



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Técnicas de prospeção para o estudo de substrato rochoso:
estudo comparativo entre o método de refração sísmica e o
ensaio de penetrómetro dinâmico**

Rui de Jesus Lopes Pinto



isep Instituto Superior de
Engenharia do Porto

P. PORTO

2018

(página propositadamente em branco)



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Técnicas de prospeção para o estudo de substrato rochoso:
estudo comparativo entre o método de refração sísmica e o
ensaio de penetrómetro dinâmico**

Rui de Jesus Lopes Pinto

1151488

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, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.

(página propositadamente em branco)

Júri

Presidente

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

Professor Coordenador com Agregação, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Fernando Pedro Ortega Oliveira Figueiredo

Professor Auxiliar, Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

*A tese de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG)** foi apresentada e defendida em prova pública, pelo Licenciado **Rui de Jesus Lopes Pinto**, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em 5 de Novembro de 2018 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **14 (catorze) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

Agradecimentos

Um agradecimento muito especial ao ao Doutor João Paulo Meixedo (ISEP), pela sua dedicada e profissional orientação, pela sua ajuda e disponibilidade constantes, pelas opiniões e críticas, e por toda a motivação que me deram ao longo deste percurso.

Ao Professor Jorge Carvalho (FEUP) pelos conselhos, opiniões e ajuda acerca dos ensaios realizados.

Um agradecimento muito grande aos meus Pais e Irmãos, por terem estado sempre muito presentes durante todo o processo, ajudando-me em tudo o que precisei.

Um agradecimento também a todos os meus colegas de Mestrado e amigos em especial ao João Dixo, Nicola Moreira, Jorge Pereira, José Campos, Luís Azevedo, Bruno Daniel e Pedro Ribeiro por me terem ajudado na realização dos ensaios de campo necessários para esta dissertação.

Por último, um agradecimento sentido ao ISEP – Instituto Superior de Engenharia e ao Departamento de Engenharia Geotécnica por me ter dado a oportunidade de contactar diretamente com tantos e excelentes profissionais, fazendo com que estes dois anos tenham sido de aprendizagem e aperfeiçoamento constantes.

Palavras-Chave

Refracção sísmica, penetrómetro dinâmico médio, campo de testes, Porto

Resumo

Na presente investigação pretendeu-se definir a espessura das camadas e superfície de *bed-rock* através dos ensaios de refração sísmica e do PDM (Penetrómetro dinâmico médio). Os resultados destes dois ensaios foram comparados entre si de forma a verificar qual o melhor para o caso de estudo para no fim se fazer um cruzamento de dados. Quando obtidos estes resultados, posteriormente realizaram-se perfis e superfícies 3D do firme para uma melhor interpretação visual dos resultados. Para esta pesquisa foi escolhido um campo de testes localizado na FEUP, no qual se sabe que é um terreno remexido onde foi enterrada sucata. Do resultado desta investigação evidenciou-se algumas das vantagens e desvantagens destes métodos assim como se conclui que apesar de métodos diferentes, é possível verificar que muitos dos resultados obtidos pela sísmica, no que diz respeito as espessuras de camadas superficiais, conseguem ser comprovados pelo ensaio de penetrómetro dinâmico médio (PDM) e vice-versa.

Keywords

Seismic refraction, dynamic penetrometer medium, test field, Porto

Abstract

In the current investigation the main purpose was to define the thickness of the layers and the deepness of the bed-rock by the seismic refraction method and the dynamic penetrometer medium method. The results of both methods were compared to each other to verify what method should be used for the purpose in study and in the end make result crossover. After the obtained data, profile and 3D surface was built for a better visual interpretation of the data. For this investigation, the field test located in FEUP (Porto) was chosen, in which it is known that it is a field where was buried scrap. The result investigation, it was evident some of the advantages and disadvantages of each method as was concluded that despite being different methods was possible to verify that many of the results obtained in the seismic refraction method, regarding the thickness of the layers, can be proven by the dynamic penetrometer medium (DPM)

Índice

1. Introdução	3
1.1. Estrutura da tese	3
2. Metodologias	7
2.1. Refração sísmica.....	7
2.1.1. Definição de Refração Sísmica	7
2.1.2. Descrição do ensaio.....	8
2.1.3. Campos de aplicação	10
2.1.4. Vantagens e desvantagens.....	11
2.2. Penetrómetro dinâmico	11
2.2.1. Definição de petrómetro dinâmico	11
2.2.2. Descrição do ensaio.....	14
2.2.3. Campos de aplicação	16
2.2.4. Vantagens e Desvantagens	17
3. Estado de arte	21
3.1. Prospecção Geotécnica vs Prospecção Geológica.....	21
3.1.1. Prospecção Geotécnica.....	22
3.1.2. Prospecção mecânica.....	25
3.1.3. Prospecção Geofísica	26
3.1.4. Ensaio de Campo/ <i>in situ</i>	28
3.2. Princípios de sísmica	29
3.2.1. Breve história dos métodos sísmicos	29
3.2.2. Conceitos teóricos de sísmica	30
3.2.2.1. Tensão e deformação.....	30
3.2.2.2. Ondas sísmicas	33
3.2.2.3. Ondas e Raios.....	37
3.2.2.4. Velocidade das ondas sísmicas nas rochas	38
3.2.2.5. Reflexão e refração de raios oblíquos incidentes	41
3.2.2.6. Refração crítica.....	42

3.2.2.7.	Difração	44
3.2.2.8.	Sistema de aquisição de dados da sísmica	44
3.3.	Sísmica de refração	52
3.3.1.	Introdução	52
3.3.2.	Cálculo para a determinação de espessuras das camadas e profundidade do <i>bed-rock</i> 52	
3.3.3.	Geometria de perfil para estudar problemas de camadas planas	54
3.3.4.	Problemas das camadas cegas e escondidas	55
3.4.	Penetrometro dinâmico médio	57
3.4.1.	Boletim de campo, RDA e tensão admissível	57
4.	Tipologia das camadas e perfil do <i>bed-rock</i> no campo de testes da FEUP através de ensaios de campo. 63	
4.1.	Apresentação do local de estudo	63
4.1.1.	Enquadramento Geográfico	63
4.1.2.	Enquadramento Geológico	64
4.1.3.	Local dos ensaios	65
4.2.	Perfis de distribuição dos <i>shot points</i> , geofones e dos furos do PDM	66
4.2.1.	Perfis de distribuição dos <i>shot points</i> e geofones (Refração sísmica)	66
4.2.2.	Penetrómetro dinâmico médio (PDM) – distribuição dos furos	68
4.3.	Resultados obtidos, cálculo de velocidades sísmicas, profundidades e perfis (Refração sísmica)	70
4.3.1.	Tempos de Chegada e Dromocrónicas	70
4.3.2.	Velocidades sísmicas	74
4.3.3.	Cálculo das velocidades reais	75
4.3.4.	Profundidade do <i>bed – rock</i> e espessuras das camadas	77
4.3.5.	Perfis obtidos, caracterização e análise	78
4.4.	Resultados obtidos, profundidades e perfis (Penetrómetro dinâmico médio – “PDM”) 83	
4.4.1.	Perfis obtidos, caracterização e análise	83
4.5.	Modelagem 3D do firme	89
4.5.1.	Modelagem 3D do firme com os dados obtidos pelo PDM	90

4.6. Análise e discussão de resultados	92
5. Conclusão	99
6. Desenvolvimentos Futuros.....	105
7. Bibliografia	109
8. Anexos.....	115

