



**Instituto Superior de Engenharia do Porto**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

## **Análise comparativa de métodos de prospeção direta e indireta na determinação do topo rochoso para fundações**

**Rosa Maria Neto Pereira Vinagre**

160 ANOS 1944-2014 **isep** Instituto Superior de Engenharia do Porto



**POLITÉCNICO  
DO PORTO**

**2013**





**Instituto Superior de Engenharia do Porto**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Análise comparativa de métodos de prospeção direta e indireta na determinação do topo rochoso para fundações**

**Rosa Maria Neto Pereira Vinagre**

**1930290**

*Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, realizada sob a orientação do Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*



## **Júri**

### **Presidente**

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé  
*Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Doutor José Augusto de Abreu Peixoto Fernandes  
*Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva  
*Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Doutora Maria José Coxito Afonso  
*Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Diplôme d'Études Approfondies e Licenciado José Hermenegildo Tavares de Freitas Carvalho  
*Professor Adjunto Convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto*  
*Geologia e Geotecnia Consultadores, Lda (GGC)*

---

A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente** (MEGG) foi defendida em prova pública, pela Licenciada Rosa Maria Neto Pereira Vinagre, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em 29 de Outubro de 2013 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **12 (doze) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta.

O Director do MEGG|ISEP

---

*Dedico esta tese à minha mãe que sempre me apoiou e ensinou ao longo do meu percurso de vida a ser lutadora e persistente. Obrigada Mãe.*



## **Agradecimentos**

São devidos agradecimentos a todos os meus amigos e colegas que me acompanharam e cooperaram durante a elaboração desta tese, nomeadamente Anabela Portela, Helena Magalhães, João Branco, José Alberto Pinto, Rogério Pinheiro.

Agradeço ainda ao Professor Doutor João Paulo Meixedo pela disponibilidade, desde a primeira hora, na orientação científica do presente documento, bem como todo o apoio nas sucessivas correções meticulosas e sugestões ao manuscrito e pela ajuda vital no trabalho de campo.

Ao Diretor do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC), Professor Doutor José Augusto Fernandes, por todo o apoio na utilização dos equipamentos de geofísica aplicada e de investigação geotécnica *in situ*.



## **Palavras-chave**

*Prospecção geofísica, prospecção sísmica, investigações geotécnicas in situ, ripabilidade.*

## **Resumo**

Com o decorrer dos tempos e com a evolução da indústria, acresce a necessidade de aparecimento de novas construções e conseqüentemente de novos desafios geotécnicos. Para responder a estes novos reptos que a construção nos lança é necessário aprofundar o conhecimento acerca dos materiais que constituem o subsolo e estudar o seu comportamento quando sujeito a novas solicitações, como por exemplo sobrecargas, pois parte do cálculo de dimensionamento de fundações das novas construções dependerá destas características. Existem duas possíveis formas de identificar os materiais existentes no subsolo e caracterizá-los: através de ensaios de laboratório e de ensaios *in situ*, sendo nestes últimos que nos iremos focar. Os ensaios *in situ*, para além de outros dados, permitem-nos estimar com algum grau de incerteza a profundidade a que se encontra o horizonte com capacidade de suporte pretendida, quer se trate ou não do *bedrock*, e identificar o processo mais indicado para a retirada do material: através de um meio mecânico de escavação ou por recurso a explosivos. Com a realização de ensaios de sísmica de refração e igualmente recorrendo a ensaios executados com o penetrómetro dinâmico médio (DPM), tentamos dar resposta a estas incógnitas através do cruzamento dos dados obtidos. No entanto, este cruzamento de dados pode não ser completamente esclarecedor, levando ao aparecimento de novas incógnitas às quais não seja possível dar resposta recorrendo-se unicamente à informação recolhida por meio destes dois métodos, pois poderão revelar-se insuficientes. Contudo, existem muitos outros ensaios *in situ* que podem ser realizados e capazes de nos ajudar a complementar os dados inicialmente obtidos no sentido de diminuir ou até mesmo eliminar as incógnitas existentes, e desta forma poder identificar e caracterizar o material existente com o maior grau de segurança possível.



## **Keywords**

*Geophysical exploration, seismic exploration, in situ geotechnical investigations, Rippability.*

## **Abstract**

With the passing of time, and due to the industrial evolution, there are more and more needs concerning new constructions and, as a direct consequence, new geotechnical challenges appear. To face these new construction challenges it is necessary to deepen the knowledge about the materials that constitute the subsoil as well as to study its behaviour when subjected to new requests such as overloads, once part of the calculation of dimensioning of foundations of new buildings will depend on these characteristics. There are two possible ways to identify the existing underground materials and to characterize them: through laboratory testing and in-situ testing. We will focus on the last ones. In situ tests, in addition to other data, allows us to estimate, with a certain degree of uncertainty, the depth at which is situated the zone desired capable of supporting, whether or not the bedrock, and identify the most appropriate process for the removal of the material: through a mechanical means of excavation or by use of explosives. With the realization of seismic refraction tests and also using surveys performed by a dynamic penetrometer Medium (DPM), we've tried to look for answers by crossing the obtained data. Nevertheless, this crossing may not be quite enlightening leading to the emergence of new unknowns to which it is not possible to respond using solely to the information collected through these two kinds of equipment, as they may prove to be insufficient. However, there are many other in situ tests that can be performed and able to help us to complement the data originally obtained, in order to decrease or even eliminate the existing unknowns and in this way be able to identify and feature the existing material with the highest degree of safety possible.



# Índice

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	PROSPEÇÃO GEOFÍSICA.....	3
2.1.	ENQUADRAMENTO HISTÓRICO .....	3
2.2.	GEOFÍSICA PURA VS GEOFÍSICA APLICADA .....	5
2.3.	A GEOFÍSICA NA PROSPEÇÃO .....	7
2.3.1.	MÉTODOS SÍSMICOS DE PROSPEÇÃO GEOFÍSICA .....	10
2.3.2.	OUTROS MÉTODOS DE PROSPEÇÃO GEOFÍSICA .....	64
3.	PROSPEÇÃO MECÂNICA .....	71
3.1.	ENQUADRAMENTO HISTÓRICO .....	71
3.2.	PENETRÓMETROS DINÂMICOS.....	73
3.2.1.	APARECIMENTO E EVOLUÇÃO DOS PENETRÓMETROS.....	73
3.2.2.	TIPOS DE PENETRÓMETROS DINÂMICOS .....	76
3.3.	OUTROS ENSAIOS DE PENETRAÇÃO.....	83
4.	TRABALHO EXPERIMENTAL.....	93
4.1.	OBJETIVOS E PLANEAMENTO DO TRABALHO DE CAMPO.....	93
4.2.	EXECUÇÃO DOS PERFIS SÍSMICOS .....	93
4.3.	EXECUÇÃO DAS SONDAGENS MECÂNICAS .....	96
5.	ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS.....	99
6.	CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS.....	105
7.	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO .....	107
	ANEXOS .....	111

## ANEXOS

**Anexo I** - Planta de localização

**Anexo II** - Boletins de ensaio DPM

**Anexo III** - Perfis sísmicos de refração

**Anexo IV** - Tabelas de ripabilidade



## Índice de Figuras

FIGURA 1 - DISCIPLINAS DA GEOFÍSICA DE ACORDO COM A UNIÃO INTERNACIONAL DE GEODESIA E GEOFÍSICA. ....	6
FIGURA 2 - DISCIPLINAS DA GEOFÍSICA DE ACORDO COM UNIÃO GEOFÍSICA AMERICANA.....	6
FIGURA 3 - PRINCIPAIS MÉTODOS PROSPEÇÃO GEOFÍSICA. ....	8
FIGURA 4 - PRINCIPAIS CAMPOS DE APLICAÇÃO DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS. ....	9
FIGURA 5 – VIATURA VIBROSEIS.....	16
FIGURA 6 – DIFUSÃO DA ONDA SÍSMICA. ....	18
FIGURA 7 – NAS ONDAS P (PRIMÁRIAS), AS PARTÍCULAS DO MEIO MOVEM-SE NA DIREÇÃO E SENTIDO DO PERCURSO DA ONDA, ENVOLVENDO, ALTERNADAMENTE, EXPANSÃO E CONTRAÇÃO DO MEIO .....	19
FIGURA 8 – NAS ONDAS S (SECUNDÁRIAS), O MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS É PERPENDICULAR À DIREÇÃO DO PERCURSO DA ONDA.....	19
FIGURA 9 - AS ONDAS L (LOVE) SÃO ONDAS DE SUPERFÍCIE QUE PRODUZEM CISALHAMENTO HORIZONTAL DO MACIÇO, SENDO QUE A SUA ENERGIA É “OBRIGADA” A PERMANECER NAS CAMADAS SUPERIORES POR OCORRER POR REFLEXÃO INTERNA TOTAL.....	20
FIGURA 10 - AS ONDAS R (RAYLEIGH) PROVOCAM VIBRAÇÃO NO SENTIDO CONTRÁRIO À PROPAGAÇÃO DA ONDA, OU SEJA, UM MOVIMENTO DE ROLAMENTO (DESCREVEM UMA ÓRBITA ELÍPTICA), E A SUA AMPLITUDE DIMINUI RAPIDAMENTE COM A PROFUNDIDADE. ....	20
FIGURA 11 - ESQUEMA DO CONJUNTO EMISSOR/CABOS/GEOFONE/SISMÓGRAFO. ....	21
FIGURA 12 - UTILIZAÇÃO DO PAR MARRETA/PLACA METÁLICA, COMO EMISSOR. ....	22
FIGURA 13 - ASPETO DA DISPOSIÇÃO DE CABOS E LIGAÇÕES E DE UM GEOFONE.....	24
FIGURA 14 - GEOFONE: IMAGEM E ESQUEMA.....	25
FIGURA 15 - ASPETO DE UMA UNIDADE DE RECEÇÃO (SISMÓGRAFO) ACOPLADA A UM COMPUTADOR PARA LEITURA IMEDIATA DOS VALORES EM SOFTWARE ESPECÍFICO. ....	26
FIGURA 16 - MOVIMENTO DE ONDA.....	28
FIGURA 17 - RAIOS SÍSMICOS. ....	29
FIGURA 18 - INFORMAÇÃO REGISTADA PELOS GEOFONES. ....	29
FIGURA 19 - NOVAS FRENTES DE ONDA (HEAD WAVES).....	31
FIGURA 20 – FORMAÇÃO E PROPAGAÇÃO DAS ONDAS SECUNDÁRIAS.....	32
FIGURA 21 - EXTRAPOLAÇÃO GRÁFICA - LINHA LILÁS INDICA O TEMPO NA POSIÇÃO ZERO METROS.....	34
FIGURA 22 – SISMOGRAMA - AS SETAS INDICAM O TEMPO DAS PRIMEIRAS CHEGADAS DE ONDA (FIRST BREAK). ...	35
FIGURA 23 - REFRAÇÃO EM MULTICAMADAS.....	36
FIGURA 24 - EXEMPLO DE HORIZONTE ESCONDIDO. ....	37
FIGURA 25 – INTERFACE DE MERGULHO (DOWN DIP). ....	39
FIGURA 26 – INTERFACE ASCENSIONAL (UP-DIP). ....	40
FIGURA 27 – DOIS HORIZONTES HORIZONTAIS COM UM ÚNICO EMISSOR. ....	42
FIGURA 28 - MÚLTIPLOS HORIZONTES HORIZONTAIS.....	42
FIGURA 29 - DOIS HORIZONTES INCLINADOS E UM SÓ EMISSOR. ....	43

FIGURA 30 - DOIS HORIZONTES INCLINADOS E UM SÓ EMISSOR.....	43
FIGURA 31 - DOIS HORIZONTES HORIZONTAIS E DOIS EMISSORES. ....	44
FIGURA 32 - DOIS HORIZONTES INCLINADOS E DOIS EMISSORES. ....	44
FIGURA 33 - REFLEXÃO SUBCRÍTICA E REFLEXÃO SUPERCRÍTICA. ....	46
FIGURA 34 - MÉTODOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS REFLEXÃO SÍSMICA.....	48
FIGURA 35 - MÉTODO SPLIT SPREAD (A).....	49
FIGURA 36 – MÉTODO SPLIT SPREAD (B). ....	49
FIGURA 37 - ESQUEMAS DE POSICIONAMENTO NO MÉTODO SPLIT SPREAD. ....	50
FIGURA 38 – ESQUEMA DE POSICIONAMENTO NO MÉTODO COMMON MID-POINT. ....	51
FIGURA 39 – SIMETRIA DA HIPÉRBOLE EM INTERFACES REFLETORAS HORIZONTAIS. ....	52
FIGURA 40 – GRÁFICO RESULTANTE DA DECOMPOSIÇÃO LINEAR DA HIPÉRBOLE. ....	55
FIGURA 41 – ASSIMETRIA DA HIPÉRBOLE EM INTERFACES REFLETORAS INCLINADAS. ....	57
FIGURA 42 – FALSA POSIÇÃO DA INTERFACE REFLETORA RESULTADO DO TRAÇAR ..... 58	58
FIGURA 43 - REFLEXÕES MÚLTIPLAS (A). ....	61
FIGURA 44 – REFLEXÕES MÚLTIPLAS (B).....	61
FIGURA 45 – PENETRÓMETRO DINÂMICO 1940 APROXIMADAMENTE. ....	74
FIGURA 46 - PENETRÓMETRO DINÂMICO LEVE E MÉDIO. ....	78
FIGURA 47 - EXEMPLO DE BOLETIM ENSAIO.....	82
FIGURA 48 – EXECUÇÃO DE ENSAIO SPT.....	83
FIGURA 49 - ETAPAS DO ENSAIO SPT. ....	84
FIGURA 50 - VIATURA DE APOIO CPT/CPTU. ....	87
FIGURA 51 - PONTEIRA EQUIPADA COM TRANSDUTOR. ....	88
FIGURA 52 – PIEZOCONTE. ....	89
FIGURA 53 - DIAGRAMA DE HORIZONTES ATRAVESSADO.....	90
FIGURA 54 - EXEMPLO DE MONTAGEM ENSAIO SÍSMICA DE REFRAÇÃO DE 12 GEOFONES. ....	94
FIGURA 55 – COLABORADORES. ....	94
FIGURA 56 - PERFIL SÍSMICO PS1. ....	95
FIGURA 57 - PERFIL SÍSMICO PS2. ....	95
FIGURA 58 - VISTA AÉREA DO LOCAL IMPLANTAÇÃO ..... 96	96
FIGURA 59 – PLANTA DO LOCAL ONDE FOI REALIZADA A CAMPANHA ..... 96	96
FIGURA 60 - INFRAESTRUTURAS EXISTENTES ..... 99	99
FIGURA 61 – AFLORAMENTO NO LOCAL DA SONDAGEM 6 ..... 101	101
FIGURA 62 - ANÁLISE COMPARATIVA DE PORMENOR ENTRE UM PERFIL SÍSMICO E UM PERFIL DE RESISTÊNCIA, OBTIDO A PARTIR DA PROSPEÇÃO MECÂNICA. ....	102

## Índice de Tabelas

TABELA 1 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS ONDAS SÍSMICAS. ....	20
TABELA 2 - EXEMPLOS DAS VELOCIDADES PROPAGAÇÃO ONDAS P E S.....	21
TABELA 3 - TIPOS DE PENETRÓMETROS DINÂMICOS. ....	76
TABELA 4 - EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS PENETRAÇÃO DINÂMICA .....	80
TABELA 5 - INDICES DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO. ....	85
TABELA 6 - PARÂMETROS DE CORREÇÃO SPT.....	86



## Índice de equações

EQUAÇÃO 1 - DISTÂNCIA CRÍTICA .....	33
EQUAÇÃO 2 - ESPESSURA DA CAMADA A PARTIR DA DISTÂNCIA CRÍTICA.....	33
EQUAÇÃO 3 - ESPESSURA DA CAMADA A PARTIR DE $T_0$ .....	34
EQUAÇÃO 4 - PROFUNDIDADE DA INTERFACE 1.....	37
EQUAÇÃO 5 – PROFUNDIDADE DA INTERFACE 2 .....	37
EQUAÇÃO 6 - ACRÉSCIMO DA DISTÂNCIA PERCORRIDA .....	40
EQUAÇÃO 7 - ACRÉSCIMO DO TEMPO DE PERCURSO .....	40
EQUAÇÃO 8 – VELOCIDADE APARENTE .....	41
EQUAÇÃO 9 – VELOCIDADES DE PROPAGAÇÃO A PARTIR DO TIRO DIRETO E INVERSO .....	41
EQUAÇÃO 10 - TEMPO DE PROPAGAÇÃO RAIOSÍSMICO REFLETIDO.....	53
EQUAÇÃO 11 - TEMPO DE PROPAGAÇÃO VS DISTÂNCIA. ....	53
EQUAÇÃO 12 - TEMPO DE PROPAGAÇÃO VS DISTÂNCIA FORMA SIMPLIFICADA.....	53
EQUAÇÃO 13 - DIFERENÇA ENTRE TEMPOS DE PROPAGAÇÃO .....	54
EQUAÇÃO 14 - DIFERENTES TEMPOS DE PROPAGAÇÃO PARA DIFERENTES POSIÇÕES GEOFONE. ....	54
EQUAÇÃO 15 - MÉDIA DE VELOCIDADES DE PROPAGAÇÃO .....	56
EQUAÇÃO 16 – RAÍZ QUADRADA DA MÉDIA DA VELOCIDADE .....	56
EQUAÇÃO 17 - IMPEDÂNCIA ACÚSTICA.....	59
EQUAÇÃO 18 - COEFICIENTE DE REFLEXÃO.....	60
EQUAÇÃO 19 - TENSÃO ADMISSÍVEL. ....	81
EQUAÇÃO 20 - RESISTÊNCIA DINÂMICA APARENTE. ....	97



## **Lista de Símbolos e Abreviaturas**

AGU – American Geophysical Union

CPT – Cone Penetration Test

CPTu – Piezone Penetration Test

CR – Coeficiente de Reflexão

EPI's – Equipamento de Proteção Individual

GRC – Geophysical Research Corporation

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

IUGG – International Union of Geodesy and Geophysics

LGMC - Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção

NESCO – National Electric Signaling Company

DPL – Penetrómetro Dinâmico Leve

DPM – Penetrómetro Dinâmico Médio

DPH – Penetrómetro Dinâmico Pesado

DPSH – Penetrómetro Dinâmico Super Pesado

Rda – Resistência Dinâmica Aparente

SPT – Standard Penetration Test



## 1. Introdução

A prospeção geotécnica pode sumariamente ser definida como o conjunto de trabalhos e operações visando a determinação da natureza e esclarecimento de algumas características dos maciços (terrosos ou rochosos), em função da necessidade de execução de uma obra ou da avaliação de risco.

É bastante alargado o seu campo de aplicação, englobando desde simples ações de reconhecimento superficial preliminar até complexos estudos de reconhecimento em profundidade, quer por via da prospeção geofísica (medição de campos físicos ou variações na propagação de ondas) quer recorrendo a meios mecânicos.

Esta afirma-se cada vez mais como uma disciplina fundamental da engenharia geotécnica que se apoia nas geociências de engenharia, entendidas estas como a geologia de engenharia, a mecânica das rochas e a engenharia dos maciços terrosos e rochosos. Sob esse ponto de vista, serve a uma vasta gama de “geo-engenheiros”, como sejam os Engenheiros Geotécnicos, os Engenheiros de Minas, os Engenheiros Geólogos, os Geólogos de Engenharia e os Engenheiros Civis.

Do seu campo de atuação podemos destacar a determinação de características geomecânicas do maciço, envolvendo disciplinas como a resistência dos materiais e as mecânicas dos solos e das rochas. Nela se lida com parâmetros operacionais geométricos, mecânicos, construtivos e de segurança operacional e mesmo relativos a prazos e custos.

Uma das correntes utilizações do método sísmico da refração em geotecnia é a sua aplicação na determinação da espessura de ripabilidade de maciços, com o objetivo da quantificação do volume de escavação a ser desmontado mecanicamente, com vista à implementação de fundações ou à construção subterrânea. O método baseia-se no estabelecimento de uma correlação empírica entre a velocidade de propagação longitudinal das ondas sísmicas e as capacidades de ripagem dos equipamentos existentes no mercado.

Quando, por outro lado, se pretende determinar a resistência dinâmica aparente dos maciços, com vista à definição da profundidade a que o maciço tem capacidade de suportar as cargas impostas pela edificação de uma obra de reduzida a média dimensão, essa informação é usualmente conseguida por recurso à aplicação do eficiente, rápido e pouco oneroso ensaio de

penetração dinâmica, que consiste na cravação vertical no terreno, por percussão, de uma ponteira cónica de aço, colocada na extremidade de uma haste metálica. Por este método é medida a resistência oferecida à penetração desenvolvida na ponteira, permitindo avaliar o grau de compactação dos terrenos, concluindo-se acerca da resistência à rotura e da deformabilidade do maciço terroso.

No presente trabalho procurou legitimar-se o estabelecimento de uma relação entre estes dois tipos de ensaios de prospeção geotécnica no que à ripabilidade diz respeito. O objetivo que presidiu a esta opção de estudo prendeu-se com o facto de se tratar de dois dos ensaios mais correntes, simples e menos dispendiosos, utilizados nos dois campos de ação da prospeção geotécnica – a geofísica e a mecânica – pelo que eventuais conclusões que possam ir de encontro às especulações iniciais terão seguramente interesse prático. Acresce que a existência de ambos os equipamentos no LGMC|ISEP (Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do ISEP) permitiria o estabelecimento de uma indispensável componente prática.

## 2. Prospecção Geofísica

### 2.1. Enquadramento histórico

Para os nossos antepassados a Terra foi o local onde estes fizeram as suas primeiras observações, e mais tarde as suas experiências bem como o local onde testaram as suas teorias, ou seja a terra foi para os nossos antepassados o seu primeiro “laboratório”.

O tamanho da terra foi uma das primeiras questões a despertar curiosidade aos nossos antepassados, bem como a origem dos terremotos e sismos. As primeiras evidências aparecem na civilização grega onde por volta do séc. IV aC, foram encontrados cálculos da tentativa de determinar o tamanho da terra. No que se refere a origem dos terremotos entre outros fenómenos naturais, também se encontram nas civilizações Maia e Chinesa evidências da tentativa das suas explicações.

A geofísica faz parte do grupo das ciências da terra, sendo considerada uma das mais antigas. Contudo o grande avanço desta disciplina verifica-se nos sécs. XVI e XVII continuando no entanto a progredir até ao XIX. Os grandes impulsionadores da geofísica, ciência que entre os primeiros séculos de desenvolvimento não tinha este nome, foram Galileo, Gilbert, Newton, Halley entre outros. Os nomes pelos quais a geofísica era conhecida foram variando, por exemplo no sec. XVII J. Zahn y A. Kircher denominava a geofísica por “Geoscópica”. Por seu lado, A. G. Werner em 1755 chama-lhe “Geognosia”, relacionando o nome com a área das minas e da Geologia. O pai da física moderna, Alejandro von Humbolt, utilizou o termo “Physikalische Geographie” (Geografia Física) para se referir à geofísica. Para Franz Neumann, termo usado por ele para geofísica era “Physik der Erde” (Física da Terra).

Progredimos no tempo e quando chegamos ao final do séc. XVIII princípio do Séc. XIX, De la Matherie em França usava o termo “Theorie de la Terre” (Teoria da Terra), por sua vez o físico e escritor Saigey, denominava a geofísica de “Physique du Globe” (Física do Globo) termo este que ainda hoje se encontra em uso. Finalmente em 1838, em Inglaterra a geofísica é definida como uma ciência que se foca no tratamento dos aspetos físico-matemáticos da Geologia e surge então o termo “Physical Geology” (Geologia Física) introduzido por W. Hopkins que na altura era professor na Universidade de Cambridge.

De acordo com estudiosos, em 1863 surge pela primeira vez o termo *geofísica*, no tratado de Adolf Mühry, Beitrage zur Geophysik und Klimatographie. Oito anos mais tarde a ciência

geofísica é definida por Georg van Neumayer como sendo a ciência que nos permite conhecer as relações físicas da terra. Por volta do ano 1880 Karl J. Zoeppritz propõe uma outra definição para a geofísica. Zoeppritz defende que a geofísica é a ciência que estuda os fenómenos físicos os quais serão responsáveis pela origem, evolução e estrutura da terra. Na opinião deste estudioso, o aparecimento da ciência geofísica veio complementar as ciências da terra já existentes tais como a geografia e a geologia.

Nos finais do Séc. XIX de acordo Walter Kertz surge finalmente a geofísica como ciência independente como consequência da física por si só ter diminuído o seu interesse pela terra como alvo de estudo e pelo facto de para a geografia e geologia não conseguirem abranger os métodos usados pela geofísica considerados por estas duas ciências demasiado generalistas e confusos. Assim, no ano 1887, S. Günther, publica o primeiro texto “Handbuch der Geophysik” e em 1893 é criada por G. Gerland a primeira revista de geofísica com o nome de Beiträge zur Geophysik e a geofísica assume-se então como ciência independente. Após 5 anos, em 1898, surge na Universidade de Gottingen pela primeira vez a disciplina de geofísica, a qual será lecionada por Emil Wiechert, que se tornaria mais tarde uma ajuda preciosa no desenvolvimento da geofísica principalmente na área da sismologia sendo o pioneiro na explicação da forma de propagação das ondas sísmicas através das diferentes camadas que constituem a terra.

Enquanto a geofísica necessita dos conhecimentos da geologia no que se refere as camadas superficiais da terra e ao seu processo evolutivo, a geologia por sua vez tem necessidade que a geofísica partilhe os seus conhecimentos para que não fique limitada a que as interpretações dos fenómenos geológicos sejam unicamente qualitativas e descritivas.

Nos dias de hoje e com o desenvolvimento da economia, cresce a necessidade de conhecer os estratos e formações geológicas, novas jazidas quer de fontes de energia, como o carvão e o petróleo, quer de metais, e por isso cresce também a necessidade de recorrer à geofísica para que a obtenção deste conhecimento seja bem-sucedido, não esquecendo alto contributo da física e matemática.

O desenvolvimento e aumento das exigências económicas levam ao conseqüente aumento do desenvolvimento da geofísica. Esta pode ser classificada a nível económico em dois ramos, a geofísica pura e a geofísica aplicada. A geofísica pura é definida como sendo o ramo da geofísica cujo campo de estudo se encontra vocacionado para a terra como um todo ou para o estudo de

estruturas de grande dimensão. Os objetivos das suas pesquisas relacionam-se com aspetos científicos e sociais.

Por sua vez a geofísica aplicada, também denominada prospeção geofísica, está altamente vocacionada para fins económicos e de engenharia. Com todo o desenvolvimento crescente que se tem verificado quer a nível da economia quer a nível das chamadas ciências da terra, é obrigatória a existência de uma aliança entre a geologia e a geofísica

## ***2.2. Geofísica pura vs geofísica aplicada***

A palavra geofísica teve a sua origem na Grécia e surge pela junção de outras duas palavras, a palavra geo e a palavra física. A palavra geo significava terra e a palavra física significava natureza, e ao juntarem-se formaram a palavra geofísica.

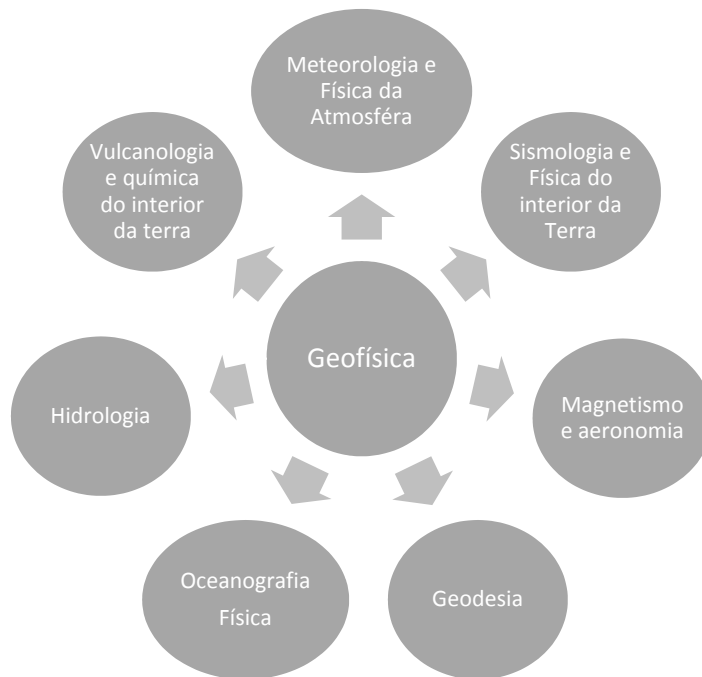
Como o próprio nome indica, a geofísica é então a ciência que se dedica ao estudo de fenómenos ao nível da física quer ocorram em profundidade, altitude ou até mesmo à superfície da terra. Esta ciência apoia-se nos métodos da física em geral e na matemática, para proceder a medições e estabelecer correlações podendo através destas determinar variações das propriedades físicas do interior da terra sejam elas verticais ou horizontais.

A geofísica veio também permitir-nos estudar e conhecer situações que através da observação direta (poços ou minas) não seria possível, pois existe uma limitação construtiva relacionada com a profundidade.

Com a necessidade de recorrer cada vez mais a esta ciência houve também necessidade de desenvolver os equipamentos que lhe prestam apoio e os quais nos permitem medir as propriedades físicas através de medidas indiretas, na sua grande parte realizadas à superfície.

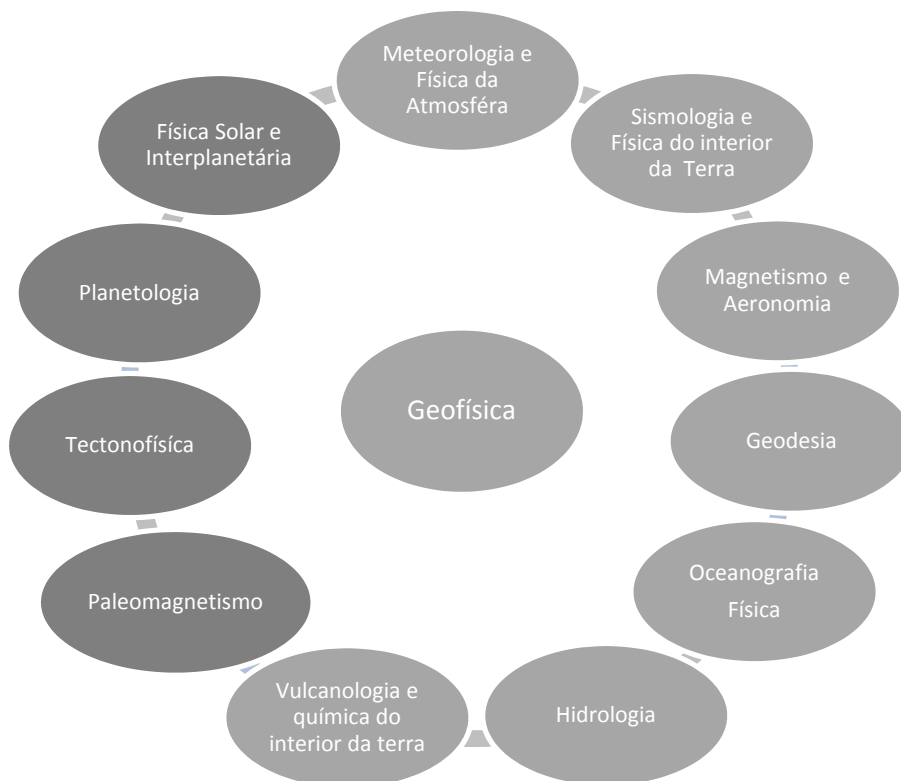
Quando a geofísica era uma única ciência, a sua divisão era bastante fácil, agora com o desenvolvimento da economia e aumento da procura de conhecimento a geofísica foi desenvolvendo cada vez mais os seus campos de atuação que por sua vez vão criando também novos campos e conseqüentemente novos métodos a usar. Por esta razão acabam por existir variadas opiniões e todas elas possíveis à cerca das disciplinas que integram a geofísica pois não se consegue estabelecer um critério.

Por exemplo a União Internacional de Geodesia e Geofísica (IUGG) considera como disciplinas da geofísica as constantes no esquema da Figura. 1.



**Figura 1 - Disciplinas da Geofísica de acordo com a União Internacional de Geodesia e Geofísica.**

Por sua vez a União Geofísica Americana (AGU), tem uma interpretação diferente, de acordo como que está esquematizado na Figura 2.



**Figura 2 - Disciplinas da Geofísica de acordo com União Geofísica Americana.**

Existem outras disciplinas tais como a geologia, geomorfologia e geoquímica cujos conhecimentos aliados aos conhecimentos da geofísica permitem-nos estudar mais pormenorizadamente a composição química e os aspetos estruturais da terra.

A geofísica apresenta então variados métodos que são aplicados de acordo com o tipo de estudo pretendido e das profundidades que se pretende atingir. Os métodos utilizados pela geofísica são bastante versáteis pois adaptam-se à vasta gama de estudos que esta ciência leva a cabo, isto é, podem ser estudos que podem ir desde a larga escala e estamos a falar de uma geofísica global a uma escala mais reduzida como por exemplo os levantamentos geofísicos que podem ser executados numa pequena região o caso da geofísica aplicada

Apesar da escala de aplicação ser um fator de distinção, o que realmente melhor poderá distinguir a geofísica pura da geofísica aplicada é o fator económico, isto porque, a nível económico a geofísica aplicada é de extrema importância devido ao facto desta se dedicar à descoberta de recursos minerais.

Outra divisão possível e aceite muito utilizada pelos franceses é a de geofísica interna e geofísica externa. De acordo com esta divisão a geofísica interna dedica-se ao estudo dos fenómenos naturais que ocorrem na terra enquanto meio sólido, enquanto a geofísica externa desenvolve o estudo no âmbito dos fenómenos que ocorrem na atmosfera, oceanos, campo magnético externo, meio interplanetário entre outros. Como podemos verificar, a geofísica é uma ciência muito vasta, com campos de aplicação diversos, podendo abranger várias outras disciplinas e ser complementada e ajudar a complementar outras ciências.

### ***2.3. A geofísica na prospeção***

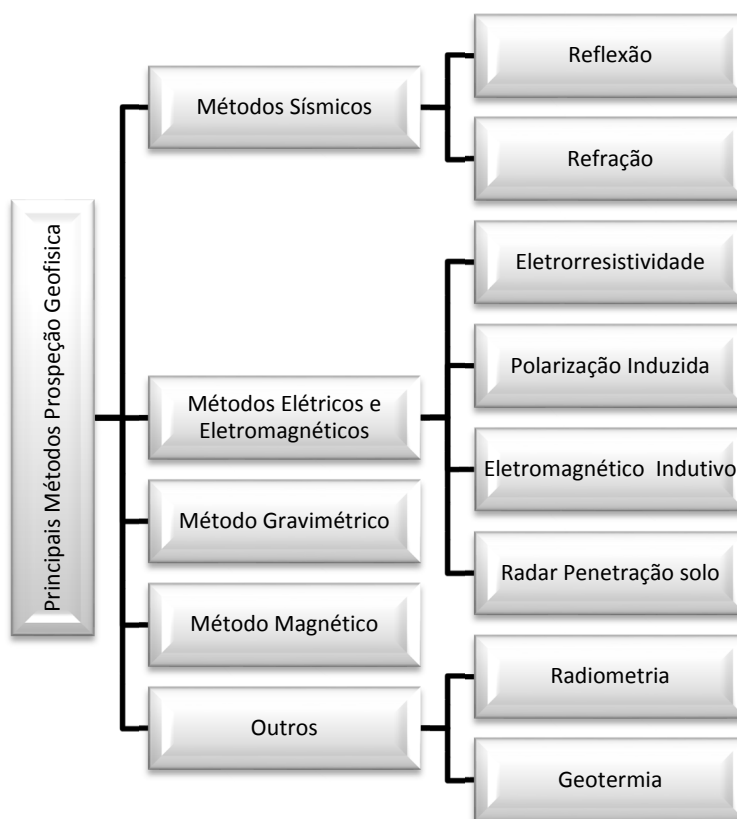
Os valores de medições executadas pela geofísica são habitualmente e na sua grande parte obtido em campo, no entanto alguns também podem ser obtidos em laboratório. Com isto queremos dizer que os valores são obtidos habitualmente no local alvo de estudo, embora em algumas situações possamos recriar esse local em laboratório e obter resultados a partir desta recriação.

Existem vários métodos para prospeção geofísica, os quais são habitualmente usados com o objetivo de nos permitir obter informação acerca das condições existentes na parte mais externa da litosfera.

Os métodos geofísicos podem ser invasivos ou não invasivos. Os invasivos valem-se de uma fonte de energia para agitar o meio que vai ser alvo de investigação. Os métodos não invasivos são realizados à superfície e não criam qualquer tipo de alteração; estes permitem medir a energia emitida pelo meio.

Os métodos integrantes da geofísica aplicada são assim utilizados em vastas e diferentes áreas das geo-engenharias, arqueologia, prospeção de petróleo, prospeção mineira, hidrogeologia, estudos ambientais e geofísica forense.

Todas as estas áreas recorrem aos testes geofísicos uma vez que estes são de fácil execução e rapidez na obtenção de resultados, são não destrutivos e não pontuais e na sua grande parte realizados *in situ*. Por estas razões tornam-se vantajosos em termos de custo/benefício.



**Figura 3 - Principais métodos prospeção geofísica.**

Apesar de todas estas vantagens estes também apresentam algumas desvantagens como a não obtenção de amostras, e o facto de serem influenciáveis pelo ruído, presença de água e de argilas e também pela profundidade, podendo ainda ser afetados pela presença de horizontes cimentados ou que apresentem inclusões. Na Figura 4 é apresentado um quadro ilustrativo dos principais campos de aplicação dos métodos geofísicos.

