interpretação, como, por exemplo posição do nível d’água, estratigrafia em subsuperfície, profundidade do topo rochoso, presença de falhas, zonas fraturadas e sujeitas à maior percolação de água, objetos enterrados e demais estruturas identificadas. Esta apresentação possibilita ao contratante observar os dados originais sem a interpretação do contratado.
- Recomenda-se utilizar mais de um método geofísico na investigação, a fim de minimizar a natural ambiguidade do processo de interpretação dos dados.
- Na investigação de ambientes submersos, recomenda-se o emprego simultâneo de mais de uma fonte acústica, para se garantir o desempenho dos métodos sísmicos em termos de resolução e de penetração na coluna sedimentar.
- A disponibilidade de dados oriundos de investigações diretas (boletins de sondagens, ensaios geotécnicos etc.) contribui efetivamente para a interpretação, já que possibilita a confrontação de dados diretos e indiretos, que viabilizam a análise das concordâncias e das discrepâncias entre os dados.
- Por conveniência técnica ou por solicitação do contratante, poderá vir a ser necessária a reinterpretação dos dados, caso novas informações diretas ou indiretas (inexistentes na ocasião em que o levantamento geofísico foi realizado) sejam disponibilizadas posteriormente.

CAPÍTULO 1

INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA EM TERRA

As principais aplicações dos métodos geofísicos em geologia de engenharia e ambiental, empregados em levantamentos terrestres, foram organizadas em quatro grandes temas e estes, por sua vez, estão relacionados a pautas específicas, conforme são apresentados a seguir.

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.

b) 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.

c) 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.

d) Outras aplicações:

- 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 neste manual, estão listados a seguir.

a) Métodos Sísmicos

- Sísmica de Refração (REFRA);
- Sísmica de Reflexão (REFLEX);
- métodos que empregam ondas de superfície (SW): MASW, SASW, Remi e HVSR;

- ensaios em furos de sondagem: *Crosshole* (CH), *Downhole* (DH) e Tomografia Sísmica (TOMO).

b) Métodos Elétricos

- Eletrorresistividade: Caminhamento Elétrico/Imageamento (CE/Im) e SEV;
- Potencial Espontâneo (SP);
- Polarização Induzida (IP).

c) Métodos Eletromagnéticos

- Radar de Penetração no Solo (GPR);
- EM no Domínio da Frequência (FDEM);
- EM no Domínio do Tempo (TDEM).

d) Métodos Potenciais

- Magnetometria (MAG);
- Microgravimetria (GRAV).

e) Perfilagem de Poços (PERF)

Para cada uma das aplicações anteriormente citadas, sugerimos os métodos geofísicos mais apropriados para se obter os melhores resultados na investigação em terra, de modo que as demandas possam ser efetivamente solucionadas em cada projeto.

Este documento deve ser visto como um manual de orientação. Para aprimorar o conhecimento dos conceitos básicos e dos fundamentos dos métodos geofísicos, recomenda-se a leitura das várias publicações disponíveis na literatura geofísica, algumas delas, mencionadas neste manual nos itens Referências Bibliográficas e Leituras Recomendadas.

Para a classificação dos métodos ou das técnicas geofísicas empregadas, em função das principais aplicações na investigação em terra, foram utilizados os seguintes critérios: **A** = primeira escolha (método geofísico preferencial); **B** = segunda escolha (método geofísico alternativo). Quando não houver qualquer uma destas opções, o método não é recomendado ou é aplicável em situações muito particulares e, neste caso, a possibilidade de sua utilização deve ser discutida com o geofísico executor do trabalho.

Ao final deste capítulo, apresenta-se uma planilha (Quadro 1), que tem a intenção de auxiliar o profissional na escolha do(s) método(s) geofísico(s) recomendado(s) para as diversas aplicações na investigação terrestre, no contexto da geologia de engenharia e ambiental. Esta tabela é orientativa e as informações que nela constam devem ser entendidas como sugestões, com indicações dos métodos geofísicos comumente empregados para as diversas aplicações. Cumpre ressaltar que não deve ser descartada a possibilidade de utilização de outros métodos geofísicos, não indicados/sugeridos na tabela, desde que seja tecnicamente justificada pelo executor dos serviços, com a anuência do contratante.

1.1 MÉTODOS SÍSMICOS

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 dos materiais. 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 pelos engenheiros civis como G_0 ou G_{\max} , permite que sejam reconhecidas algumas propriedades dos solos que os tradicionais ensaios SPT (*Standard Penetration Test*), rotineiramente utilizados, não permitem avaliar.