Índice de Figuras

Figura 1 -Esquema representativo do RAS – 24 (adaptado Azevedo & Rocha,2010).....	8
Figura 2 – 1) Bateria do carro usada para dar energia à box ; 2) Geofones usados; 3) Marreta e chapa usada para executar o embate; 4) sismogramas obtidos após o embate em software próprio; 5) Box que liga os diferentes componentes entre si.....	10
Figura 3 – Penetrómetro dinâmico médio (Rodrigues, 2016).....	13
Figura 4 – Componentes do penetrómetro dinâmico médio (motor, pedal, pilão e vara)	16
Figura 5 - Esquema resumido dos métodos da Prospecção geológica (adaptado Rodrigues,2016) .	24
Figura 6 - Esquematisação dos métodos geofísicos (adaptado Vinagre,2013).....	27
Figura 7 - Curva de tensão vs deformação para um corpo solido (adaptado Kearey et al , 2002) ..	31
Figura 8 – a) módulo elástico. b) módulo de Young. c) módulo volumétrico. d) modulo axial (Kearey et al. ,2002).	32
Figura 9 - Deformações e movimentos de partículas do terreno associadas à passagem de ondas de corpo: (A) ondas P; (B) ondas S (adaptado Kearey et al., 2002)	35
Figura 10 – Deformação elástica movimento do terreno associado à passagem de ondas de superfície. (a) onda Rayleigh. (b) onda Love (Kearey et al. 2002).....	37
Figura 11 – Relação entre frente de onda e trajetória do raio. (Kearey et al. 2002).....	37
Figura 12 - Raios das ondas P refletidas e refratadas. Raios das ondas S geradas, refletidas e refratadas, a partir de um raio de onda P que incidiu obliquamente à interface de um contraste de impedância acústica. (Kearey et al . 2002).....	41
Figura 13 – Raio de onda P refletida e refractada associada a incidência obliqua de um raio de onda P numa interface com um contraste de impedância acústica. (Kearey et al. 2002).....	42
Figura 14 – Formação de uma head wave na camada acima devido à propagação de onda através da camada abaixo (Kearey et al ,2002)	43
Figura 15 – Difração causada pelo fim cortado de uma camada falhada (Kearey et al.,2002).....	44
Figura 16 – O espetro sísmico /acústico (Kearey et al., 2002)	46
Figura 17 – Esquema dos diferentes tipos de Fonte sísmica (Kearey et al, 2002)	47
Figura 18 – (a) – compressor de ar. (b) -compressor de água (Kearey, 2002)	50
Figura 19 – Geofone de bobine móvel (Kearey,2002)	51
Figura 20 - Perfil reverso convencional com 2 tiros, um em cada pont do perfil (Kearey et al, 2002)	54

Figura 21 – <i>Split-profile</i> , com um tiro central (Kearey ,2002)	55
Figura 22 – Single-ended profile com repetição de tiros (Kearey ,2002).....	55
Figura 23 - Camada escondida: camada fina que não dá origem a primeiras chegadas (Kearey et al,2002).....	56
Figura 24 - Camada cega: uma camada de baixa velocidade que não origina frentes de onda (Kearey et al, 2002)	57
Figura 25 - Exemplo de boletim de campo PDM.....	58
Figura 26 – Gráfico de índice de resistência do solo à penetração.....	60
Figura 27 – Localização geográfica do distrito do Porto e também do local onde se vão realizar os ensaios. (Fonte: Google Earth Pro)	63
Figura 28 – Enquadramento geotécnico regional da faixa de cisalhamento de Porto–Coimbra-Tomar (Zona da Ossa Morena de Portugal) no Maciço Ibérico (Chaminé et al., 2003)	64
Figura 29 - Local onde foram realizados os ensaios (Fonte: Google Earth)	65
Figura 30 - Distribuição dos geofones e locais de embate para os ensaios de sísmica.	66
Figura 31 – Organização das linhas e locais do <i>shot point</i> de forma nominal	67
Figura 32 - Local de realização dos furos do PDM	69
Figura 33 – Numeração dos furos realizados no ensaio de PDM.....	69
Figura 34 – Dromocrónicas correspondentes aos tempos de chegada obtidos na Linha 1	71
Figura 35 -Dromocrónicas correspondentes aos tempos de chegada da linha 2	72
Figura 36 - Dromocrónicas correspondentes aos tempos de chegada da linha 3	73
Figura 37 - Dromocrónicas correspondentes aos tempos de chegada da linha 4	74
Figura 38 - Perfis obtidos a partir do método de refração sísmica: 1) Perfil da Linha 1 ; 2) Perfil da linha 2; 3)Perfil da Linha 3 ; 4) Perfil da linha 4.....	80
Figura 39 - Orientação dos perfis transversais.....	81
Figura 40 – Perfis transversais do método de refração sísmica.....	82
Figura 41 - Perfis obtidos a partir do método do penetrómetro dinâmico médio: 1) Perfil da Linha 1 ; 2) Perfil da linha 2; 3)Perfil da Linha 3 ; 4) Perfil da linha 4	85
Figura 42 – Orientação dos perfis transversais do PDM	88
Figura 43 – Perfis transversais do PDM.....	88
Figura 44 - Compilação de mapas do tipo Wireframe, com os diferentes métodos de interpolação para o firme no método PDM.	90
Figura 45 - Compilação de mapas do tipo 3D Surface, com os diferentes métodos de interpolação para o firme no método PDM	91

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Características dos vários penetrómetros (Rodrigues,2016)	12
Tabela 2- Fases da prospeção geotécnica e respetivas funções (Vallejo,2002)	23
Tabela 3 – Diferenças entre a prospeção direta, semi-direta e indireta (Rodrigues,2016).....	25
Tabela 4 – Ensaios in situ (Rodrigues,2016)	28
Tabela 5 - Velocidade das ondas compressivas em materiais terrestre (adaptado Kearey et al.,2002).	40
Tabela 6 – Perfis sísmicos divididos pela distância do <i>shot point</i>	68
Tabela 7 – Tempos de chegada obtidos para a linha 1 tendo em conta os locais do <i>shot point</i>	70
Tabela 8 - Tempos de chegada obtidos para a linha 2 tendo em conta os locais do <i>shot point</i>	71
Tabela 9 - Tempos de chegada obtidos para a linha 3 tendo em conta os locais do <i>shot point</i>	72
Tabela 10 - Tempos de chegada obtidos para a linha 4 tendo em conta os locais do <i>shot point</i> ...	73
Tabela 11 – Velocidades obtidas para as diferentes camadas na linha 1	74
Tabela 12 - Velocidades obtidas para as diferentes camadas na linha 2	75
Tabela 13 - Velocidades obtidas para as diferentes camadas na linha 3	75
Tabela 14- Velocidades obtidas para as diferentes camadas na linha 3.....	75
Tabela 15 – Velocidades reais das camadas para a linha 1.....	76
Tabela 16 – Velocidades reais das camadas para a linha 2.....	76
Tabela 17 – Velocidades reais das camadas para a linha 3.....	76
Tabela 18 – Velocidades reais das camadas para a linha 4.....	77
Tabela 19 – Espessuras das camadas identificadas pelo método sísmico para a Linha 1	77
Tabela 20 - Espessuras das camadas identificadas pelo método sísmico para a Linha 2	78
Tabela 21 - Espessuras das camadas identificadas pelo método sísmico para a Linha 3	78
Tabela 22 - Espessuras das camadas identificadas pelo método sísmico para a Linha 4	78
Tabela 23 – Valores de velocidades para camadas da Linha 1 do ensaio de refração sísmica.....	92
Tabela 24 - valores de velocidade real e ângulo de inclinação dos raios refratados.....	93
Tabela 25 – Comparação dos valores máximos obtidos para cada método, de profundidade, na linha 1.....	94
Tabela 26 - Comparação dos valores máximos obtidos para cada método, de profundidade, na linha 2.....	94
Tabela 27 - Comparação dos valores máximos obtidos para cada método, de profundidade, na linha 3.....	94

Tabela 28 - Comparação dos valores máximos obtidos para cada método, de profundidade, na linha 2.....	95
---	----

Índice de Equações

Equação 1 – Módulo de Young.....	31
Equação 2 – Modulo volumétrico	32
Equação 3 – Módulo de cisalhamento	32
Equação 4 – Módulo axial	32
Equação 5 – velocidade de propagação de uma onda de corpo num certo material	33
Equação 6 – velocidade de propagação das ondas P simplificada.....	34
Equação 7 – Velocidade de propagação das ondas P	34
Equação 8 – Velocidade de propagação das ondas S.....	34
Equação 9 – Razão v_p/v_s para qualquer material	34
Equação 10 – Lei de Snell	42
Equação 11 – Lei de Snell	42
Equação 12 – Ângulo crítico	43
Equação 13 - Ângulo crítico.....	43
Equação 14 – Equação da velocidade	52
Equação 15 – Equação de V_{0real}	53
Equação 16 – Ângulo de inclinação.....	53
Equação 17 – equação da velocidade real de uma camada	53
Equação 18 – Equação da espessura de camadas	53
Equação 19 – Equação para a obtenção do parâmetro K.....	59
Equação 20 – Parâmetro RDA	59
Equação 21 – Tensão admissível	59

1.Introdução

1. Introdução

A aquisição de um maior aprofundamento sobre a refração sísmica, penetrómetro dinâmico médio e sobre a interpretação dos dados que deles advêm requer que, no presente estudo, a revisão da literatura vise a consulta sobre métodos de prospeção, os princípios do método de refração sísmica e os princípios do penetrómetro dinâmico médio. Assim, os principais objetivos do presente estudo centraram-se em delimitar os horizontes e *Bed-rock* a partir dos dados obtidos; e comparar os dados fornecidos por cada método. Desta, no presente trabalho serão efectuados os métodos de refração sísmica e penetrómetro dinâmico médio num campo de testes, localizado na FEUP (Freguesia de Paranhos).