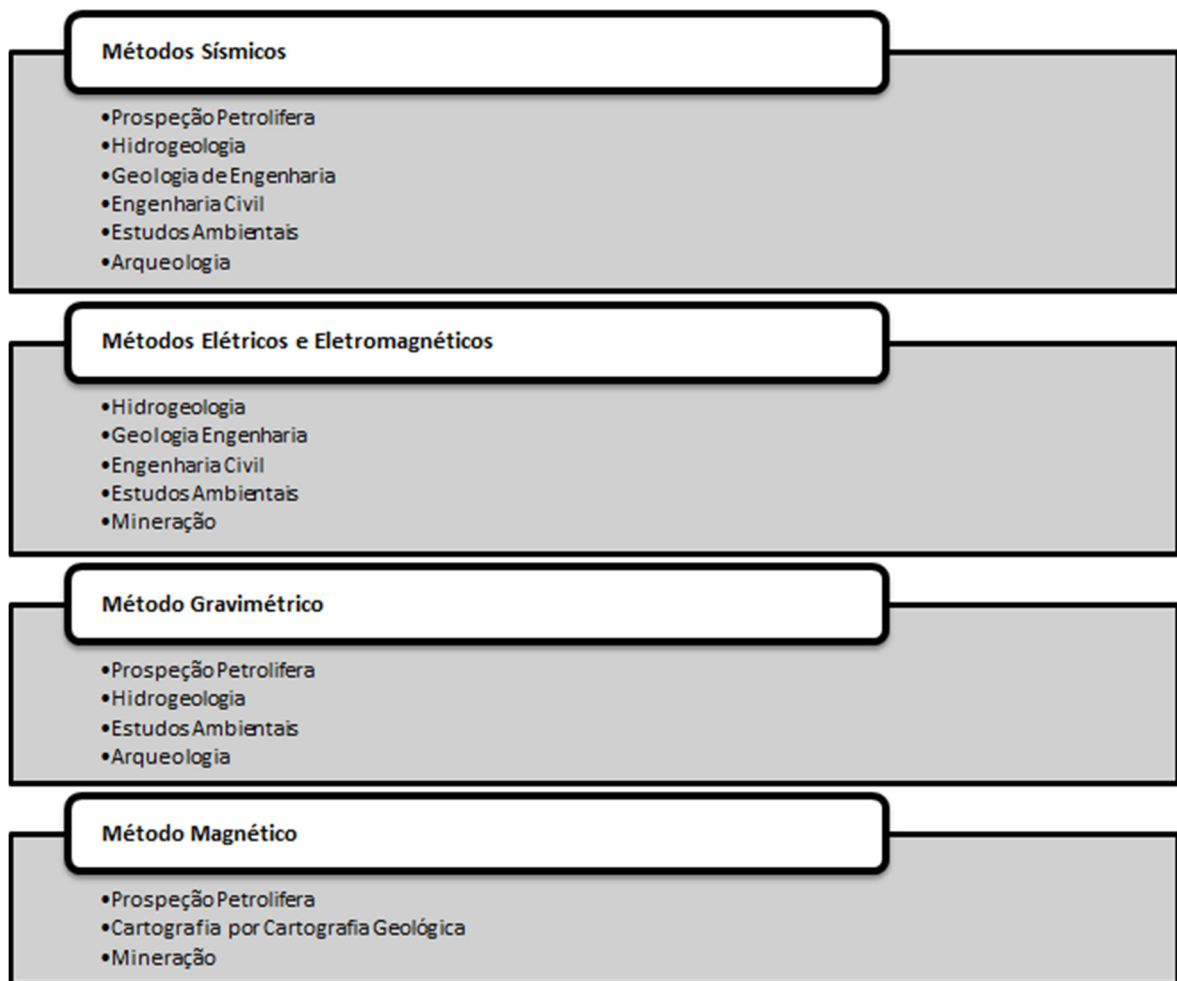


Figura 4 - Principais campos de aplicação dos métodos geofísicos.

### **2.3.1. Métodos Sísmicos de prospecção geofísica**

#### **Surgimento do método sísmico**

Os sismos sempre foram assunto de estudo desde os tempos mais remotos. Ao que se sabe, os movimentos sísmicos estão documentados desde há 3000 anos na China. Também na Grécia e em Itália se podem encontrar documentos que descrevem de forma muito clara a destruição de cidades devido à ocorrência de sismos e terramotos. Na Europa Oriental e no Japão é possível encontrar registos com 1600 anos, os quais descrevem com exatidão a devastação das cidades provocada por estes fenómenos naturais. No continente americano existem registos escritos os quais descrevem com alguma exatidão a forma como os sismos afetaram aquele continente.

Através dos escritos que os nossos antepassados nos deixaram, também sabemos que os sismos, pelo menos até à idade média, eram considerados fenómenos sobrenaturais e míticos, sendo muitas vezes assumidos como castigos divinos provocados pela existência de grandes criaturas que viviam nas profundezas da terra e cujo seu movimento provocava os fenómenos naturais que hoje conhecemos como sendo sismos e terramotos.

Os séculos vão passando e com eles vai crescendo a necessidade de explicar estes fenómenos tentando deixar de parte a ideia de que eram acontecimentos sobrenaturais. Assim surgem primeiras explicações para os sismos e terramotos sendo fenómenos de causa natural. Hoje sabe-se que a primeira base de dados sobre a ocorrência de terramotos e sismos começou a ser criada cerca do ano 1600 por alguns estudiosos que se começaram a interessar por estes fenómenos.

Dentro deste grupo de estudiosos encontra-se Vincenzo Magnati, que elaborou uma lista que continha registos de aproximadamente uma centena de terramotos ocorridos entre os anos 34 e 1687 os quais foram responsáveis por grandes destruições ocorridas.

Muitos mais estudos foram desenvolvidos aos logo dos seculos, os quais irão contribuir para o surgimento da sísmica. A história da sísmica remete-nos para o Séc. XIX mais propriamente para o ano de 1845, com Robert Mallet, de nacionalidade Irlandesa, era Engenheiro Civil e Investigador científico, e foi considerado o “pai da sismologia”.

Mallet e o seu filho, estudante de geologia, decidiram ir até à praia Knilliney e lá realizar uma experiência. A experiência consistia em enterrar um barril de pólvora e detoná-lo, com o objetivo

final de conseguir provar que a energia libertada resultante desta explosão se movia sob a forma de ondas que se propagavam através do material que neste caso seria areia e rochas. Pretendiam também demonstrar, recorrendo a utilização de um equipamento rudimentar ao qual chamavam sismoscópio, que a energia libertada era mensurável. Tudo correu como esperado e os Mallet conseguiram provar que a sua teoria estava correta ao medir a energia libertada a 1,5 km de distância do local onde foi detonado o barril de pólvora que tinham enterrado na areia.

Ainda no decorrer do Séc. XIX deu-se outro grande desenvolvimento da área da sismologia com o físico escocês Cargill Knott. A sua contribuição prestada no desenvolvimento da sísmica foi essencialmente no campo da matemática. Cargill dedicou-se inicialmente a estudar as observações e os resultados obtidos das experiências que tinham sido anteriormente realizados pelos colegas no âmbito da sismologia e a este estudo aliou o seu vasto conhecimento na área das matemáticas, conseguindo assim através de fórmulas chegar às propriedades mecânicas internas da terra, estabelecendo posteriormente através desta descoberta a sua ligação com o tempo que a energia libertada pela ocorrência de um sismo demorava a percorrer a distância desde o local da ocorrência do fenómeno até ao local onde se encontravam as estações sismológicas.

Depois de minuciosos estudos acerca das características físicas das ondas, Knott publicou em 1899 as suas equações as quais ficaram conhecidas como equações de Knott. Estas equações permitem analisar o modo como as ondas ao encontrar materiais diferentes com propriedades distintas refratam e refletem. Podemos então dizer que Knott foi o pioneiro da teoria da reflexão e refração.

Ainda ao nível da matemática, a sismologia recebeu um contributo do geofísico Alemão Karl Zeoppritz, as suas equações são conhecidas e utilizadas até hoje na sismologia de reflexão. Tal como Cargill Knott também Zeoppritz se focou em experiências realizadas pelos seus colegas, entre os quais se encontrava Emil Wiechert para desenvolver os seus estudos e fórmulas. Emil, alemão de nacionalidade, professor de geofísica na universidade alemã de Göttingen, no decorrer dos seus estudos e investigações fez duas descobertas: que a terra tinha uma estrutura constituída por camadas e que existia diferença entre a densidade da matéria que constituía a superfície da terra e a densidade média da terra. Esta última descoberta foi a levou Emil a concluir que a terra poderia ter um núcleo constituído por metais pesados como o ferro. Emil sendo geofísico também se dedicou ao estudo de terremotos e foi com base nestes estudos que o seu colega Zeoppritz conseguiu chegar ao cálculo das curvas do tempo de propagação das ondas P, S, R e L em função da velocidade e da profundidade.

Com base nesta descoberta foi então possível o reconhecimento que as ondas P e S são refletidas e convertidas em descontinuidades. Em 1907 foi então dada a conhecer a teoria da onda, escrita por Zeoppritz e pelo seu colega Wiechert.

A sismologia é uma ciência de grande amplitude, podendo ser usada em diferentes campos de estudo e com diferentes objetivos, o que nos leva ao ano de 1914 com a primeira Guerra Mundial. Durante a primeira guerra mundial, foram feitas algumas tentativas recorrendo aos conhecimentos existentes sobre sismologia com a finalidade de conseguir localizar armas potentes. Para isso foram-se efetuando registos das chegadas das ondas provocadas pelo impacto.

Contudo este trabalho não foi bem-sucedido, no entanto foi bastante importante para o desenvolvimento da exploração sismológica, uma vez que os estudos nesta altura desenvolvidos permitiram mais tarde desenvolver novas técnicas e equipamentos no que virá a ser a prospeção sísmica.

Mintrop, Alemão, foi um dos cientistas que esteve envolvido durante a Primeira Guerra Mundial na tentativa de localização das armas inimigas através da sismologia. Nesta tentativa de localização ele recorreu a sismógrafos portáteis, mas como já anteriormente foi mencionada não foi tarefa bem-sucedida, uma vez que não conseguiram atingir o objetivo.

Terminada a Guerra, Mintrop decidiu usar os estudos e dados anteriormente obtidos e tirar partido dos mesmos em benefício da ciência. Para tal decidiu recorrer a explosivos para desencadear explosões controladas, colocando estrategicamente o sismógrafo a distancias por ele previamente definidas do local da deflagração. Estas investigações são bem-sucedidas, Mintrop consegue ao medir o tempo de retorno das reflexões e refrações de onda estimar a profundidade das diferentes formações geológicas.

No período entre 1919 e 1922 Mintrop requere a patente sobre o método de refração e constitui a primeira empresa de geofísica do mundo, a empresa Sismos. A partir daqui formou duas equipas as quais serão responsáveis pelos trabalhos de prospeção sísmica no México e na Costa do Golfo dos Estados Unidos da América. O equipamento utilizado na recolha dos dados da campanha foi o sismógrafo de frequência baixa. Estas intervenções foram bastante bem sucedidas sendo o ponto de partida para que a sísmica passe a ser usada como um instrumento fidedigno e com poder de decisão principalmente na área dos petróleos e gás. Com todo este

sucesso a sísmica de refração continuou a ser bastante usada de forma mais diversificada. Assim foi então descoberto pela equipa de Mintrop o primeiro Domo de Sal na América do Norte mais propriamente no Texas.

Esta descoberta fez com que entre o Ano de 1924 e 1930 as campanhas de sísmica de refração fossem as mais utilizadas na área dos domos de sal.

Com o decorrer destes seis anos e com a intensidade das campanhas executadas praticamente todos os depósitos de sal mais superficiais foram localizados, levando à diminuição da procura de campanhas recorrendo à sísmica de refração e o método começou a desvanecer, dando origem ao desenvolvimento do método de reflexão.

Assim como a prospeção através de campanhas de sísmica de refração eram ideias na localização dos depósitos de sal as campanhas de reflexão eram ideais na localização de outras estruturas mais simples e vulgares como por exemplo a deteção de Icebergs.

A participação de Reginald Fessenden na sísmica teve início em 1911 quando decidiu deixar o local onde trabalhava designado por NESCO (Companhia Nacional de Sinalização Elétrica) onde se dedicava à investigação de rádio para se dedicar a investigação em outras áreas nas quais mais tarde fará parte a sísmica. A sua primeira grande obra após ter saído da NESCO foi o equipamento preparado para a deteção de submarinos e icebergs ao qual chamaram Oscilador de Fessenden.

Com o surgir da Primeira Guerra Mundial Fessenden alistou-se como voluntário no Canadá sendo de seguida enviado para Londres local onde aproveitou para desenvolver o já existente Oscilador, e do qual foi tirado o máximo de partido na localização de armamento pesado e submarinos inimigos. Como até aqui Fessenden foi bem-sucedido, decidiu dar continuidade as suas investigações mas desta vez vocacionadas para a área da sismologia.

Foi então que surgiu por volta do ano 1913 um sonar. Este equipamento foi desenvolvido por Fessenden com a finalidade de determinar a profundidade à qual se encontraria um objeto submerso em água, recorrendo à reflexão de ondas sonoras. Com esta descoberta surge um novo desenvolvimento na prospeção sísmica, mais concretamente na sísmica de reflexão.

Tal como Fessenden desenvolveu o Oscilador, o Karcher desenvolveu o sismógrafo de reflexão nos anos 20. Tal como Mintrop e Fessenden, também Karcher de nacionalidade Americana passou pela Primeira Guerra Mundial. Karcher, frequentava o curso de física na universidade, quando rebentou a primeira guerra mundial e ele foi destacado pelo seu país para França onde então

passou 8 meses no campo de batalha. Estes 8 meses permitiram-lhe aprofundar variados estudos dentro dos quais se encontrava a variação de unidades de som. Após ter concluído a sua obrigação para com o seu país, Karcher regressou a universidade para terminar o seu curso em física e foi então que surgiu desenvolvimento do seu interesse pela sismologia levando-o a um estudo no qual relacionaria as ondas sísmicas com a geologia. Aproximadamente no ano de 1921 Karcher, em conjunto com uns colegas, numa quinta não muito distante da cidade de Oklahoma, efetuou o seu primeiro levantamento sísmico testando o seu sismógrafo. Karcher para proceder ao levantamento sísmico e testar o sismógrafo, decidiu fazer vibrar a superfície da terra recorrendo à dinamite para provocar pequenas explosões às quais chamou tiros. Após os tiros, ele recorria ao sismógrafo para registar e cronometrar as ondas refletidas para assim poder determinar a profundidade a que se encontravam os diversos substratos. Os resultados obtidos das diversas experiências, levaram Karcher a concluir que este equipamento lhe permitiria detetar estruturas subterrâneas capazes de armazenar petróleo.

Com todo este sucesso em 1927, Karcher foi convidado a formar uma empresa Geophysical Research Corporation (GRC) da qual se tornou vice-presidente e foi então que em conjunto com o presidente da empresa e seu antigo colega de renome da área da geologia aperfeiçoaram o sismógrafo de reflexão de forma a que este os pudesse detetar, ampliar e registar os leves impulsos provenientes do interior da superfície. Esta nova empresa foi logo contratada pela Gulf Oil empresa fortemente implantada na área dos petróleos para realizar levantamentos sísmicos recorrendo ao método de sísmica de reflexão usando para tal o sismógrafo de reflexão. Todos os levantamentos efetuados foram muito bem-sucedidos e Karcher tornou-se o pioneiro no desenvolvimento da sísmica de reflexão quebrou os elos de ligação à Geophysical Research Corporation (GRC) e formou em 1930 a primeira empresa de prestação de serviços com sismógrafos de reflexão, tornando então a sísmica de reflexão e o sismógrafo de reflexão mundialmente conhecidos.

A sísmica de reflexão encontra-se então em alta, no entanto existem determinadas áreas onde esta não é a mais adequada para os objetivos pretendidos e aí ainda recorrem a sísmica de refração.

Foi por volta de 1936 que se começou a ouvir falar de Frank Rieber, de nacionalidade Americana, e que também esteve presente na primeira Guerra Mundial. A sua participação tinha como objetivo a deteção de submarinos sónicos e a profundidade a que estes se encontravam.

Foi este trabalho que desenvolveu durante o tempo que esteve destacado que o levou a pensar que poderia usar a mesma técnica para a localização de jazidas de petróleo.

Assim ele começa por usar o sismógrafo de refração, com a finalidade de identificar velocidades e profundidades para estratos sedimentares de baixas velocidades de contraste. Para tal teve de desenvolver novos métodos e conseqüente instrumentação. A sua ideia ao desenvolver investigação neste campo seria de mais tarde poder aproveitar este trabalho na geofísica. Foi então que se associou a algumas empresas e desenvolveu um método de registo de som em filme. Com este método Frank apercebeu-se que poderia utiliza-lo na geofísica para registo e posterior reprodução dos dados registados.

Por volta do ano de 1932, Frank Rieber decide então fazer alguns testes com o sismógrafo de reflexão na Califórnia em áreas de sismicidade problemática, o que o levou a concluir que a principal causa dos fracos resultados obtidos era devido a interferência nas ondas que chegam até aos geofones, sendo então o seu próximo passo a obtenção de uma solução para superar este problema. Nos 3 anos que se seguem encontrou então forma de reduzir estas interferências, bem como a identificação das diferentes proveniências de diferentes ondas.

Frank Rieber decide então denominar o seu método de Sonógrafo, este método permitia o registo dos sinais do sismograma como se fossem faixas de som reproduzível, podendo depois reproduzi-los combinados de diversas maneiras e de forma faseada, tendo o cuidado de o fazer através de vários filtros os quais iriam permitir a redução de variadas interferências especialmente provocadas pelas ondas chegadas de diferentes direções. Este passo representa um marco de enorme impacto na Geofísica.

Durante os anos que se vão seguir Frank vai apresentar vários trabalhos e vai participar em várias palestras, escrevendo e tornando públicos vários artigos sobre o sonógrafo, e sobre as complexas condições geológicas existentes sujeitas de serem avaliadas. Às suas palestras foi adicionando modelos interessantes com os quais tentava ilustrar o que na realidade se passava relativamente à atuação e propagação da onda sísmica no interior da terra. Apesar de todo o impacto causado na indústria da exploração, este método não teve aceitação imediata. Este método de registos reproduzíveis foi amplamente aceite sofrendo então o seu grande desenvolvimento após a comercialização da fita magnética ficar acessível.

Entre 1939 e 1945 decorre a 2.<sup>a</sup> Guerra Mundial, a qual também irá contribuir para o desenvolvimento de estudos que irão mais tarde ser aplicados à sísmica de exploração, como por

exemplo a detecção de sinais na presença de ruído. Em 1953 surge a comercialização da fita magnética e o desenvolvimento do método vibroseis.

Estes novos acontecimentos irão então criar um grande impacto no campo da exploração sísmica. A comercialização da fita magnética veio aumentar a confiabilidade na utilização de fontes de energia mais débeis, uma vez que a gravação da fita magnética irá possibilitar a junção e combinação de dados a partir de diferentes registos efetuados em diferentes alturas, o que conseqüentemente levou ao aparecimento da ação de um peso deixado cair sujeito a ação de gravidade como sendo a primeira fonte sísmica débil a ser utilizada pela exploração sísmica.

A introdução deste peso como fonte de energia sísmica, foi o ponto de partida para o surgimento de outras fontes, nomeadamente o desenvolvimento do método vibroseis. Este método utilizava um dispositivo mecânico para gerar vibrações, que irão originar ondas sísmicas as quais são posteriormente captadas por geofones colocados à superfície. Esta fonte de energia vem mais tarde substituir sempre que possível o uso de explosivos uma vez que é mais segura e menos poluente.



**Figura 5 – Viatura Vibroseis.**

Fonte: <http://tle.geoscienceworld.org/content/24/Supplement/S46.full>

Três anos mais tarde, surge um outro método denominado de ponto comum em profundidade que irá permitir o melhoramento da qualidade dos dados obtidos uma vez que é um método que irá promover a atenuação do ruído sem ter de recorrer a muitos vetores no campo de ensaio.

Este método consiste na aquisição de dados a partir de uma mesma sub-superfície, um determinado número de vezes, variando a localização da fonte e do geofone, combinando posteriormente os dados obtidos no processamento.

Na década de 1960 dá-se a revolução na indústria informática e com ela a grande divulgação da fita magnética. A partir deste momento os registos sísmicos começam a ser efetuados

digitalmente e a maior parte dos dados será sujeita a processamento mesmo antes dos dados serem interpretados, o que significa que o surgimento da revolução na indústria informática é a grande responsável por considerável parte do desenvolvimento dos métodos sísmicos.

A indústria informática, também ela em evolução constante, veio permitir que os dados inicialmente tratados em computadores de grande porte passassem a ser tratados em computadores pessoais e em estações de trabalho completamente autónomas.

Com isto passa a haver um aumento na capacidade de processamento de dados, aumentando também a sua confiabilidade, e por essa razão, muitos locais considerados de grande interesse que haviam em tempos sido sujeitos a levantamentos sísmicos, vão sofrer novos levantamentos com a finalidade de obtenção de dados de melhor qualidade.

Também as técnicas de interpretação de dados evoluíram, tornando-se assim capazes de desenvolver estudos quer de velocidade, quer de frequência e de variação da forma de onda, de modo a que a informação acerca da litologia, características estratigráficas e acumulações de hidrocarbonetos possam ser determinadas.

As inovações que surgiram no âmbito da interpretação e processamento de dados levam a que a sísmica deixe de ser unicamente utilizada na localização, monitorização e controlo de hidrocarbonetos, e passe a ser também utilizada em outras áreas de interesse, vindo assim também aumentada a vontade de recorrer estas técnicas agora de alta resolução na investigação sísmica de superfície.

A partir de 1980, sensivelmente, quer o método de refração quer o método de reflexão, passam a ser utilizados na caracterização de áreas consideradas de pequena profundidade, isto é, profundidades inferiores a 200 m, podendo mesmo na sua grande parte ser inferiores a 50 m, o que antes de 1980 era impensável, uma vez que os custos para a realização de levantamentos sísmicos de pequena profundidade eram elevadíssimos.

Hoje em dia os custos tornaram-se bastante mais acessíveis e os levantamentos sísmicos de pequenas profundidades são os mais praticados.

### **Ondas sísmicas e parâmetros de propagação**

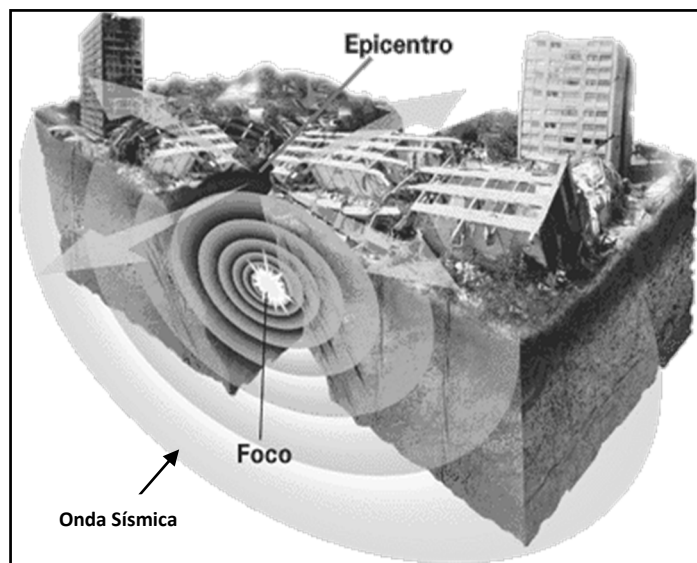
O método sísmico, de entre todos os métodos de prospeção geofísica existentes, foi o que nos permitiu obter a maior quantidade de informação acerca do interior da terra. Sem qualquer

dúvida o método sísmico é o mais utilizado dos métodos geofísicos uma vez que é bastante preciso e rigoroso.

Tal como referido anteriormente, este método continua a ser bastante utilizado na prospeção de petróleo. A localização dos poços de exploração raramente é definida sem que se recorra à informação obtida através do método sísmico.

O método sísmico também é bastante utilizado na identificação e procura de reservas de água subterrânea e na localização e determinação da profundidade a que se localiza o “bedrock”, para a execução de fundações em obras de engenharia.

Já no caso da prospeção mineira a sua utilização é praticamente nula, uma vez que a interface entre as diferentes rochas é muito irregular. No entanto é bastante útil na localização de filões nos quais os minerais pesados podem encontrar-se acumulados. O método de funcionamento do método sísmico assemelha-se a um terramoto mas a uma escala muito mais pequena.



**Figura 6 – Difusão da onda sísmica.**

Adaptado: <http://bibliotecadeinvestigaciones.wordpress.com>

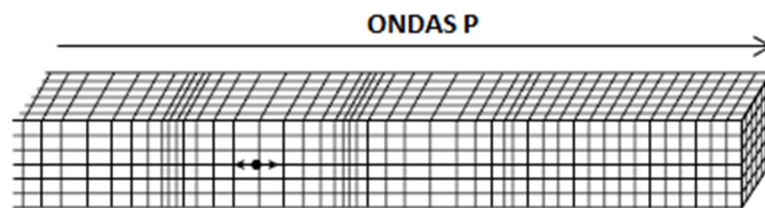
As ondas originadas a partir de um epicentro irão propagar-se no interior e até ao exterior da superfície terrestre em todas as direções podendo ser sentidas e medidas em diferentes locais.

Existem 4 tipos de ondas sísmicas: as ondas P, ondas S, as ondas L e as ondas R, que por sua vez se agrupam da seguinte forma:

- Interiores, volumétricas ou profundas – ondas P e ondas S;
- Superficiais ou longas – ondas L e ondas R.

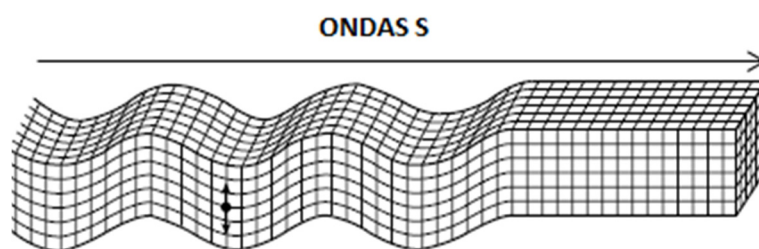
As ondas P (primárias) são ondas de movimentos consecutivos de compressão/dilatação e são as de maior velocidade, pois são as que se propagam mais rápido.

Estas ondas são também denominadas por ondas primárias, longitudinais ou de compressão e distensão. Propagam-se em qualquer meio, seja ele sólido, gasoso ou fluido.



**Figura 7 – Nas Ondas P (primárias), as partículas do meio movem-se na direção e sentido do percurso da onda, envolvendo, alternadamente, expansão e contração do meio**  
Adaptado: An Introduction to Geophysical Exploration

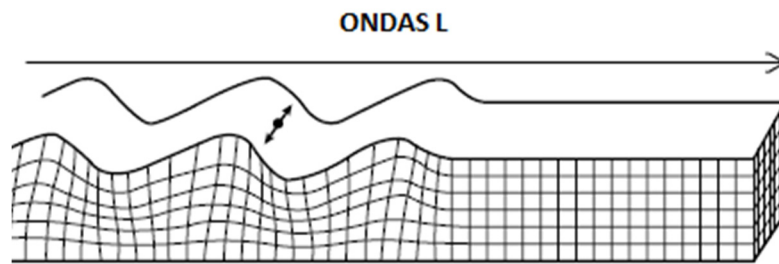
As ondas S (secundárias), por sua vez, apresentam um movimento ascendente e descendente em que as suas partículas apresentam uma vibração com direção perpendicular à direção de propagação da onda, são denominadas de ondas secundárias de cisalhamento ou transversais. Estas ondas tem uma velocidade de propagação inferior as ondas P. As ondas S só se propagam em meios sólidos porque são ondas de cisalhamento e este não se verifica em meios gasosos e líquidos.



**Figura 8 – Nas ondas S (secundárias), o movimento das partículas é perpendicular à direção do percurso da onda**  
Adaptado: An Introduction to Geophysical Exploration

As ondas L, assim chamadas em honra de A.E.H. Love, um matemático britânico que criou um modelo matemático destas ondas em 1911, e por esse motivo também conhecidas por ondas Love, propagam-se à superfície ou muito próximo desta, sendo que a sua vibração apresenta uma progressão horizontal e perpendicular relativamente à direção de propagação.

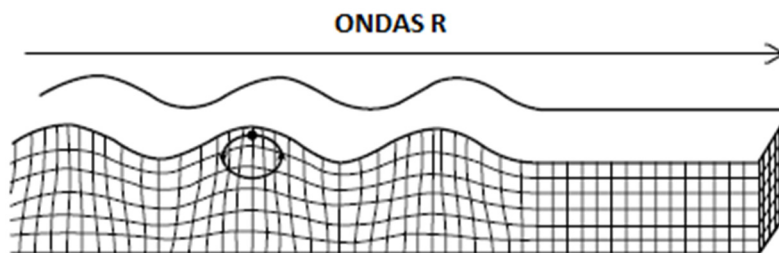
Estas ondas tal como as ondas S unicamente se propagam em meio sólido.



**Figura 9 - As ondas L (Love) são ondas de superfície que produzem cisalhamento horizontal do maciço, sendo que a sua energia é “obrigada” a permanecer nas camadas superiores por ocorrer por reflexão interna total.**

Adaptado: An Introduction to Geophysical Exploration

As ondas R também elas de superfície, e assim chamadas em honra de William Strutt (Lord Rayleigh) que previu a sua existência em 1885, propagam-se em meios sólidos e líquidos e são ondas que provocam um movimento das partículas que se dá segundo um plano de deslocação vertical com a direção de propagação, apresentando um movimento de rotação elíptica quer vertical quer horizontal perpendicular à direção de propagação. Então os movimentos de rotação elíptica vertical serão de cisalhamento já os horizontais são de compressão.



**Figura 10 - As ondas R (Rayleigh) provocam vibração no sentido contrário à propagação da onda, ou seja, um movimento de rolamento (descrevem uma órbita elíptica), e a sua amplitude diminui rapidamente com a profundidade.**

Adaptado: An Introduction to Geophysical Exploration

Todas estas ondas apresentam diferentes velocidades de propagação, variando com a rigidez, densidade, compressibilidade, profundidade, grau de alteração e fracturação do maciço. O quadro da Tabela 1 resume as características de propagação de cada um dos diferentes tipos de ondas, enquanto o quadro da Tabela 2 indica a velocidade de propagação em alguns meios.

	Origem		Direção de Propagação		Meio de Propagação			Velocidade de Propagação	
	Internas	Superficiais	Longitudinais	Transversais	Meio sólido	Meio líquido	Meio Gasoso	Variável	Constante
Ondas P	X		X		X	X	X	X	
Ondas S	X			X	X			X	
Ondas Love		X		X	X				X
Ondas Rayleigh		X		X	X	X	X		X

**Tabela 1 - Resumo das características Ondas Sísmicas.**

Material	Velocidade de Propagação(m/s)	
	Ondas P(Compressão)	Ondas S(Cisalhamento)
Solos	300-700	100-300
Areia seca	300-1200	100-500
Areia Húmida	1500-2000	400-600
Argila Saturada	1100-2500	200-800
Arenitos saturados	2000-3500	800-1800
Calcário	3500-6000	2000-3300
Sal	4500-5500	2500-3100
Granito	4500-6000	2500-3300
Basalto	5000-6000	2800-3400
Gnaisse	4400-5200	2700-3200
Água	1450-1500	-
Gelo	3400-3800	1700-1900
Óleo	1200-1250	-

Tabela 2 - Exemplos das Velocidades Propagação Ondas P e S.

### Equipamentos de prospecção sísmica

O equipamento sísmico que permite proceder à medição da velocidade de propagação das ondas, que mais tarde nos irão permitir a caracterização dos diferentes materiais que constituem as horizontes geológicos dos locais em estudo, é constituído pelos seguintes instrumentos: emissor; cabos; geofones e sismógrafo.

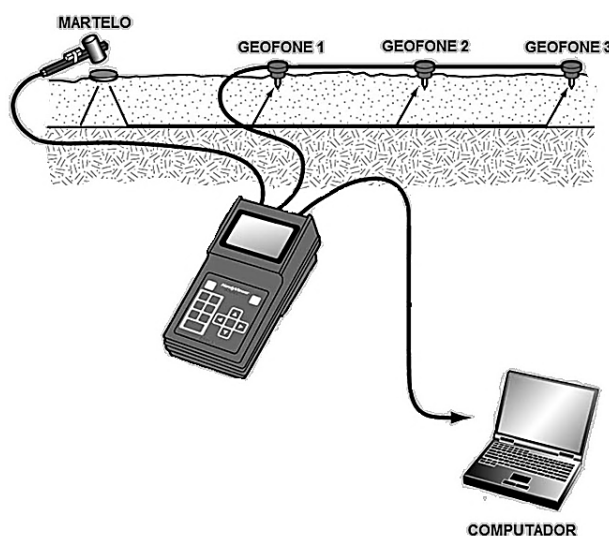


Figura 11 - Esquema do conjunto emissor/cabos/geofone/sismógrafo.

O emissor é o elemento que irá transmitir energia, isto é, será a fonte de energia. Essa energia poderá ser fornecida através da percussão de um martelo numa chapa metálica pousada no solo,

através da detonação de explosivos ou por meio de qualquer outro equipamento capaz de transmitir de forma eficaz e eficiente a energia necessária à geração de ondas.



**Figura 12 - Utilização do par marreta/placa metálica, como emissor.**

A marreta é habitualmente usada para ensaios de pequenas profundidades, que não ultrapassem a dezena de metros. Esta não será a fonte energia mais adequada para distâncias entre geofones superiores a 50m. Sempre que usamos a marreta, usamos também uma placa de aço a qual irá permitir melhorar a transmissão da energia ao solo, bem como nos permitirá repetir as vezes necessárias as pancadas no mesmo local sem que o martelo se enterre.

O impacto da marreta na placa de aço gera um ruído bastante penoso para o nosso ouvido. Por esta razão, será sensato usar EPI's (equipamentos de proteção individual) sempre que seja usada uma placa deste material. Apesar das placas de aço ainda serem utilizadas, começam a ser substituídas por discos de borracha, uma vez que estes provocam uma poluição sonora bastante inferior que o aço e são muito mais duradouras.

Existe ainda um cuidado a ter com a colocação da placa, para que a transmissão de energia desferida pela marreta seja eficiente, a placa deverá ficar perfeitamente nivelada e "acamada" na superfície do solo, isto porque as pancadas são sempre desferidas com alguma intensidade e no caso das condições descritas não se verificarem a energia poderá não ser transmitida de forma eficaz.

Para levantamentos ou pesquisas com profundidades superiores a 10 m, as quais requerem a aplicação de maiores quantidades energia, poder-se-á recorrer a blocos cujo peso rondará a casa das toneladas os quais serão unicamente possíveis de utilizar recorrendo ao apoio de guias móveis equipadas com guinchos; isto porque este bloco têm de ser elevado a alturas mínimas de cerca de 4m para que seja de seguida largado em queda livre.

Quando o bloco é largado da altura mínima de 4m o seu apoio ao soltá-lo irá sofrer um ressalto podendo gerar energia suficiente sob a forma de vibrações, que darão origem à sua própria cadeia de ondas. Uma vez que a distância de lançamento é pequena esta cadeia de ondas poderá também ser sentida no solo.

Nas alturas de lançamento do bloco superiores a 4m não se verificará o efeito das vibrações geradas pelo ressalto porque estas dissipar-se-ão antes de atingir o solo. Existem ainda outros emissores que usam o seu peso para gerar energia dos quais não iremos falar uma vez que são muito pouco utilizados devido a sua dificuldade na aplicação, transporte e complexidade no processamento de dados.

Os métodos sísmicos também recorrem aos explosivos como fonte de energia, existindo normas de procedimento cujo rigor varia de país para país. No caso de Portugal, o uso de explosivos só poderá ser feito por técnicos que se encontrem habilitados; isto é, detentores da carta de fogo e após verificadas e devidamente autorizadas as exigências previstas na Lei.

Hoje em dia existem diversos tipos de explosivos considerados de alguma forma seguros e que podemos usar nos métodos sísmicos, tais como por exemplo os que usamos nas pedreiras para introduzir atrasos na sequência de rebentamento, chamado cordão detonante.

Antes da colocação do cordão detonante será necessária a execução de furos no solo recorrendo a martelos de perfuração equipados com varas, e só depois será colocado o cordão detonante, que para furos considerados de pequena profundidade é tão eficaz como a habitualmente usada gelamonite, além de que é mais seguro e fácil de manipular. No entanto, se forem necessários altas resoluções como por exemplo na sísmica de reflexão menos profunda teremos de recorrer a detonadores.

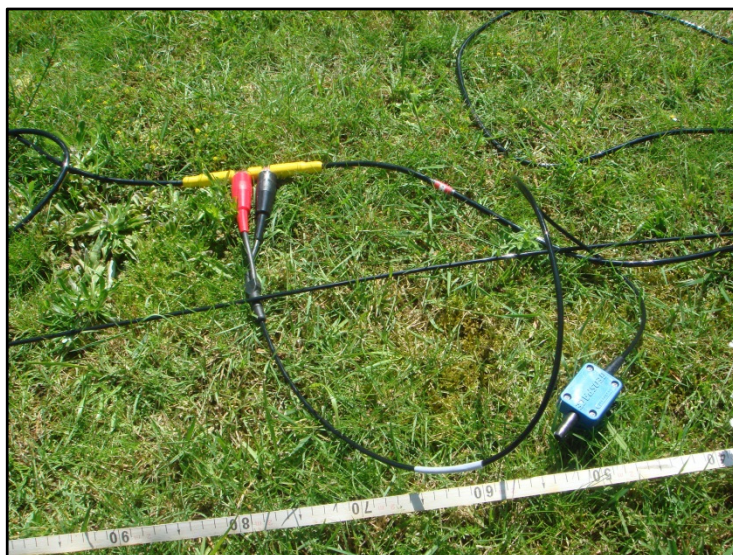
Sabemos também que estando na presença de maciços fraturados, grande parte da energia gerada pelo rebentamento será perdida. A colocação de água nos furos de rebentamento poderá de forma significativa conduzir ao melhoramento desta perda de energia.

Apesar de a utilização dos explosivos não ser totalmente segura, caso seja necessária a colocação dos geofones com distâncias entre si com cerca de 50 m é a este processo que teremos de recorrer uma vez que a energia sísmica por eles emitida poderá ser detetada a mais de 50 m.

Após a emissão de energia, seja através de marreta, libertação de peso, ou explosivos, o sinal emitido será detetado e encaminhado através de cabos desde os diferentes recetores (geofones), até ao equipamento (sismógrafo) que irá gravar e guardar os dados para mais tarde serem interpretados.

No que diz respeito aos cabos, eles servem para ligar os geofones e ao sismógrafo. Os cabos e as ligações são as partes consideradas mais vulneráveis do equipamento necessário para um ensaio sísmico.

Assim, com o passar dos anos o cabo poderá ter de ser substituído uma vez que o seu uso continuado poderá levar a situações de desgaste da sua proteção exterior possibilitando a entrada de humidades que irão dar origem a um aumento interferências na transmissão do sinal.