Os métodos sísmicos utilizam fontes de energia consideradas “ativas” (explosivos, marreta, rifle sísmico, compactadores de solo, queda de pesos) e “passivas” (ruídos urbanos, microsismos), 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.

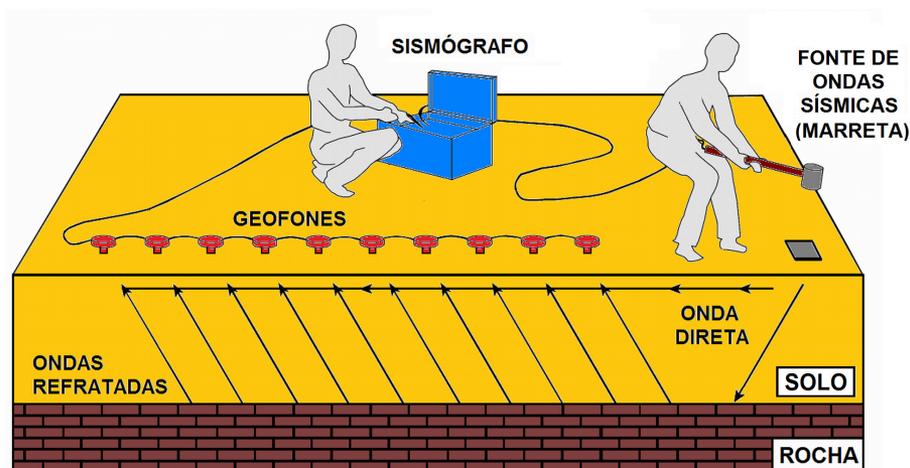
Os métodos sísmicos podem ser subdivididos em Refração, Reflexão, métodos que empregam ondas de superfície (MASW, SASW, Remi e HVSR) e ensaios em furos de sondagens (*Crosshole*, *Downhole* e Tomografia Sísmica).

A) Sísmica de Refração (REFRA)

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 acústicas 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 de Sísmica de Refração.



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

Vantagens

Ensaio de Sísmica de Refração fornece 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.

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 subjacente (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.

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. A linha de aquisição deve ser posicionada, evitando-se uma 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.

Processamento e apresentação dos resultados

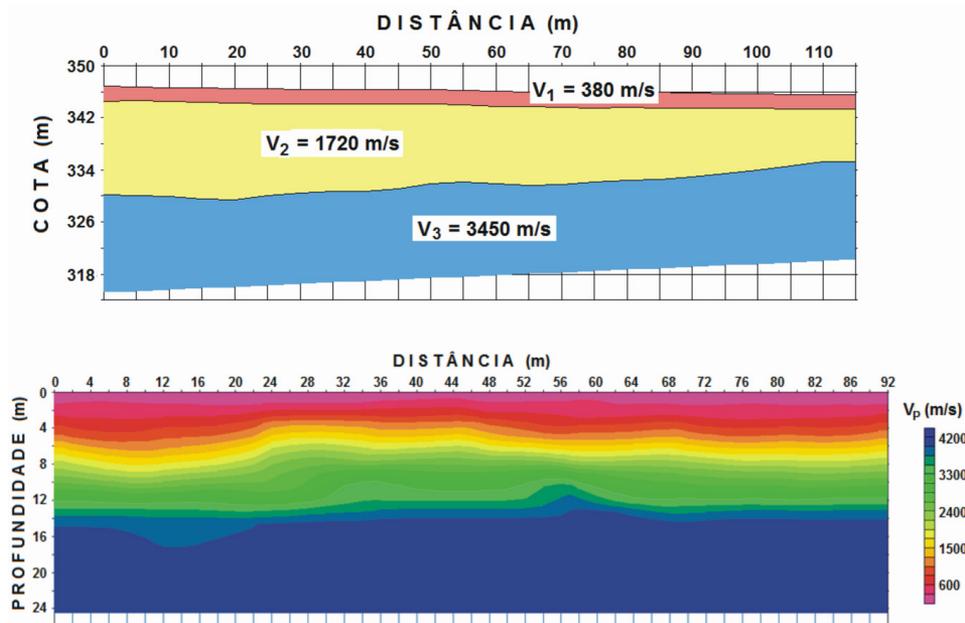
O processamento dos dados de Sísmica de Refração consiste, primeiramente, em identificar as primeiras chegadas das ondas sísmicas (no caso do emprego da onda P) e construir gráficos do tipo tempo x distância. A interpretação destes gráficos fornece um modelo (seções 2D) composto de estratos sísmicos 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).

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



Fonte: elaborada pelos autores.

Informações mais detalhadas sobre o método de Refração Sísmica podem ser obtidas em ASTM-D5777 (Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation, 2006).