Assim, a presente dissertação divide-se em três partes principais: metodologia, estado da arte, e apresentação, tratamento e discussão dos resultados. Na metodologia serão abordados os métodos de refração sísmica e o método do penetrómetro dinâmico médio e a forma como são aplicados, bem como as vantagens e desvantagens de cada método e a sua aplicação. No que se refere ao estado de arte, este subdivide-se em 3 secções: prospeção, princípios de refração sísmica e cálculo de tensões admissíveis a partir do método do penetrómetro dinâmico médio. Será também realizado um enquadramento geológico e geográfico dos referidos locais onde serão efectuados ambos os ensaios, assim como a distribuição dos perfis executados em cada um dos locais. Por fim, será feita a apresentação, tratamento e discussão dos resultados obtidos.

1.1. Estrutura da tese

Esta tese está dividida em quatro partes:

- Metodologias;
- Estado de arte;
- Apresentação, tratamento e discussão de resultados;
- Conclusões.

O capítulo referente a metodologias, é descrito e definido cada método usado neste trabalho, onde se refere os constituintes de cada método, como se realiza e também os princípios em que estes se baseiam. Posteriormente também se aborda os campos de aplicação e vantagens e desvantagens de cada método.

O capítulo do estado de arte está dividido em três partes. A parte da prospeção onde aborda-se os vários tipos de prospeção assim como os seus objetivos e métodos. Na parte seguinte, que diz respeito aos princípios de sísmica e de refração sísmica, aborda-se os princípios de sísmica e em que estes consistem (ondas P/S, refração/reflexão, fontes e recetores sísmicos, entre outros), e no que diz respeito à refração sísmica aborda-se o cálculo neste método assim como o problema das camadas escondidas e cegas. Na terceira parte, que diz respeito ao penetrómetro dinâmico aborda-se o boletim de campo assim como o cálculo do RDA e tensões admissíveis.

No terceiro capítulo, que diz respeito ao capítulo de apresentação, tratamento e discussão de resultados, inicialmente faz-se uma apresentação do local (geograficamente e geologicamente) onde vão ser realizados os ensaios. Seguidamente a partir dos dados obtidos produziu-se perfis de forma a se interpretar melhor os dados, por último a partir do *Surfer 9* produziu-se modelos 3D.

Por último, a partir dos dados e perfis obtidos, assim como os próprios ensaios de campo, foi possível obter algumas conclusões para ambos os métodos no caso em estudo .

2. Metodologias

2. Metodologias

2.1. Refração sísmica

2.1.1. Definição de Refração Sísmica

Os ensaios geofísicos normalmente são utilizados para o reconhecimento de águas subterrâneas, combustíveis fósseis, minérios em geral, entre outros. Dentro destes ensaios destacam-se os ensaios gravimétricos, magnéticos, elétricos, eletromagnéticos, radiométricos, sísmicos, geotérmicos e (diagrafias).

O ensaio de refração sísmica trata-se de um ensaio indireto, e como tal, não destrutivo, que é utilizado para realizar reconhecimentos litológicos presentes num determinado local. Como se trata de um ensaio indireto, que tem por base o fenómeno da refração sísmica, este ensaio não recolhe amostras, porém, a sua modelação ao longo do tempo tem melhorado de uma forma bastante significativa, o que permite obter com maior rigor informações acerca da litologia presente num determinado local. O fenómeno da refração de uma onda sísmica ocorre quando ela, ao propagar-se por um determinado meio, incide e transpõe uma interface que separa duas camadas com materiais de composições diferentes, sofrendo um desvio na trajetória e passando a propagar-se com uma velocidade diferente daquela a que anteriormente se deslocava. Se a incidência for oblíqua, a mudança também vai, assim, ocorrer na direcção da propagação da onda. No caso de a incidência ser normal à interface que separa duas camadas, a refração da onda vai ocorrer sem nenhuma mudança na sua direcção como no caso das ondas sonoras e da luz (Azevedo & Rocha,2010).

O sismógrafo utilizado neste estudo para aquisição dos dados das velocidades das ondas sísmicas, é da marca *Seistronix* modelo *RAS-24*. Este contém uma *Box* que é usada para fazer interagir os vários elementos que o constituem, sendo eles:

- Uma interface *USB* para que seja permitido recolher os dados sísmicos em computador com o *Software* do *RAS-24*;
- Uma maretta de 10 Kg, que vai ser o elemento que vai produzir as ondas sísmicas artificiais;
- Um *Trigger* que é o “gatilho” que vai acionar quando é efectuado o embate com a marreta, de forma a que o sistema comece então a receber os dados a partir dos

geofones. Este *Trigger* está preso à marreta de forma a que o sistema accione ao mesmo tempo que o embate é efetuado;

- Um cabo sísmico que faz a ligação entre a *Box* e os Geofones;
- Os geofones são os sensores que captam as ondas sísmicas, transformando-as em informação legível para o computador. De forma a ser possível a interpretação dos dados, estes serão colocados de uma forma alinhada, numa superfície livre do terreno. Os Geofones usados são da marca *GEOSPACE*® com uma frequência de 10 Hz;
- Uma bateria ou uma ligação a partir de um cabo de arranque de uma bateria de um carro, para que o aparelho tenha energia para executar as suas funções;
- Uma chapa de metal, onde com a marreta se irão provocar as ondas sísmicas artificiais.

A distância entre os geofones poderá variar, dependendo da área a estudar, no caso em estudo irá ser de 3 metros, permitindo assim um maior rigor nos dados fornecidos. Porém, esta distância foi também definida tendo por base o espaço disponível pelas áreas em estudo. Na Figura 1 está representado um esquema de como é constituído o circuito do RAS-24:

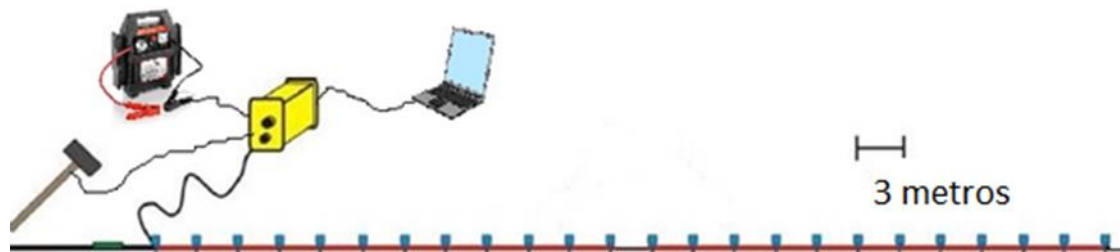


Figura 1 -Esquema representativo do RAS – 24 (adaptado Azevedo & Rocha,2010)

2.1.2. Descrição do ensaio

Após definida a área onde se iria realizar o ensaio, o equipamento teve que ser transportado para os respetivos locais de intervenção.

Verificou-se que o local se encontrava em boas condições para ser realizado o ensaio, ou seja, que condições como a acessibilidade, topografia, vegetação e ruído não se encontravam como problemas para o ensaio ser realizado.

Numa primeira fase foi montado o circuito como já foi demonstrado na figura 1, certificou-se que todos os acessórios estavam encaixados na entrada correta. Depois, o sismógrafo foi ligado à bateria de um carro para ser fornecida a energia necessária para o circuito trabalhar corretamente. Seguidamente, foi ligado o cabo USB ao computador para se conseguir trabalhar com o *software* fornecido pelo equipamento. Importa referir que este *software* só funciona com recurso a uma “máquina virtual” (processo aqui utilizado), uma vez que este só opera com *softwares windows* (*Windows XP* ou anteriores a este). De uma forma muito despreziosa, a “máquina virtual” é um computador virtual, que pode conter versões do *Windows* mais antigas, permitindo assim que o programa do sismógrafo opere. A “máquina virtual” aqui utilizada foi a *Oracle VM VirtualBox*, reunindo-se assim todas as condições necessárias para avançar com o ensaio de refração sísmica.

Numa primeira fase, tal como o ensaio demanda, foi necessário “armar” a *Box*, que não é mais do que preparar o circuito para o ensaio. Quando o aparelho se encontrava devidamente armado, essa informação foi fornecida pelo *software*.