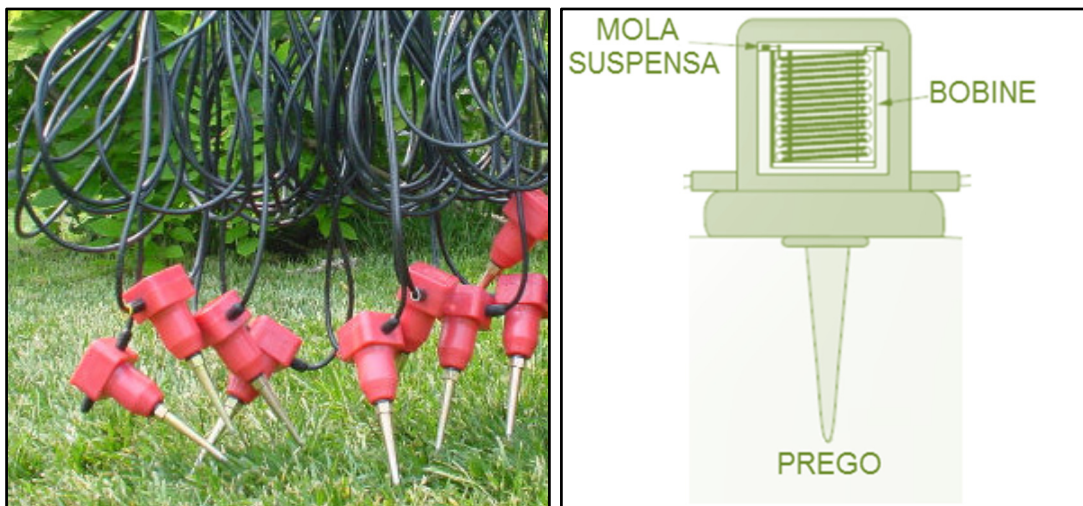
**Figura 13 - Aspeto da disposição de cabos e ligações e de um geofone.**

No caso de trabalharmos com cabos que permitam duas ligações, uma em cada extremidade, e caso os fios que os constituem sofram algum dano numa das ligações a outra permanece funcional o que só é detetado, caso se inverta a posição do cabo. Por esta razão devem ser continuamente verificados e reavaliados.

Os geofones são sensores, os quais apresentam características diferentes de acordo com a sua aplicação e o objetivo pretendido. Os geofones que registam as ondas sísmicas são sensores que se fixam na superfície e captam as vibrações do terreno as quais poderão ser naturais (terramoto) ou induzidas (provocadas pelo homem).

O geofone apresenta um núcleo de grande permeabilidade magnética (íman) o qual se encontra suspenso por molas e enrolada à volta deste núcleo encontra-se uma bobina. Esta bobina apresentará uma pequena folga na vertical, pois será esta folga que irá permitir o seu deslocamento na vertical. Sempre que existe um movimento no solo quer seja ele natural ou induzido, a passagem de corrente através do campo magnético é proporcional à velocidade de movimento da bobina. As resistências destas bobinas andam na ordem dos 400 ohms.

Apesar dos meios rudes onde os geofones são muitas vezes usados e o mau tratamento que lhes é dado, pode reduzir a sua vida útil, no entanto são considerados equipamentos com grande capacidade de resistência.



**Figura 14 - Geofone: imagem e esquema.**

Para aumentar a durabilidade dos geofones, deveremos ter em atenção de não os atirar para o chão sem qualquer cuidado, ou deixar os seus cabos completamente enredados pois isso poderá

levar ao aparecimento de danos nos mesmos e o geofone ficará inutilizado. São pequenos cuidados a ter que poderão evitar gastos supérfluos.

Os sismógrafos são equipamentos utilizados para obter medições de amplitude e tempos de chegada dos diferentes tipos de onda P, S, R e L, quer surjam de forma natural ou induzida por um emissor. Este equipamento regista a informação fornecida pelos geofones que são os recetores numa sequência de tempo controlada.

O sismógrafo é um equipamento multifacetado isto porque permite disparar ou receber sinais de uma fonte emissora, armazenar os sinais dos diferentes canais como dados digitais em unidades de tempo discretas e também digitalizar os sinais dos geofones. Os dados obtidos do sismógrafo permitir-nos-ão calcular a distância e a intensidade real de um sismo, bem como identificar a localização do seu foco.

Os primeiros sismógrafos que existiram recorriam a papel ou a filme fotográfico para registarem os dados obtidos.

Com o decorrer dos anos e com o aumento da solicitação do método sísmico, estes equipamentos desenvolveram-se tornando-se assim bastante mais sofisticados permitindo, o processamento do vasto volume de dados além do armazenamento da informação de mais de um canal, bem como a apresentação dos mesmos sobre forma de gráficos.



**Figura 15 - Aspeto de uma unidade de receção (sismógrafo) acoplada a um computador para leitura imediata dos valores em *software* específico.**

Existem correntemente dois tipos de sismógrafos: uni-canal e multicanal. O sismógrafo uni-canal, como o próprio nome indica só tem um canal. Este equipamento apresenta um único geofone que é colocado fixo num ponto. O emissor é um martelo que induz as ondas sísmicas. A distância do emissor ao geofone irá sendo incrementada de cada vez que o martelo emissor induzir ondas sísmicas.

Os primeiros tempos de chegada são identificados no monitor sob a forma de ondas sísmicas. Este tipo de sismógrafo é indicado para pequenos projetos em que se pretende medições da propagação de velocidade sísmica em amostras rochosas.

O sismógrafo multicanal, por sua vez, e ao contrário do anterior poderá ser utilizado na obtenção de dados para 6, 12, 24, 48 ou mais geofones. Este equipamento permite-nos o registo simultâneo das ondas sísmicas por todos os geofones.

A visualização simultânea da chegada das ondas sísmicas permitir-nos-á observar qual a tendência dos dados, bem como escolher o primeiro tempo de chegada mais confiável. Assim o sismógrafo multicanal deverá ser usado para projetos de grande complexidade geotécnico-geológica.

### **Refração vs Reflexão**

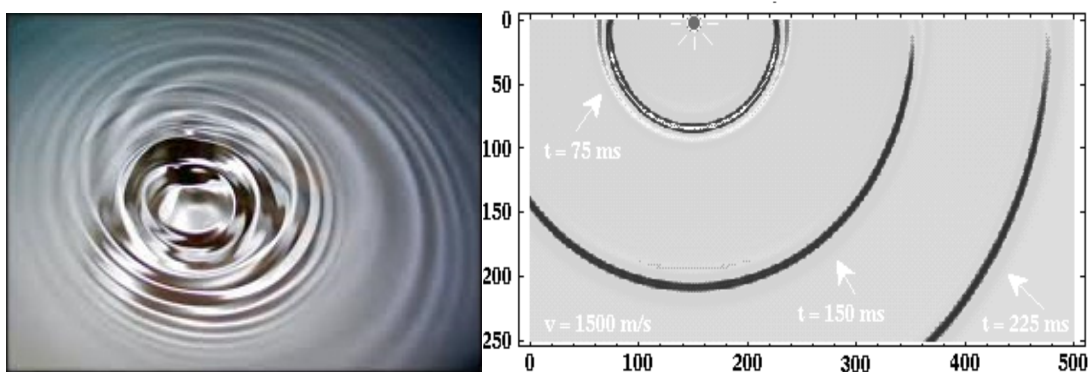
Os métodos sísmicos de refração e reflexão têm como principal objetivo a determinação da estrutura geotécnica de um determinado local, bem como a sua estratigrafia e qualidade da rocha existente. Através de emissão de ondas sísmicas estes métodos permitem-nos obter informação acerca dos horizontes existentes na subsuperfície terrestre, bem como algumas propriedades geomecânicas da rocha/solo. Assim, quando pretendemos identificar a estrutura geológica das unidades rochosas e as velocidades a que as ondas sísmicas atravessam as referidas unidades, recorreremos ao método sísmico de refração ou reflexão, pois através deles podemos registar a informação acerca da velocidade das ondas refratadas e refletidas que nos levaram à concretização do objetivo pretendido.

Apesar de ambos os métodos terem o mesmo objetivo final existem diferenças bastante significativas entre ambos, com isto queremos dizer que a escolha do método a utilizar deverá ter em conta entre outras coisas as condições específicas do local onde vai ser aplicado o método e o que pretendemos caraterizar e identificar, isto é, por exemplo se pretendemos caraterizar um local para posterior construção ou se pretendemos identificar possíveis locais de exploração de um qualquer recurso, como seja o petróleo.

Em geral ambos os métodos envolvem a medição do tempo que a energia sísmica leva a percorrer os horizontes existentes desde que se dá o disparo superficial cujo emissor poderá ser por exemplo uma marreta, até atingir os diversos recetores, os geofones.

A propagação das ondas sísmicas na subsuperfície é muito semelhante à situação quando deixamos cair um pequeno fragmento de rocha nas águas calmas de um lago.

O soltar do fragmento no lago vai dar origem à libertação de energia que se irá propagar sobre a forma de um anel de ondulações segundo uma determinada direção.



**Figura 16 - Movimento de Onda.**

Fonte: <http://www.pantojaindustrial.com.br>

Fonte: <http://galitzin.mines.edu>

Esta direção é-nos dada a conhecer através dos raios sísmicos. Então, o raio sísmico geralmente curvilíneo não é mais do que um conjunto de linhas que nos dão a conhecer a direção na qual a onda se desloca a partir do foco.

Cada onda poderá apresentar um conjunto infinito de raios sísmicos a descrever o seu percurso. Além da direção do percurso descrito pela onda o raio sísmico indica-nos também a frente de onda. A frente de onda é esférica e é nela que se definem os pontos que num determinado instante passam pela mesma ocorrência.

A energia sísmica à medida que vai atingindo os diversos geofones diz-se que se propagou no sentido perpendicular à frente de onda, ou seja que se propagou no sentido do raio sísmico.

Na subsuperfície, nos limites de separação dos diferentes meios com diferentes velocidades sísmicas e densidades, as ondas sísmicas serão refratadas e refletidas. Isto porque sempre que os

diferentes materiais com diferentes densidades são atingidos por raios sísmicos, uma parte da energia é refratada para o horizonte subjacente, enquanto que a energia remanescente é refletida segundo um ângulo de incidência.

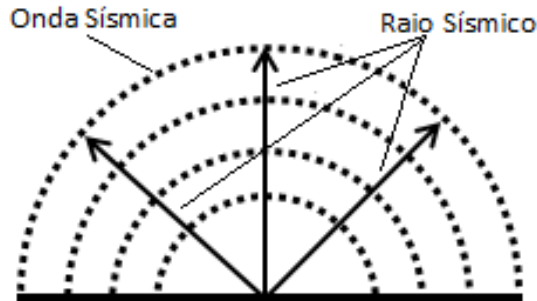


Figura 17 - Raio Sísmico.

A combinação de diversos fatores como a refração e reflexão de energia sísmica para as diferentes densidades, a geração de ondas superficiais e o som na superfície terrestre, dá origem a uma longa e complicada sequência de movimentos sísmicos os quais são então registados por cada um dos geofones sob a forma de um traço agitado.

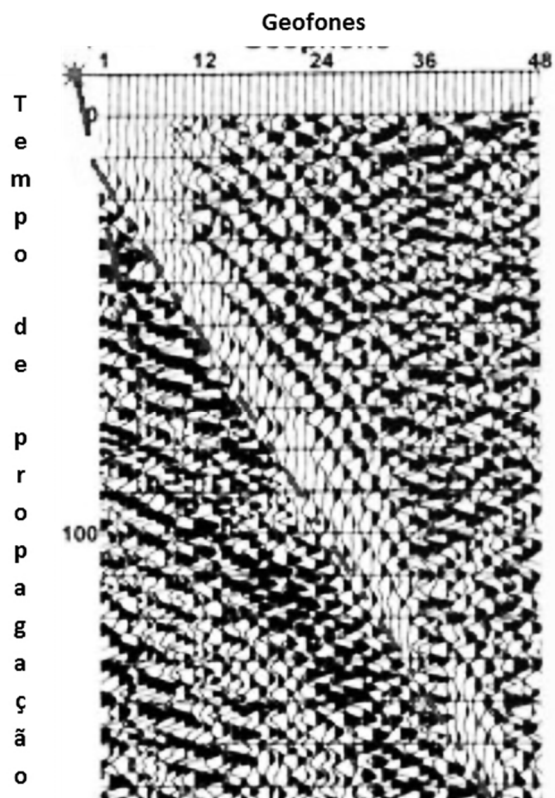


Figura 18 - Informação registada pelos geofones.

Adaptado: <http://www.enviroscan.com>

### **Método de refração sísmica**

Este método, como anteriormente referido, recorre à emissão de ondas sísmicas usando o seu tempo e velocidade de propagação para estimar profundidades de lençóis de água e horizontes de elevada capacidade de suporte (“bedrock”), localização de crateras de subsidência, mapear a estratificação existente na sub-superfície, prever a ripabilidade do maciço e proceder à determinação de características geotécnicas.

Assim, este método recorre a um emissor (marreta, explosivos, entre outros) para gerar energia a qual se irá propagar sob a forma de ondas sísmicas. Estas serão detetadas pelos recetores (geofones) que se encontram colocados em intervalos regulares registando a chegada da energia da onda e o tempo que esta demora a percorrer a distância desde o ponto emissor até ao recetor. Os dados obtidos permitir-nos-ão traçar gráficos de tempo - distância (domocrónicas) a partir dos quais podemos determinar a velocidade de propagação da onda em cada horizonte bem como a profundidade a que se encontram as interfaces. Para que este método forneça resultados fiáveis, é necessário que a velocidade sísmica nos horizontes existentes aumente à medida que aumenta a profundidade, (Lei de Snell). Por exemplo, se encontramos uma camada de velocidade sísmica com valor de 5000 m/s posicionada superiormente a um horizonte de velocidade sísmica de valor 2000 m/s este método poder-nos-á fornecer resultados incorretos, uma vez que não cumpre a condição inicialmente apresentada.

Ao dar-se a emissão de energia, esta vai-se propagando num determinado meio 1 sob a forma de onda com uma determinada velocidade de propagação  $V_1$ , assim que esta onda encontra o limite de separação do meio 1 em que se propaga, com um outro meio 2 de diferentes características e diferente velocidade de propagação  $V_2$ , parte da energia que compõe a onda penetra o limite de separação entre horizontes sendo refratada (onda refratada), outra porção da onda é refletida (onda refletida) para a superfície e existe ainda outra parte de energia que não tem qualquer interação com o limite de separação dos horizontes à qual chamamos onda direta.

A onda refratada pode sofrer dois tipos de refração, a refração simples dá-se quando a energia é refratada para o horizonte subjacente, e a refração crítica que ocorre quando a energia é refratada ao longo da interface existente entre os meios.

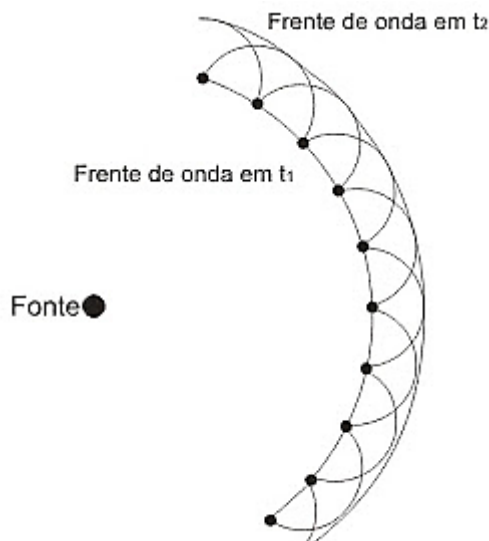
Como já atrás mencionado, a direção de propagação das ondas bem como a frente de onda, é indicada pelos raios sísmicos, o direto, refletido, refratado respetivamente.

Os raios sísmicos têm de ser perpendiculares às frentes de onda, estes raios com a propagação da onda vão acabar por incidir no limite de separação entre os meios com um determinado ângulo, o ângulo de incidência ou ângulo crítico.

Quando se dá a refração da onda ao longo do limite de separação entre os meios e o raio sísmico de refração passa a ter um ângulo de  $90^\circ$  passar-se-á a chamar-se ângulo de refração, e a onda refratada que se propaga ao longo deste limite com a velocidade do meio 2, chamar-se-á onda refratada e conseqüentemente chamar-se-á à refração, refração crítica.

Podemos então dizer que a refração é crítica quando ocorrem as condições da Lei de Snell, isto é, a velocidade de propagação no meio 1 é inferior a velocidade de propagação da camada subjacente, o meio 2 e  $\text{sen } i = V_1/V_2$ .

Da ocorrência da refração crítica surgem novas ondas, as ondas criticamente refratadas cuja energia irá propagar-se até à superfície. De acordo com o Princípio de Huygens, Todos os pontos numa frente de onda podem ser considerados como fontes pontuais para a produção de ondas elementares esféricas secundárias, sendo que após um tempo  $t$  a nova posição de uma frente de onda será a superfície tangente a estas ondas elementares secundárias).

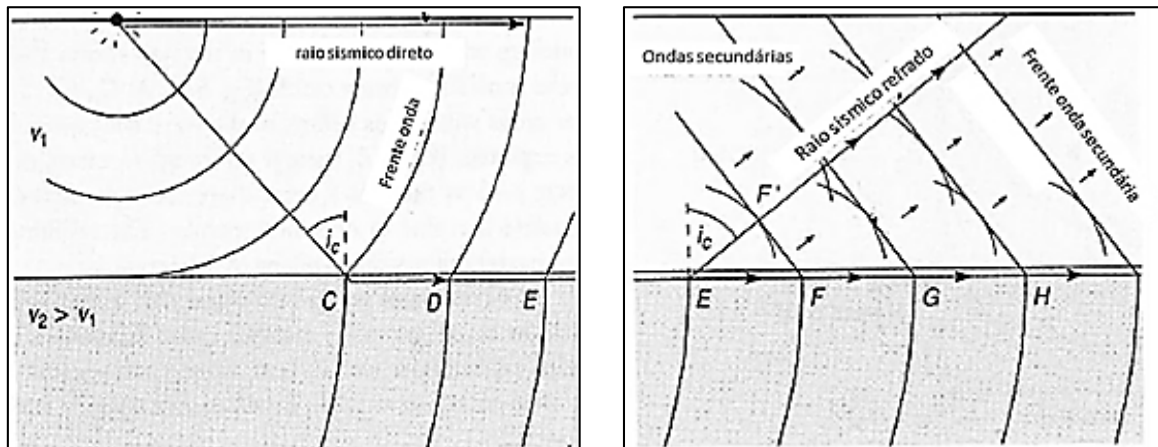


**Figura 19 - Novas frentes de onda (*Head Waves*).**

Fonte: <http://fisicaqui.blogspot.pt>

Os raios sísmicos correspondentes a estas ondas irão atingir a superfície com um ângulo igual ao ângulo crítico.

Estas novas ondas irão propagar-se até a superfície com a direção do raio sísmico crítico refratado com a velocidade correspondente à do meio 1 ou seja  $V_1$ .



**Figura 20 – Formação e propagação das ondas secundárias.**  
Adaptado: <ftp://geologyftp.gg.uwyo.edu>

As primeiras ondas a atingir a superfície serão as ondas diretas e de seguida as ondas criticamente refratadas para pequena distância entre o emissor e o recetor. Para maiores distâncias ( $> 275\text{m}$ ) as ondas criticamente refratadas serão as primeiras ondas a atingir o recetor.

Isto verifica-se essencialmente por dois motivos: a espessura do meio onde se propaga e a distância entre o emissor e o recetor.

Se estivermos na presença de dois meios que apresentem diferentes características e velocidades de propagação e em que a distância entre o emissor e o recetor seja pequena, as primeiras ondas a atingir o recetor serão as ondas diretas. A razão pela qual isto acontece é porque embora a velocidade a que as ondas se propagam inicialmente seja igual, o percurso a percorrer pela onda refratada acaba por ser superior uma vez que se irá propagar até ao limite de separação dos meios para depois retornar novamente à superfície.

Mas existem também situações em que as ondas refratadas podem ser as primeiras a chegar aos recetores, para espessuras pequenas do meio onde se propagam e grandes distâncias entre o

emissor e o recetor. Quanto mais fina for a espessura do meio, menor é o espaço em que a onda refratada se propaga a baixa velocidade, isto porque o limite de separação entre os meios está mais próximo da superfície e aí a onda refratada propagar-se-á com uma velocidade superior, isto é, com a velocidade do meio subjacente.

Para situações de grande distância entre o emissor e o recetor também as ondas refratadas podem ser as primeiras a chegar aos recetores uma vez que o percurso mais extenso de propagação vai ser onde atingem velocidades de propagação superiores.

Assim para determinar a distância para a qual a onda refratada começa a chegar aos recetores antes da onda direta teremos de determinar a distância crítica ( $X_c$ ).

Usamos a seguinte fórmula para a determinação da distância crítica:

$$X_c = 2 * d * \sqrt{((V_2 + V_1)/(V_2 - V_1))}$$

**Equação 1 - Distância crítica**

Em que:

$X_c$  = Distância crítica

$d$  = Profundidade interface

$V_1$  = Velocidade do meio 1

$V_2$  = Velocidade do meio 2

O valor obtido para a distância crítica vai também permitir determinar a espessura das camadas, recorrendo para isso à seguinte fórmula:

$$h = X_c/2 * \sqrt{((V_2 + V_1)/(V_2 - V_1))}$$

**Equação 2 - Espessura da camada a partir da distância crítica.**

Podemos ainda ter necessidade de determinar o tempo de chegada da onda direta através da velocidade de propagação no meio. Se tivermos o valor da propagação de velocidade naquele meio podemos encontrar o tempo de chegada da onda direta dividindo a distância existente entre o emissor e o recetor pela velocidade de propagação.

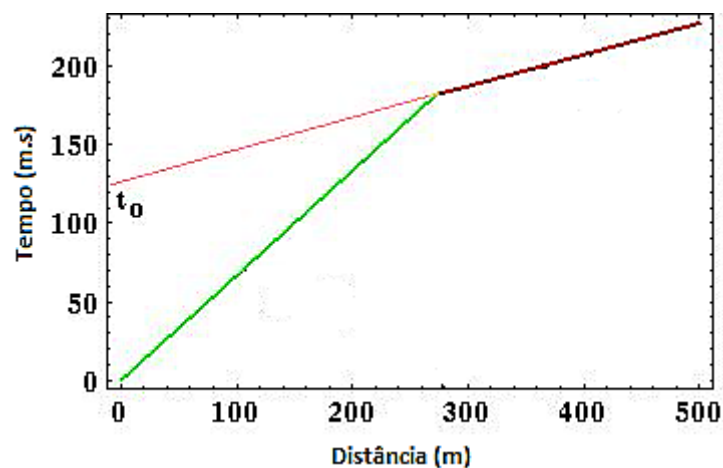
A velocidade de propagação pode ser calculada através da divisão da distância existente entre o emissor e o recetor e o tempo de chegada. A espessura do horizonte pode também ser determinada recorrendo-se ao uso de um outro parâmetro que é o tempo que a onda refratada

demoraria a percorrer a distância até aos zero metros isto é o tempo que a onda refratada demoraria a atingir o emissor (zero-offset time). Isto só se consegue através de extrapolação gráfica uma vez que sabemos que não existem ondas refratadas junto do emissor.

$$h = (t_0 * V_2 * V_1) / (2 * \sqrt{(V_2^2 - V_1^2)})$$

**Equação 3 - Espessura do horizonte a partir de  $t_0$**

A aquisição dos dados necessários ao cálculo da distância crítica, velocidade de propagação, espessura de horizontes e a sua diversidade é obtida através de perfis sísmicos que terão de posteriormente ser tratados e interpretados.



**Figura 21 - Extrapolação gráfica - Linha lilás indica o tempo na posição zero metros.**

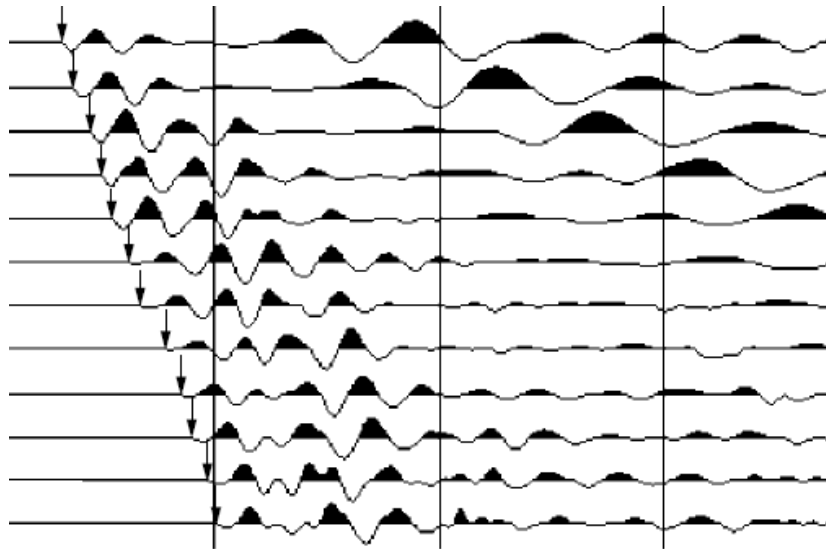
Adaptado: <http://galitzin.mines.edu>

Como já foi dito o método de refração sísmica baseia-se no registo do tempo de chegada da primeira onda emitida a cada geofone. Aos registos efetuados pelo sismógrafo, chamamos sismogramas.

É nos sismogramas que vamos proceder à identificação da chegada das primeiras ondas e o tempo que estas demoraram a atingir cada geofone. No entanto esta pode ser uma tarefa bastante difícil especialmente se existirem fontes de ruído, pois o ruído também será registado pelos sismógrafos. Existem diferentes tipos de situações que podem produzir ruídos, e as quais não podemos controlar, por exemplo, circulação automóvel, animais e pessoas e até mesmo o barulho provocado pela incidência do vento na vegetação existente pode ser uma fonte de ruído. Estas situações não podem ser eliminadas mas podem ser minimizadas, com ações como por exemplo, quando possível colocar os recetores (geofones) o mais afastado possível de vegetação.

Quando os sismogramas não apresentam sinais de ruído é relativamente fácil a identificação do tempo da chegada da primeira onda. Existem situações em que o ruído registado é mínimo, mas situações há em que o ruído que precede a chegada das primeiras ondas é intensamente registado e aí esta chegada torna-se bastante difícil de identificar.

Então, em casos semelhantes ao descrito em vez de identificar o tempo de chegada da primeira onda, o que poderá ser feito é identificar a primeira grande crista de onda que ocorre imediatamente a seguir ao tempo da primeira chegada. Contudo esta segunda opção não será a melhor.



**Figura 22 – Sismograma - as setas indicam o tempo das primeiras chegadas de onda (*First break*).**

Fonte: Field Geophysics

Até ao momento têm sido descritas as situações mais básicas em que temos dois meios 1 e 2, e as camadas se apresentam horizontais, no entanto no dia-a-dia somos confrontados com diversas situações para além desta como o aparecimento de múltiplos horizontes, horizontes escondidos e horizontes inclinados.

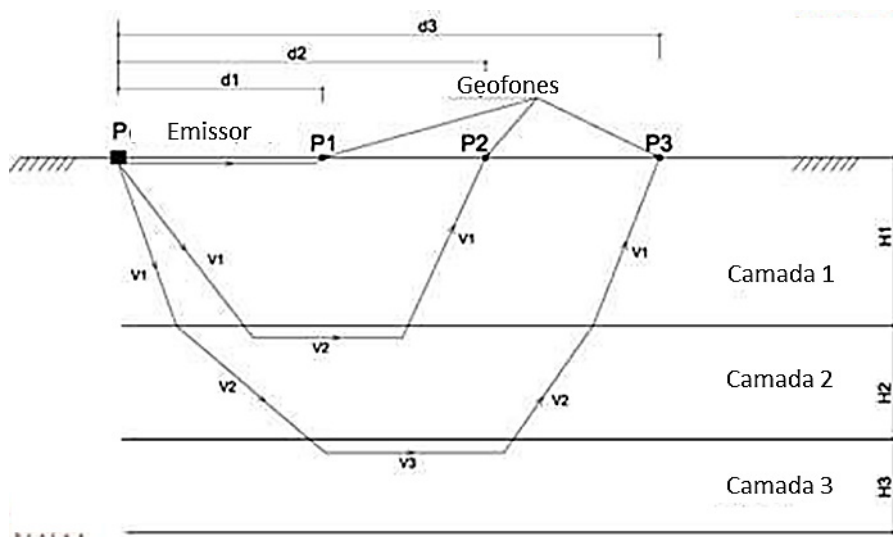
Nas situações em que temos múltiplos horizontes, logo de início temos conhecimento de duas situações, é que vamos ter diversas velocidades de propagação de ondas e que as primeiras chegadas serão de ondas diretas e de ondas criticamente refratadas. Sabemos também que os tempos da primeira chegada nos permite determinar a velocidade de propagação, a espessura do horizonte e o número de horizontes existentes.

Vamos por exemplo imaginar uma situação em que temos 3 horizontes. Para o meio 1 em que a distância entre o emissor e o recetor é mais pequena os primeiros tempos de chegada registadas

são das ondas diretas e propagam-se horizontalmente com a velocidade de propagação  $V_1$  deste mesmo meio 1.

No caso do meio 2, aumentando a distância entre o emissor e os recetores, os primeiros tempos de chegada são para as ondas criticamente refratadas pelo limite de separação existente entre o meio 1 e 2. Estas irão propagar-se também horizontalmente mas com uma velocidade de propagação igual à velocidade de propagação do meio 2. Por sua vez ao descer em profundidade para o meio 3 aumenta mais uma vez a distância entre o emissor e os recetores e a velocidade de propagação de onda. Então, relativamente a este meio, as primeiras chegadas a registar serão também as ondas criticamente refratadas. Estas ondas serão criticamente refratadas na interface de separação entre o meio 2 e 3, e propagar-se-ão horizontalmente com a velocidade do meio 3.

Em situações de múltiplos meios teremos mais do que uma interface de separação que será igual ao número de meios existentes menos 1. A profundidade a que se encontram estas interfaces podem ser calculadas através do método de interceção de tempos para as ondas refratadas a distância zero do emissor (zero offset time –  $t_0$ ) e as respetivas velocidades conhecidas.



**Figura 23 - Refração em multicamadas.**

Adaptado: <http://www.buildingresearch.com.np/services/gi/gi2.php>

Para o exemplo da Figura 23 as profundidades da interface 1 (com  $t_{01}$ ) e interface 2 (com  $t_{02}$ ) poderiam ser calculadas pelas seguintes fórmulas:

$$D_1 = (t_{01} V_2 V_1) / (2\sqrt{(V_2^2 - V_1^2)})$$

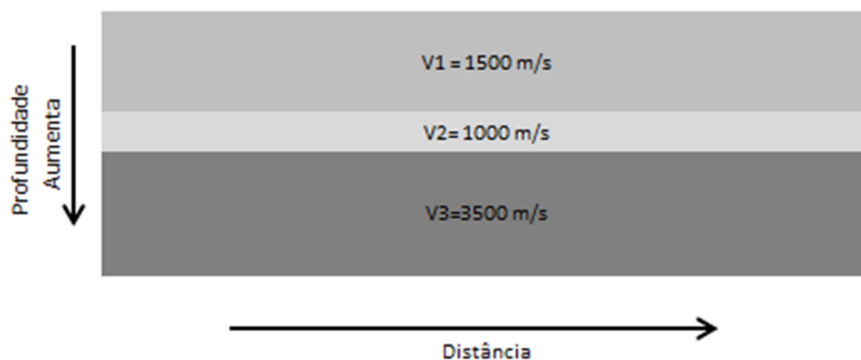
**Equação 4 - Profundidade da interface 1**

$$D_2 = t_{02} - \left( 2D_1 \sqrt{(V_3^2 - V_1^2)} / V_3 V_1 \right) * \frac{V_3 V_2}{2\sqrt{(V_3^2 - V_2^2)}} + D_1$$

**Equação 5 – Profundidade da interface 2**

Além da situação das múltiplas camadas que acabamos de descrever pode também aparecer a situação em que um horizonte intermédio apresente espessura e velocidade de propagação inferior quer à do horizonte que se lhe encontra sobreposto quer o horizonte que se encontra subjacente.

Esta situação é conhecida pelo horizonte escondido ou seja é uma camada da qual não se observará primeiras chegadas.



**Figura 24 - Exemplo de horizonte escondido.**

A presença deste horizonte é bastante difícil de identificar, embora possa acontecer ocasionalmente através das segundas chegadas (ondas refratadas), contudo também esta situação não é fácil uma vez que os horizontes de menor espessura atenuam bastante as ondas refratadas.

Muitas vezes temos horizontes que produzem ondas criticamente refratadas que são primeiras chegadas mas que não são detetadas pelos geofones o que nos leva a uma situação de horizonte escondido. Isto pode acontecer se os geofones não estiverem localizados em locais chave.

Contudo só podemos ter algum conhecimento destes locais caso exista algum estudo previamente desenvolvido e aí poderemos relocalizar os recetores (geofones).

Então, quando temos horizontes escondidos provavelmente estes só serão detetados durante a execução de trabalhos de movimento de terras.

Para além dos horizontes escondidos temos também a possibilidade da ocorrência de zonas de sombra das quais fazem parte o nível freático, terraços enterrados. Quando estamos perante uma situação em que a velocidade diminui na interface, a refração crítica não irá ocorrer logo os recetores na superfície não irão detetar a energia refratada. Isto porque as ondas ao propagarem-se pelas zonas de sombra à medida que se afastam da fonte emissora perdem rapidamente energia, deixando rapidamente de ser detetáveis.

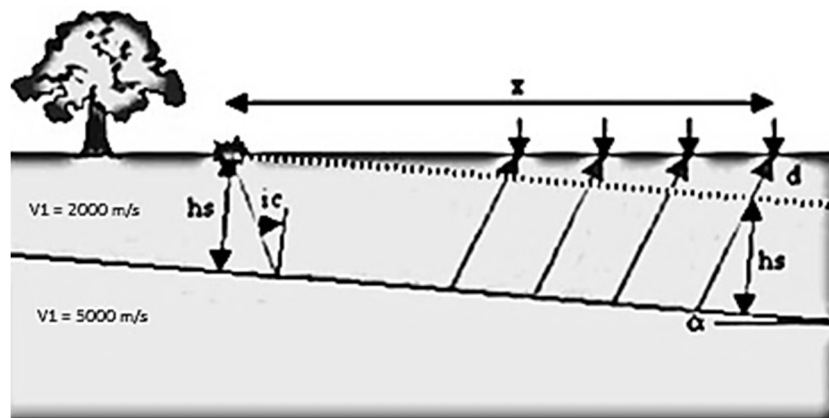
Até ao momento temos considerado sempre horizontes com zero graus de inclinação, mas todos sabemos que no interior da superfície terrestre podemos encontrar horizontes com diversas inclinações, mesmo que o horizonte superficial não tenha inclinação.

A inclinação dos horizontes vai interferir nos tempos de chegada. De acordo com a distância do emissor aos recetores e a sua posição relativamente à inclinação do horizonte o tempo de chegada da onda aos recetores será menor ou maior, bem como a velocidade de propagação.

Se a inclinação do horizonte aumentar à medida que aumenta a distância do emissor ao recetor em que o limite de separação entre os meios se encontra mais próximo da superfície do lado do emissor, temos uma situação de mergulho do horizonte (*down-dip*), ou seja a inclinação encontra-se no sentido descendente do emissor para os recetores.

No entanto podemos também ter a situação contrária em que o emissor está colocado do lado em que o limite da interface entre os meios se encontra mais profundo e os recetores do lado em que este limite se encontra mais próximo da superfície ou seja estamos a andar no sentido ascendente à medida que nos afastamos do emissor em direção aos recetores e teremos então *up-dip*. Poderemos observar estas situações nas figuras abaixo colocadas.

Na Figura 25 existe uma linha a tracejado que simboliza a superfície onde seriam colocados os geofones caso esta fosse paralela ao limite de separação entre os 2 meios.



**Figura 25 – Interface de mergulho (Down dip).**

Adaptado: <http://galitzin.mines.edu>

Então, colocando o emissor do lado esquerdo dos recetores, e posicionando os recetores na camada paralela à linha de separação dos meios, e verificada ainda a condição do aumento da velocidade de propagação com o aumento da profundidade, estamos perante uma situação em que a refração crítica da onda se dá ao longo do limite de separação dos meios com inclinação de zero graus, como temos visto até agora.

Mas como podemos observar na Figura 25 os geofones estão colocados numa superfície não paralela ao limite de separação dos meios, o que vai fazer com que a onda criticamente refratada tenha um acréscimo no seu percurso de propagação ( $d$ ) para atingir os geofones que se encontram mais afastados da fonte, o que vai conseqüentemente provocar atrasos nos tempos de chegada.

Então, à medida que aumenta a distância entre a fonte e o recetor, o tempo de atraso na chegada da onda aos recetores é maior. Contudo, é possível calcular este atraso na chegada da onda criticamente refratada a cada geofone para situações em que o limite da separação dos meios se encontra a pequena profundidade, através das fórmulas a seguir apresentadas desde que saibamos a profundidade do horizonte ( $\alpha$ ), a distância à fonte ( $x$ ), e o acréscimo da distância percorrida pelo raio sísmico refratado ( $d$ ).

O acréscimo da distância percorrida pelo raio sísmico refratado pode ser calculado:

$$d = (\text{sen } \alpha / \text{sen } i_c) * x$$

**Equação 6 - Acréscimo da distância percorrida**

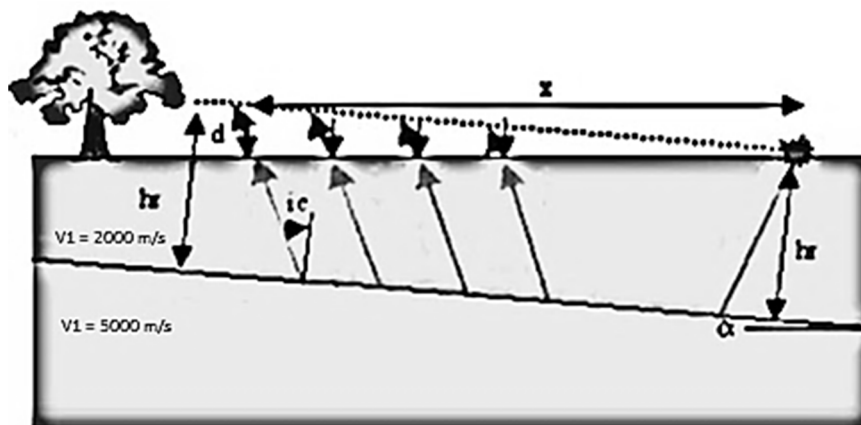
Por sua vez o acréscimo no tempo de percurso pode ser calculado pela expressão:

$$t_{extra} = (d/V_1)$$

**Equação 7 - Acréscimo do tempo de percurso**

Então, percebemos que quando o limite de separação entre os meios não é paralelo à superfície onde estão colocados os geofones e a inclinação aumenta da esquerda para a direita, o acréscimo de atraso no tempo de chegada da onda criticamente refratada aos geofones é proporcional ao aumento da distância do emissor aos geofones.