Seguidamente utilizou-se a marreta e bateu-se com ela na chapa de metal, de forma a produzir artificialmente as ondas sísmicas. Foram realizados 7 ensaios em cada perfil, ou seja, um a 6 e outro a 3 metros do primeiro geofone (tanto no início como no fim da linha de geofones), outro no meio da linha dos geofones, e ainda outros dois entre o embate central e o embate que está a 3 metros do primeiro geofone, tendo por base as indicações anteriores e de forma a ser possível o cruzamento de dados. Depois do embate, a pessoa que o provocou ficou imobilizada durante cerca de 30 segundos, uma vez que 30 segundos é o tempo que os geofones demoram a recolher todas as informações relativas às ondas refratadas, ou seja, se a pessoa se movimentasse durante este período, podia provocar adulteração nos dados obtidos, devido ao embate dos passos no chão.

Passados os 30 segundos, o *software* apresentou os dados relativos ao ensaio realizado. Os dados anunciados pelo *software* apresentam-se na forma de um gráfico distância (m) vs tempo (s), também conhecido por sismograma. (frequência,)

Na Figura 2, estão representados alguns elementos do ensaio realizado de refração sísmica.

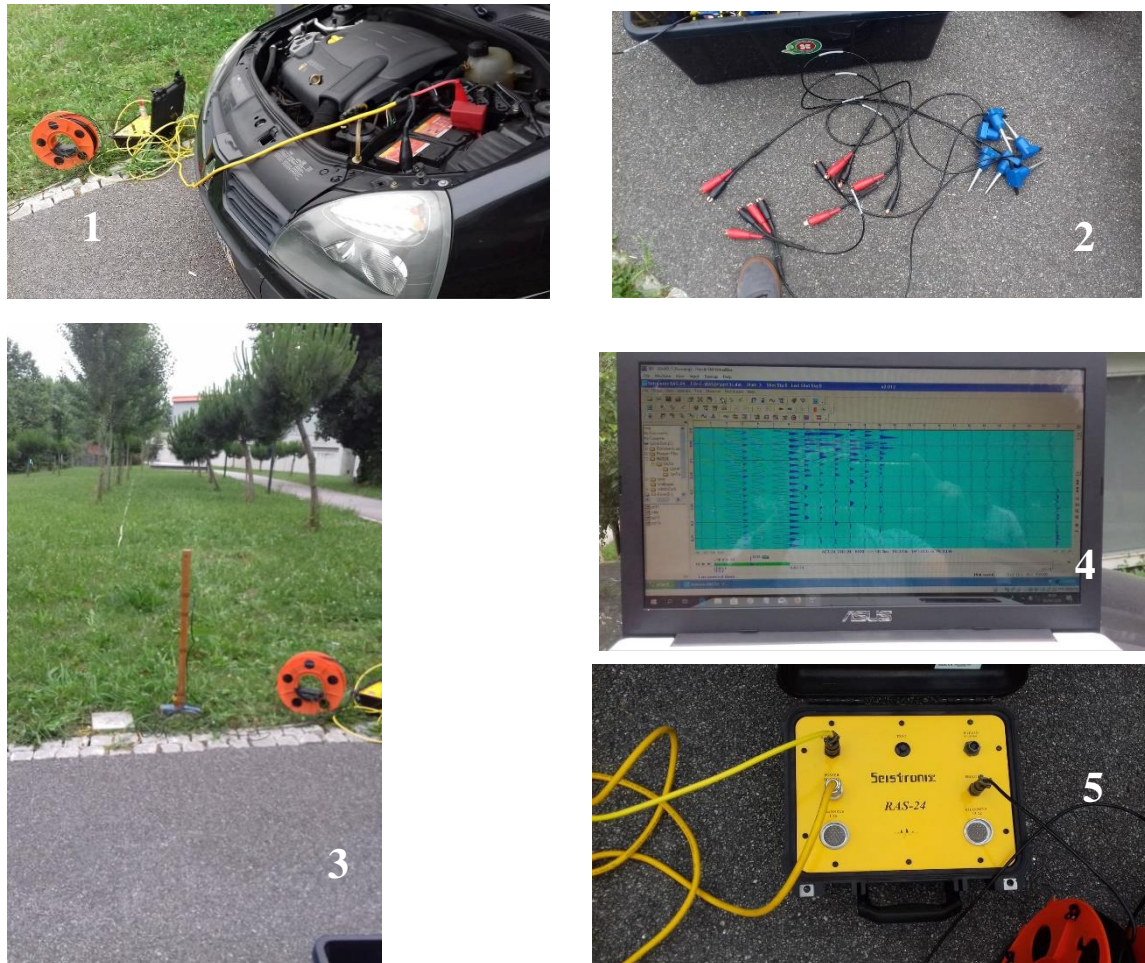


Figura 2 – 1) Bateria do carro usada para dar energia à box ; 2) Geofones usados; 3) Marreta e chapa usada para executar o embate; 4) sismogramas obtidos após o embate em software próprio; 5) Box que liga os diferentes componentes entre si

2.1.3. Campos de aplicação

Normalmente este método é aplicável com o objetivo de se conhecer em profundidade as características geológicas correlacionáveis com as velocidades de propagação das ondas elásticas (zonas e espessuras de alteração, possança de estratos, etc.), e as características mecânicas das diversas formações que são de interesse para a prospeção.

Em síntese, o método de refração sísmica é aplicável na resolução de um grande número de problemas de engenharia, daí muitas vezes utilizado, tendo então diversas aplicações, de que são exemplo:

- Avaliação do volume de terras em manchas de empréstimo para barragens;
- Estudo de locais de pedreiras;

- Avaliação de condições de escavabilidade dos terrenos para inserção de obras, tais como canais, estradas e vias férreas;
- Avaliação das características mecânicas das fundações.

2.1.4. Vantagens e desvantagens

Segundo Cervi (2009), as maiores vantagens da refração sísmica são o fornecimento de dados quantitativos dos estratos, bem como o fornecimento uma ótima visualização das camadas e das feições estruturais em profundidade. Como se trata também de um método indireto, não implica escavação nem perturbação do solo a estudar.

No que concerne às desvantagens do método da refração sísmica, podemos nomear algumas, nomeadamente o facto de este não detetar camadas com muito pouca possança, ter um alto custo relativo, e como os geofones são muito sensíveis (apesar de ser possível alterar esta sensibilidade), os dados poderão sofrer interferências de ruídos e vibrações mecânicas.

2.2. Penetrómetro dinâmico

2.2.1. Definição de petrómetro dinâmico

Admite-se que os ensaios de penetração *in situ* são geralmente usados para a realização de projetos de fundações, estabilidade de taludes e outros tipos de obras geotécnicas. Destes ensaios *in situ* destacam-se dois tipos de ensaios penetrométricos, sendo eles o *Standard Penetration Test* (SPT) e o Penetrómetro Dinâmico (PD) (Folque, 1986).

Existem vários tipos de penetrómetros no mercado, assim como teorias e regras para a interpretação de resultados, podendo constituir por vezes uma difícil seleção para os técnicos responsáveis e familiarizados com o reconhecimento geotécnico.

Para este caso de estudo foi selecionado o penetrómetro dinâmico, pois segundo Terzaghi (1927), “A ideia Básica é esta: primeiro inventar um ensaio simples, cujos resultados dependam da consistência do material e logo correlacionar esse coeficiente obtido pelo ensaio, com a capacidade de suporte so solo”.

Apesar de este tipo de equipamento, ao contrário do SPT, não fornecer amostras dos solos atravessados, por outro lado permite uma visualização em pormenor e contínua da variação das resistências à penetração com a profundidade, obtendo-se uma boa imagem dessa variação e consequentemente uma definição rigorosa das zonas de menor e maior compressibilidade (Miranda & Martins, 2003).

Segundo Miranda & Martins (2003), este equipamento funciona em qualquer tipo de terreno devido às várias opções de penetrómetros que existem. O EC7 (ENV 1997-3) e, mais recentemente, a EN ISO 22476-2, menciona quatro tipos diferentes de penetrómetros dinâmicos: leve (DPL), médio (DPM), pesado (DPH) e super-pesado (DPSH), estando as características destes penetrómetros apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos vários penetrómetros (Rodrigues,2016)

	DPL (Leve)	DPM (Médio)	DPH (Pesado)	DPSH (Super Pesado)
Profundidades atingidas				
(m)	8	20	20 a 25	>25
Dispositivo de cravação				
Massa do pilão (Kg)	10 ± 0,1	30 ± 0,3	50 ± 0,5	63,5 ± 0,5
Altura da queda (mm)	500 ± 10	500 ± 10	500 ± 10	750 ± 20
Batente				
Diâmetro (mm)	100 < d < 0.5	100 < d < 0.5	100 < d < 0.5	100 < d < 0.5
Massa (Kg)	6	18	18	30
Cone de penetração				
Área da base (cm²)	10	10	15	20
Diâmetro da base (mm)	35,7 ± 0,3	35,7 ± 0,3	43,7 ± 0,3	51 ± 0,5
Varas				
Massa (Kg/m)	3	6	6	6
Diâmetro (mm)	22	32	32	32
Energia específica por golpe				
(kJ/m ²)	50	150	167	238

Independentemente das características que esclarecem cada tipo de penetrómetro, na sua base o equipamento é o mesmo, variando apenas em parâmetros como a massa, a altura da queda, o diâmetro dos cones e a energia de penetração como se observa na Tabela 1 .

O equipamento usado pertence ao LGMC (Laboratório de Geotecnia e materiais de construção – ISEP) e opera de acordo com a Norma EN ISSO 22476-2:2003, apresentando as seguintes características:

- Diâmetro da Ponteira (d_p) – 35 mm;
- Secção da Ponteira (S) – 9,621 cm²;
- Diâmetro das varas (d_h) – 20 mm;
- Peso das varas (p) – 2,420 Kg;
- Massa do Pilão (M) – 29,654 Kg;
- Altura da queda do pilão – 20 cm.

A Figura 3 representa um esquema do penetrómetro em questão, o PDM.

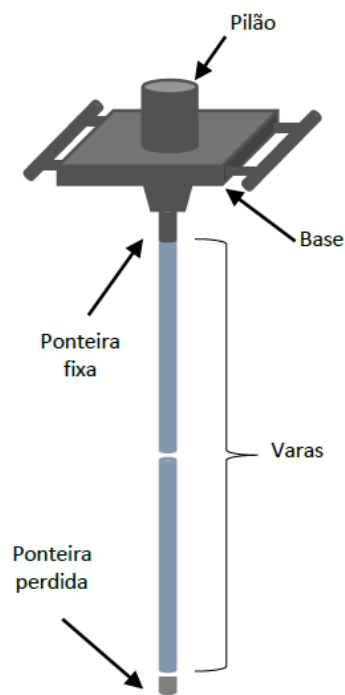


Figura 3 – Penetrómetro dinâmico médio (Rodrigues, 2016)

Os custos deste ensaio vão variar tendo em conta o tipo de penetrómetro, da dimensão da malha (área) do ensaio e das profundidades que são necessárias atingir.

2.2.2. Descrição do ensaio

Depois de se escolher qual o penetrómetro a utilizar, dever-se-á fazer o mesmo que no sísmógrafo, ou seja, transportá-lo para o local escolhido para os ensaios. Este local, como no sísmógrafo, deve estar preparado para os ensaios, ou seja, limpo e ausente de qualquer material que possa danificar o equipamento e conseqüentemente comprometer o próprio ensaio.

Começa-se então por colocar-se uma ponteira cônica, descartável, no terreno e de seguida aplica-se somente uma vara metálica. A penetração da vara começa quando o movimento do pilão inicia, sendo que este acaba quando a primeira vara é totalmente penetrada (um metro de profundidade), ou seja, a ponteira será cravada devido à ação da força de queda livre que é aplicada através de um cilindro metálico, que assim é transmitida às varas continuamente.

A garantia que o ensaio é contínuo é dada através da colocação de uma nova vara que já se encontra enterrada, ajustáveis através de rosca, na parte superior. Cada vez que é necessário acrescentar varas o ensaio tem de ser interrompido, sendo que este processo deverá ser feito da forma mais cuidadosa possível de forma a não perturbar os resultados.

A resistência à penetração é obtida e relacionada de acordo com o número de pancadas necessários para se cravar um certo comprimento de vara nos solos penetrados em profundidade, podendo ser esta de dez ou vinte centímetros (dez no caso em estudo), registrando-se esse mesmo número de pancadas num boletim próprio. A força necessária é considerada como o parâmetro índice de resistência à penetração dos solos.

Parte-se do princípio que uma camada que seja constituída por material mais resistente, será necessário um maior número de pancadas para se penetrar uma determinada profundidade do que uma camada constituída por materiais mais brandos.

Na parte final do ensaio e quando o número de pancadas necessário para penetrar determinada distância é superior a 60, dá-se a “nega”. Porém deve-se insistir de forma a assegurar que o “firme” foi atingido e que na verdade não é um obstáculo. Depois de a contagem ser feita, e caso se verifique um número exagerado de pancadas, o ensaio dá-se por acabado (Martins & Miranda, 2003).

Quando se realiza a remoção do equipamento, esta deve ser cuidadosamente realizada para que não se perca nenhuma vara, pois estas poderão escapar e deslizar pelo furo feito a partir do ensaio, após ser dado uma folga, conseqüentemente, não se consegue recuperar.

Tendo em conta o que foi dito em cima, é de realçar a importância de pelo menos 2 operadores para executar o ensaio, pelo que é necessária pouca mão-de-obra para se realizar o ensaio. Porém, enquanto o ensaio é executado há necessidade de manter o penetrómetro sempre na vertical, iniciar a queda da massa para a penetração das varas e contar o número de golpes necessários.

Quando o ensaio se dá por acabado, todos os dados são transferidos numa folha de cálculo em EXCEL, para simplificar a obtenção do gráfico anteriormente referido que relaciona o número de golpes com a profundidade. Desta forma é facilitado a interpretação dos níveis de resistência à penetração do solo em profundidade, obtendo-se a caracterização geológica e geomecânica dos mesmos.

As evoluções deste método de prospecção têm permitido estabelecer correlações com outros tipos de ensaio, principalmente quando estes são dirigidos à construção e caracterização de pavimentos, sendo assim possível a aplicação de modelos matemáticos em vez de métodos mais complexos, custosos e demorosos para o mesmo efeito.

Deve-se ter cuidado em:

- Manter o equipamento na posição vertical durante o ensaio., de forma a garantir que o furo não tenha desvios superiores a 2%;
- A força do impacto deverá ser constante para não provocar movimentos nas varas;
- As ligações entre as varas e a ponteira cónica e como os restantes componentes devem estar estáveis;
- O documento que diz respeito aos passos de execução do ensaio deverá estar sempre presente;
- Deve-se ter uma atenção mais cuidadosa, na parte final do ensaio, ao comportamento da massa cilíndrica no momento em que são acionados os golpes e interpretar os mesmos para que as conclusões sejam o mais rigorosas possíveis;

- Todos os fatores conhecidos ou supostos que possam influenciar os valores de resistência à penetração, tal como a inclinação das varas, devem ser registados.

De seguida são apresentadas duas imagens do ensaio realizado neste trabalho (Figura 4).



Figura 4 – Componentes do penetrómetro dinâmico médio (motor, pedal, pilão e vara)

2.2.3. Campos de aplicação

Como dito anteriormente, o penetrómetro dinâmico pode ser aplicado em vários tipos de solo devido aos vários tipos existentes de penetrómetro assim como a sua versatilidade.

Porém, e visto que pode ocorrer a “falsa nega”, é necessário a realização de outros ensaios e metodologias complementares, se possível e de preferência, sondagens meânicas e ensaios SPT. E caso seja possível, ao lado de cada SPT fazer um ensaio DPH, onde os dados deste se podem correlacionar com os do SPT. Assim é possível obter uma imagem completa do terreno e de algumas características físicas do mesmo (deformabilidade e resistência), em diferentes profundidades (Martins & Miranda, 2003). Isto tende a acontecer quando o estudo é focado para obras de engenharia com estruturas mais robustas como pontes, tuneis, edifícios com uma estrutura não normal no que diz respeito à altura e envergadura, entre outros.

Para trabalhos menos complexos, o ensaio é indicado para se obter qualquer estudo geotécnico necessário para a execução de uma obra de menor porte. Ou seja:

- Dimensionamento de fundações para pequenas ou grandes profundidades;
- Identificação de terrenos homogéneos;
- Controlo e manutenção de camadas presentes num determinado pavimento;

- Controlo e estabilidade de taludes;
- Zonamento Geotécnico a partir de índices de resistência;
- Caracterização geológica e geotécnica (indireta);
- Previsão para a evolução de longo prazo dos solos, que poderão sofrer instabilidade quando sujeitos às ações da natureza que lhes provocam alterações.