A situação apresentada na Figura 26 é completamente o oposto da anteriormente exposta. Isto é, trocamos a posição dos geofones com o emissor, passamos a posicionar os recetores do lado esquerdo e o emissor do lado direito. Traçando a mesma linha a simular a superfície paralela ao limite de separação dos meios a passar no emissor, podemos verificar que os raios sísmicos para uma situação real em que não há paralelismo entre a superfície onde estão colocados os recetores e a interface refletora, os raios sísmicos refratados são inferiores comparando-os com os obtidos para uma situação de paralelismo.



**Figura 26 – Interface ascensional (up-dip).**

Adaptado: <http://galitzin.mines.edu>

Para esta segunda situação verificamos que à medida que nos afastamos do emissor, os raios sísmicos refratados são mais pequenos, e o tempo de chegada diminui; logo a onda criticamente refratada é observada à superfície mais cedo.

Relativamente às ondas diretas estas não são afetadas pela inclinação de camadas, e a velocidade de propagação é inferior se estamos perante uma situação de mergulho (*down-dip*) ou se estamos numa situação ascensional (*up-dip*).

Quando procedemos a um levantamento recorrendo a sismica de refração, uma boa forma de identificar a inclinação das camadas existentes consiste em proceder a dois disparos, um em cada extremo da linha de geofones colocada. A estes disparos chamamos o tiro direto e o tiro inverso. Em primeiro lugar é dado o tiro direto e posteriormente o tiro inverso. Então, sendo a superfície onde se encontram colocados os geofones paralela ao limite de separação dos meios e os emissores forem colocados à mesma distância dos geofones em ambos os extremos, quando fizermos o tratamento de dados após a aquisição dos mesmos iremos constatar que o tempo de chegada e a velocidade de propagação de onda é igual quer seja o disparo direto ou inverso na linha de geofones. Então não existindo inclinação dos horizontes os resultados obtidos são simétricos.

Quando temos horizontes não paralelos, ou seja inclinados, recorrendo ao tiro direto e tiro inverso, após o tratamento de dados constatamos que deixa de haver simetria nos resultados obtidos ou seja os tempos de chegada e as velocidades de propagação são diferentes.

As velocidades de propagação podem ser calculadas através das seguintes fórmulas em que os valores das incógnitas são retirados dos gráficos tempo vs distância:

- ✓ Camadas inclinadas recorrendo a 1 só disparo:

$$V_{ap} = V_2 / (1 + \text{sen } \alpha)$$

**Equação 8 – Velocidade aparente**

- ✓ Camadas com inclinações inferiores ou iguais a  $10^\circ$  em que se recorre ao tiro direto e inverso:

$$2/V_2 = 1/V_{inv} + 1/V_{dir}$$

**Equação 9 – Velocidades de propagação a partir do tiro direto e inverso**

Vejamos agora como ficariam os gráficos de tempo vs distância (domocrónicas) para as situações a cima expostas.

- ✓ Tempo vs distância dois horizontes horizontais com um só emissor

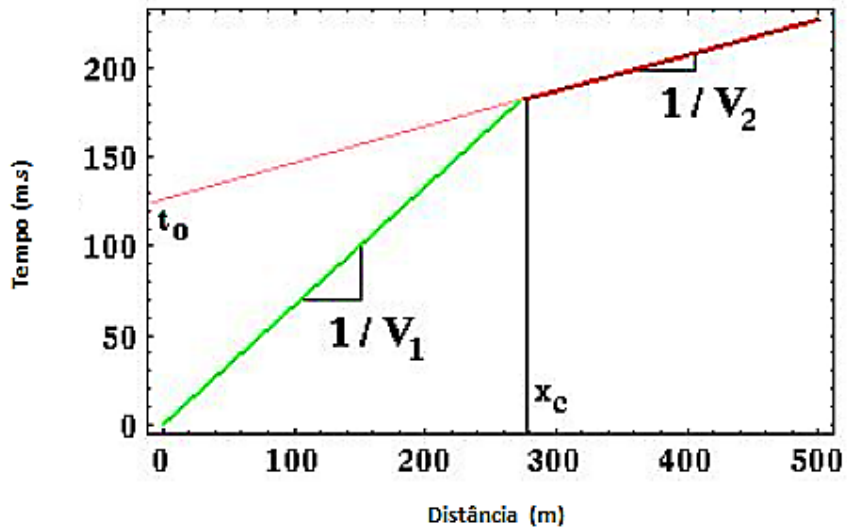


Figura 27 – Dois horizontes horizontais com um único emissor.

Adaptado: <http://galitzin.mines.edu>

- ✓ Tempo vs distância múltiplos horizontes horizontais com um só emissor

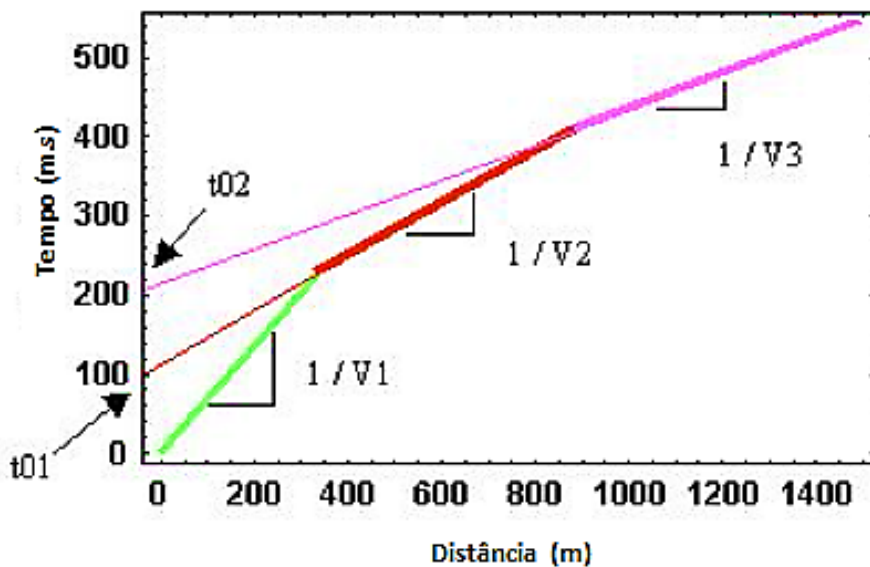


Figura 28 - Múltiplos horizontes horizontais.

Adaptado: <http://galitzin.mines.edu>

- ✓ Tempo vs distância dois horizontes: inclinados com um só emissor (*Down dip*)

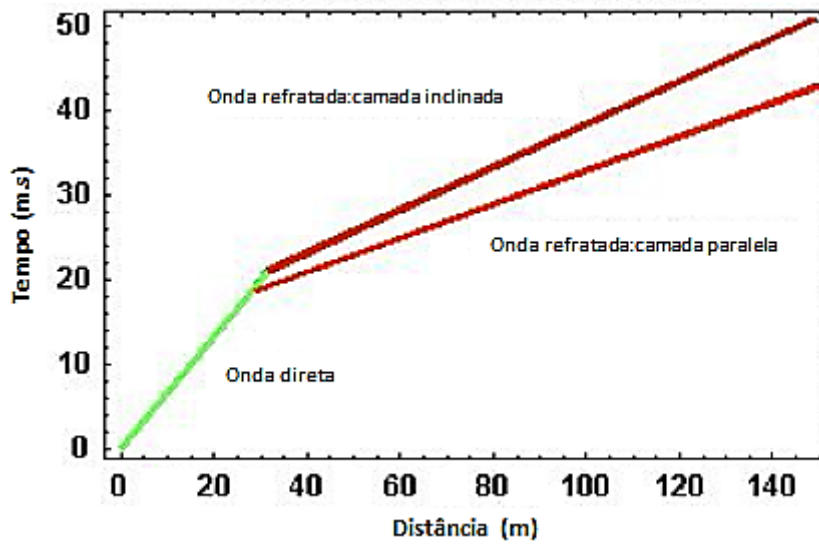


Figura 29 - Dois horizontes inclinados e um só emissor.  
Adaptado: <http://galitzin.mines.edu>

- ✓ Tempo vs distância dois horizontes: inclinados com um só emissor (*Up dip*)

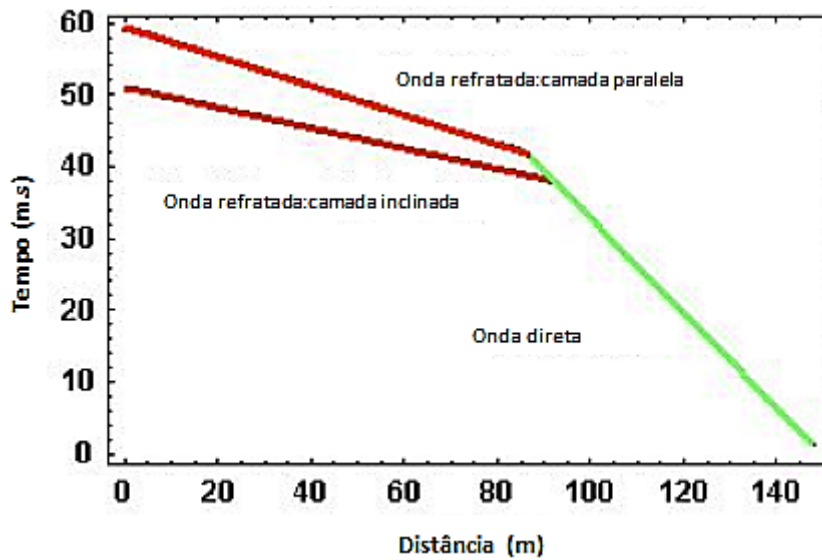


Figura 30 - Dois horizontes inclinados e um só emissor.  
Adaptado: <http://galitzin.mines.edu>

- ✓ Tempo vs distância dois horizontes: horizontais com dois emissores

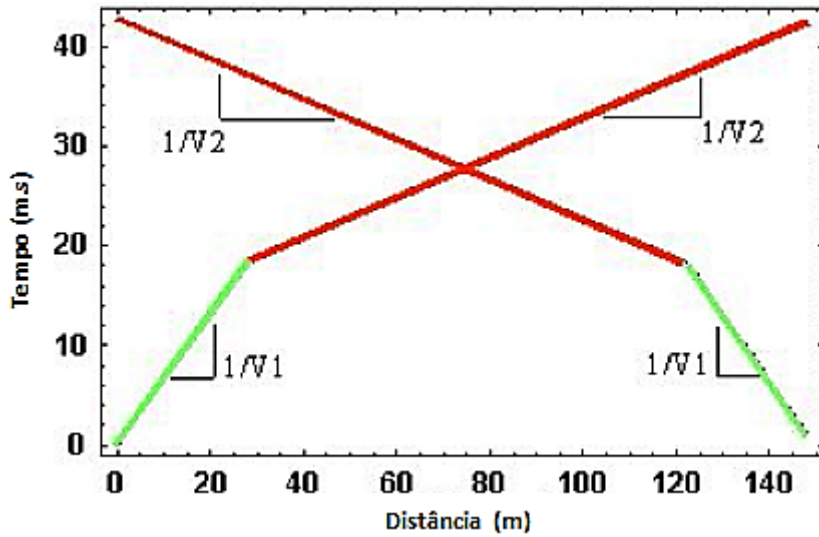


Figura 31 - Dois horizontes horizontais e dois emissores.  
Adaptado: <http://galitzin.mines.edu>

- ✓ Tempo vs distância dois horizontes: inclinados com dois emissores

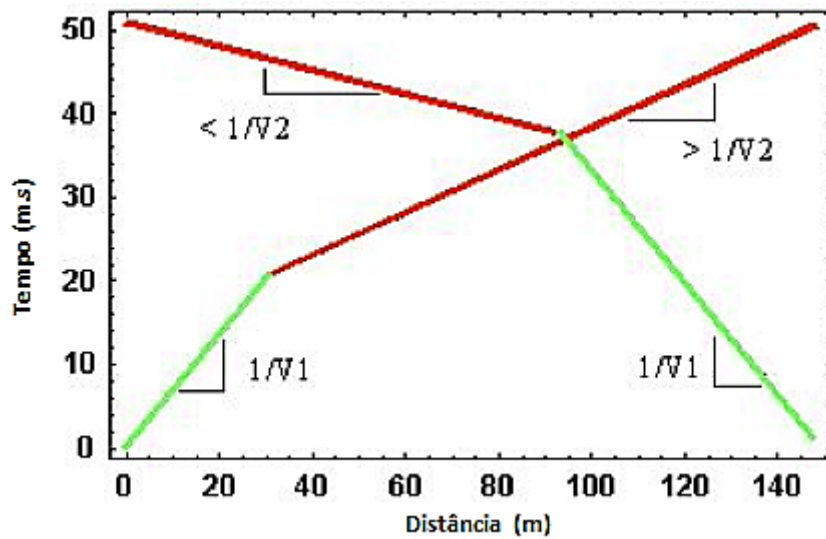


Figura 32 - Dois horizontes inclinados e dois emissores.  
Adaptado: <http://galitzin.mines.edu>

O sucesso do método de refração sísmica depende essencialmente da recolha e interpretação de dados obtidos durante o trabalho de campo. Assim, aquando da realização do trabalho de campo,

existem informações tais como registos produzidos durante o dia de trabalhos, verificações, testes, o número de perfis realizados e sua localização, que devem ser registadas de forma cuidada para que mais tarde não possam suscitar dúvidas, até porque durante um dia de trabalho estas tarefas podem ser executadas várias vezes.

Os perfis sísmicos devem ser corretamente identificados, número, data, técnico responsável pela realização do ensaio, e o seu local de implantação.

É aconselhável fazer um pequeno esboço do perfil sempre que possível onde conste, a sua orientação, número e espaçamento entre geofones, espaçamento entre os geofones e o emissor. Um registo cuidado é o segredo de uma boa interpretação de dados.

Ao longo dos últimos anos esta interpretação foi-se tornando mais fácil com o desenvolvimento da informática e com o aparecimento de *softwares* em computadores bastante simples que podem ser facilmente instalados nos nossos portáteis e até mesmo em alguns sismógrafos.

Para aquisição e tratamento dos dados obtidos através do método de refração, são necessários dois programas.

Um primeiro terá com objetivo o registo dos primeiros tempos de chegada das ondas refratadas aos recetores, enquanto que o segundo terá como finalidade o relacionamento dos tempos e velocidades, bem como ser capaz de considerar uma grande quantidade de horizontes ou contrastes de velocidades onde estas estiveram presentes.

### **Método de reflexão sísmica**

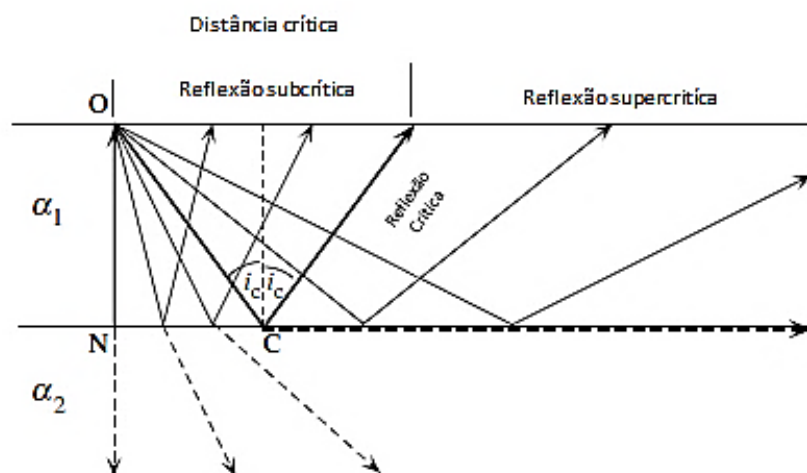
O método de reflexão sísmica permite elaborar o mapeamento estratigráfico e geológico, bem como estimar a profundidade a que se encontram as camadas que apresentam maior capacidade de suporte (“bedrock”). O recurso a este método é bastante dispendioso. O seu principal alvo são os levantamentos e identificação de estruturas que se encontram a grandes profundidades. É um método muito utilizado na localização de jazidas de gás e petróleo, e pouco usado em levantamentos mais superficiais.

A reflexão sísmica encontra-se então vocacionada para a pesquisa em profundidade no subsolo de estruturas através da sua superfície refletora e velocidade sísmica. Como todos os métodos, o seu grande desenvolvimento surge com a prática, ou seja, o desenvolvimento da obtenção e

processamento de dados deve-se em grande parte à sua repetida aplicação principalmente na identificação das jazidas de petróleo.

A sismica de reflexão baseia-se num fenómeno bastante comum a emissão de energia sob forma de ondas sísmicas. A onda sísmica emitida vai descendo em profundidade através de um primeiro meio, o qual apresenta determinada densidade e velocidade sísmica, até encontrar um novo meio com diferentes características ou seja com diferentes densidade e velocidade de propagação. Quando a onda sísmica encontra a fronteira que separa os diferentes meios é refletida sob forma de raios sísmicos a partir da fronteira em direção à superfície onde os dados serão registados para posteriormente serem tratados e interpretados.

Temos dois tipos de reflexão da onda sísmica, a reflexão subcrítica e a reflexão supercrítica. A reflexão subcrítica é a reflexão que ocorre no intervalo ocupado pela distância crítica, por sua vez a reflexão supercrítica (*Wide - angle reflection*) dá-se quando a incidência oblíqua dos raios sísmicos é superior à do ângulo crítico, e a sua reflexão é quase total.



**Figura 33 - Reflexão Subcrítica e Reflexão Supercrítica.**

Adaptado: Fundamentals of Geophysics

Num levantamento de reflexão sísmica os geofones são distribuídos pela zona onde se dará a reflexão subcrítica, isto é, na zona a qual chamamos distância crítica que é um espaço dentro do qual não existe chegadas de ondas refratadas. Se o levantamento a realizar for superficial, a distância entre o emissor e o recetor será maior ou menor de acordo com a fonte emissora escolhida. Assim se a fonte emissora for a marreta, a distância entre esta e o primeiro geofone será de aproximadamente 2m, já quando recorreremos a fontes emissoras mais poderosas tais

como explosivos, a distância entre esta fonte e o primeiro geofone deverá ser de pelo menos 10m. Quanto menor for a distância entre o emissor e o recetor maior será a verticalidade dos raios sísmicos refletidos.

Sendo então os geofones aplicados ao longo da distância subcrítica, as ondas por eles detetadas serão as ondas diretas e as ondas refletidas pela fonteira de separação dos meios. Então, os primeiros raios sísmicos a ser detetados irão ser os raios sísmicos diretos e posteriormente os raios sísmicos de reflexão. Existem, no entanto, as ondas de superfície as quais também serão registadas uma vez que são consideradas um elemento de ruído bastante perturbador. Referimo-nos às ondas de superfície pois elas interferem com a reflexão da onda.

Através dos tempos de propagação registados pelos geofones é possível representar uma secção transversal da estrutura em questão a duas dimensões. No entanto, com o decorrer do avanço tecnológico tornou-se também possível executar pesquisas a 3 dimensões, estas por sua vez de importância considerável uma vez que nos permitem fazer o levantamento de toda a sub-superfície a estudar. Existem vários procedimentos que podem ser utilizados em campo para a execução da sísmica de reflexão. O que os distingue é a forma como que se colocam os geofones em relação ao emissor.

O tipo de esquema de aplicação de geofones mais usado na reflexão sísmica é o método do perfil contínuo. Neste tipo de método os geofones são colocados a uma determinada distância específica ao longo do perfil desde do ponto emissor, de acordo com esquema previsto. Este esquema consiste em ter em cada local de registo um grupo de geofones interligados por forma a reduzir o ruído.

De cada vez que se provoca emissão de energia e os dados são recolhidos, quer o esquema de geofones quer o emissor são deslocados para outra posição previamente definida e repete-se novamente o processo. Este método apresenta dois tipos de variações a cobertura convencional e a cobertura redundante que são classificadas de acordo com a quantidade de amostras recolhidas de reflexão por cada ponto refletor. Se for colhida unicamente uma amostra de reflexão por cada ponto refletor estamos perante a cobertura convencional caso contrário estamos perante a cobertura redundante.

Por sua vez quer o método de cobertura convencional quer o método de cobertura redundante, também englobam outros métodos, em que os mais usados são método de *split – spread* e *common mid point*.

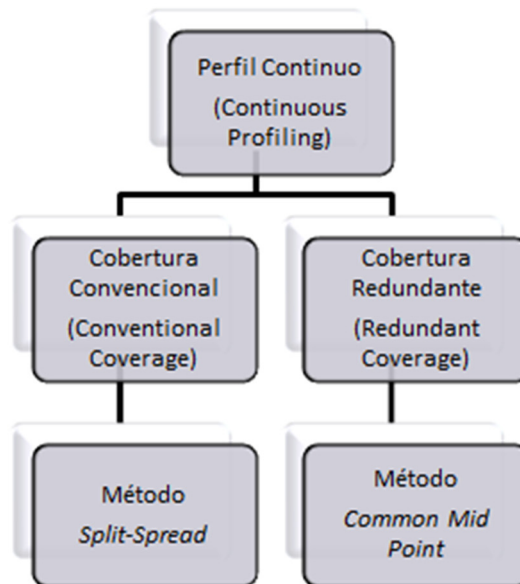
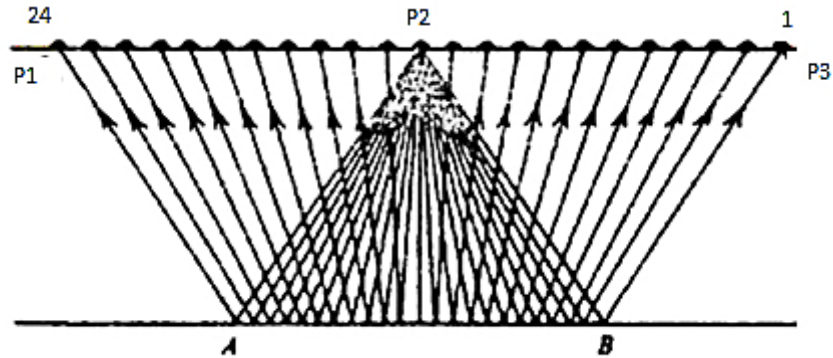


Figura 34 - Métodos de aquisição de dados reflexão sísmica.

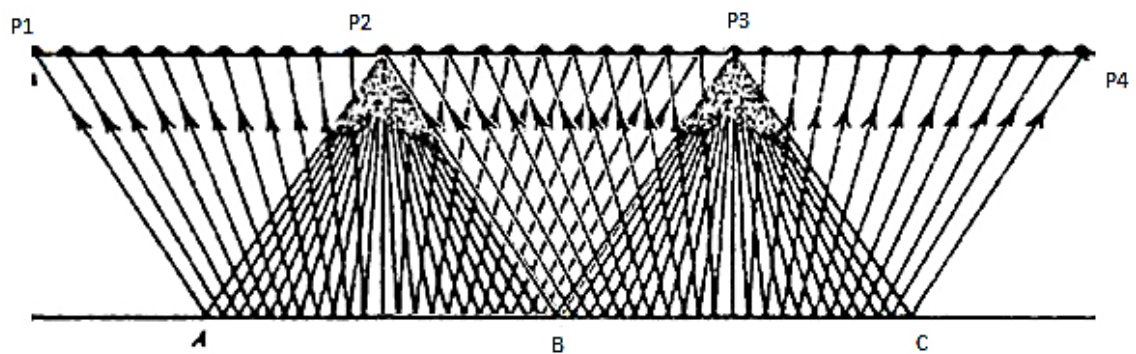
O método *Split Spread* consiste na colocação do emissor num ponto central e os geofones espalhados simetricamente para ambos os lados do emissor. Então vamos ter um cabo com uma determinada extensão o qual se encontrará estendido no solo e que interligará o grupo de geofones a utilizar os quais estão espalhados de forma simétrica e em intervalos regulares. Ao longo da extensão do cabo estarão também colocados, em intervalos regulares, os emissores.

A Figura 35 exemplifica de forma esquemática a aplicação do método *Split - spread*. Temos então 24 geofones e uma fonte emissora, em que a fonte está colocada na posição central P2. Quando a emissão de energia é feita a partir deste ponto vai-nos permitir fazer a cobertura do subsolo entre o ponto A e B. Quando terminada a recolha de dados, recolheremos a extensão de cabo que até agora se encontrava entre o ponto P1 e P2 e iremos estende-lo entre a posição P3 e P4. A fonte emissora agora estará localizada em P3, o que nos irá permitir após a emissão de energia fazer a cobertura do terreno entre B e C.

Note-se que a emissão de energia foi feita no ponto P2, o percurso feito foi P2BP3, quando a energia foi emitida no ponto P3 permitiu-nos fazer o caminho inverso P3BP2, deste modo a cobertura do subsolo ao longo da linha de perfil será contínua.



**Figura 35 - Método *Split spread* (a).**  
Adaptado: Applied Geophysics



**Figura 36 – Método *Split spread* (b).**  
Adaptado: Applied Geophysics

O método do *Split Spread* pode apresentar diferentes esquemas desde que obedçam ao critério já indicado em que os grupos de geofones têm de apresentar intervalos constantes. Na Figura 37 podemos ver alguns desses esquemas.

Os esquemas da Figura 37 mostram as diferentes alternativas para colocação da fonte emissora relativamente ao grupo de geofones ativos.

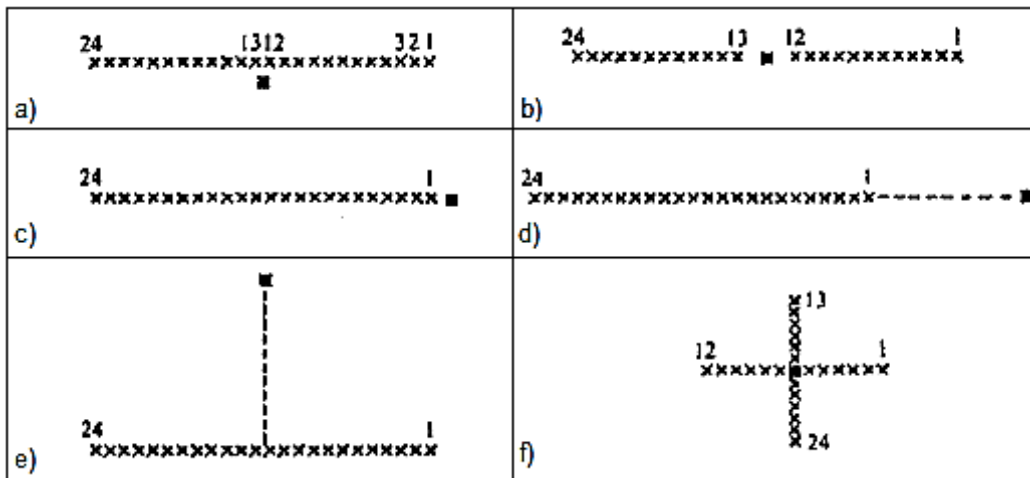
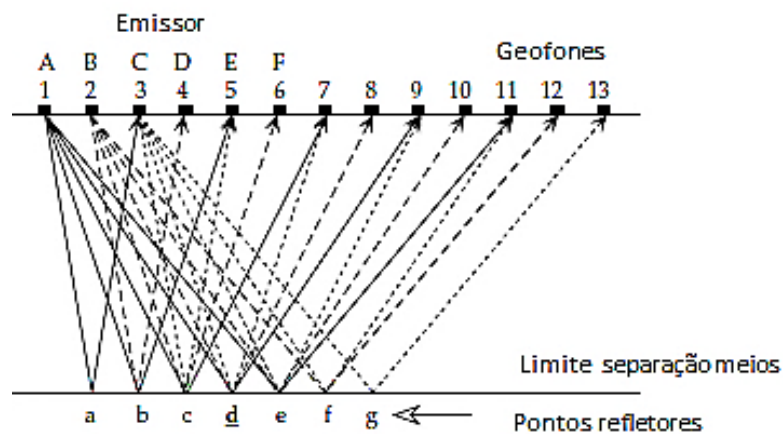


Figura 37 - Esquemas de posicionamento no método *split spread*.  
Adaptado: Applied Geophysics

Então, temos a possibilidade de colocação da fonte emissora no centro e no final da linha de geofones. Quando a fonte emissora colocada ao centro de linha está muito próxima dos geofones ativos ficamos sujeitos a enorme registo de ruído, então neste caso podemos separar perpendicularmente a fonte do geofones ativos ou criar um espaço entre a fonte e os geofones não ligando os geofones que se encontram imediatamente junto do lado direito e esquerdo da fonte emissora (Figuras 37a e 37b). Quando utilizamos o esquema em que a fonte emissora é colocada em uma das pontas da linha de geofones e estamos em locais propícios a ondas de superfície, podemos proceder ao seu afastamento em linha contínua para minimizar este efeito (Figuras 37c e 37d). Temos ainda a possibilidade do distanciamento da fonte ao grupo de geofones ser feita em forma de T quando a fonte se encontra colocada ao centro ou em forma de L quando a fonte se encontra numa das pontas da linha do grupo de geofones ativos (Figura 37e). Uma outra alternativa é colocar duas linhas de geofones ativos em forma de cruz com a fonte colocada no centro, no ponto de cruzamento comum às duas linhas (Figura 37f). Nas situações em que pretendemos a chegada da energia refletida aos recetores antes das ondas superficiais, usamos o método em linha ou em forma de T/L (Figura. 37e). Para termos uma cobertura contínua recorreremos e dois registos por linha habitualmente utilizamos os esquemas nos quais as fontes se encontram no final seja junto do ultimo geofone ativo seja a uma distância do mesmo. O espalhamento em cruz (Figura 37f) é normalmente usado para registos a três dimensões.

Para a caracterização contínua existe ainda a possibilidade de recorrer á cobertura redundante a qual utiliza um método denominado de *Common mid point*. Também este método é bastante usado pela sísmica de reflexão pois permite minimizar o ruído melhorando assim a razão sinal-ruído. Este método recorre habitualmente a grupos de geofones que pode variar de 24 a 96 geofones e a um sismógrafo multicanal.

Na Figura 38 podemos visualizar um pequeno resumo do desenvolvimento do método *Common mid point*. Para simplificar iremos usar um conjunto de 13 geofones.



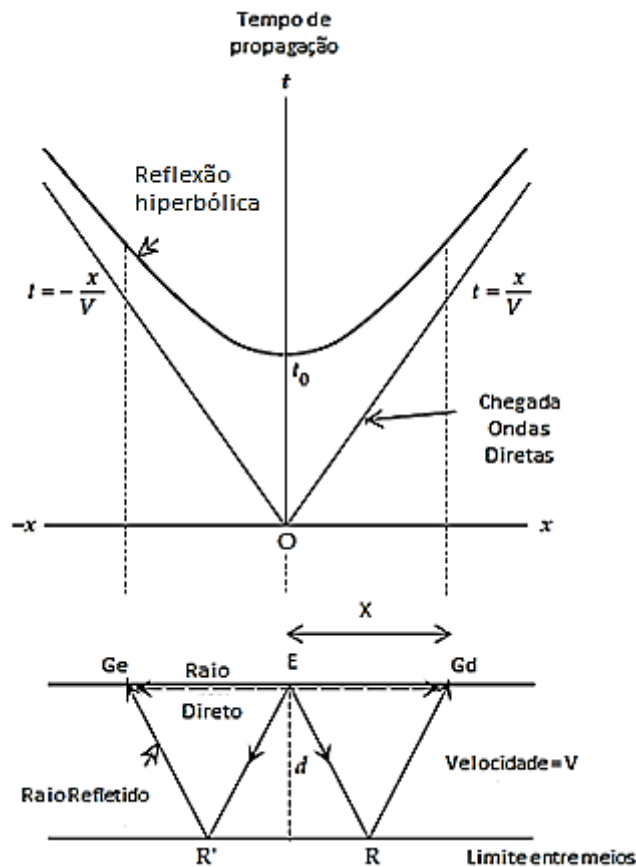
**Figura 38 – Esquema de posicionamento no método *Common Mid-Point*.**  
Adaptado: Fundamentals of Geophysics

O primeiro ponto de emissão de energia será o ponto A, ou seja o emissor estará colocado no ponto A. A energia que chegará até ao limite de separação dos meios irá ser refletida e registada do geofone 3 até ao geofone 11, o que permitirá fazer a cobertura da fronteira existente entre meios do ponto a ao ponto e. De seguida movemos o emissor para o ponto B, a energia emitida será registada pelo geofone 4 até ao geofone 12 e a fronteira será coberta desde o ponto b até ao ponto f. Mudando agora o emissor para o ponto C a energia refletida será detetada pelo geofones 5 até ao geofone 13 e temos então a cobertura da fronteira do ponto c ao ponto g. Se deslocássemos o ponto emissor para o ponto D os geofones que detetariam a energia refletida seriam do 6 ao 14 e seria feita a cobertura da fronteira de separação dos meios do ponto d ao ponto h e assim sucessivamente. Se observarmos com atenção a figura, verificamos que ao mudar o emissor e o conjunto de geofones, os dados referentes a um mesmo ponto refletor são ensaiados e registados mais do que uma vez. Por exemplo o ponto refletor d é ensaiado várias vezes, pelo emissor no ponto A, no ponto B e no ponto C, aos quais correspondem os raios sísmicos Ad9, Bd8 e Cd7.

No decorrer dos levantamentos sísmicos deparar-nos-emos quer com interfaces horizontais quer com interfaces inclinadas. A determinação da inclinação da interface de separação entre os diferentes meios existentes no subsolo) é sempre uma das dificuldades encontradas quando da realização de um levantamento sísmico.

Tal como na refração, para uma boa interpretação de dados é necessário o conhecimento da velocidade em todos os pontos ao longo do perfil, e ter noção que esta velocidade nem sempre é constante.

Para que não sejam cometidos erros podemos recorrer a fórmulas relativamente simples que nos podem ajudar a obter as respostas que necessitamos. O caso mais simples de reflexão sísmica é o da reflexão nos limites horizontais de separação de meios.



**Figura 39 – Simetria da hipérbole em interfaces refletoras horizontais.**

Adaptado: Fundamentals of Geophysics

Quando se dá a emissão de energia (E), e um raio sísmico atinge o limite de separação de meios num determinado ponto (R), este é refletido para a superfície a partir desse ponto, onde é

registado pelo recetor (Gd) que se encontra a alguma distância da fonte emissora (offset - X), com ângulos de incidência e reflexão iguais.

Sendo a velocidade das ondas primárias ou de compressão P igual a V, então o primeiro sinal a ser detetado pelo geofone Gd vai ser o das ondas diretas que se propaga diretamente do ponto emissor E até ao geofone fazendo o percurso EGd.

Então o tempo de propagação da onda direta pode ser calculado dividindo a distância X pela velocidade ( $t_d = x/V$ ).

No caso de querermos obter o tempo de propagação do raio sísmico refletido e como ER=RGd então o tempo de propagação pode ser calculado para uma determinada profundidade à qual se encontra a interface (d) a partir de:

$$t = \left(\frac{2d}{V}\right) * \left(\sqrt{1 + \frac{x^2}{4 * d^2}}\right)$$

**Equação 10 - Tempo de propagação raio sísmico refletido.**

O tempo de propagação na posição X=0 corresponde a reflexão vertical em que a fonte emissora se encontra localizada na posição do geofone:  $t_0 = (2 * d) / V$ , ou seja, neste caso é assumido que a propagação do raio sísmico na distância entre o recetor e o emissor é feita de forma vertical, o que não é verdade, pois esta propagação ocorre com curvatura. Então é necessário, posteriormente, calcular esta curvatura e proceder à sua correção.

Após a aplicação do fator corretivo a equação que nos permite calcular o tempo de propagação versus distância curva para a reflexão numa interface horizontal é a equação da hipérbole dada por:

$$\left(\frac{t^2}{t_0^2}\right) - \left(\frac{x^2}{(4 * d^2)}\right) = 1$$

**Equação 11 - Tempo de propagação vs distância.**

Ou de forma mais simplificada:

$$t^2 = \frac{x^2}{V^2} + t_0^2$$

**Equação 12 - Tempo de propagação vs distância forma simplificada.**

Se observarmos a Figura 39 a cima colocada podemos verificar que a simetria da hipérbole ocorre quando intersesta x=0 no momento  $t_0$ . Com o aumento da distância do emissor ao recetor, o

tempo de propagação do raio sísmico refletido aproximasse bastante do tempo de propagação do raio sísmico direto e o tempo de propagação passa a ser para ambos:  $t = \pm x/V$ , ou seja, se prolongarmos as linhas da chegada das ondas diretas e de reflexão da hipérbole para uma distância  $x$  elas praticamente se irão sobrepor.