2.2.4. Vantagens e Desvantagens

No Esquema 1 estão representadas as vantagens e desvantagens do método em questão.

Vantagens

- Fácil mobilização, transporte e manipulação do equipamento;
- Simples obtenção, interpretação e leitura de resultados;
- Opera em qualquer profundidade e em locais de difícil acesso;
- Custo da operação relativamente baixo;
- Realiza um vasto numero de leituras num curto espaço de tempo, podendo assim reduzir-se possíveis erros;
- Devido à facilidade do ensaio, poderá ser utilizado para teste de rotina;
- Pode ser correlacionado com outros ensaios (SPT), evistando assim o uso de métodos mais caros e complexos.

Desvantagens

- Não é possível a recolha de amostras;
- Só é possível medir diretamente um parâmetro (índice de resistência);
- O ensaio terá de ser complementado, calibrado e atualizado tendo em conta que os parâmetros avaliados por correlação se encontram em constante atualização;
- Caso os furos sejam feitos muito próximos entre eles, podem por em causa os valores recolhidos/obtidos;
- o ensaio pode ser comprometido caso do aparecimento de obstáculos , que não o firme;
- Por ser um equipamento portátil e que funciona sem estar devidamente fixado ao solo poderá apresentar incertezas de execução e obtenção de resultados, devendo então o posicionamento de todo o conjunto ser controlado e assegurar a verticalidade dos furos pré e durante o ensaio.

Esquema 1 – Vantagens e desvantagens do penetrómetro dinâmico (Adaptado Rodrigues,2016)

3.Estado de Arte

3. Estado de arte

3.1. Prospeção Geotécnica vs Prospeção Geológica

Em primeiro lugar importa referir que as prospeções geológicas e geotécnicas utilizam os mesmos métodos, apesar de os objetivos a atingir serem dissemelhantes. Desta forma, a prospeção geológica preocupa-se, sobretudo, em encontrar novos depósitos minerais, assim como em definir o seu conteúdo e extensão, de forma a garantir que a exploração deste depósito seja economicamente viável - durante a exploração, esta prospeção é responsável por demarcar locais onde possam existir extensões do depósito. Por outro lado, a prospeção geotécnica preocupa-se em identificar parâmetros e características geológicas/geotécnicas, de forma a que seja possível verificar se uma determinada obra de engenharia tem condições de se instalar num determinado local (Rodrigues,2016).

Tendo em conta os objetivos de cada prospeção, podem definir-se os seus métodos em 3 tipos: métodos diretos, métodos indiretos e métodos semi-diretos - métodos estes que serão descritos de seguida, pela sua pertinência. Os métodos diretos definem-se por permitir a observação direta do contexto geológico/geotécnico a estudar, quer através de amostras recolhidas de uma perfuração ou pela medição direta das propriedades *in situ*. Nestes métodos estão incluídas as trincheiras, poços, sondagens, entre outros. Os métodos indiretos, por sua vez, definem-se pela obtenção de dados sobre o solo, através da observação à distância, ou a partir da medição de grandezas de carácter físico (resistividade elétrica, condutividade, densidade, entre outros) do solo. Nos métodos indiretos, estão inseridos a Geofísica (na qual esta dissertação se enquadra) e o sensoriamento remoto. Por último, os métodos semi-diretos caracterizam-se por representarem ensaios que são realizados, de forma geral, em furos de sondagem, de forma a medirem propriedades específicas do solo. Estes métodos são assim designados, uma vez que não incluem recolha de amostras. Estes métodos têm como ensaios o CPT(U), o pressiómetro, o SPT, o PDM, entre outros. (Rodrigues,2016).

3.1.1. Prospeção Geotécnica

A Prospeção geotécnica utiliza um conjunto de metodologias e processos, com o objetivo de retirar informações acerca do terreno, de que são exemplos a sua constituição, as características mecânicas e outras propriedades do solo e substrato do local, onde poderá ocorrer um trabalho de engenharia. Com estas informações retiradas é possível concluir-se se o solo está apto, ou não, para a realização de uma obra.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados para se determinarem as propriedades do solo, representam um ponto crítico para a se estimarem os custos para um determinado projecto ou obra. Frequentemente mais de metade dos incrementos de custo em obras publicas devem-se ao facto de a prospeção geotécnica ter sido deficiente, estimando-se que pelo menos um terço destes projetos demoram mais que o previsto, devido a esta insuficiência de estudos geológicos/geotécnicos (Tyrrell et al cit. In. Vallejo, 2002). Por outro lado, existe a ideia de que a prospeção não é “rentável”, partindo-se muitas vezes para a construção de uma obra com dados insuficientes. Daí a incerteza com que se chega à construção e aos custos e demoras da mesma, compreendendo-se então, segundo Vallejo, a seguinte frase: “A prospeção paga-se sempre, antes ou depois” (Vallejo, 2002). Por este motivo, a prospeção geotécnica deverá estar sempre incluída num projeto. Segundo o mesmo autor, a prospeção para ser útil e eficiente deverá atuar em todas as fases do projeto, que impliquem conhecimento geotécnico, ou seja, a Prospeção Geotécnica deverá atuar nas seguintes fases:

- Estudos prévios e de viabilidade;
- Anteprojeto;
- Projeto;
- Construção;
- Exploração.

Para facilitar a compreensão das diferentes fases de um projeto, e os respetivos objetivos, segue-se a seguinte tabela:

Tabela 2- Fases da prospeção geotécnica e respetivas funções (Vallejo,2002)

Fases do Projeto	Objectivos geológico - geoténicos
Estudos prévios e de viabilidade	<ul style="list-style-type: none">• Viabilidade Geológica• Identificação de riscos geológicos• Condições geológicas-geotécnicas gerais
Anteprojecto	<ul style="list-style-type: none">• Seleção do Local• Classificação geoténica dos materiais• Soluções geotécnicas aproximadas
Projecto	<ul style="list-style-type: none">• Caracterização geoténica detalhada• Parâmetros geotécnicos para o desenho de estruturas, escavações, cimentações, etc.
Construção	<ul style="list-style-type: none">• Controlo Geoténico e instrumentação• Verificação e adaptação do projecto
Exploração	<ul style="list-style-type: none">• Controlo da resposta entre terreno-estrutura• Auscultação.

Segundo Rodrigues (2016), as técnicas de prospeção geotécnica poderão ser divididas em 2 tipos:

- As que permitem a observação direta de terreno (valas, poços, galerias, entre outros) e a recolha de amostras do mesmo a partir de sondagens (percussão e/ou rotativas), trados e dispositivos de amostragem adequados;
- As que não recolhem amostras, mas que permitem conhecer as características do terreno a partir de ensaios *in situ* (SPT, CPT(u)), entre outros já referidos) e ensaios geofísicos.

Segundo Vallejo (2002), a prospeção está dividida em três grupos:

- Sondagens, valas e poços;
- Sondagens geofísicas;

- Ensaios *in situ*.

Na Figura 5 está representado um esquema que divide a prospeção Geotécnica nos seus diferentes métodos:

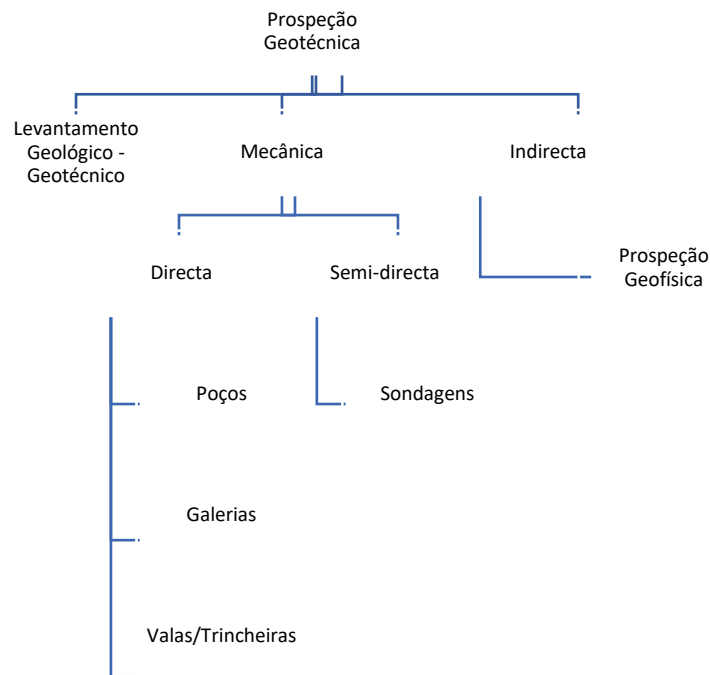


Figura 5 - Esquema resumido dos métodos da Prospeção geológica (adaptado Rodrigues,2016)

A prospeção geotécnica/geológica inicia-se, sempre, através de um levantamento geológico/geotécnico. Depois do levantamento ser efetuado, pode proceder-se à prospeção mecânica, que, por sua vez, se subdivide em prospeção mecânica direta, prospeção mecânica semi-direta e em prospeção indireta, que se caracteriza pela deteção remota e pela prospeção Geofísica. A escolha do método prospetivo deverá ter em conta quatro parâmetros principais: finalidade e proporção do projeto, características do terreno, parâmetros que se querem conhecer e custos associados.