Tudo o que fomos descrevendo anteriormente tem um único objetivo, é conseguir identificar a que distância vertical se encontra a superfície limite entre os diferentes meios ou seja a sua profundidade. Em primeiro lugar teremos de determinar a velocidade de propagação, e uma forma de o fazer é comparando o tempo de propagação vertical do raio sísmico ( $t_0$ ) e o tempo de propagação curva do raio sísmico ( $t$ ) num mesmo geofone colocado a uma determinada distância  $x$ . Assumindo que a profundidade do limite de separação entre os meios é inferior á distância entre o emissor e o recetor, então a diferença entre o tempo de propagação  $t$  e o tempo de propagação  $t_0$  é o que chamamos *normal moveout* uma vez que ambos os registos são feitos por um geofone que se encontra no local da fonte emissora.

$$t - t_0 = (x^2)/(2 * (V^2) * t_0)$$

**Equação 13 - Diferença entre tempos de propagação**

Caso os registos fossem feitos em duas posições do geofone chamar-se-ia simplesmente *moveout* e o seu cálculo seria efetuado em que o  $x$  e  $x_1$  correspondem as posições do geofone e

$$\Delta t_n = t_1 - t:$$

$$\Delta t_n = \frac{x_1^2 - x^2}{2 * (V^2) * t_0}$$

**Equação 14 - Diferentes tempos de propagação para diferentes posições geofone.**

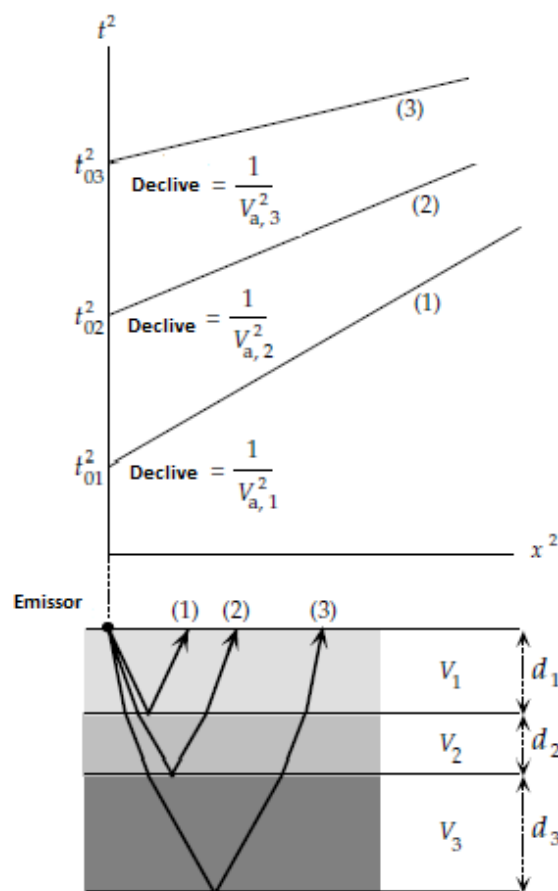
Sendo todos os valores são já conhecidos, podemos então determinar a profundidade da interface  $d$  usando:  $d = \frac{1}{2} * V * t_0$ .

O tempo de propagação dos raios sísmicos refletidos depende essencialmente de 3 fatores, da profundidade á qual se encontra o limite de separação dos meios, da velocidade de propagação no horizonte que se encontra acima deste e da distância do emissor ao recetor.

Até ao momento temos abordado o caso mais simples em que unicamente existem dois meios diferentes, isto é, um só limite refletor horizontal. No entanto, a maior parte das vezes quando

procedemos a levantamentos de reflexão sísmica vamos encontrar mais de dois meios diferentes os quais irão ter diferentes velocidades, espessuras e densidades.

Então, para estas situações, recorre-se ao método chamado  $t^2 - x^2$  uma vez que é mais fácil de visualização. Também nas situações em que nos deparamos com a existência de múltiplos horizontes, a primeira incógnita a ser calculada é a velocidade de propagação pois será através desta que iremos chegar á profundidade destes horizontes. Com o decorrer do levantamento sísmico, cada geofone regista dados de diversos raios sísmicos refletidos pelas diferentes interfaces as quais se encontram a diferentes profundidades. Num gráfico  $t^2 - x^2$  o declive da reta é nos dado por  $1/v^2$ .



**Figura 40 – Gráfico resultante da decomposição linear da hipérbole.**  
Adaptado: Fundamentals of Geophysics

Através do gráfico somos capazes de obter a velocidade  $V_1$  correspondente ao horizonte que se encontra posicionado superiormente a todos os restantes. Com o valor da velocidade  $V_1$  e o valor do primeiro tempo de propagação dos raios sísmicos refletidos ( $t_{01}$ ) podemos então determinar a profundidade do primeiro horizonte  $d_1$ . Mas, tal como na refração, quando encontramos o segundo meio, os raios sísmicos atravessam-no até à interface sendo por ela refletidos. Ião

propagar-se com a velocidade  $V_2$ , e ao atravessar o meio 1 vão propagar-se com a velocidade  $V_1$ . Então, a velocidade calculada será uma velocidade média entre as duas velocidades a que os raios sísmicos se propagaram. Como todas as velocidades serão velocidades médias, dizemos que a única velocidade de propagação que é verdadeira é a do meio 1.

O declive da segunda reta permitir-nos-á calcular com o correspondente tempo de propagação  $t_{02}$  a velocidade média  $V_{a2}$ , que posteriormente permitirá calcular a espessura do segundo horizonte  $d_2$ , a profundidade do segundo limite refletor  $D_2$  é calculado  $d_1 + d_2 = (V^2 * t^2)$ .

Os tempos de propagação no horizonte 2 é o tempo  $(t_{02} - t_{01})$  e a partir daqui também já pode ser determinada a velocidade de propagação no meio 2 ou seja  $V_2$ . Os valores para os restantes horizontes são determinados da mesma forma.

Significa então que o método  $t_2 - x_2$  é um método simples de calcular a espessura dos horizontes e as velocidades de propagação para os diferentes horizontes existentes no subsolo.

Ao termos ângulos de incidência e reflexão cuja propagação é quase vertical, a média das velocidades de propagação é calculada através da seguinte fórmula:

$$V_{a,n} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + \dots + d_n}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + \dots + t_n}$$

**Equação 15 - Média de velocidades de propagação**

Sendo:

$d$ =espessura do horizonte

$t$ =intervalo de tempo de propagação no horizonte

Mas, como sabemos, a propagação dos raios sísmicos refletidos não é vertical; o seu percurso é curvo principalmente quando se propagam entre meios bem como a velocidade de propagação como já tivemos oportunidade de explicar também varia de meio para meio. Então aplicando a fórmula na qual se substitui a velocidade média pela raiz quadrada da média da velocidade é possível compensar estes efeitos provocados pelos raios sísmicos e pela velocidade.

$$V^2_{rms} = \frac{V_1^2 * t_1 + V_2^2 * t_2 + \dots + V_n^2 * t_n}{T_n}$$

**Equação 16 – Raíz quadrada da média da velocidade**

$V_n$ = intervalo de velocidade

$t_n$ =tempo de propagação em cada horizonte

$T_n$ =tempo total de propagação

Até ao momento as situações descritas foram para meios cujas interfaces se apresentavam sem qualquer grau de inclinação ou seja horizontais. Vejamos agora o que acontece em meios cujas interfaces se encontram inclinadas. Quando deparamos com interfaces inclinadas, sabemos que a menor distância  $d$  entre o emissor e a interface inclinada é o percurso perpendicular que os interliga, significa então que do lado do emissor em que a interface é mais inclinada, os raios sísmicos são mais longos do que os do lado contrário, o que vai influenciar o tempo de propagação. É possível calcular o tempo de propagação de reflexão numa interface inclinada se recorrermos á seguinte equação da hipérbole:  $t = \sqrt{x^2 + 4xd \text{sen } \alpha + 4d^2}$ . Na situação em que a interface é horizontal a hipérbole apresenta-se simétrica relativamente ao eixo do tempo  $t$ , e o tempo mínimo de propagação de reflexão é no ponto onde a reflexão é vertical ou seja no ponto de abscissa  $t_0$  e ordenada  $x=0$  que corresponde ao local onde se dá a emissão de energia – ver Figura 39.

No entanto o mesmo não se verifica para interfaces refletoras inclinadas como poderemos observar na figura abaixo – Figura 41.

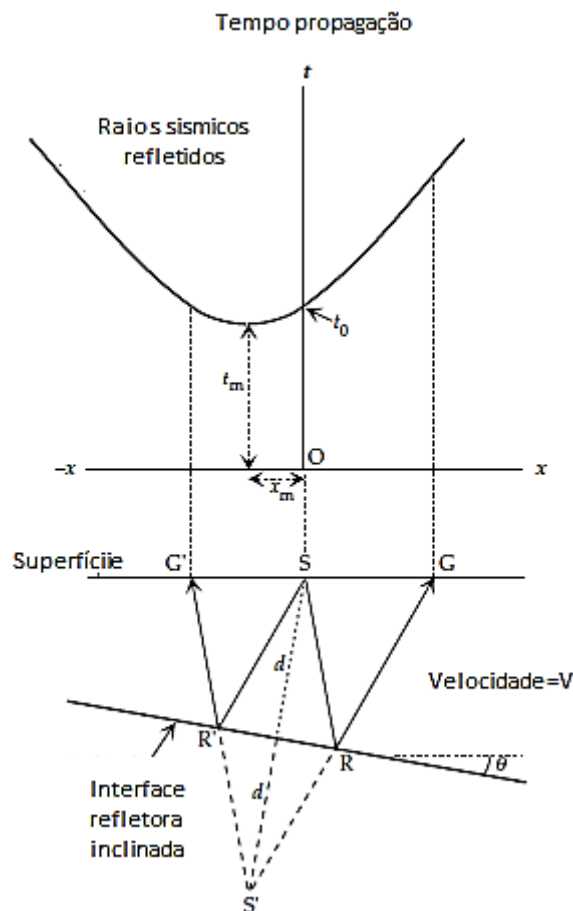
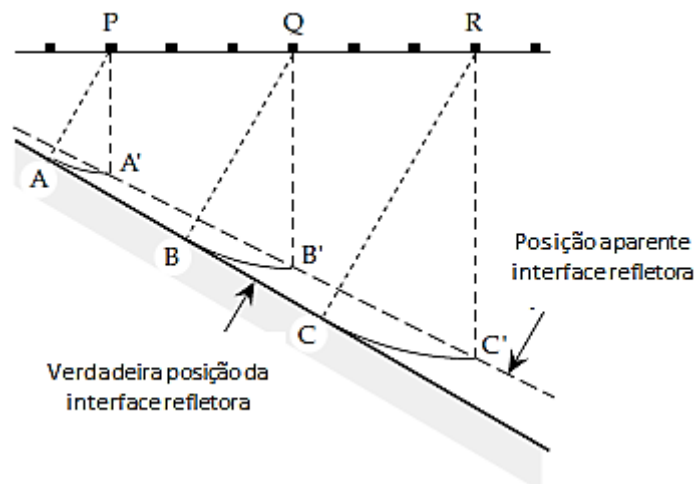


Figura 41 – Assimetria da hipérbole em interfaces refletoras inclinadas.

Adaptado: Fundamentals of Geophysics

Como podemos então observar graficamente o tempo de propagação de reflexão mínimo deixa de ser perpendicular à interface refletora e também não será no local onde se encontra o ponto emissor de energia em  $x=0$ . Embora o caminho perpendicular seja a distância menor do emissor à interface refletora, não será o caminho mais curto de propagação dos raios sísmicos desde do ponto emissor até ao recetor. Então o mínimo tempo de propagação  $t_m = (2d * \cos \alpha) / V$  e a sua ordenada que será a distância compreendida entre o emissor e o recetor para o lado esquerdo (*up -dip*) será  $x_m = -2d * \sin \alpha$ , o que significa que as coordenadas a que se encontra o ponto em que o tempo de propagação é menor são  $(x_m, t_m)$  e a hipérbole deixa de ser simétrica em relação ao eixo dos tempos de propagação. Na prática é bastante difícil identificar logo à partida se estamos na presença de uma interface refletora inclinada ou horizontal. Por esse motivo é necessário que se façam correções nos registos de reflexão de modo a que se possam evitar erros ao traçar a inclinação dos horizontes. O tempo de propagação quando o emissor se encontra sobre o geofone, isto é,  $t_0$  indicar-nos-á a distância à interface refletora o que não nos indica é qual o caminho ao longo do qual se dá a propagação.



**Figura 42 – Falsa posição da interface refletora resultado do traçar a profundidade verticalmente em relação à posição dos geofones.**  
Adaptado: Fundamentals of Geophysics

Por exemplo, procedeu-se a emissão de energia, e as primeiras ondas refletidas pela interface foram detetadas e registadas pelos geofones que se encontram nas posições de disparo P, Q e R, provenientes dos pontos de reflexão A, B e C localizados na verdadeira posição da interface refletora. No entanto se não se proceder à devida correção dos registos para o efeito do horizonte inclinado, ou seja, se não for feita a correção para que a perpendicularidade seja em relação à interface refletora e não em relação à superfície em que se encontram os recetores, a

profundidade a que se localizará a interface refletora não será a verdadeira, mas sim a indicada pelos pontos A', B' e C' e a sua inclinação também será ligeiramente inferior. Isto irá originar uma representação distorcida da estrutura da qual se fez o levantamento. Por este motivo os registos efetuados pelos geofones devem sofrer correções para reflexões não verticais. Esta correção é de grande importância e é conhecida por migração, porque é através dela que conseguimos traçar as posições reais das interfaces refletoras existentes nos locais em estudo. O processo de migração é bastante complicado, e a sua explicação não se encontra dentro do âmbito desta tese.

Quando a energia é emitida e atinge a interface refletora, dependendo da inclinação com que esta a atinge, parte da energia será refletida e refratada ou totalmente refletida.

O que significa que a quantidade de energia a ser refletida e refratada ou unicamente refletida, está intimamente ligada ao maior ou menor ângulo de incidência na interface refletora. Para ângulos de incidência acima de 15 graus, a quantidade de energia refletida e refratada praticamente não varia, já para ângulos cuja incidência seja inferior a do ângulo crítico, os cálculos terão de ser efetuados recorrendo a complicadas funções.

Então inicialmente a energia refletida sofre uma pequena diminuição para depois aumentar á medida que aumenta o ângulo crítico. Numa interface refletora sujeita a uma incidência normal não irão existir ondas de cisalhamento ou seja ondas S, então a forma como será feita a distribuição de energia pelas ondas P refletidas e refratadas acontecerá de forma bastante simples. Este acontecimento é consequência de uma propriedade existente em cada diferente meio ao qual se chama impedância acústica.

A impedância acústica I é igual ao produto da densidade de cada meio e a velocidade de propagação das ondas P no mesmo.

$$I = (\rho * \alpha)$$

**Equação 17 - Impedância acústica**

I= Impedância acústica

$\sigma$  = Densidade

$\alpha$  =Velocidade propagação ondas P

No caso de a frente da onda sísmica atingir uma interface refletora que não seja acidentada existente entre dois meios com impedância I<sub>1</sub> e I<sub>2</sub> respetivamente com incidência normal, a

amplitude da onda refletida como percentagem de amplitude de onda incidente (Coeficiente de reflexão) é dada por:

$$CR = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1}$$

$$CR = ((\rho_2 * \alpha_2) - (\rho_1 * \alpha_1)) / ((\rho_2 * \alpha_2) + (\rho_1 * \alpha_1))$$

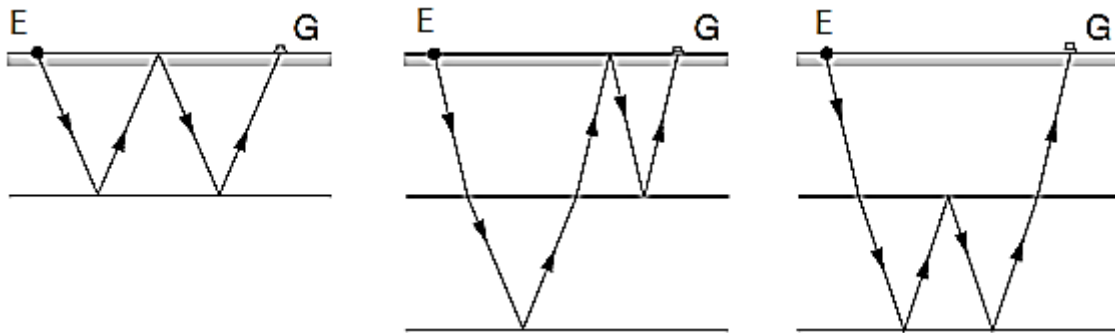
**Equação 18 - Coeficiente de Reflexão.**

O coeficiente de reflexão será positivo quando a impedância do meio 2 ( $I_2$ ) é superior à impedância do meio 1 ( $I_1$ ), ou seja,  $I_2 > I_1$ , significa então que a onda refletida se encontra em fase com a onda incidente. Se nos encontrarmos perante uma situação em que,  $I_1 > I_2$  então o coeficiente de reflexão será negativo. A porção de energia que é refletiva pela interface existente entre os meios, é dada por  $CR^2$ , logo o facto de a incidência partir do meio de impedância superior ou inferior não trará qualquer implicação.

Nos levantamentos efetuados pelo método sísmico de reflexão, tal como na refração, também temos de lidar com o ruído, proveniente de eventos secundários os quais também são registados pelos geofones, podendo mesmo mascarar de alguma forma os sinais pretendidos. O ruído pode ser classificado em incoerente e coerente, o incoerente é o ruído proveniente de vento, carros, vegetação, tal como anteriormente falamos na refração é um ruído aleatório. No método de reflexão sísmica encontrou-se uma forma de reduzir este tipo de ruído, que foi colocar os recetores em grupos, habitualmente em número de 16 por grupo, combinando a informação obtida em cada um deles criando um único registo. Juntando os geofones em grupos consegue-se melhorar bastante a relação sinal ruído, sabendo que quanto mais elevado for o rácio sinal ruído melhor será a qualidade do registo. Por sua vez o ruído coerente o qual também faz parte dos registos é proveniente das ondas de superfície e das múltiplas reflexões. Estas ondas de superfície podem de certa maneira mascarar as reflexões, principalmente se forem menos fortes, o que acontece quando a disposição na qual os geofones se encontram a uma mesma distância de forma a cobrir completamente o comprimento de onda das ondas superficiais.

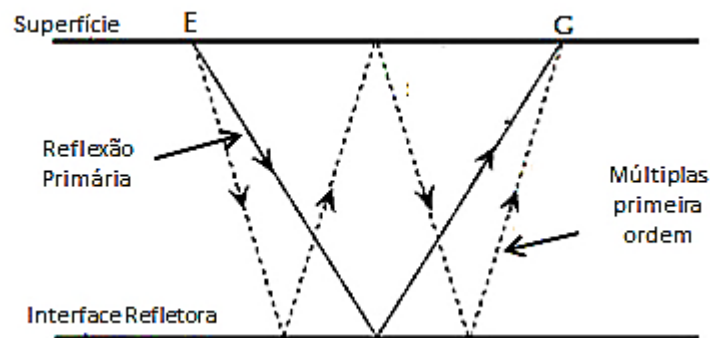
Outro método bastante usado para minimizar os efeitos do ruído das ondas de superfície é o método de filtragem de frequência. Uma vez que as ondas de superfície apresentam uma frequência inferior às das ondas primárias P o efeito do seu ruído poderá ser minimizado com a aplicação de filtros no circuito dos geofones ou na fase de posterior processamento de modo a eliminar as baixas frequências resultantes do ruído coerente. Outra manifestação de ruído coerente são as múltiplas reflexões provenientes de um meio onde existam diversos horizontes.

Este tipo de reflexões podem originar diferentes formas mas a mais gravosa é a de múltipla superfície.



**Figura 43 - Reflexões Múltiplas (a).**  
Adaptado: Field Geophysics

As múltiplas reflexões podem ocorrer frequentemente entre a interface refletora e a superfície uma vez que o coeficiente de reflexão (CR) na superfície é mais elevado. Por esta razão podemos então verificar na figura a seguir colocada que para uma praticamente vertical múltipla reflexão de primeira ordem, o tempo de propagação é o dobro do tempo de propagação das ondas primárias P, o que nos induz em erro uma vez que a interface refletora vai parecer estar localizada a uma profundidade que é o dobro da real profundidade a que se encontra.



**Figura 44 – Reflexões Múltiplas (b).**  
Adaptado: Fundamentals of Geophysics

Como podemos verificar o ruído é algo que pode tornar dificultar bastante o processamento e interpretação dos resultados da sísmica de reflexão e por isso se tenta recorrer aos métodos mais eficazes para minimização deste fator.

Então o método de reflexão sísmica tem de ser suficientemente capaz de identificar o que é energia refletida e o que é ruído seja ele qual for coerente ou/e incoerente. Tal como todos os métodos, também o método sísmico de reflexão tem as suas limitações.

Para que haja reflexão é necessário que existam nos materiais a ensaiar diferentes características, diferentes velocidades e densidades bem como um coeficiente de reflexão diferente de zero, este método quando aplicado em locais onde se verifique que as interfaces apresentam inclinações bastante significativas poderá necessitar de equipamentos mais exigentes fora dos que estão dentro do padrão comum de utilização. No entanto os principais fatores limitadores são o rácio sinal ruído e a reflexão múltipla. Para além destes existem muitos outros tais como por exemplo a configuração dos geofones a localização da fonte relativamente a estes os espaçamentos entre eles.

Assim existem muitos fatores passíveis de ponderação antes de recorrermos as método de reflexão sísmica, até porque poderemos ter de executar outros ensaios de modo a recolher informação que nos permita posteriormente avaliar se o método de reflexão sísmica é o mais adequado para a obtenção dos resultados pretendidos.

### **Vantagens vs Desvantagens**

Quando existe a possibilidade de utilização de dois ou mais métodos para alcançar os mesmos objetivos teremos ponderar qual é o método mais indicado e economicamente vantajoso.

Assim apresentamos de seguida uma pequena lista de vantagens e desvantagens entre o método sísmico de reflexão e método sísmico de refração que nos permite fazer uma pequena comparação entre ambos.

### Refração

Vantagens:

- ✓ O equipamento utilizado é menos sofisticado, a necessidade de recetores e fontes é inferior logo, à partida implica menores custos.
- ✓ As campanhas de refração em geral não necessitam de grande processamento de dados, exceto no que se refere á escolha dos primeiros tempos de chegada das ondas, para o seu processamento teremos de recorrer a programas informáticos de complexidade reduzida.
- ✓ Para o desenvolvimento de modelos e interpretação, é utilizada uma pequena parte do registo efetuado do movimento sísmico, logo não existe dificuldade acrescida á dificuldade existente relativamente aos outros levantamentos geofísicos.

#### Desvantagens:

- ✓ Nas campanhas de refração sísmica é necessário que a fonte (por exemplo a marreta) e o recetor (Geofones) se encontrem relativamente afastados.
- ✓ Para que o método de refração sísmica funcione em pleno, é necessário que á medida que vamos descendo em profundidade, encontremos diferentes horizontes (podem apresentar ou não diferentes topografias) constituídos por diferentes materiais.
- ✓ O método de refração sísmica necessita que haja uma diferença nas velocidades de propagação das ondas sísmicas com o aumento da profundidade para que possa fazer a caracterização do existente.
- ✓ Só os tempos iniciais de chegada do movimento sísmico aos diversos geofones são considerados no método de refração.
- ✓ A caraterização do subsolo é feita com base nos primeiros tempos de chegada das ondas sísmicas registadas.
- ✓ O método de refração está limitado quanto à profundidade.

#### Reflexão

#### Vantagens:

- ✓ Nas campanhas de reflexão sísmica a fonte (por exemplo a explosivos) e o recetor geofones, encontram-se relativamente próximos.
- ✓ O método de reflexão sísmica funciona em pleno para qualquer velocidade de propagação independentemente da profundidade.
- ✓ As campanhas realizadas pelo método de reflexão sísmica permitem-nos mesmo que a geologia existente seja de grande complexidade ser facilmente interpretada.
- ✓ O subsolo é diretamente apresentado sob a forma de imagem a partir da informação que surge no levantamento.
- ✓ Os levantamentos de reflexão sísmica usam todos os tempos de chegada do movimento sísmico para as diferentes distâncias existentes entre a fonte e os recetores.

Desvantagens:

- ✓ É um método mais dispendioso uma vez que necessita de recorrer a uma maior quantidade de fontes e recetores para que se obtenha resultados de boa qualidade do subsolo em estudo.
- ✓ As campanhas de reflexão sísmica podem ser consideradas bastante dispendiosas uma vez que para o processamento dos dados obtidos são necessários complexos programas informáticos, os quais requerem técnicos com alguma experiência.
- ✓ As campanhas de reflexão são bastante mais sofisticadas e necessitam de maior conhecimento para o seu processamento, devido á quantidade de dados que é recolhida que aumentará com a complexidade da estrutura em estudo. Como a informação é muita esta terá de ser simplificada para processamento e interpretação o que poderá trazer algumas complicações.

Após a observação da lista de vantagens e desvantagens acima descritas podemos verificar que o método de refração devido á sua relativa simplicidade de aquisição e processamento de dados bem como a necessidade de utilização de programas menos complexos, torna-se mais aliciante de utilizar sempre que possível porque se torna mais barato.

Por sua vez quando nos encontramos em situações que a partida temos conhecimento que se vai tratar de estruturas de grande complexidade geológica logo precisamos de um método potencialmente superior em termos de interpretação de dados como por exemplo na indústria de petróleo e aí recorreremos ao método sísmico de reflexão.

### ***2.3.2. Outros métodos de prospeção geofísica***

#### Método Gravimétrico

Podemos dizer que gravimetria é uma extensão da geofísica que se dedica ao estudo das variações da aceleração de gravidade podendo fazê-lo em cada ponto da superfície terrestre. De acordo com estudos efetuados, sabe-se que a variação da aceleração de gravidade tem diversas origens tais como a rotação e o achatamento da Terra, efeitos da Lua e do Sol, variações de altitude entre os pontos de medida, efeitos da estrutura da crosta e manto superior, entre outros.

Os corpos são constituídos por massa e essa massa por elementos químicos cujos átomos variam em massa atômica. Quanto maior for essa massa atômica maior é a quantidade de massa por volume, logo a densidade do corpo será maior. Então a intensidade de atração entre os corpos é tanto maior quanto maior for a sua densidade. Por outro lado também sabemos que intensidade de atração entre os corpos varia com a distância, sendo que quanto maior for a distância entre eles menor será a atração.

Como este método se apoia no conhecimento das diferenças do campo gravítico da terra para identificar as diferentes formações de materiais existentes, é considerado um método de fonte natural. Assim, associando ao conhecimento das diferentes densidades dos materiais informações geológicas, o método gravimétrico permite-nos identificar e localizar formações, tais como jazidas carvão, petróleo, sal, matéria-prima para indústria cerâmica e construção, bem como avaliar o seu potencial económico.

Habitualmente as observações e medições neste método são feitas na superfície terrestre. No entanto também poderemos ter necessidade ocasionalmente de realizar alguma pesquisa subterrânea. Então, as diferenças de densidade das massas que existem na terra podem provocar nesta pequenas variações do campo gravítico. Estas variações podem ser medidas recorrendo a aparelhos chamados gravímetros. Estes aparelhos não são mais do que balanças, com uma precisão muito elevada e extremamente sensíveis, as quais nos permitem medir variações muito pequenas de alteração de gravidade de massas em diferentes locais.

### Método magnético

Este método é bastante eficaz em levantamentos de grandes áreas, sendo o seu grande objetivo o fornecimento de informações quantitativas sobre a principal fonte responsável pela causa da anomalia, isto é, um modelo geológico.

Os levantamentos magnéticos podem ser feitos em meio sólido ou líquido, isto é, em terra ou no mar recorrendo a magnetómetros, podendo estes estar colocados em aviões, satélites e em navios.

Os magnetómetros são equipamentos que recorrem a prótons ou núcleos de átomos de hidrogénio numa amostra de hidrocarbono fluido para medir a intensidade total magnética.

Se alinharmos ou polarizarmos durante um intervalo de tempo estes magnetes, sujeitando-os a um campo magnético uniforme originado por uma corrente a partir de uma bobina de fio, quando eliminarmos esta corrente, é provocado nos protões uma precessão em direção á superfície ou ao campo magnético da terra.

De seguida a precessão dos protões originam um pequeno sinal na mesma bobina que foi usada para os polarizar. Este sinal emitirá uma frequência que é exatamente proporcional á intensidade total do campo magnético e independente da orientação da bobina.

A prospeção magnética cartografa as variações no campo magnético da Terra, os quais são atribuídos a alterações na estrutura ou suscetibilidade magnética em determinados maciços próximos da superfície. As rochas sedimentares têm normalmente uma menor sensibilidade quando comparadas com as ígneas ou as metamórficas, as quais tendem a ter uma maior componente magnética. Motivo pelo qual os métodos magnéticos são essencialmente utilizados na prospeção mineira, em especial na deteção de corpos mineralizados contendo minerais com propriedades magnéticas, tais como a magnetite.

A interpretação dos dados resultantes da prospeção magnética está igualmente associada a alguma incerteza, na medida em existem diferentes rochas com equivalente potencial magnético.

#### Método da Resistividade

É um método que nos permite identificar através da diferença de potencial, formações com diferentes características litológicas que estiveram sujeitas a diferentes situações de intemperismo seja ele químico ou físico. O método de resistividade é habitualmente utilizado para identificação de interfaces entre horizontes que apresentem diferentes condutividades, estudos relacionados com a água subterrânea na definição da salinidade. Como a resistividade das formações é afetada pelo vapor subterrâneo este método tem sido aplicado em situações de procura de energia geotérmica. Basicamente este método recorre a um equipamento com dois elérodos de corrente e dois elérodos de potencial. Um perfil elétrico de profundidade é obtido à medida que se vai alargando o espaçamento entre os elérodos, porque com o afastamento dos elérodos o fluxo propaga-se a maior profundidade. O fluxo torna-se mais denso nos horizontes com maior condutividade e torna-se mais escasso nos horizontes de maior resistividade.

O potencial na superfície irá refletir os percursos e fornecer-nos-á o conjunto de dados os quais nos permitirão através de um perfil elétrico calcular um modelo do subsolo. Este método usa uma fonte de corrente elétrica a qual é injetada no subsolo através de elétrodos, e deste modo poderemos então medir o campo de potencial resultante. Esta medição é feita com recurso a um segundo pare de elétrodos também eles enterrados no subsolo. A este conjunto de elétrodos os transmissores e os recetores são habitualmente chamados dipolos. Fazendo variar o comprimento de unidade de dipolos e a sua distância poderemos então registar a distribuição verticais e horizontal das propriedades elétricas.

### Método Eletromagnético

Este método é o mais comumente usado na prospeção mineral, e tal como o próprio nome indica, resume-se á medição da condutividade elétrica induzida, através da propagação de uma onda continua ou campos magnéticos transitórios no interior ou na superfície da terra.

É de salientar que este método não se adequa á prospeção de petróleo uma vez que não se adapta a grandes profundidades onde não estão presentes bons condutores e por isso a condutividade elétrica não tem boa resposta, bem como na construção civil onde é praticamente usado para a deteção de infraestruturas enterradas tais como por exemplo cabos, e coletores.

O método eletromagnético pode ser utilizado com indução de energia no subsolo por contato direto ou por acoplamento indutivo em que não existe qualquer contato direto com o solo e o recetor recebe o sinal por indução, permitindo assim uma mais rápida aquisição de dados. Dentro do método eletromagnético teremos 3 tipos de situações, no domínio da frequência, do tempo e detetor de metais. Quando estamos perante o caso de utilização da frequência fazemos variar o campo magnético de forma sinusoidal através de correntes eletromagnéticas induzidas no solo de tal forma que a sua amplitude seja linearmente proporcional á condutividade do terreno ensaiado. Para se obter o valor destas correntes é necessário em primeiro lugar determinar a magnitude do campo em torno do qual elas irão ser produzidas. Os dados serão detetados automaticamente registados para poderem ser tratados posteriormente.

Na segunda situação estamos a falar de um método de indução em que o equipamento (transmissor e recetor) terá de ter uma capacidade bastante superior. Este poderoso emissor irá originar um primeiro campo magnético onde irá induzir correntes parasitas imediatamente abaixo do circuito transmissor. Posteriormente a degradação das correntes parasitas irá ser medida

durante o decorrer do tempo em que o emissor se encontra desligado, o campo de forças é diretamente proporcional à condutividade média dos materiais que se encontram no subsolo.

Para a deteção de metais é usado habitualmente um emissor bastante potente que gera um campo magnético quando transmite impulsos às bobinas que sofrerão energização e irão induzir correntes parasitas aos objetos condutores que mais próximos delas se encontrem. A diminuição das correntes parasitas é medida pelas bobinas as quais são bobinas recetoras que se encontram concentricamente uma por cima da outra. Estas bobinas encontram-se preparadas para medir a taxa de decaimento das correntes parasitas. As medições são feitas por estas bobinas em intervalos de tempo relativamente longos cuja unidade é o milissegundo. Assim apos o término do impulso primário a resposta é praticamente independente da condutividade elétrica do solo. Apesar de todas as vantagens de utilização no solo por contato direto, a grande vantagem do método eletromagnético é poder ser usado também por acoplamento indutivo, isto é, o recetor recebe o sinal por indução, permitindo assim ser usado a partir de uma aeronave, ou seja, poder ser aerotransportado.

Pelo facto de poder ser aerotransportado tem sido usado em conjunto com o método magnético quer para reconhecimento em prospeção mineral quer para levantamentos bastante detalhados.

### Método Georadar

O método de georadar mais conhecido pelo nome *ground penetrating radar* é uma técnica indireta sendo bastante utilizado para localizar objetos enterrados sejam eles metálicos ou não metálicos e cartografar a estratigrafia. Para obter estes resultados ele baseia-se na propagação de ondas eletromagnéticas.

O georadar lança feixes de energia para o subsolo a partir da sua antena sob a forma de ondas eletromagnéticas. Quando em contacto com o subsolo parte desta energia será refletida por qualquer interface no subsolo onde exista um contraste elétrico. Esta energia refletida pela interface será captada e registada pela antena. Os dados são registados continuamente. Estes registos feitos pela antena dar-nos-ão uma imagem resultante da energia refletida pela interface do subsolo. A onda eletromagnética propaga-se através de um meio a uma velocidade que é característica desse meio. Uma vez essas velocidades identificadas e identificado o meio que lhe é correspondente, o tempo decorrido desde a sua emissão até ao momento em que a energia refletida é novamente registada, permitirá proceder ao cálculo de profundidades. Quer a

penetração no solo quer a resolução da imagem são função da condutividade elétrica e da constante dielétrica do meio existente no subsolo, quanto mais elevada for a condutividade elétrica menor será o alcance em profundidade.

Os dados recolhidos ao longo dos perfis e o seu tratamento pode ser feito em tempo real, para isso basta que se coloque anexado ao sistema um computador, o que facilitará a interpretação de forma fácil e rápida das estruturas existentes no subsolo *in situ*, no caso de necessidade os dados serão retidos e poderão ser mais tarde tratados em local adequado.



### **3. Prospecção Mecânica**

#### **3.1. Enquadramento histórico**

O solo como material de construção em projetos de engenharia é suporte de todas as fundações. Assim é necessário proceder ao estudo de todas as suas características físicas e químicas. O início destes estudos remonta à pré-história. Desde cedo houve a necessidade de procurar abrigo para proteção de intempéries ou qualquer outro tipo de proteção. Habitualmente eram as cavernas que exerciam esta função mas na falta delas recorriam a abrigos subterrâneos que não ultrapassavam os dois metros de profundidade, indicando que já exista uma pequena noção sobre a estabilidade dos maciços dos locais de abrigo. Posteriormente com a descoberta de novos materiais o tipo de construção foi sofrendo evolução, evoluindo também a noção de capacidade de suporte das fundações.

Os gregos por exemplo já usavam solo misturado com cinzas de carvão, e posterior compactação para aumentar a capacidade de suporte mas também recorriam a equipamento bélico para cravar estacas de madeira atuando como suporte de fundação. Mas foi durante o século XVIII em França que se iniciaram os estudos dos solos com Henry Gautier. Este estudo focou-se no escorregamento natural dos solos nomeadamente nas areias secas. Mais tarde Bernard Forest, publicou um livro no qual propunha uma teoria para a pressão lateral exercida pela terra em paredes de contenção. Surgiu, também por ele elaborada, uma tabela de classificação para os diferentes tipos de materiais, como por exemplo areia e argila em termos de peso volúmico.

Entre o século XVIII e o século XIX foram obtidos novos desenvolvimentos na sua grande parte por Engenheiros e Cientista Franceses. Até à data para efeitos de cálculo tinham sido usadas considerações teóricas. Foi então com Charles Coulomb que foram elaborados os primeiros cálculos científicos para a determinação de impulsos de terras, e surgiu a hipótese para a lei de rotura de solos. Para tal ele recorreu às leis da fricção e coesão para corpos sólidos. A partir deste estudo de Coulomb, outros estudos foram feitos em aterros inclinados e com sobrecarga. Jean Poncelet por volta do ano de 1840 evolui baseado nos estudos de Coulomb, elaborando e apresentando um método gráfico para determinação da magnitude da pressão lateral da terra numa parede de retenção vertical e inclinada. Foi também Poncelet que nos forneceu a teoria de capacidade de carga última para fundações superficiais. Com o Eng. Alexandre Collin surgem os primeiros dados para deslizamentos acentuados (profundos) em taludes, escavações e aterros de

argila. Collin conclui de forma teórica que em todos estes casos o fracasso dá-se quando a coesão mobilizada excede a coesão do solo existente.

Aproximadamente em 1857 o professor William Rankine apresentou-nos com a teoria sobre a pressão da terra e o equilíbrio de massas. Rankine conseguiu com isto simplificar a teoria de Coulomb. Por volta do ano de 1856 surge a publicação do estudo sobre a permeabilidade de filtros de areia, surgindo assim também um novo parâmetro de extrema importância nos nossos dias: o coeficiente de permeabilidade do solo. Este coeficiente é também conhecido pelo coeficiente de Darcy, pois foi quem o definiu. Entretanto muitos outros estudos foram desenvolvidos com base nas anteriores teorias. Nas teorias expostas por Coulomb e Rankine foi considerado que a superfície de rotura do solo é plana. Poderá ser verdade em solos incoerentes mas para solos coerentes não se verifica uma vez que estes tendem a deslizar segundo uma superfície curva. Surgem então os primeiros estudos sobre este tema levados a cabo por Engenheiros suecos por volta de 1911. Foi então proposto por Petterson que a projeção da superfície de escorregamento fosse considerada como um arco de circunferência. Com o aparecimento desta nova hipótese surgem muitos estudos que levam ao aparecimento de novos métodos práticos, tanto analíticos como práticos.

Durante um largo período de tempo excluindo o impulso de terras em muros de suporte, todos os problemas relacionados com solos, eram tentados solucionar através de métodos empíricos, recorrendo a observações do solo feitas *in situ*, cruzando essa observação com os rudimentares ensaios de carga. Este período decorre até a primeira guerra mundial. Os estudos científicos que eram feitos a nível dos solos encontravam-se bastante vocacionados para responder a problemas relacionados com a agricultura. No entanto a partir da Primeira Guerra mundial a progressão nos estudos científicos e ensaios de solos foi bastante acentuada, bem como a aplicação dos dados teóricos e experimentais nas áreas da Engenharia. Até se dar este desenvolvimento, existiam poucos dados relativamente à estabilidade das fundações e as teorias tais como a de Rankine para a profundidade mínima das fundações pouco valor prático tinham uma vez que era baseado numa hipótese em que o solo era seco e granular.