A seguinte tabela (Tabela 3), explica de forma sucinta as diferenças entre prospeção direta, prospeção semi-direta e prospeção indireta:

Tabela 3 – Diferenças entre a prospeção direta, semi-direta e indireta (Rodrigues,2016)

<i>Prospeção</i>	Direta	Semi-Direta	Indireta
<i>Definição</i>	Permite a observação direta do subsolo, ou através de amostras colhidas ao longo de uma perfuração.	Processo que fornece informações sobre as características do terreno, sem possibilitarem, a colheita de amostras ou informações sobre a natureza do solo.	As propriedades geotécnicas dos solos são estimadas indiretamente pela observação à distância ou através de métodos específicos.
<i>Exemplos</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Escavações • Sondagens 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensaio <i>in situ</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Detecção remota • Ensaio Geofísicos

3.1.2. Prospeção mecânica

A prospeção mecânica, como o nome indica, passa pela utilização de meios mecânicos, de forma a conhecer-se o maciço em profundidade. Esta penetração serve para o esclarecimento das características do maciço, sendo elas:

- A espessura das camadas geológicas e/ou depósitos de cobertura e respetiva atitude;
- Profundidade de alteração do maciço encontrado;
- Características de fracturação e regime hidrogeológico;
- Localização de contactos, falhas, filões ou outros tipos de elementos estruturais;
- Colheita de amostras para a realização de ensaios de laboratório;
- Observação de superfícies de deslizamento;
- Detecção de zonas de subsidência;
- Determinação *in situ* de certas características dos maciços tais como permeabilidade, resistência e deformabilidade;
- Execução do tratamento de terrenos;
- Observação do interior de maciços através de métodos fotográficos ou endoscópios;
- Determinação do seu estado de tensão.

Sobre os métodos de prospeção mecânica, importa referir que os mesmos estão divididos em duas categorias: a categoria directa e a categoria semi-directa. O método de prospeção directa é realizado a partir de escavações manuais ou por meio mecanizado, de forma a permitir a observação directa do solo e a recolha de amostras. Neste tipo de prospeção incluem-se a realização de possos, galerias e valas/trincheiras. Por sua vez, o tipo de prospeção semi-directa, consiste na abertura de furos de pequeno diâmetro, executado, em geral, a partir da superfície - sondagens (Rodrigues,2016).

A diferença existente entre estas duas categorias, consiste em que enquanto na categoria semi-directa o acesso aos materiais é efectuada na superfície, após a evacuação dos mesmos, o que exige uma panóplia de técnicas e equipamento para o efeito, na categoria directa o acesso aos materiais e respectiva recolha é directa e imediata.

A profundidade e o método a utilizar depende do tipo e dimensão da obra, bem como da natureza do maciço, sendo que a furação pode ser efectuada através de um trado, de rotação ou percussão (Lima, 2013).

3.1.3. Prospeção Geofísica

Sobre a prospeção geofísica, importa referir que a mesma se caracteriza por reunir um conjunto de técnicas, apoiadas em métodos da física em geral e da matemática, para investigar o subsolo.

Os métodos aplicados pela geofísica vieram fornecer grande parte do conhecimento sobre a distribuição espacial dos materiais e estruturas que compõem o nosso planeta, abaixo daquelas profundidades que se podem alcançar por poços, minas, furos e sondagens.

Como exemplos de aplicação de métodos geofísicos podem ser nomeados: i) a avaliação da profundidade do firme sob uma camada aluvionar branda; ii) a avaliação da espessura de alteração de um maciço rochoso, por exemplo, para previsão do custo de desmonte num trecho de estrada em escavação; iii) o estudo de localização de manchas de empréstimo ou de pedreiras para barragens, quer de aterro quer de betão; iv) a identificação de cavidades no subsolo quando se pretende construir sob formações cársicas; v) a identificação de falhas e outros acidententes tectónicos junto de estruturas cuja segurança exija especiais requisitos, como grandes barragens ou centrais nucleares. (Fernandes, 2015)

Os métodos aplicados pela geofísica variam em função do tipo de estudo pretendido e das profundidades que se pretendem atingir. Esses métodos geofísicos são não invasivos, pois são realizados à superfície e não criam qualquer tipo de alteração.

A grande vantagem que estes métodos apresentam em relação aos mecânicos recai na circunstância de a investigação ser realizada através da aquisição e interpretação de dados instrumentais, sem recurso a métodos destrutivos. Estes métodos são muito utilizados em arqueologia, prospecção de petróleo, prospecção mineira, hidrologia, estudos ambientais e geofísica forense (Vinagre, 2013).

Na Figura 6 estão representados os vários métodos da Geofísica. (acrescentar crooshole)

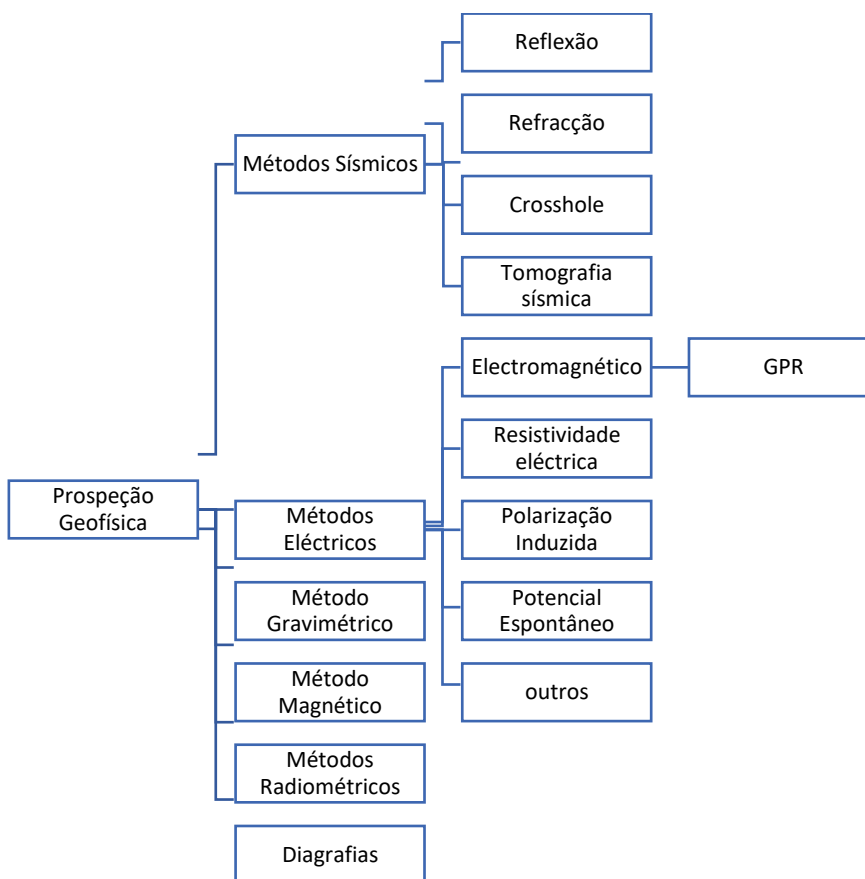


Figura 6 - Esquematização dos métodos geofísicos (adaptado Vinagre,2013)

3.1.4. Ensaio de Campo/ *in situ*

Estes ensaios são mais utilizados para a prospecção geotécnica, pois permitem obter parâmetros do solo de uma forma expedita e *in situ*. Estes métodos podem ser classificados de duas formas, ou seja, em função da sua investigação (diretos e indiretos) ou então em função do efeito que têm no maciço (destrutivos ou não destrutivos).