A forma como era definida a profundidade das fundações era através de observação e da experiência das construções locais, ou na falta delas recorria-se aos rudimentares ensaios de carga, os quais muitas vezes conduziam a falsos profundidades devido a efeitos de escala e também pela existência de estratos de pequena capacidade de suporte localizados inferiormente ao estrato onde eram construídas as fundações. Estes acontecimentos levaram então a

aparecimento de ensaios de laboratório como por exemplo o ensaio de resistência ao corte que em conjunto com os novos e desenvolvidos ensaios de campo permitiram que os cálculos posteriormente efetuados fossem de maior fiabilidade. Mas o maior acontecimento foi o surgimento da teoria de consolidação de Terzaghi em 1925, a qual veio permitir calcular o possível assentamento do solo argiloso bem como a sua progressão quando sujeito a edifícios neles fundados.

Mas não são só os edifícios que necessitam de ter boas fundações. Ao longo dos anos também as infraestruturas como por exemplo as vias de comunicação tiveram um grande desenvolvimento e também estas precisam de boas fundações na sua construção e nos dias decorrentes aplicam-se-lhes os princípios da compactação e estabilização quer à fundação quer ao pavimento. A necessidade de desenvolvimento dos trabalhos de investigação levarão também ao desenvolvimento do equipamento seja ele de laboratório seja ele de campo.

Foi pelo ano de 1920 na América do Norte que se começou a dar a devida importância aos solos de fundação e a sua investigação e tirar então partido de ensaios concebidos em 1911 pelo Sueco Atterberg. Mas é no decorrer de 1939 a 1945 com a construção de aeródromos em diferentes locais que se consegue adquirir uma enorme experiência. Experiência esta adquirida pelo fato de estarmos a viver um período de guerra em que os problemas eram muitos tais como a falta de mão-de-obra e a necessidade de execução rápida de trabalho de boa qualidade. É assim que surge trabalho intenso de investigação para melhoramento de equipamento mecânico e aperfeiçoamento dos ensaios a realizar. Surgem então os primeiros laboratórios móveis os quais permitiram a execução dos ensaios no próprio local da obra e até aos dias de hoje em constante evolução e utilização. Mas também os ensaios de campo foram evoluindo e se espera que mais evoluam pois a necessidade de prospeção direta e indireta é cada vez mais solicitada, pois é ela que em conjunto com os ensaios de laboratório complementa os dados necessários à execução de futuros bons trabalhos.

## **3.2. Penetrómetros dinâmicos**

### **3.2.1. Aparecimento e evolução dos penetrómetros**

O recurso a penetrómetros dinâmicos começou há alguns séculos. O penetrómetro dinâmico foi utilizado pela primeira vez em 1699 por Goldman na Alemanha. O método por ele usado e que ficou no esquecimento até a última metade do século. XIX só em meados 1890 voltou a ser utilizado de acordo com os arquivos nacionais Suecos onde foram encontrados registos deste

teste num projeto realizado em Estocolmo. No local, estavam a prever usar estacas pelo que então o penetrómetro foi usado com o principal objetivo de investigar qual a extensão necessária que deveriam ter as estacas. A forma que encontraram para medir a variação da resistência á penetração com a profundidade foi através do uso da palavra “duro”.

Para a realização deste ensaio foram usadas varas, com extensão de aproximadamente 12 m com área de 25x25 mm, martelo, espeto, cunha, cinzeis e uniões para acoplamento das varas. No mesmo local foi levada a cabo em 1910 outra investigação recorrendo provavelmente ao mesmo tipo de varas, e um martelo que possivelmente seria de madeira com um peso de 60 Kg. Este martelo era levantado até uma altura de 0,60m para então depois desferir a pancada na vara conduzindo assim através dos diferentes horizontes.

De acordo com a experiência e o tipo de condições geológicas bem como a profundidade de furação, eram escolhidas as dimensões das varas a ser utilizadas.

Começou também a ser registado o número de pancadas e a profundidade que era atingida para esse número de pancadas. Ao fim de alguns registos foi verificada que em média para cada 10 pancadas a vara penetrava o solo a uma profundidade que variava de 3 a 13 cm.

Através de um panfleto encontrado na Suécia temos indicação do tipo de penetrómetros que eram usados sensivelmente na altura de mudança de século.



**Figura 45 – Penetrómetro dinâmico 1940 aproximadamente.**  
Fonte: *Penetration Testing 1988*

Neste panfleto também se encontrava descrito o tipo de equipamento usado e o modo de realização do ensaio. Então aqui já foram usadas varas de aço de secção quadrada de 25x25 mm

acopladas com uniões. Para que pudessem obter uma ideia da resistência do solo era medida a cada 20 pancadas a profundidade de penetração das varas. Quanto à mão-de-obra pode ser observada na Fotografia 45, que eram necessário 4 homens para a execução e 1 encarregado para verificar a correta execução do ensaio e fazer as medições.

Na Alemanha foi descrito por Kunzel volta de 1936 a utilização de um penetrómetro bastante simples já de varas redondas com diâmetro a variar de 16 a 20 mm e de varas cujos comprimentos podiam variar entre 5 e 8 m. Este penetrómetro tinha um martelo com peso a variar entre 5 e 6 Kg o qual desferia as pancadas na vara de uma altura de 50 cm. A cada 10 pancadas desferidas era medida a penetração da vara, ou em alternativa eram medidas o número de pancadas necessárias até que a vara penetrasse o solo numa profundidade de 10 cm. Os resultados obtidos foram registados e traçados em forma de gráfico. Em 1943 o penetrómetro de Kunzel foi usado por Paproth o qual lhe introduziu umas variantes. Ele incrementou o peso do martelo cerca de 10 kg aumentando também ao diâmetro das varas que passaram a ter 22 mm. Este penetrómetro tem uma ponta cónica com 35,6 mm e na tentativa de redução do atrito foi usado um encamisamento. Em 1964 deu-se então a padronização deste penetrómetro leve.

Este tipo de penetrómetro é bastante usado na Europa Central e em alguns países como por exemplo a Bulgária foi também aprovado como padrão. Países como a Suécia, Austrália entre outros também levaram a cabo o desenvolvimento deste tipo de penetrómetro dinâmico leve.

No Sudeste da Asia o penetrómetro dinâmico leve embora com o nome de “Mackintosh probe” é também extensamente usado. Na Alemanha entre 1964 e 1974 foi padronizado o penetrómetro dinâmico pesado. As varas de ponta cónica que o constituem apresentam diâmetro de 32mm e a ponta cónica 43,7 mm. O martelo que acompanha este penetrómetro tem uma massa de peso 50Kg, sendo apresentando uma altura de queda de 50 cm. Ao apresentarem um penetrómetro com tão larga dimensão da ponta cónica foi com o propósito de tentar diminuir o atrito ao longo das varas. O método de medição era a contagem das pancadas a cada 10 cm de penetração da vara no solo. Na Suécia este tipo de penetrómetro foi patenteado em 1942 contudo começou a ser desenvolvido pelo ano de 1935. A cada ano este penetrómetro tem sofrido grandes desenvolvimentos passando assim a ser cada vez mais usado em muitos locais do mundo. Na Rússia o penetrómetro dinâmico pesado com varas de finalização cónica com diâmetro de 74mm e martelo de 60Kg com altura de queda de 0,80 m foi desenvolvido pelo ano de 1950. Este penetrómetro foi padronizado no ano de 1974 no entanto esta padronização foi revista em 1981.

Mas não só na Alemanha e Rússia este penetrómetro dinâmico é bastante usado, ele é também utilizado na Austrália e França.

Pelo fato de serem testes de fácil execução e de baixo custo e terem sido adotados por muitos países ao longo dos anos levam também a que sejam feitas comparações entre os diferentes penetrómetros dinâmicos existentes bem como com outros penetrómetros como por exemplo o SPT (*standard penetration test*), obtendo na maior parte das vezes resultados bastante consistentes.

Em resumo, até 1945 os penetrómetros dinâmicos sofreram grande evolução e foram adotados em toda a Europa como um dos principais testes de prospeção do subsolo na área das fundações. A partir de 1945 os penetrómetros dinâmicos além de se encontrarem perfeitamente divulgados na Europa também foram bastante divulgados e adotados fora deste continente, em parte devido ao fato da troca de experiências e conhecimentos provenientes dos quadros superiores técnicos das empresas de construção civil europeias que se ramificaram para outros países fora da Europa.

### 3.2.2. Tipos de penetrómetros dinâmicos

Os ensaios executados com recurso a penetrómetros dinâmicos, é um método de prospeção que tem por objetivo avaliar a capacidade resistente do solo numa primeira fase, podendo ainda servir de base ao desenvolvimento de estudo num determinado local onde se verifique a necessidade de numa fase posterior se virem a executar outros ensaios e até mesmo ser uma ferramenta para controlo de qualidade em obra em obras de compactação de aterros e reforço de solos. Os penetrómetros dinâmicos são largamente usados em Países da Europa como Alemanha, Portugal, França e Itália, entre outros como Austrália, Finlândia, África do sul etc. Este método não permite recolha de amostra logo enquadra-se nos métodos de prospeção mecânica semidirecta. Existem 4 tipos de penetrómetros dinâmicos: os leves, os médios, os pesados e os super-pesados.

Tipo Penetrómetro Dinâmico	Abreviação	Massa (kg)
Leve	PDL	≤ 10
Médio	PDM	>30
Pesado	PDP	>50
Superpesado	PDSP	> 60

**Tabela 3 - Tipos de penetrómetros dinâmicos.**

O critério de escolha do penetrómetro dinâmico mais adequado está intimamente ligado a fatores como a topografia, geologia, bem como a necessidade de maior penetração e de realização de testes de penetração em consonância com sondagens.

Considerando que todos estes fatores influenciam a escolha do equipamento mais adequado, o seu processo de seleção deverá também ter em conta as questões económicas e tecnológicas.

Habitualmente e principalmente na área da construção a tendência é para começar por usar o penetrómetro dinâmico mais simples (DPL ou DPM) o qual seja possível de dar resposta ao trabalho que temos a desenvolver. Existe uma regra que poderá servir de guia que é o uso do penetrómetro dinâmico leve (DPL) para profundidades que não ultrapassem os 8 m, o penetrómetro dinâmico médio (DPM) para profundidades a variar entre 20 e 25 m, o penetrómetro dinâmico pesado (DPH) para profundidades que não ultrapassem os 25 m e o penetrómetro dinâmico superpesado (DPSH) para profundidades cuja profundidade possa ultrapassar os 25 m. Outras informações a ter em consideração quando da escolha do penetrómetro dinâmico a ser usado são o atrito e o nível freático pois podem influenciar os resultados do ensaio. Com os primeiros resultados obtidos nos ensaios de campo pode ser então verificada a necessidade de escolher um equipamento de capacidade superior para a realização do ensaio. De uma forma geral todos os penetrómetros dinâmicos são utilizados em prospeção preliminar.

Para que não sejam obtidos resultados menos corretos é necessário ter algum cuidado na realização dos ensaios de campo.

Existem alguns fatores a ter em consideração antes de dar início ao ensaio com recurso a penetrómetro pois estes fatores podem influenciar os resultados finais. Estamos a falar da necessidade de manter as varas em perfeitas condições, isto é, sem qualquer tipo de empeno, atrito, ao número de interrupções durante a realização do ensaio, e da forma de aplicação da energia.

Devemos evitar a utilização de varas que se apresentem empenadas isto porque em primeiro lugar a penetração no solo deve ser completamente vertical de depois porque a curvatura das varas levará a um deferimento de energia não uniforme o que causará um incremento no atrito ao longo das varas, o que nos poderá conduzir a falsos resultados.

O atrito superficial é também um fator muito importante talvez até o mais importante uma vez que é a resistência do cone que nos permite a interpretação dos resultados do teste.

Significa então que o atrito terá de ser minimizado ou até mesmo eliminado no caso de possibilidade, para tal existem algumas situações que podem ajudar nesta tarefa tais utilizar um cone de diâmetro superior ao da vara, ir girando as varas á medida que estas vão penetrando o solo, e até mesmo injetar lama de perfuração.

A razão pela qual devemos ter em conta o menor número de interrupções possível é porque estas interrupções podem levar a um aumento do atrito superficial. Então o ideal é interromper unicamente a continuidade do ensaio em caso de ser necessário incrementar o número de vara e mesmo assim esta paragem deverá ser muito curta.

A forma de aplicação de energia, ou seja, a forma de utilização do martelo deverá ser tida em atenção, pois também influencia os resultados finais tais como a situações anteriores. É muito importante que se garanta a altura constante de queda bem como a sua liberdade. Foram feitas comparações usando um martelo manual e um martelo a ar comprimido e foi verificado que as diferenças são consideráveis.

Com a evolução e a consciencialização da influência destes fatores nos resultados finais, os operadores estão cada vez mais atentos o que leva a obtenção de resultados reais.



**Figura 46 - Penetrómetro dinâmico leve e médio.**

Os resultados obtidos dos ensaios com penetrómetros dinâmicos podem ser interpretados qualitativamente e quantitativamente.

A interpretação qualitativa está mais vocacionada para uma avaliação da existência ou não da uniformidade do existente no subsolo, bem como para verificação da compacidade do material constituinte presente nos horizontes existentes, ou para controlo de qualidade como por exemplo fazer um controlo de compactação de um aterro através da execução de ensaios à penetração antes de depois da construção do aterro.

Ainda dentro da interpretação qualitativa se for conhecida a distribuição do solo existente ao longo da profundidade pode ser feita uma avaliação geral dos horizontes e tipo de subsolo bem como da sua extensão horizontal.

Quando existe a necessidade por parte da engenharia de determinar coesão e localizar solos coesivos, bem como a determinação de capacidade de suporte de solos para fundações superficiais e estacas, nestes casos já se recorre à interpretação quantitativa.

Apresenta-se em seguida uma listagem das principais vantagens e também das desvantagens do uso dos penetrómetros.

Vantagens:

- ✓ O equipamento é de fácil transporte e montagem o que permite aceder aos locais de difícil acesso;
- ✓ Ensaio de baixo custo e de rápida execução pois permitem elevados rendimentos;
- ✓ Ensaio de mão-de-obra reduzida principalmente em ensaios mecanizados;
- ✓ Ensaio contínuo, estabelecendo-se um perfil contínuo da resistência do solo;
- ✓ Resolve o problema de alívio de tensões, uma vez que não há recolha de amostras;
- ✓ Não necessita de execução prévia de um furo de sondagem;
- ✓ Poder usado em mais do que um tipo de solo, desde argilas moles, siltes, areias e cascalhos, solos residuais ou argilas rijas pois permite a utilização diferentes energias de penetração.
- ✓ São os métodos mais adequados para a avaliação da posição do “firme” mas, em especial, como detetores de obstáculos pontuais ou singularidades, do maciço natural ou criados pelo homem (ex: estruturas enterradas, poços, minas, etc.).

- ✓ Podem constituir a base de um estudo geotécnico preliminar para definir os locais mais apropriados para executar ensaios mais sofisticados (e mais caros).
- ✓ Em obras de compactação em aterros e de reforço de solos este método pode ainda constituir um bom controlo de qualidade.

Desvantagens:

- ✓ Não permite a recolha de amostra;
- ✓ Apenas um parâmetro é possível medir com recurso a este ensaio que é a resistência de ponta;
- ✓ Como é um ensaio por cravação dinâmica incrementa a perturbação do solo.

A Tabela 4 é um quadro resumo das principais características dos principais tipos de penetrómetros dinâmicos.

	DPL (leve)	DPM (médio)	DPH (pesado)	DPSH (super- pesado)
<b>Dispositivo de cravação</b>				
Pilão massa m (kg)	10 ± 0,1	30 ± 0,3	50 ± 0,5	63,5 ± 0,5
Altura de queda h (mm)	500 ± 10	500 ± 10	500 ± 10	750 ± 20
Razão comprim./diâm. (Dn)	≤1 ≤2	≤1 ≤2	≤1 ≤2	≤1 ≤2
<b>Batente</b>				
Diâmetro (mm)	100<d<0,5Dn 6	100<d<0,5 Dn 18	100<d<0,5 Dn 18	100<d<0,5 Dn 30
Massa (kg) (máx.) (vara guia incluída)				30
<b>Cone de 90°</b>				
Área d base nominal A cm <sup>2</sup>	10	10	15	20
Diâm. da base (D) nov (mm)	35,7 ± 0,3	35,7 ± 0,3	43,7 ± 0,3	51 ± 0,5
Diâmetro da base, usado (mm) min.	34	34	42	49
Comprim. da manga (mm)	35,7 ± 1	35,7 ± 1	43,7 ± 1	51 ± 2
Comprimento da ponta do cone (mm)	17,9 ± 0,1	17,9 ± 0,1	21,9 ± 0,1	25,3 ± 0,4
Desgaste máx. da ponta mm	3	3	4	5
<b>Varas</b>				
Massa (kg/m) (máx)	3	6	6	6
Diâmetro OD (mm) (máx)	22	32	32	32
Sm inferiores %	0,1	0,1	0,1	0,1
Restante %	0,2	0,2	0,2	0,2
<b>Energia específica por pancada</b>				
(mgh/A) em kJ/m <sup>2</sup>	50	150	167	238

**Tabela 4 - Equipamento para ensaios penetração dinâmica**

Fonte: NP EN 1997-3 – Eurocódigo 7 Parte 3

O penetrómetro escolhido para a realização do estudo de campo é o DPM cujo equipamento consiste numa ponteira cónica (C), um conjunto de varas de aço (V), um pilão de massa (M) e um

sistema de golpeio (B) com capacidade para elevar o pilão com uma altura (h) e a partir desse ponto permitir a sua queda livre. As dimensões do equipamento encontram-se padronizadas e correspondem às dimensões que podem ser observadas na segunda coluna da tabela 4.

Inicialmente devem ser definidos os locais onde se irão realizar as sondagens. Quando no local deve existir uma planta ou um esquiço onde as sondagens fiquem localizadas e numeradas, para mais tarde não haver dúvidas e se necessário repetir a sondagem ou até outro ensaio que permita obter mais informação caso seja necessário. Deve também existir um boletim de ensaio previamente preparado onde serão registadas as medições efetuadas ao longo de cada sondagem.

Para início da execução do ensaio o equipamento do qual faz parte a ponteira cónica, a vara de aço, o pilão e o respetivo sistema de golpeio na posição anteriormente definida para a realização da sondagem.

Após a colocação do equipamento em posição deve ser mantida a máxima verticalidade das varas e acionar o movimento de queda do pilão. Assim que as pancadas começam a ser desferidas, estas serão contadas para cada 10 cm e registadas até que se atinga o critério de paragem o qual de acordo com a norma será de 50 pancadas.

No entanto podemos sempre definir um maior fator de segurança e definir um número superior de pancadas como critério de paragem.




Para a realização do ensaio são normalmente necessários 3 colaboradores, um para manter a verticalidade do equipamento, um para proceder à contagem e outro para registo de dados. Após a execução das sondagens e os respetivos dados registados estes então serão tratados e interpretados.

Para o cálculo da tensão admissível será necessário recorrer à *fórmula dos Holandeses* para encontrar o valor da resistência dinâmica aparente (Rda) e multiplica-la pelo fator K.

$$\text{Tensão admissível} = Rda * K$$

$$Rda = (n/a) \left( \frac{M^2 h}{S(M + p)} \right)$$

**Equação 19 - Tensão admissível.**

 <p><b>LGMCM</b> LABORATÓRIO GEOTECNIA E MATERIAS DE CONSTRUÇÃO</p>   <p>Instituto Superior de Engenharia do Porto</p>	<b>ENSAIOS DE CAMPO - DPM</b>	
	Trabalho de Mestrado de Rosa Vinagre	
	Realizado por:	
	(R. Pinheiro)	(J.P. Meixedo)

**PENETRAÇÃO DINÂMICA MÉDIA (DPM 30)**

Ensaio nº **0** x Rzz 2012

Prof. (m)	Nº de Varas	Nº de Golpes N	K	Rda N x K (kg/cm²)	Tensões Admissíveis (kg/cm²)	Prof. (m)	Nº de Varas	Nº de Golpes N	K	Rda N x K (kg/cm²)	Tensões Admissíveis (kg/cm²)
0, 10	1		3,837	0,00	0,00	10	6		3,060	0,00	0,00
20	1		3,837	0,00	0,00	20	6		3,060	0,00	0,00
30	1		3,837	0,00	0,00	30	6		3,060	0,00	0,00
40	1		3,837	0,00	0,00	40	6		3,060	0,00	0,00
50	1		3,837	0,00	0,00	50	6		3,060	0,00	0,00
60	1		3,837	0,00	0,00	60	6		3,060	0,00	0,00
70	1		3,837	0,00	0,00	70	6		3,060	0,00	0,00
80	1		3,837	0,00	0,00	80	6		3,060	0,00	0,00
90	1		3,837	0,00	0,00	90	6		3,060	0,00	0,00
1, 00	1		3,837	0,00	0,00	6, 00	6		3,060	0,00	0,00
10	2		3,652	0,00	0,00	10	7		2,941	0,00	0,00
20	2		3,652	0,00	0,00	20	7		2,941	0,00	0,00
30	2		3,652	0,00	0,00	30	7		2,941	0,00	0,00
40	2		3,652	0,00	0,00	40	7		2,941	0,00	0,00
50	2		3,652	0,00	0,00	50	7		2,941	0,00	0,00
60	2		3,652	0,00	0,00	60	7		2,941	0,00	0,00
70	2		3,652	0,00	0,00	70	7		2,941	0,00	0,00
80	2		3,652	0,00	0,00	80	7		2,941	0,00	0,00
90	2		3,652	0,00	0,00	90	7		2,941	0,00	0,00
2, 00	2		3,652	0,00	0,00	7, 00	7		2,941	0,00	0,00
10	3		3,483	0,00	0,00	10	8		2,831	0,00	0,00
20	3		3,483	0,00	0,00	20	8		2,831	0,00	0,00
30	3		3,483	0,00	0,00	30	8		2,831	0,00	0,00
40	3		3,483	0,00	0,00	40	8		2,831	0,00	0,00
50	3		3,483	0,00	0,00	50	8		2,831	0,00	0,00
60	3		3,483	0,00	0,00	60	8		2,831	0,00	0,00
70	3		3,483	0,00	0,00	70	8		2,831	0,00	0,00
80	3		3,483	0,00	0,00	80	8		2,831	0,00	0,00
90	3		3,483	0,00	0,00	90	8		2,831	0,00	0,00
3, 00	3		3,483	0,00	0,00	8, 00	8		2,831	0,00	0,00
10	4		3,330	0,00	0,00	10	9		2,728	0,00	0,00
20	4		3,330	0,00	0,00	20	9		2,728	0,00	0,00
30	4		3,330	0,00	0,00	30	9		2,728	0,00	0,00
40	4		3,330	0,00	0,00	40	9		2,728	0,00	0,00
50	4		3,330	0,00	0,00	50	9		2,728	0,00	0,00
60	4		3,330	0,00	0,00	60	9		2,728	0,00	0,00
70	4		3,330	0,00	0,00	70	9		2,728	0,00	0,00
80	4		3,330	0,00	0,00	80	9		2,728	0,00	0,00
90	4		3,330	0,00	0,00	90	9		2,728	0,00	0,00
4, 00	4		3,330	0,00	0,00	9, 00	9		2,728	0,00	0,00
10	5		3,189	0,00	0,00	10	10		2,633	0,00	0,00
20	5		3,189	0,00	0,00	20	10		2,633	0,00	0,00
30	5		3,189	0,00	0,00	30	10		2,633	0,00	0,00
40	5		3,189	0,00	0,00	40	10		2,633	0,00	0,00
50	5		3,189	0,00	0,00	50	10		2,633	0,00	0,00
60	5		3,189	0,00	0,00	60	10		2,633	0,00	0,00
70	5		3,189	0,00	0,00	70	10		2,633	0,00	0,00
80	5		3,189	0,00	0,00	80	10		2,633	0,00	0,00
90	5		3,189	0,00	0,00	90	10		2,633	0,00	0,00
5, 00	5		3,189	0,00	0,00	10, 00	10		2,633	0,00	0,00

Figura 47 - Exemplo de boletim ensaio.

### 3.3. Outros ensaios de penetração

#### Standard Penetration Test (SPT)

O ensaio SPT foi dado a conhecer em larga escala em 1948 após a publicação do livro “*Soil Mechanics in Engineering Practice*” de Terzaghi e Peck, tornando-se assim o ensaio de penetração dinâmica, dos mais divulgados em todo o mundo. É um ensaio de baixo custo, de fácil e rápida execução permitindo a obtenção de testemunhos.

Através da execução deste ensaio poder-se-á determinar os tipos de solo existentes e a profundidade a que se encontram, altura do nível freático, qual a capacidade de carga do subsolo localizado a diferentes profundidades e qual o comportamento do solo quando sujeito a sub-carga.

O equipamento que permite a realização deste ensaio é constituído por um martelo, um conjunto bomba com motor, trépano para lavagem, um trado em forma de concha e um amostrador.



**Figura 48 – Execução de ensaio SPT.**

Fonte: <http://www.engeconfundacoes.com.br/estacas-sondagem.html>

O ensaio consiste então na execução de uma perfuração vertical no fundo da qual se irá procedendo à cravação de um amostrador normalizado. Esta cravação é feita por pancadas com recurso a um pilão de peso 63,5 Kg com altura de queda livre de 76 cm. Este amostrador não é mais do que um tubo de aço que apresenta um comprimento de 80 cm apresentado um diâmetro interior de 35 mm e exterior de 51 mm o seu peso será de aproximadamente de 6,8 Kg.

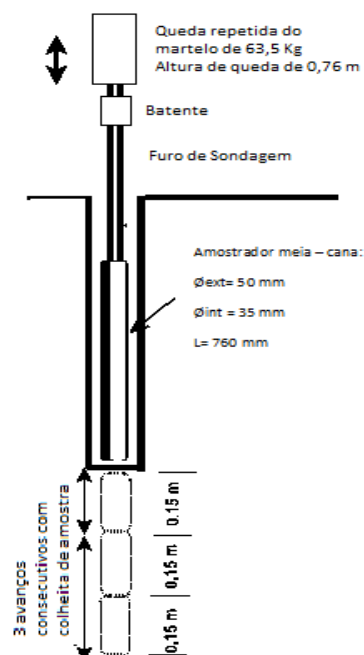
A configuração do amostrador biselada na parte inferior facilita a penetração no subsolo já a parte superior é roscada por forma a facilitar a união com o comboio de varas que se estendem desde do interior da sondagem até á superfície do terreno.

O batente que recebe as pancadas do pilão está acoplado à primeira vara que se encontra na superfície do terreno.

O ensaio SPT realiza-se de acordo com as seguintes fases:

- ✓ Numa primeira fase deverá ser cravado o amostrador em cerca de 15 cm, procedendo-se à contagem e registando-se o número de pancadas necessárias para atingir estes 15 cm, sendo que este valor será meramente indicativo pois o objetivo pretendido é conseguir penetrar e atravessar a zona do terreno mais perturbado abaixo do fundo do furo.
- ✓ Numa segunda fase são cravados mais 15 cm, considerando o número de pancadas (N) desferidas para a respetiva penetração o resultado a registar para o ensaio.
- ✓ Na terceira e última fase serão cravados os últimos 15 cm, para o qual também será registado o número de pancadas (N) correspondentes.

Assim vão sendo contadas as pancadas para atingir 30 cm e se estes não forem atingidos ao fim de 50 pancadas, o processo de cravação é parado e registado o comprimento de penetração para estas 50 pancadas. Em linguagem corrente esta situação é denominada de “nega”.



**Figura 49 - Etapas do ensaio SPT.**

Adaptado: Manual on Subsurface Investigations

Após o registo dos dados deverá ser determinado o índice de resistência à penetração. O índice de resistência à penetração é determinado com base na soma do número de pancadas obtido em cada 15 cm de penetração no solo, sendo que o número de pancadas dos primeiros 15 cm é desprezado. Se chamarmos N1 ao n.º de pancadas correspondente aos primeiros 15 cm, N2 aos segundos 15 cm e N3 aos 15 cm finais, desprezando o N1, o índice de resistência à penetração passa a ser dado por  $N = N2 + N3$ .

Com o valor obtido pode então ser estabelecida uma classificação indicativa da consistência ou da compacidade caso se esteja na presença de solos argilosos ou solos arenosos.

Índices de resistência à penetração e respetivas designações		
Solo	Índice de resistência à penetração	Designação
Areias e Siltes Arenosos	$\leq 4$	Solto
	5 a 10	Pouco compacto
	11 a 30	Medianamente compacto
	31 a 50	Compacto
	$> 50$	Muito compacto
Siltes Argilosos	$\leq 2$	Muito mole
	3 a 4	Mole
	5 a 8	Média
	9 a 15	Rija
	16 a 30	Muito riga
	$> 30$	Dura

**Tabela 5 - Índices de Resistência à penetração.**

É de salientar ainda que existem fatores como o comprimento de varas, diâmetro do furo e a existência ou não de revestimento que podem levar á necessidade de fazer correções ao valor N.

<b>Efeito do comprimento do trem de varas (correção apenas a utilizar em areias)</b>	
Comprimento comboio de varas (mm)	Parâmetro de correção
> 10	1,00
6 a 10	0,95
4 a 6	0,85
0 a 4	0,75
<b>Efeito do liner</b>	
Condição	Parâmetro de correção
Sem revestimento de amostra	1,00
Com revestimento da amostra	
Areias densas e argilas	0,80
Areias soltas	0,90
<b>Efeito do diâmetro do furo</b>	
Diâmetro furo (mm)	Parâmetro de correção
60 a 120	1,00
150	1,05
200	1,15

**Tabela 6 - Parâmetros de Correção SPT.**

#### Vantagens

- ✓ simplicidade do equipamento e dos procedimentos (rotineiros);
- ✓ possibilidade de obtenção de amostra (perturbada);
- ✓ existência de uma vasta experiência (muito popular);
- ✓ economia dos processos.

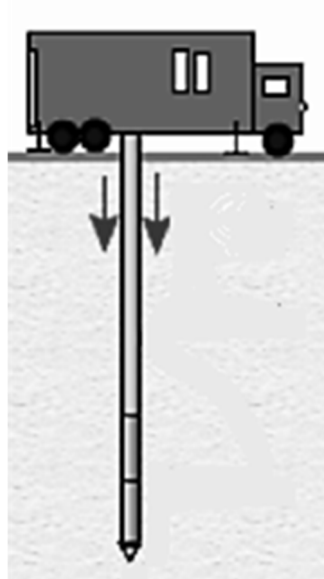
#### Desvantagens

- ✓ muito dependente do operador e da técnica de perfuração;
- ✓ equipamentos e procedimentos não normalizados internacionalmente (como por exemplo a energia transmitida ao amostrador);
- ✓ a necessidade de realização de furo de sondagem com extração de solo, implica a uma redução da resistência do mesmo (daí desprezar-se os primeiros 15 cm)
- ✓ dificuldades de operação abaixo do NF (problema anterior agravado em solos saturados, o que obriga à utilização de lamas bentoníticas o que é difícil e dispendioso.

### Cone penetration test (CPT)

Este ensaio é um ensaio estático e consiste na cravação com o apoio de um sistema hidráulico de uma série de varas cilíndricas no solo com uma ponteira cônica normalizada na base. À medida que se avança em profundidade e a penetração aumenta, as varas vão sendo acrescentadas. A velocidade de penetração deverá ser constante e suficientemente lenta: cerca de 2cm/seg.

Durante o processo de cravação das varas são geradas ao longo destas, forças atríticas e de ponta que podem provocar o levantamento do equipamento. Para evitar esta situação o equipamento de furação deverá permitir reação à força resultante gerada pelas forças anteriormente mencionadas para tal recorre-se habitualmente a uma viatura pesada ou com capacidade de se ancorar.



**Figura 50 - Viatura de apoio CPT/CPTu.**  
Adaptado: Manual on Surface Investigations

Este tipo de cravação permite medir a resistência de ponta e/ou a resistência lateral. Em acréscimo a pressão intersticial que se encontra entre a interface do cone com o solo pode também ser medida durante a realização do ensaio usando para tal um sensor no cone.

Esta pressão intersticial pode aumentar ou diminuir de acordo com a compressão e dilatação do solo saturado, surgindo à medida que se vai dando a penetração do cone e das varas no local a ensaiar.

Após a realização do ensaio estático, poderemos obter dados acerca da estratigrafia das camadas e sua homogeneidade, a profundidade a que se encontra o “bedrock”, bem como localização de descontinuidades como cavidades e vazios, e também permitirá identificar o solo e suas características mecânicas.

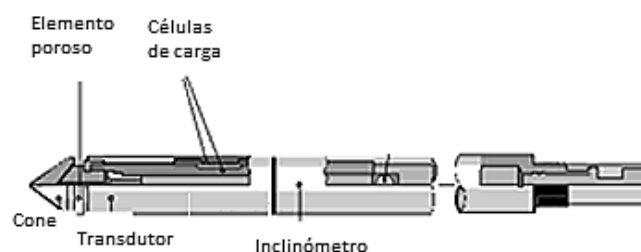
O cone penetration test é realizado em 3 etapas em que:

- ✓ Na primeira etapa dá-se o deslizamento da ponteira cônica que se encontra acoplada à vara interior, isto porque neste ensaio temos uma vara a deslizar no interior de outra por meio de um comando hidráulico (penetrómetro mecânico). Esta etapa permite a medição da resistência de ponta ( $q_c$ ).
- ✓ Na segunda etapa é medido o atrito lateral local a partir do avanço da manga junto da ponteira ( $f_c$ ).
- ✓ Na terceira e última etapa, o conjunto desce até uma nova posição de leitura o que tornará possível a medição da resistência total.

Na superfície estarão colocados manómetros os quais medirão a força de cravação da ponteira, a força de acionamento da manga de atrito bem como a força de cravação global.

Como anteriormente mencionado é possível ainda recorrer a um outro sensor denominado piezocone. O piezocone para além de medir a resistência de ponta e o atrito lateral mede também as pressões intersticiais ( $u$ ) que se geram durante a sondagem. Quando recorremos ao piezocone o ensaio passa a ter a designação de *piezocone penetration test* (CPTu).

É então possível avaliar-se a pressão da água existente no solo, através de um transdutor de pressão que está colocado no interior da ponteira.



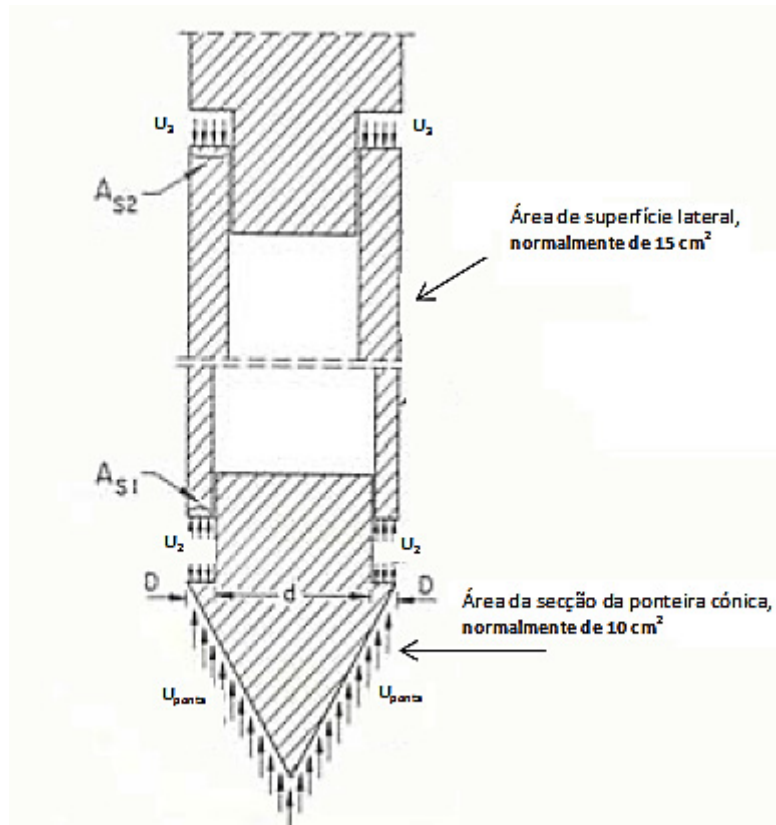
**Figura 51 - Ponteira equipada com transdutor.**

Adaptado: <http://clu-in.org/characterization/technologies/dpgeotech.cfm>

O ensaio CPTu vem completar o CPT permitindo a medição e o registo continuado em intervalos seleccionados em profundidade, a resistência lateral de uma manga normalizada, a resistência específica de penetração da ponteira cónica bem como a pressão neutra em cada instante num plano próximo da ponta de penetração.

Durante a realização do ensaio é necessário a garantia do bom funcionamento do transdutor de pressão neutra. Para tal deverá ser saturado o elemento poroso e os veios de comunicação, estes são os elementos de interface solo-transdutor.

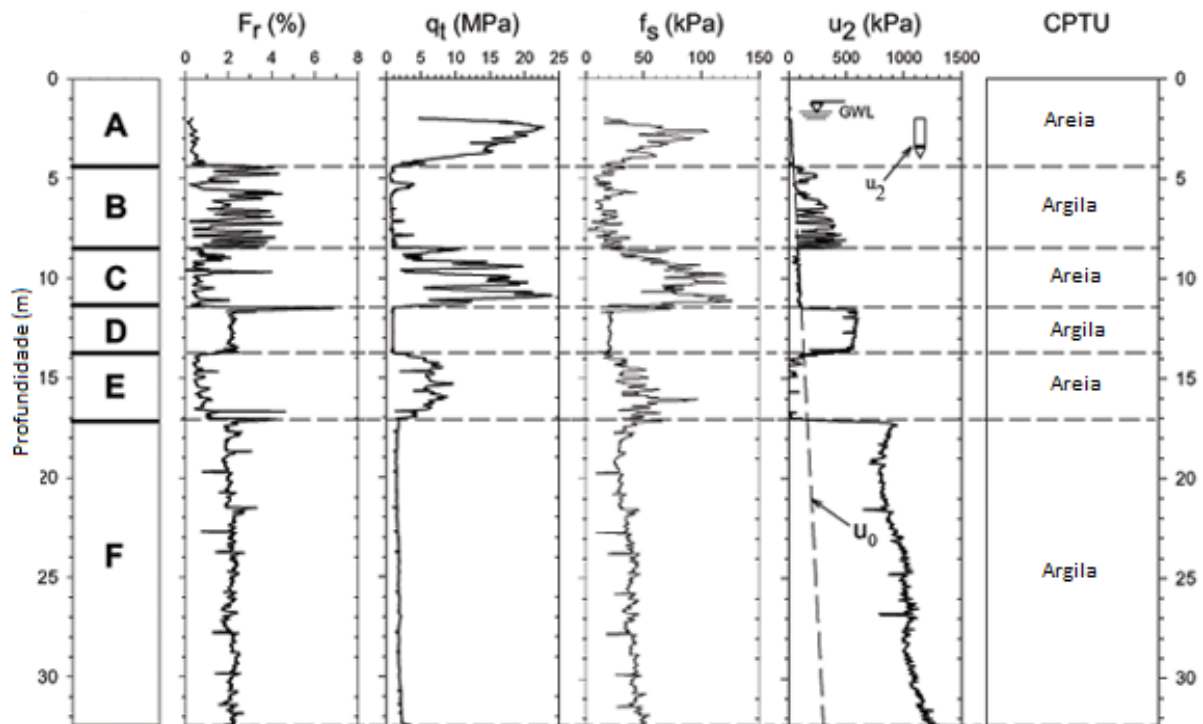
Com os dados obtidos no final do ensaio podemos então proceder ao seu tratamento, obtendo-se a resistência de ponta, o atrito lateral local e as pressões intersticiais que darão posteriormente origem a um diagrama.



**Figura 52 – Piezocone.**

Adaptado: Manual on Surface Investigations

Este ensaio estático tem o seu campo de aplicação que pode variar desde as argilas até as densas areias, não sendo adequada a sua aplicação em terrenos rochosos e gravilhas.



**Figura 53 - Diagrama de horizontes atravessado.**

Adaptado: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S000137652007000100017&script=sci\\_arttext#fig05](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S000137652007000100017&script=sci_arttext#fig05)

O CPT/CPTu permite obtenção de dados confiáveis podendo ser usado como ensaio complementar a outro tipo de ensaio.

Apresenta-se em seguida as principais vantagens e desvantagens da utilização do CPT, com e sem piezocone.

Vantagens:

- ✓ Ensaio rápido e contínuo;
- ✓ Os dados obtidos não dependem do técnico que realiza o ensaio;
- ✓ Bastante adequado a solos pouco compactos;
- ✓ Fortes bases teóricas para interpretação.

Desvantagens:

- ✓ Necessidade de alto investimento inicial;
- ✓ Não permite a colheita de amostras;
- ✓ Necessita de um operador especializado;
- ✓ Não é adequado a gravilhas e terrenos rochosos;
- ✓ Equipamento que produz elevado ruído;
- ✓ Equipamento necessita de calibração;
- ✓ Fraca capacidade de penetração se Rpa dos terrenos for média a elevada.



## **4. Trabalho experimental**

### **4.1. Objetivos e planeamento do trabalho de campo**

A ideia que presidiu à definição do trabalho de campo foi a da confrontação de resultados obtidos por meio de dois distintos métodos de prospeção geotécnica, um direto – penetrómetro dinâmico – e outro indireto – sísmica de refração.

Para esse fim foi escolhido um local (Figura 55) situado no campus do Instituto Superior de Engenharia do Porto, envolvente a um antigo edifício que tem servido de campo experimental multidisciplinar envolvendo diversas unidades de investigação do ISEP.

Foram definidos dois perfis (Figura 56 e 57), um a poente e outro a nascente do referido edifício, de desenvolvimento aproximadamente paralelo, ao longo dos quais foram executados os perfis sísmicos. Posteriormente, em cada um dos perfis foram realizadas 5 sondagens com o penetrómetro dinâmico médio, igualmente espaçadas entre si, sendo a primeira coincidente com o início do perfil e a última situada exatamente na extremidade oposta.

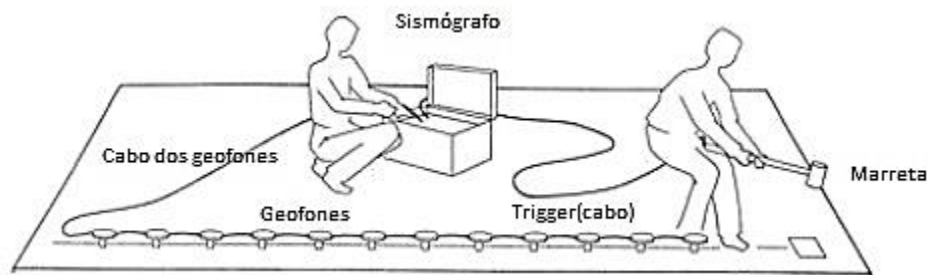
### **4.2. Execução dos perfis sísmicos**

A execução dos perfis sísmicos de refração decorreu no 21 de Maio de 2013 junto ao edifício O no campus do ISEP. Foram realizados 2 perfis sísmicos PS1 e PS2, a poente e a nascente respetivamente do já referido edifício sobre uma superfície plana e a cota constante ao longo do perfil. Cada um dos perfis tem uma extensão de 60m. Para o registo dos dados obtidos no decurso do ensaio recorreremos a um sismógrafo (Seistronix RAS-24) multicanal e um computador equipado com *software* específico para registo de dados de ensaios de refração sísmica.

Ao longo da extensão de cada perfil foram acoplados ao cabo estendido 24 geofones com um intervalo de 2,5 m entre eles.

Como fonte de energia foi usada uma marreta à qual foi ligado um gatilho (*trigger*) que por sua vez se encontrava ligado ao sismógrafo.

No decorrer do ensaio foram dados 5 tiros: um direto, 3 centrais e um inverso, sendo que em cada uma destas posições foram desferidas seis pancadas com uma marreta.



**Figura 54 - Exemplo de montagem ensaio sísmica de refração de 12 geofones.**

Adaptado: <http://www.astm.org/Standards/D5777.htm>

O tiro direto foi dado na posição em que mais tarde se realizou a sondagem S1, os 3 tiros centrais correspondem as posições S2, S3 e S4, o tiro inverso foi dado na posição da sondagem S5, isto para o perfil PS1. No caso do perfil PS2 o tiro direto foi dado na posição da sondagem S6, os 3 tiros centrais nas posições S7, S8 e S9, e o tiro inverso corresponde à posição de sondagem S10.

Para a execução do ensaio foram necessários 2 colaboradores: um colaborador para ficar junto do sismógrafo fornecendo informação necessária ao *software* de registo de dados e dar as indicações para o início de cada pancada, e o outro para desferir a emissão de energia em cada um dos locais de tiro. O intervalo entre os tiros é de aproximadamente 15 m.



**Figura 55 – Colaboradores.**

O ensaio de refração sísmica permitiu-nos a obtenção e o registo das velocidades sísmicas de propagação das ondas P através dos diferentes horizontes que são refratadas para a superfície sendo detetadas pelos geofones.

Os dados registados *in situ* foram posteriormente tratados através de *software* específico que nos forneceu um corte transversal ao longo dos 60 m de extensão de cada perfil sísmico.

A partir destes cortes transversais aos quais chamamos PS1- Figura 56 e PS2 – Figura 57 é-nos possível visualizar a profundidade das interfaces e espessura de cada horizonte existente, a sua extensão ao longo do perfil, e distinguir através da diferente escala de cores a velocidade de propagação das ondas sísmicas P nesse mesmo estrato.

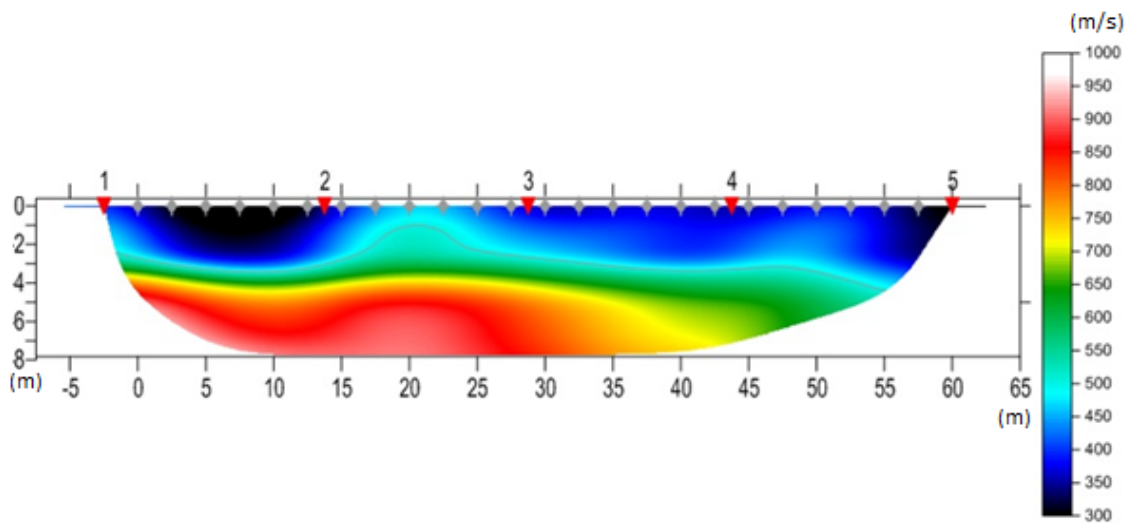


Figura 56 - Perfil sísmico PS1.

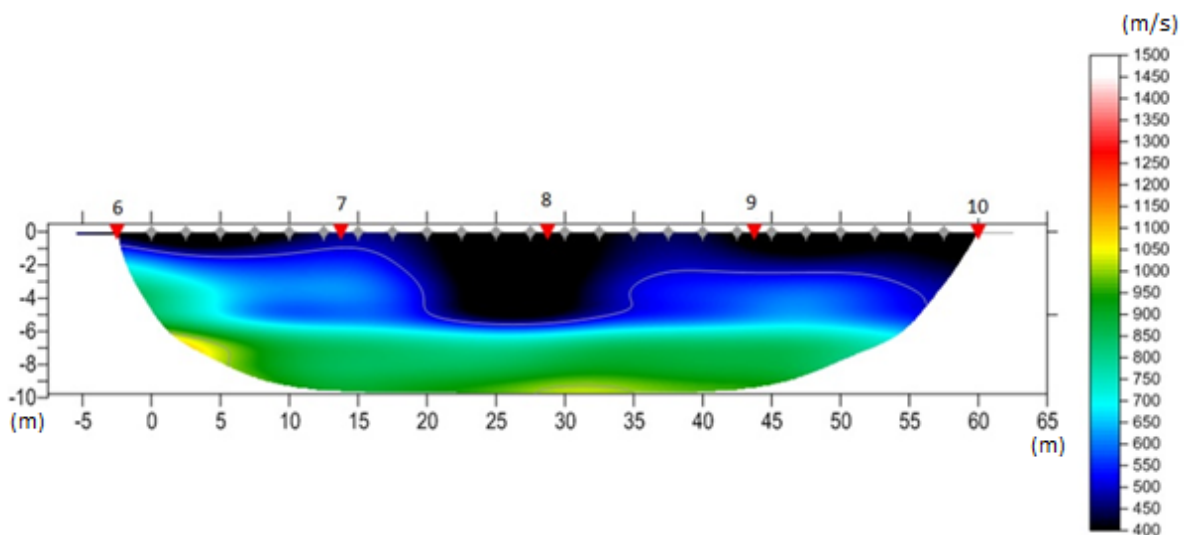


Figura 57 - Perfil sísmico PS2.

Conhecida a profundidade dos diferentes horizontes bem como as respetivas velocidades sísmicas ser-nos-á possível indicar, embora com alguma ressalva, os locais e a profundidade a que se

encontram os estratos que oferecem maior resistência de escavabilidade e/ou ripabilidade e indicar os equipamentos que melhor se adequam a esta tarefa fazendo um cruzamento da velocidade de propagação obtida com ábacos do respectivo equipamento.

#### 4.3. Execução das sondagens mecânicas

Os trabalhos de campo relativos à prospeção mecânica foram realizados nos dias 25 de Maio e 5 de Junho de 2013, e consistiram na realização de 10 ensaios (S1 a S10) de Penetração Dinâmica Média (PDM), para caracterização das capacidades resistentes do terreno.



Figura 58 - Vista Aérea do local implantação

A localização de cada um dos ensaios pode ser consultada na figura 59.

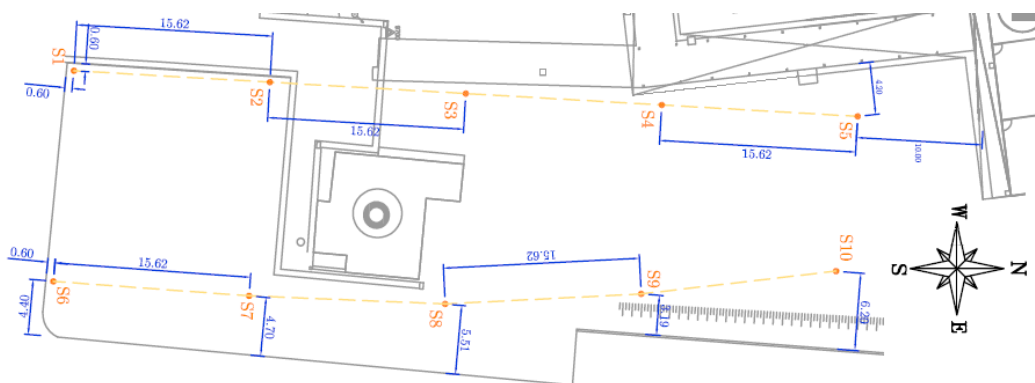


Figura 59 – Planta do local onde foi realizada a campanha

Os ensaios de penetração dinâmica, que foram realizados no estricto cumprimento do estabelecido pela norma EN ISO 22476-2:2003, consistem na cravação vertical no terreno, por percussão, de uma ponteira cônica de aço, colocada na extremidade de uma haste metálica.

É medida a resistência oferecida à penetração desenvolvida na ponteira, permitindo avaliar o grau de compactação dos terrenos, concluindo-se acerca da resistência à rotura e da deformabilidade do solo.

Na presente campanha, com o intuito de reduzir ao mínimo a mobilização do atrito lateral ao longo do contacto solo/varas, adotou-se a utilização de uma ponteira cónica com diâmetro base superior ao das varas. As pancadas são aplicadas através da queda, a altura constante, e a intervalos de tempo regulares de uma massa metálica.

A grandeza – Resistência Dinâmica Aparente (Rda) – é determinada a partir da utilização da fórmula dos holandeses:

$$Rda = (n/a) \left( \frac{M^2 h}{S(M + p)} \right)$$

**Equação 20 - Resistência dinâmica aparente.**

Em que:

n= número de pancadas (adimensional)

a= penetração em (cm)

M= massa do pilão (em Kg)

h= altura de queda do pilão (em cm)

S= secção da ponteira (em cm<sup>2</sup>)

M+p= peso das varas + batente e guia (em Kg)

Não obstante a norma EN ISO 22476-2:2003 estabelecer que o ensaio deve ser interrompido após 50 pancadas consecutivas sem que se dê a progressão de um troço de 10cm de vara, é prática do LGMC|ISEP trabalhar com uma maior margem de segurança e, nesse sentido, dar como concluído o ensaio apenas após duas séries sucessivas de 60 pancadas sem que haja progressão.

Importa ainda acrescentar que a experiência de campo nos permite avaliar (sem grau absoluto de certeza) se o motivo do impedimento da progressão está relacionado com a presença de um bloco rochoso ou com o facto de se atingir o “firme”, motivo pelo qual em determinados pontos se insiste no ensaio mesmo após atingidas as duas séries sucessivas de 60 pancadas.

Em anexo são apresentados os boletins relativos à totalidade dos ensaios executados, bem como os respetivos gráficos tradutores da evolução da capacidade de resistência do solo à penetração em profundidade.



## 5. Análise crítica dos resultados

A área onde foram realizados os ensaios de campo é uma área de construção e ajardinada, em que é possível à vista desarmada visualizar alguns afloramentos rochosos. Nesta área foi também possível identificar a existência de infraestruturas enterradas de água para rega, eletricidade, entre outras.



Figura 60 - Infraestruturas existentes

Foram então realizados dois perfis sísmicos de refração PS1 e PS2 bem como 10 sondagens com o penetrómetro dinâmico médio, uma na posição de cada tiro desferido ao longo dos perfis sísmicos. Através do relacionamento dos dados obtidos tentaremos identificar a localização da camada considerada de suporte, do *bedrock* bem como a maior ou menor capacidade resistente que os estratos oferecem à escavabilidade e à ripabilidade.

Observando os perfis sísmicos verificamos a existência de diferentes horizontes correspondendo a cada um deles uma diferente velocidade sísmica, a qual vai tendo um valor cada vez mais elevado à medida que aumenta a profundidade. Então significa que diminui a possibilidade de ripabilidade implicando, conseqüentemente, uma maior capacidade de resistência do material.

Relativamente aos dados obtidos do ensaio DPM observamos que existem locais superficiais com elevada capacidade de resistência à penetração enquanto que em outros esta capacidade de resistência se encontra a uma profundidade considerável, podendo ultrapassar os 4 m.

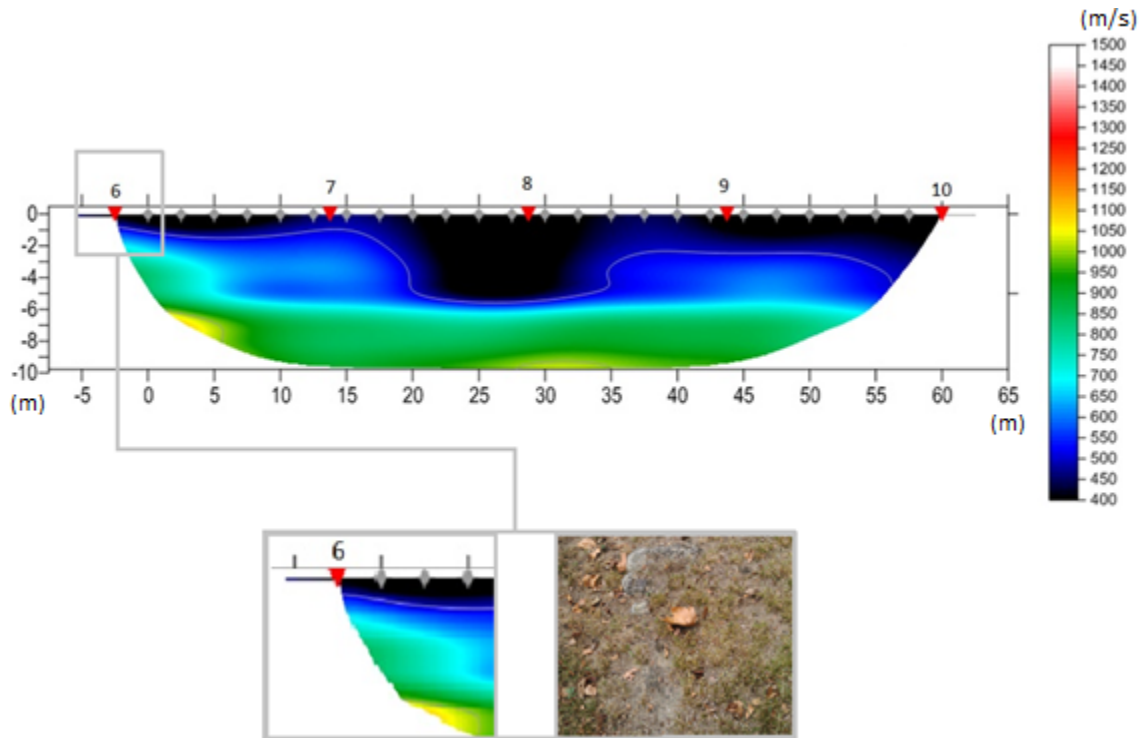
Façamos agora uma análise conjunta dos dados. Começemos pelo perfil PS1 o qual inclui as sondagens S1 a S5.

Entre a sondagem 1 e 2, Figura 56 verificamos de acordo com o DPM que o horizonte que procuramos se encontra a uma profundidade de 0,70 m, neste local temos velocidades sísmicas na ordem dos 350 a 400 m/s. No entanto, ao analisar a sondagem 3, o primeiro horizonte que encontramos tem uma velocidade sísmica na ordem dos 400 e 450 m/s não oferecendo qualquer resistência à penetração até à profundidade de 2,60m.

Tentando interpretar os dados obtidos, podemos arriscar a hipótese de que entre a sondagem 1 e 2 possam existir pequenos afloramentos rochosos pontuais que estejam descaracterizados por solos de recobrimento e terra vegetal. Ainda na sondagem 3 verificamos, através dos perfis sísmicos, que a velocidade aumenta com a profundidade, o mesmo não acontece com a resistência à penetração, ou seja, para profundidades entre os 5 e os 7m a resistência à penetração decresce bastante, e só a partir dos 7 m encontramos novamente um horizonte com capacidade resistente; não havendo coerência entre os dois ensaios.

Na sondagem 4 encontramos uma possível correspondência entre os dados obtidos através da prospeção sísmica e aqueles fornecidos pelo DPM, isto porque aos 2,60m de profundidade temos 72 pancadas e a interface entre a 1.º e 2.º horizonte e aos 2,80m temos 120 pancadas e a interface entre a 2.º e 3.º horizonte existentes naquele ponto. Estamos a falar de velocidades sísmicas a variar entre os 400 e 500 m/s. Este é um troço em que, para além de se evidenciar uma correspondência lógica entre estes dois métodos de prospeção geotécnica, é possível arriscar uma relação quantitativa. Se voltarmos à sondagem 3 verificamos que é aos 2,60m que ocorrem 60 pancadas que é mais ou menos a interface entre a 1.º e 2.º horizonte.

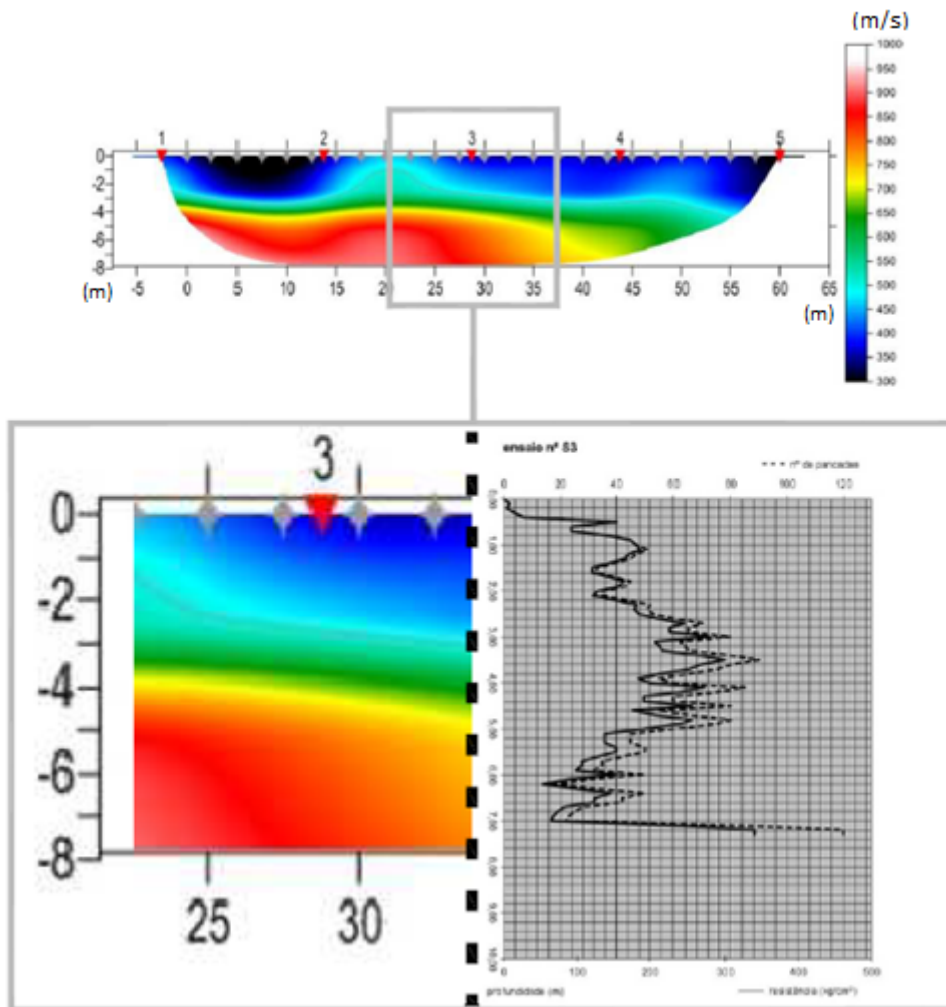
Passemos então ao perfil sísmico PS2, Figura 57. Na posição que se refere à sondagem 6 não foi executado DPM, uma vez que neste local existe um afloramento rochoso visível. No local de sondagem 7 encontramos o horizonte resistente de acordo com o DPM a uma profundidade de 0,90m que corresponde a horizontes de velocidade a variar entre 450 e 600 m/s. No caso de existir uma correspondência entre os valores da sísmica e os do penetrómetro, o que na prática sabemos não ser inequívoca, significa então que com um número de pancadas de 120 e velocidades sísmicas no intervalo dos 400 e 600 m/s é perfeitamente possível que este seja o horizonte resistente. Existe, então, a possibilidade de correspondência entre os dados obtidos nos dois ensaios.



**Figura 61 – Afloramento no local da sondagem 6**

Na sondagem 8, à semelhança do que acontece na sondagem 3, existe uma falta de correspondência entre o perfil de sísmica e o DPM. De acordo com o perfil da sísmica, existe um horizonte com extensão e profundidade consideráveis de velocidade relativamente baixa, mas comparando com o DPM o horizonte com elevada capacidade de resistência encontra-se bastante superficial, isto é, a 1,70m de profundidade. Uma possível explicação é que tenha havido a necessidade de nivelamento do terreno para a cota que permitisse a construção do Edifício O, agora existente; ou seja, poderia existir uma depressão naquele local a qual teria de ser preenchida possivelmente recorrendo a terrenos de empréstimo para que pudesse ficar nivelada para posteriormente se construir o edifício. Os solos de empréstimo poderão não ser isentos de pequenos blocos rochosos que durante o aterro foram sendo colocados aleatoriamente juntamente com o restante material de preenchimento. Quando executamos a sondagem 8 provavelmente o que encontramos foi um desses blocos e não o horizonte de capacidade resistente à penetração.

Relativamente à sondagem 9, de acordo com o observado no perfil sísmico, o horizonte com a resistência a penetração pretendida deveria encontrar-se a pequena profundidade, sensivelmente a 1,5m, que é a profundidade a que encontramos velocidades sísmicas na ordem dos 450 a 500m/s. Contudo, de acordo com o DPM, este horizonte localizar-se-á a partir dos 5,0m de profundidade.



**Figura 62 - Análise comparativa de pormenor entre um perfil sísmico e um perfil de resistência, obtido a partir da prospeção mecânica.**

Perante a análise cuidada dos resultados obtidos e o cruzamento dos mesmos sabemos que estamos na presença de terrenos com capacidade de suporte que nos permitiriam a construção de pequenos e médios edifícios sem termos de recorrer a uma sobrecavação para substituição dos mesmos por solos de empréstimos ou a qualquer outro tipo de tratamento que nos garantissem a capacidade de suporte necessária a esta mesma construção. Por outro lado, as velocidades sísmicas obtidas permitem-nos identificar a não necessidade de recurso a explosivos no caso de ser necessário proceder a escavação para a cota de fundação prevista, pois existem no mercado equipamentos mecânicos capazes de remover os materiais com as velocidades sísmicas identificadas nos perfis.

Pode ainda observar-se, através do cruzamento de dados, que horizontes com a mesma velocidade sísmica podem ou não apresentar a mesma capacidade de resistência à penetração, o

que nos pode levar a pensar que apesar de ser o mesmo horizontes pode existir algum fator na sua constituição que leve a esta ocorrência, ou que o tão desejado estabelecimento de uma correspondência quantitativa entre os valores obtidos pelos dois tipos de prospeção/equipamentos em estudo é algo que não pode ser definido de forma inequívoca.



## 6. Conclusões e perspectivas futuras

Após o cruzamento dos dados obtidos a partir da sísmica de refração e do penetrómetro dinâmico médio, verificamos que existem muitas divergências entre ambos. Estas divergências encaminham-nos para elaboração e colocação de muitas hipóteses as quais deverão ser estudadas e tratadas com algum cuidado. Para que se possa dar resposta às incertezas que surgiram com a observação dos dados seria necessário realizar no local outros ensaios de campo que nos permitissem aferir com mais rigor a informação pretendida.

Algumas conclusões poderão no entanto ser arriscadas, pois em alguns dos furos foi encontrada correspondência entre os dados obtidos entre os dois tipos de prospeção. Uma hipótese que nos permitimos arriscar é a de que, no penetrómetro, um valor em torno das 60 pancadas corresponderá à margem superior de uma interface entre um primeiro horizonte, de material alterado/desagregado, enquanto que um valor em torno das 120 pancadas (a partir do qual não é possível fazer avançar a ponteira), corresponderá à margem inferior da tal interface entre o referido horizonte e um outro, menos alterado, que apresenta já valores de resistência satisfatórios à edificação de obras de pequeno e médio porte.

Esta interface será, eventualmente, a transição entre terrenos escaváveis e terrenos ripáveis. No caso dos valores obtidos pela prospeção sísmica, são velocidades que se situam entre os 450 e os 650m/s.

Perante a evidência da impossibilidade de dar resposta a todas as dúvidas que surgiram a partir da observação dos resultados dos ensaios, e uma vez que as achamos bastante pertinentes e na tentativa de as esclarecer, poderiam ser realizados ensaios complementares, tais como a abertura de uma ou duas sanjas, em especial nas zonas correspondentes a S3 e S8.

Recorrendo ao equipamento disponível, poder-se-ia realizar um ou dois perfis transversais aos efetuados, recorrendo quer ao sismógrafo quer ao penetrómetro dinâmico médio.

No caso de haver possibilidade de recorrer a outros equipamentos, seria importante utilizar uma máquina de potência mais elevada, tal como um penetrómetro dinâmico pesado, que nos permitisse atingir o *bedrock*. Ensaios SPT, poderiam ser também bastante esclarecedores e complementares. Uma possibilidade mais ambiciosa seria a realização de uma ou mais sondagens carotadas e sujeitá-las também a ensaios de laboratório.



## 7. Bibliografia e outras fontes de informação

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bell, F.G. (2004). Engineering Geology and Construction. London: Spon Press.

Bieniawski, Z.T., 1974. Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling. Proceedings of the Third International Congress on Rock Mechanics, vol. 11A. International Society of Rock Mechanics, Denver, pp. 27–32.

Capper Leonard P., Cassie Fisher W. (1976). The mechanics of Engineering Soils. Sixth[SI]Edition. John Wiley & Sons, New York.

Cardoso, R. (2009). Geotecnia e Fundações, Arquitectura – Dos sólidos aos solos. Universidade Técnica de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Lisboa.

Caterpillar (2008). Caterpillar Performance Handbook Edition (38th ed). Peoria, Illinois, USA: CAT publication, Caterpillar Inc.

C. R. I. Clayton, M. C. Matthews and N. E. Simons (1982). Site Investigation – Second Edition. Department of Civil Engineering, University of Surrey.

De Ruiter J., Editor (1988). Penetration testing 1988 – Volume 1. A.A. Balkema Publishers.

Franklin, J.A., Broch, E., and Walton, G., (1971), Logging the mechanical character of rock: Trans. Ins. Of Mining and Metallurgy, Sec. A : 1-9.

ISRM (1981). Rock Characterisation Testing and Monitoring, ISRM Suggested Methods. Commission on Testing Methods, Int. Society for Rock Mechanics. Brown E.T. (ed) Pergamon Press Ltd. Oxford.

Kearey Philip, Brooks Michael, Hill Ian (2002). An Introduction to Geophysical Exploration – Third Edition. Blackwell Science.

Look Burt (2007). Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables. Taylor & Francis Group, London, UK.

Lowrie, William (2007). Fundamentals of Geophysics – Second Edition. Cambridge University Press.

M. Das Braja (2008) Fundamentals of Geotechnical Engineering – Third Edition. Chris Carson.

M. Das Braja (2006). Principles of Geotechnical Engineering – Fifth Edition. Thomson.

M. Das Braja, Ramana G.V. (1983). Principles of Soil Dynamics – Second Edition. Elsevier Science Publishing Company.

Machado, S., & Machado, M. (1997). Mecânica dos Solos I – Conceitos Introdutórios. Universidade Federal da Bahia, Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais, Bahia.

Milsom John (2003). Field Geophysics – The Geological Field Guide Series. Third Edition. John Wiley & Sons.

Mitchel, J.K. (1993). Fundamentals of Soil Behavior (2<sup>nd</sup> ed.). John Wiley & Sons, New York.

Pettifer, G.S., and Fookes, P.G. (1994). A Revision of the Graphical Method for Assessing the Excavatability of Rock: Quarterly Journal of Engineering Geology, (Vol. 27): 45-164.

Reynolds John M. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley & Sons.

Singh, R.N., Denby, B., Egretli, I., 1987. Development of a new rippability index for coal measures excavations. Proceedings of the 26 Z. Gurocak et al. / Engineering Geology 96 (2008) 17–2728th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Tucson, AZ. Balkema, Boston, pp. 935–943.

Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E (1990). Applied Geophysics – Second Edition. Cambridge University Press.

Terzaghi K., Peck R.B. & Mesri G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice. 3<sup>rd</sup> Edition, Wiley- Interscience.

W.Mayne Paul, R.Christopher Barry, Dejong Jason (2001). Manual on Surface Investigations. Federal Highway Administration Washington, DC.

Weaver J M (1975) Geological factors significant in the assessment of rippability, Civil Engineer in South Africa 17 pp 313-316

#### **REFERÊNCIAS DA INTERNET**

[http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/14111/14111\\_3.PDF](http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/14111/14111_3.PDF) Consultado em 11.10.2012

<http://estugeofisica.scienceontheweb.net/about-geophysics/desarrollo-de-la-geofisica.html> Consultado em 12.11.2012

<http://ingenieriageofisica.com/la-ciencia-geofisica/> Consultado em 12.11.2012

<http://www.inpres.gov.ar> Consultado em 12.11.2012

<http://bibliotecadeinvestigaciones.wordpress.com> Consultado 15.11.2012

<http://domingos.home.sapo.pt/estruterra> Consultado 11.03.2013

<http://www.astm.org/Standards/D5777.htm> Consultado 25.05.2013

<Http://tle.geoscienceworld.org/content/24/Supplement/S46.full> Consultado 19.06.2013

[http://virtualmuseum.seg.org/bio\\_frank\\_rieber.html](http://virtualmuseum.seg.org/bio_frank_rieber.html) Consultado 24.06.2013

<http://galitzin.mines.edu> Consultado 11.07.2013

<http://www.enviroscan.com> Consultado 11.07.2013

<http://bibliotecadeinvestigaciones.wordpress.com> Consultado 11.10.2012

<http://domingos.home.sapo.pt/estruterra> Consultado 11.03.2013

<Http://tle.geoscienceworld.org/content/24/Supplement/S46.full> Consultado 19.06.2013

<http://www.enviroscan.com> Consultado 11.07.2013

<http://www.pantojaindustrial.com.br> Consultado 04.08.2013

<ftp://geologyftp.gg.uwyo.edu> Consultado 09.08.2013

<http://fisicaqui.blogspot.pt> Consultado em 10-08-2013

<http://www.buildingresearch.com.np/services/gi/gi2.php> consultado 12.08.2013



# **ANEXOS**

---

**Planta de localização**  
**Boletins de ensaio DPM**  
**Perfis sísmicos de refração**  
**Tabelas de ripabilidade**



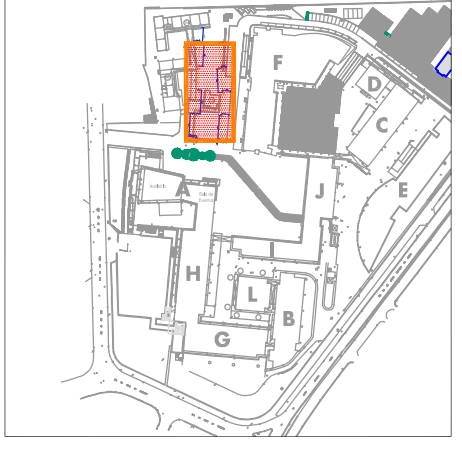
# **ANEXOS I**

---

**Planta de localização**



Localização das sondagens



- Sondagens (Sn)
- Perfis Sísmicos (PSn)



**IPP - INSTITUTO POLITÉCNICO DO PORTO**

**ISEP - INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO**

Tese de Mestrado - 2012/2013

Rosa Vinagre nº 1930290

Tema Tese:	Análise comparativa de métodos de prospeção direta e indireta na determinação do topo rochoso para fundações	Projectou:	Rosa Vinagre	Ass:	
Título do desenho:	Planta de localização dos perfis sísmicos PS1/PS2 e sondagens 1 a 10	Desenho n.º:	TM.RV.01	Data:	Setembro.2013
Local dos trabalhos:	Instalações do ISEP junto Pavilhões M, N e O	Desenhou:	Rosa Vinagre	Escala:	1/500



# **ANEXOS II**

---

**Boletins de ensaio DPM**









160 ANOS  
DESDE 1852

isep Instituto Superior de Engenharia do Porto

ENSAIOS DE CAMPO - DPM

Trabalho de Mestrado de Rosa Vinagre

Realizado por:

(R. Pinheiro)

(J.P. Meixedo)

Ensaio nº

S3

PENETRAÇÃO DINÂMICA MÉDIA (DPM 30)

29 Mai 2013

Prof. (m)	Nº de Varas	Nº de Golpes N	K	Rda N x K (kg/cm²)	Tensões Admissíveis (kg/cm²)	Prof. (m)	Nº de Varas	Nº de Golpes N	K	Rda N x K (kg/cm²)	Tensões Admissíveis (kg/cm²)
0,10	1	2	3,837	7,67	0,25	10	6	45	3,060	137,70	4,54
20	1	1	3,837	3,84	0,13	20	6	45	3,060	137,70	4,54
30	1	4	3,837	15,35	0,51	30	6	45	3,060	137,70	4,54
40	1	7	3,837	26,86	0,89	40	6	50	3,060	153,00	5,05
50	1	40	3,837	153,48	5,06	50	6	50	3,060	153,00	5,05
60	1	24	3,837	92,09	3,04	60	6	42	3,060	128,52	4,24
70	1	24	3,837	92,09	3,04	70	6	35	3,060	107,10	3,53
80	1	38	3,837	145,81	4,81	80	6	35	3,060	107,10	3,53
90	1	45	3,837	172,67	5,70	90	6	32	3,060	97,92	3,23
1,00	1	47	3,837	180,34	5,95	6,00	6	50	3,060	153,00	5,05
10	2	51	3,652	186,25	6,15	10	7	30	2,941	88,23	2,91
20	2	47	3,652	171,64	5,66	20	7	18	2,941	52,94	1,75
30	2	45	3,652	164,34	5,42	30	7	32	2,941	94,11	3,11
40	2	39	3,652	142,43	4,70	40	7	50	2,941	147,05	4,85
50	2	33	3,652	120,52	3,98	50	7	42	2,941	123,52	4,08
60	2	33	3,652	120,52	3,98	60	7	42	2,941	123,52	4,08
70	2	40	3,652	146,08	4,82	70	7	28	2,941	82,35	2,72
80	2	45	3,652	164,34	5,42	80	7	25	2,941	73,53	2,43
90	2	43	3,652	157,04	5,18	90	7	23	2,941	67,64	2,23
2,00	2	35	3,652	127,82	4,22	7,00	7	22	2,941	64,70	2,14
10	3	35	3,483	121,91	4,02	10	8	85	2,831	240,64	7,94
20	3	44	3,483	153,25	5,06	20	8	120	2,831	339,72	11,21
30	3	52	3,483	181,12	5,98	7,30	8	120	2,831	339,72	11,21
40	3	51	3,483	177,63	5,86						
50	3	53	3,483	184,60	6,09						
60	3	60	3,483	208,98	6,90						
70	3	70	3,483	243,81	8,05						
80	3	65	3,483	226,40	7,47						
90	3	65	3,483	226,40	7,47						
3,00	3	80	3,483	278,64	9,20						
10	4	62	3,330	206,46	6,81						
20	4	64	3,330	213,12	7,03						
30	4	65	3,330	216,45	7,14						
40	4	80	3,330	266,40	8,79						
50	4	90	3,330	299,70	9,89						
60	4	80	3,330	266,40	8,79						
70	4	75	3,330	249,75	8,24						
80	4	65	3,330	216,45	7,14						
90	4	55	3,330	183,15	6,04						
4,00	4	60	3,330	199,80	6,59						
10	5	85	3,189	271,07	8,95						
20	5	75	3,189	239,18	7,89						
30	5	60	3,189	191,34	6,31						
40	5	60	3,189	191,34	6,31						
50	5	80	3,189	255,12	8,42						
60	5	55	3,189	175,40	5,79						
70	5	65	3,189	207,29	6,84						
80	5	80	3,189	255,12	8,42						
90	5	75	3,189	239,18	7,89						
5,00	5	60	3,189	191,34	6,31						













LABORATÓRIO GEOTÉCNICA E  
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

160 ANOS  
DESDE 1852

isep Instituto Superior de  
Engenharia do Porto

ENSAIOS DE CAMPO - DPM

Trabalho de Mestrado de Rosa Vinagre

Realizado por:

(R. Pinheiro)

(J.P. Meixedo)

Ensaio nº S9

PENETRAÇÃO DINÂMICA MÉDIA (DPM 30)

5 Jun 2013

Prof. (m)	Nº de Varas	Nº de Golpes N	K	Rda N x K (kg/cm <sup>2</sup> )	Tensões Admissíveis (kg/cm <sup>2</sup> )	Prof. (m)	Nº de Varas	Nº de Golpes N	K	Rda N x K (kg/cm <sup>2</sup> )	Tensões Admissíveis (kg/cm <sup>2</sup> )
0, 10	1	1	3,837	3,84	0,13	10	6	55	3,060	168,30	5,55
20	1	2	3,837	7,67	0,25	20	6	62	3,060	189,72	6,26
30	1	10	3,837	38,37	1,27	5, 30	6	120	3,060	367,20	12,12
40	1	4	3,837	15,35	0,51						
50	1	14	3,837	53,72	1,77						
60	1	7	3,837	26,86	0,89						
70	1	2	3,837	7,67	0,25						
80	1	2	3,837	7,67	0,25						
90	1	11	3,837	42,21	1,39						
1, 00	1	10	3,837	38,37	1,27						
10	2	11	3,652	40,17	1,33						
20	2	19	3,652	69,39	2,29						
30	2	33	3,652	120,52	3,98						
40	2	45	3,652	164,34	5,42						
50	2	25	3,652	91,30	3,01						
60	2	28	3,652	102,26	3,37						
70	2	26	3,652	94,95	3,13						
80	2	27	3,652	98,60	3,25						
90	2	25	3,652	91,30	3,01						
2, 00	2	27	3,652	98,60	3,25						
10	3	26	3,483	90,56	2,99						
20	3	24	3,483	83,59	2,76						
30	3	25	3,483	87,08	2,87						
40	3	25	3,483	87,08	2,87						
50	3	22	3,483	76,63	2,53						
60	3	18	3,483	62,69	2,07						
70	3	17	3,483	59,21	1,95						
80	3	19	3,483	66,18	2,18						
90	3	22	3,483	76,63	2,53						
3, 00	3	25	3,483	87,08	2,87						
10	4	22	3,330	73,26	2,42						
20	4	20	3,330	66,60	2,20						
30	4	32	3,330	106,56	3,52						
40	4	55	3,330	183,15	6,04						
50	4	45	3,330	149,85	4,95						
60	4	44	3,330	146,52	4,84						
70	4	40	3,330	133,20	4,40						
80	4	43	3,330	143,19	4,73						
90	4	43	3,330	143,19	4,73						
4, 00	4	46	3,330	153,18	5,05						
10	5	55	3,189	175,40	5,79						
20	5	75	3,189	239,18	7,89						
30	5	70	3,189	223,23	7,37						
40	5	65	3,189	207,29	6,84						
50	5	68	3,189	216,85	7,16						
60	5	73	3,189	232,80	7,68						
70	5	78	3,189	248,74	8,21						
80	5	60	3,189	191,34	6,31						
90	5	65	3,189	207,29	6,84						
5, 00	5	60	3,189	191,34	6,31						

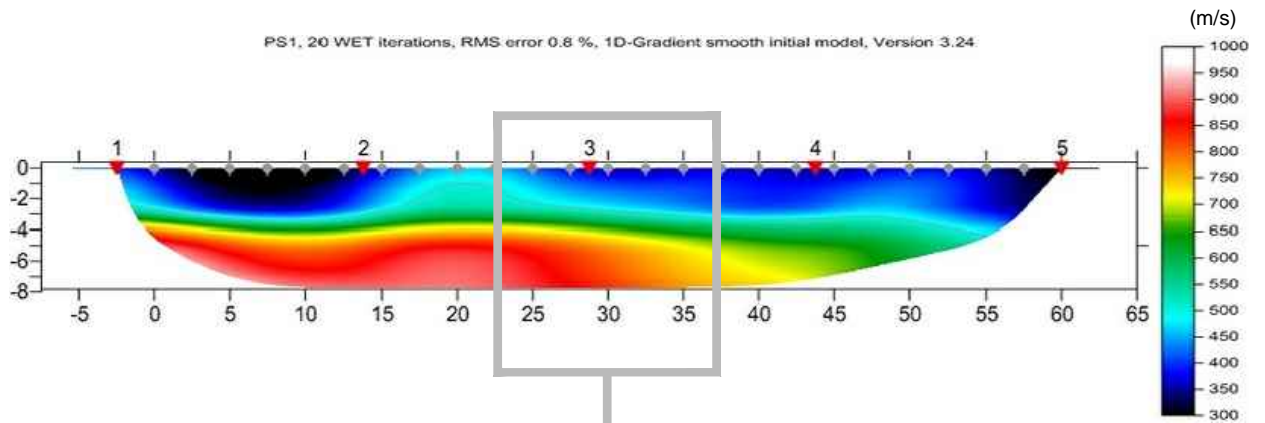


# **ANEXOS III**

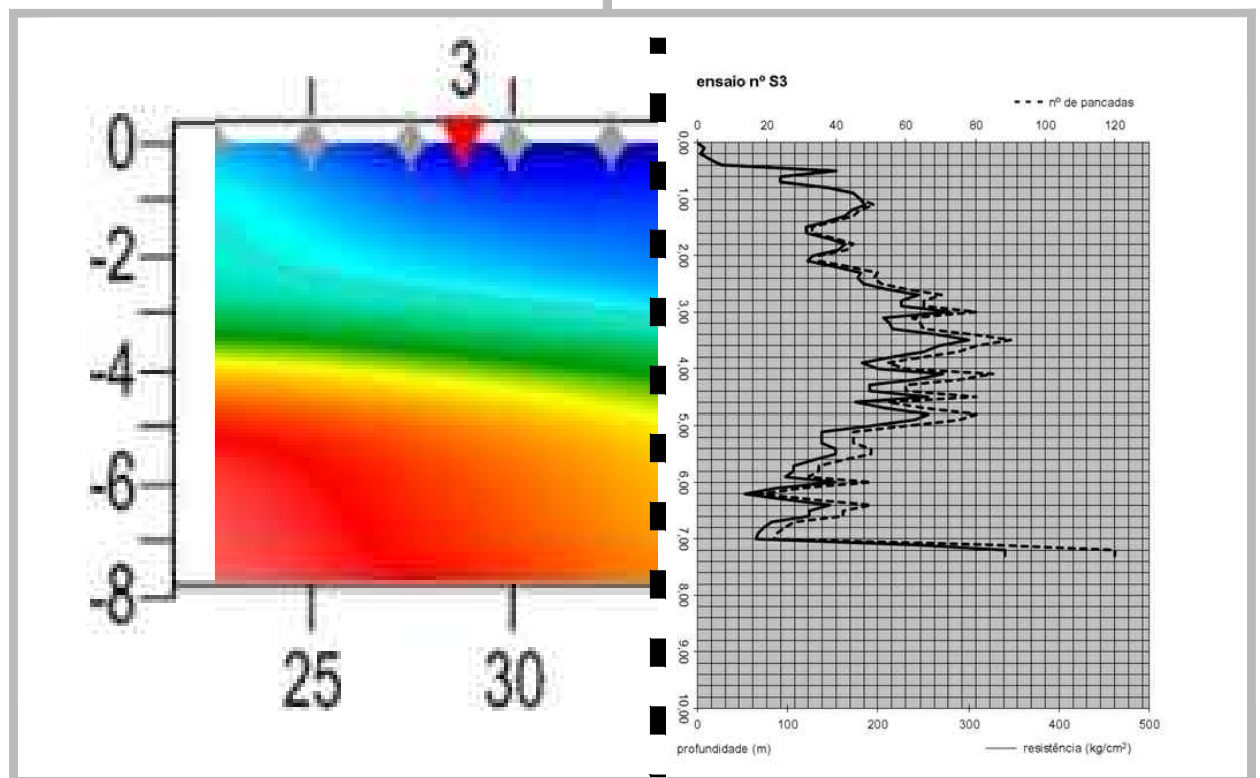
---

**Perfis sísmicos de refração**





Escala 1/500



sem escala

**IPP - INSTITUTO POLITÉCNICO DO PORTO**  
**ISEP - INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO**

Tese de Mestrado - 2012/2013  
 Rosa Vinagre nº1930290

Tema Tese: Análise comparativa de métodos de prospeção direta e indireta na determinação do topo rochoso para fundações

Projectou:  
 Rosa Vinagre

Ass:

Título do desenho: Perfil sísmico PS1 - Sondagem 3

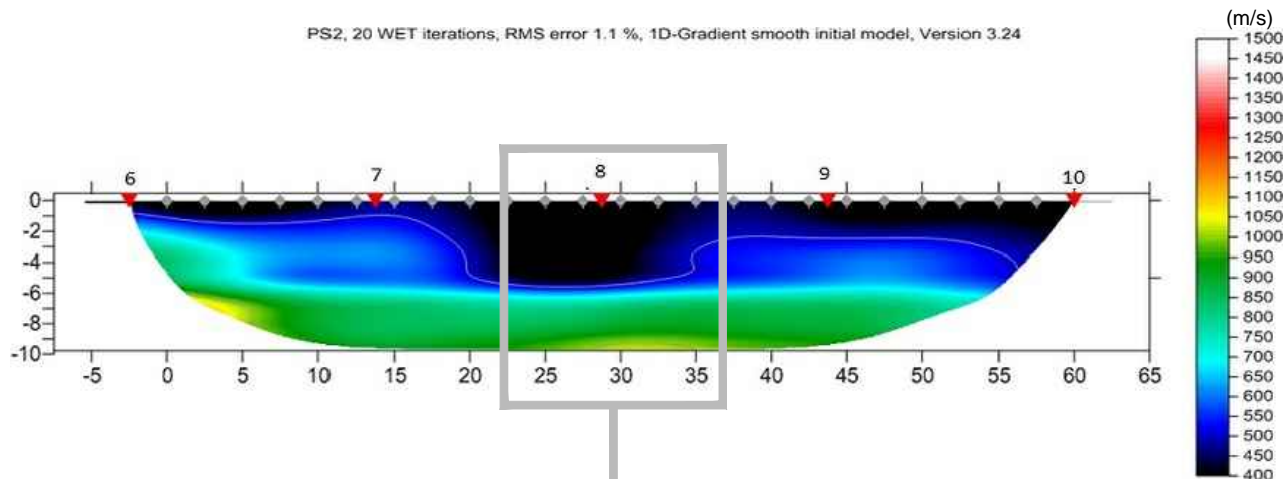
Desenho n.º:  
 TM.RV.02

Data:  
 Setembro.2013

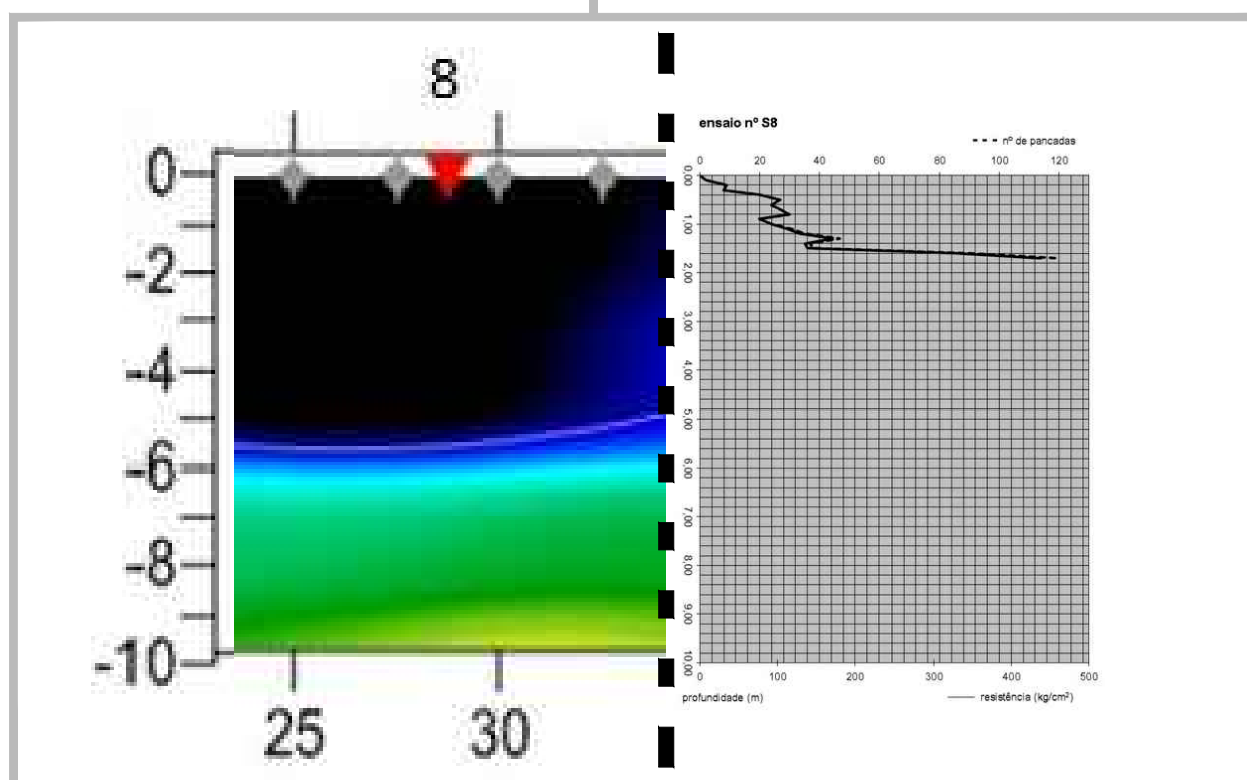
Local dos trabalhos: Instalações do ISEP junto Pavilhões M, N e O

Desenhou:  
 Rosa Vinagre

Escala:  
 como indicado



Escala 1/500



sem escala

**IPP - INSTITUTO POLITÉCNICO DO PORTO**  
**ISEP - INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO**

Tese de Mestrado - 2012/2013  
 Rosa Vinagre nº1930290

Tema Tese: Análise comparativa de métodos de prospeção direta e indireta na determinação do topo rochoso para fundações

Projectou:  
 Rosa Vinagre

Ass:

Título do desenho: Perfil sísmico PS2 - Sondagem 8

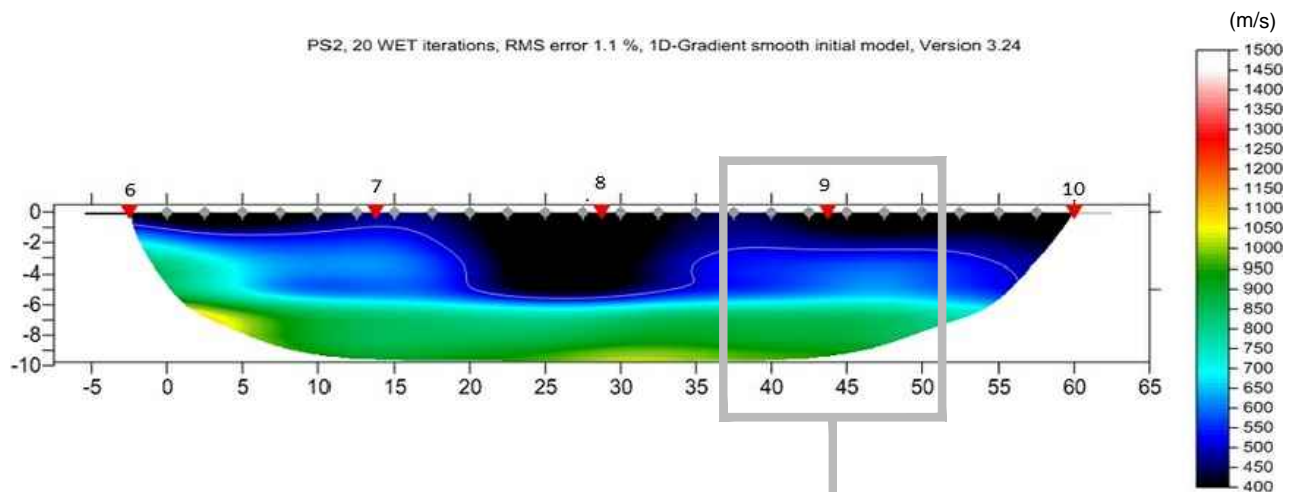
Desenho n.º:  
 TM.RV.03

Data:  
 Setembro.2013

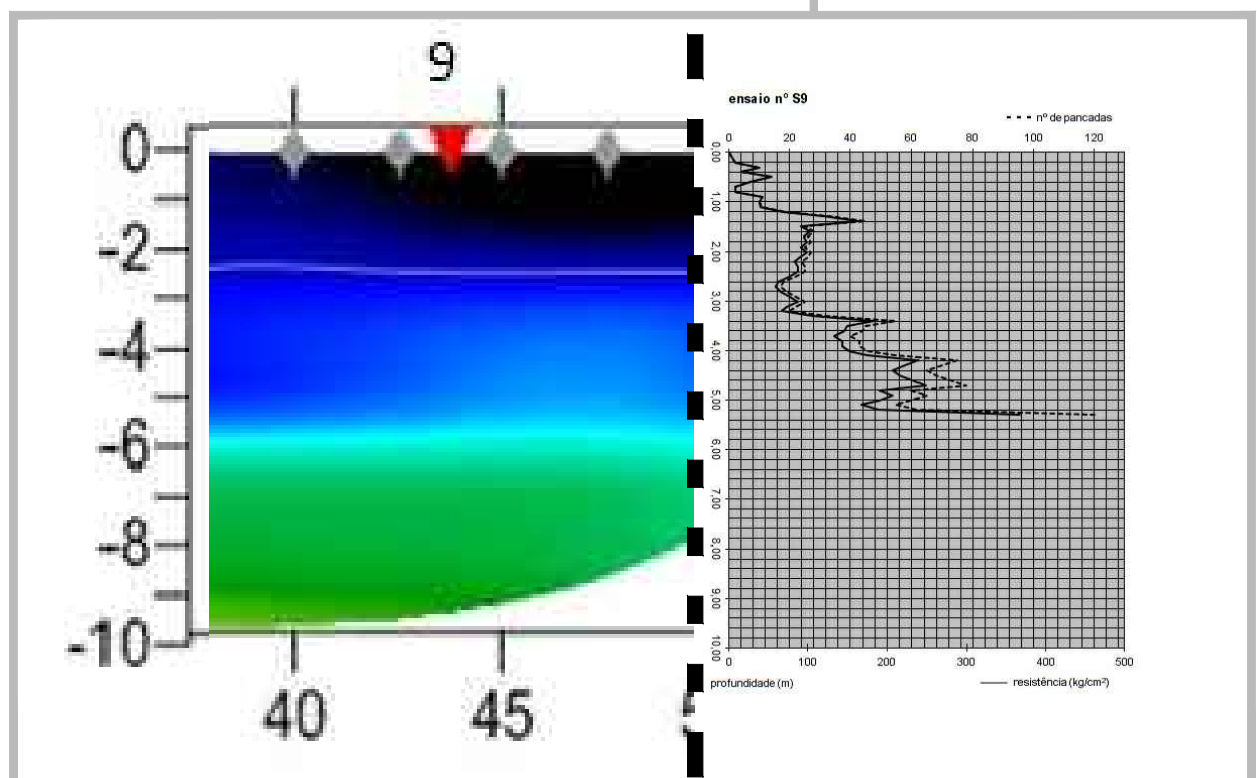
Local dos trabalhos: Instalações do ISEP junto Pavilhões M, N e O

Desenhou:  
 Rosa Vinagre

Escala:  
 como indicado



Escala 1/500



sem escala

**IPP - INSTITUTO POLITÉCNICO DO PORTO**  
**ISEP - INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO**

Tese de Mestrado - 2012/2013  
 Rosa Vinagre nº1930290

Tema Tese: Análise comparativa de métodos de prospeção direta e indireta na determinação do topo rochoso para fundações

Projectou:  
 Rosa Vinagre

Ass:

Título do desenho: Perfil sísmico PS2 - Sondagem 9

Desenho n.º:  
 TM.RV.04

Data:  
 Setembro.2013

Local dos trabalhos: Instalações do ISEP junto Pavilhões M, N e O

Desenhou:  
 Rosa Vinagre

Escala:  
 como indicado



# **ANEXOS IV**

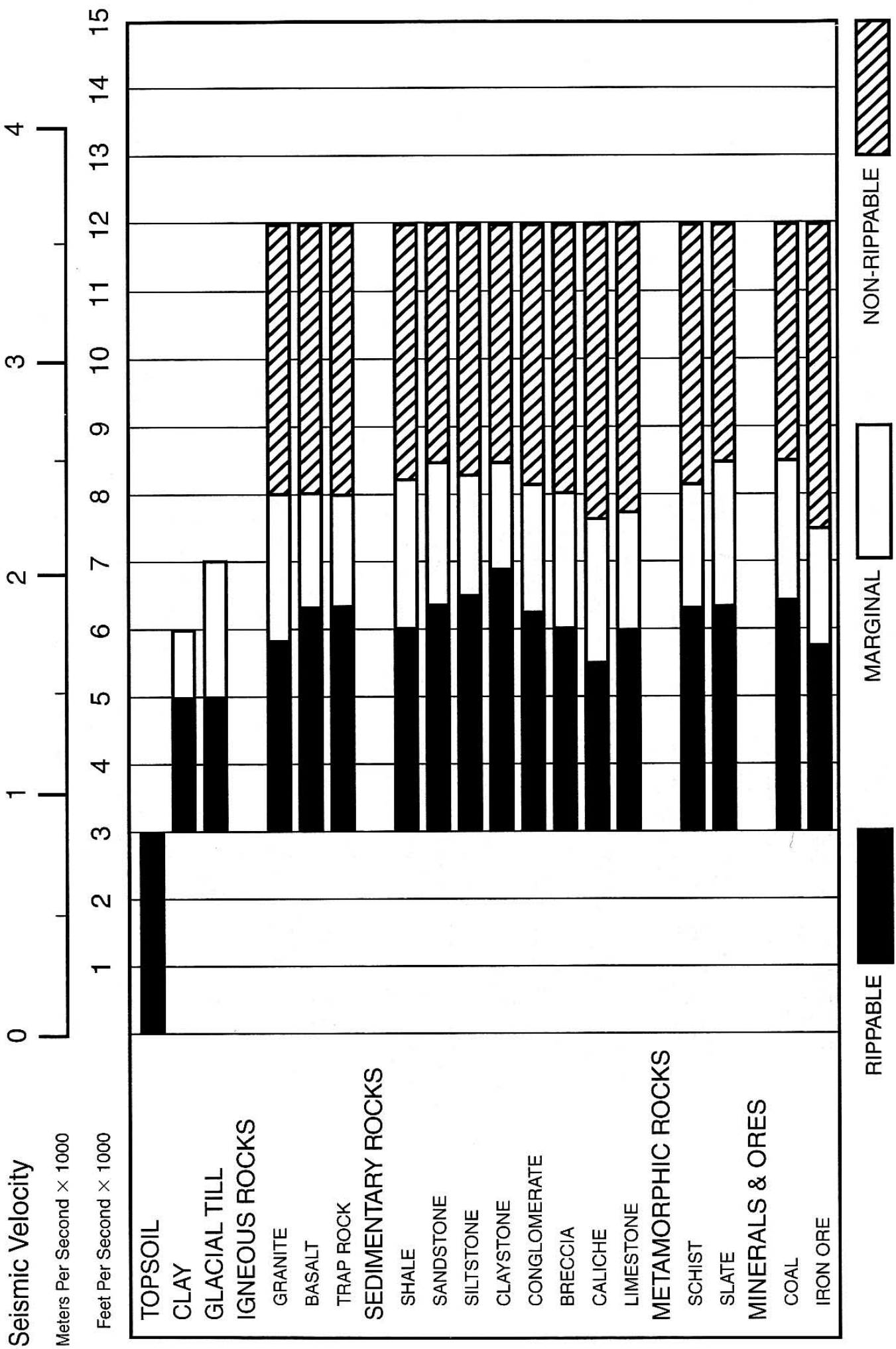
---

**Tabelas de ripabilidade**



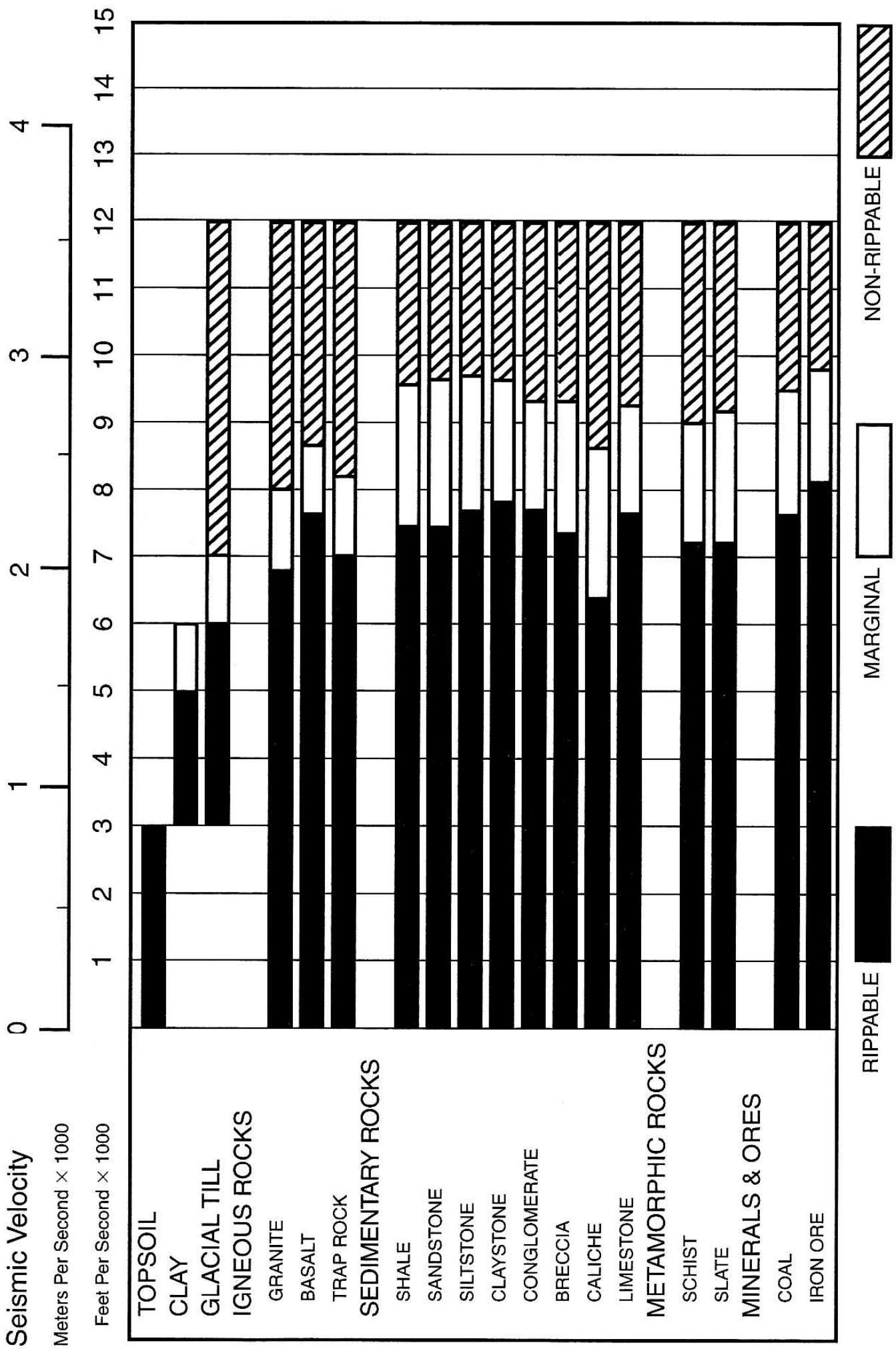
# D8R/D8R Series II

- Multi or Single Shank No. 8 Ripper
- Estimated by Seismic Wave Velocities



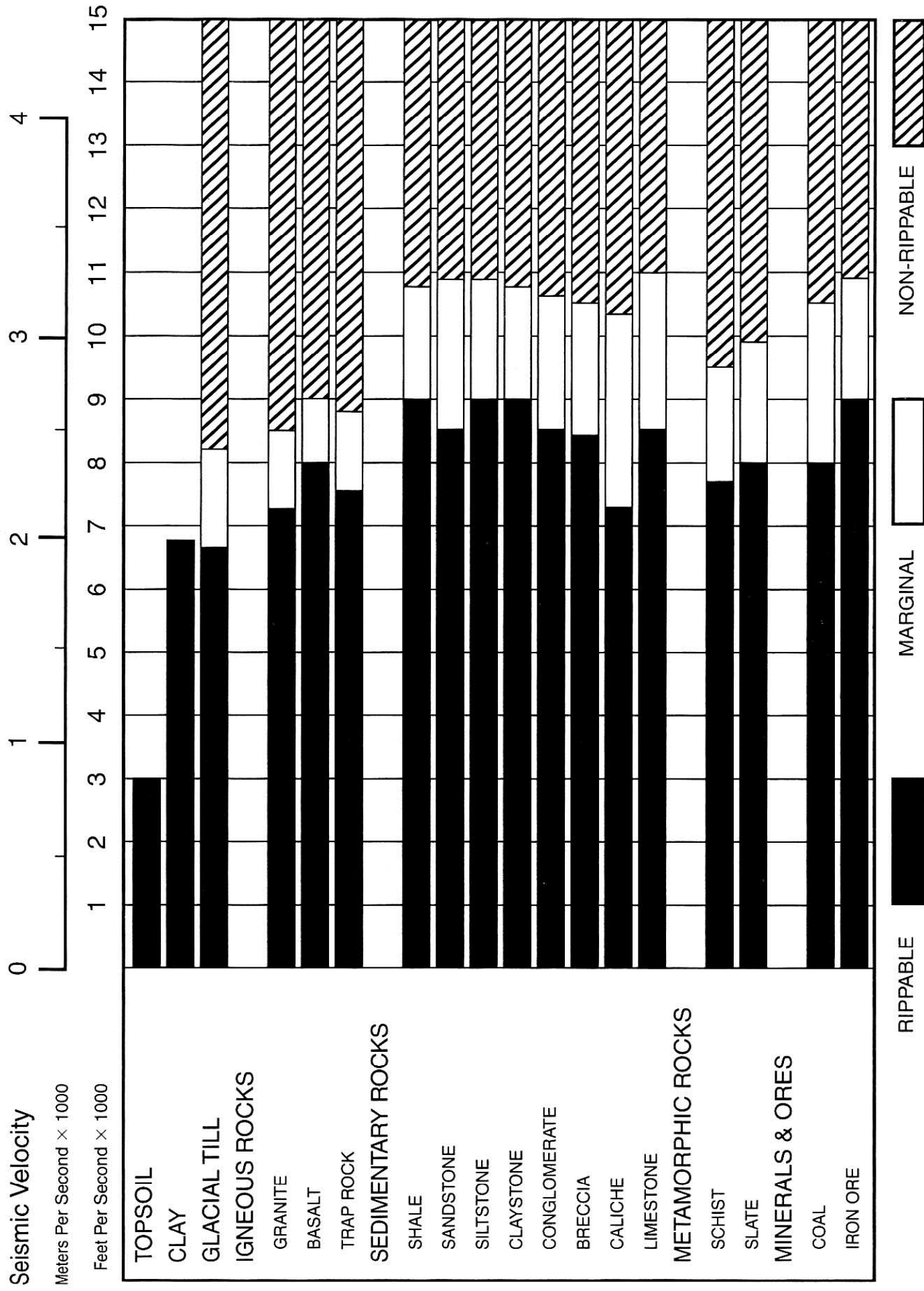
**D9R**

- Multi or Single Shank No. 9 Ripper
- Estimated by Seismic Wave Velocities



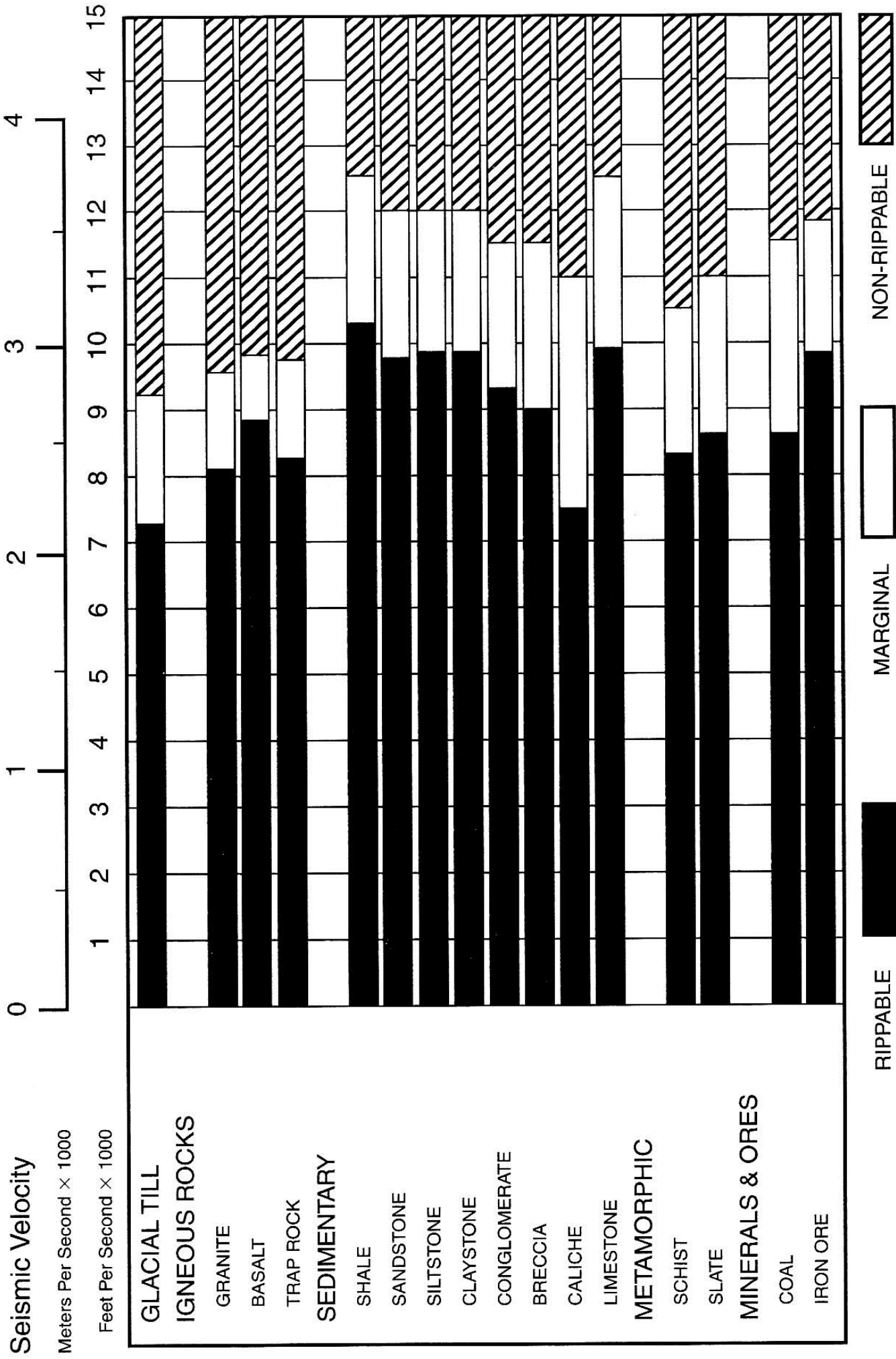
D10R

- Multi or Single Shank No. 10 Ripper
- Estimated by Seismic Wave Velocities



# D11R

- Multi or Single Shank No. 11 Ripper
- Estimated by Seismic Wave Velocities



**D11R CD**

- **Single Shank No. 11 Ripper**
- **Estimated by Seismic Wave Velocities**