Estes ensaios permitem ser usados de uma forma simultânea ou individual, pois existem situações onde só um ensaio é insuficiente e então, combina-se vários ensaios que permitem a combinação dos parâmetros do maciço, provenientes de cada um. Assim é possível realizar um Zonamento Geológico/Geotécnico para determinado objetivo.

Estes ensaios estão divididos consoante o material presente no local, como representa a Tabela 4.

Tabela 4 – Ensaio *in situ* (Rodrigues,2016)

		Resistência	Deformabilidade	Permeabilidade
Tipo de material	Solos	SPT ou DP(L,M,H,SH) CPT/CPTU Molinte	Carga em Placa Pressiómetro de Ménard	Lefranc
	Rochas	Martelo de Schmidt Carga Pontual (PLT)	Dilatómetro(DMT) Carga em Placa	Lugeon

Normalmente, a escolha do método está dependente do tipo de solo onde se vai realizar os ensaios e também dependente dos parâmetros pretendidos. Dentro destes últimos, tende-se ainda a optar pelo método menos dispendioso, mais rápido e menos complexo (Rodrigues,2016).

3.2. Princípios de sísmica

Este capítulo assim como o capítulo de “Sísmica de Refração”, a maior parte dele, fazem referência ao livro “*An Introduction to Geophysical Exploration*” de Kearey et. al (2002).

3.2.1. Breve história dos métodos sísmicos

Segundo Santos, a história da refração sísmica começou pela descoberta das descontinuidades de Mohorovicic, Gutenberg e Lehmann, sendo que a cada descontinuidade foi dado o nome do cientista que a descobriu. Estas foram descobertas a partir de variações bruscas na velocidade das ondas sísmicas que atingiam determinadas profundidades, permitindo detectar superfícies no interior da Terra que separam materiais com diferente composição e propriedades.

Em 1910 começa-se a perceber que os métodos sísmicos poderiam ser utilizados para a prospecção de petróleo, até então, a perfuração de poços de exploração era feita a partir de percepções intuitivas, ou a partir de exsudações locais de hidrocarbonetos ou de uma maneira mais abrangente, recorrendo-se a perfurações aleatórias de poços. Alguns anos depois, regista-se o começo da análise de geração de ondas sísmicas de modo artificial, para estudos aplicados à indústria do petróleo.

No início da década de 1960, com a evolução tecnológica dos métodos sísmicos, chega-se aos métodos de reflexão sísmica 3D. Esta evolução, fez com que esta ferramenta exploratória fosse alvo de vários investimentos na indústria petrolífera, pois fez com que os posicionamentos de poços de exploração atingissem um grau de certeza de quase 100%, e com um grau de detalhamento de estruturas geológicas verticais e laterais a grandes profundidades, como por exemplo, domas salinos, com um erro muito pequeno. Além disso a sísmica passou a mostrar indícios diretos da presença de hidrocarbonetos. Com a sísmica 3D, os riscos associados à exploração petrolífera foram reduzidos drasticamente, devido à precisão dos seus dados já referidos anteriormente.

Investimentos maiores na otimização sísmica de posicionamento de poços (análises tomográficas cada vez mais precisas) e crescente sucesso na detecção de indícios diretos de hidrocarbonetos a partir de amplitudes sísmicas 3D, permitiram apontar para uma forte evolução de eficiência industrial da sísmica, incluindo soluções como aplicação de um método sísmico ao mesmo tempo que se perfura um poço (*seismic while drilling*).

3.2.2. Conceitos teóricos de sísmica

3.2.2.1. Tensão e deformação

Para a compreensão dos diferentes tipos de onda sísmica que se propagam no terreno a partir de uma certa distância da fonte sísmica é necessário entender alguns conceitos elementares acerca da tensão e deformação.

Quando forças externas são aplicadas a um corpo, as forças internas do mesmo são configuradas dentro dele. A tensão é a medida da intensidade destas forças internas. A tensão quando aplicada numa área de determinada superfície, pode resultar numa componente de tensão normal perpendicular à superfície e uma outra componente de tensão de cisalhamento no plano da superfície.

Em qualquer ponto num corpo em tensão podem ser definidos 3 planos ortogonais em que em cada um desses planos corresponde somente a tensões normais, ou seja, não existe tensões de cisalhamento a atuar através deles. Estes planos definem três eixos ortogonais conhecidos como os três principais eixos da tensão, e as tensões normais que atuam na direção destes planos são designadas como tensões principais. Cada tensão principal representa o equilíbrio entre iguais magnitudes de tensão opostas em direção às componentes de força. A tensão caracteriza-se compressiva se as forças estiverem direcionadas umas para as outras e de tração caso aconteça o contrário, ou seja, as forças estarem com um sentido oposto entre elas.

Se as principais tensões são todas de igual magnitude dentro do corpo diz-se que esta tensão é hidrostática, visto que este estado de tensão ocorre ao longo de um fluido num corpo em repouso. Um corpo fluido não suporta tensões de cisalhamento (visto que os fluidos não têm força de cisalhamento), conseqüentemente não podem existir tensões cisalhantes num corpo sob tensão hidrostática. Se as tensões principais são diferentes, as tensões cisalhantes existem em todas as superfícies do corpo em tensão, exceto para os três planos ortogonais que intersetem os principais eixos.

Um corpo sujeito a tensão poderá sofrer uma mudança de forma e/ou tamanho conhecido como deformação. Até um certo limite de tensão, conhecido como força elástica de um material, a deformação é diretamente proporcional à tensão aplicada (Lei de Hooke). A deformação elástica é reversível, ou seja, a anulação de tensão resulta na anulação da deformação. Se a força elástica de um material for ultrapassada, a deformação torna-se não linear e praticamente irreversível,

também conhecido por deformação plástica ou dúctil. Se a tensão continuar a aumentar o corpo parte-se. O que foi explicado neste parágrafo está demonstrado na Figura 7.

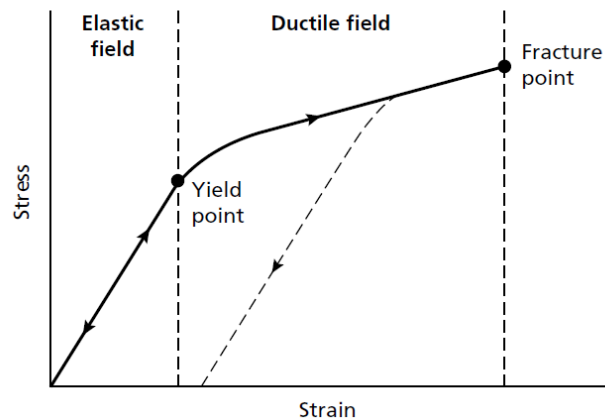


Figura 7 - Curva de tensão vs deformação para um corpo sólido (adaptado Kearey et al , 2002)

A relação linear entre tensão e deformação no campo elástico é específico para qualquer material pelo seu respetivo módulo elástico, no qual é expresso pelo seu rácio para um determinado tipo de tensão e a deformação resultante. Considere-se uma haste com um comprimento original l e uma área transversal A que é estendida por um incremento Δl devido à aplicação de uma força distensiva F . O módulo elástico relativo a este caso é o módulo de Young (E) que é definido por:

$$E = \frac{\text{Tensão longitudinal } (F/A)}{\text{Deformação longitudinal } (\Delta l/l)}$$

Equação 1 – Módulo de Young

Note-se que a extensão da haste será acompanhada por uma redução do seu diâmetro, isto é, a haste vai sofrer tanto deformação lateral com longitudinal. O rácio da deformação lateral para a longitudinal é dado pelo coeficiente de Poisson (σ).

O módulo volumétrico K expressa o rácio de tensão-deformação no caso de uma pressão hidrostática simples P aplicada a um corpo cúbico, dividido pela divisão da deformação volúmica resultante Δv dividido pelo volume original.

$$K = \frac{\text{Tensão volumica (P)}}{\text{Deformação volumica}(\Delta v/v)}$$

Equação 2 – Modulo volumétrico

De uma forma parecida o módulo de cisalhamento (μ) é definido pela razão da tensão de cisalhamento (τ) pela resultante da deformação de cisalhamento $\tan(\theta)$.

$$\mu = \frac{\text{Tensão de cisalhamento } (\tau)}{\text{Deformação de cisalhamento } (\tan(\theta))}$$

Equação 3 – Módulo de cisalhamento

Por último, o módulo axial Ψ define a razão entre a tensão longitudinal e a deformação longitudinal considerando-se que não existe deformação lateral, isto é, quando o material é forçado a deformar-se uniaxialmente.

$$\Psi = \frac{\text{Tensão longitudinal (F/A)}}{\text{Deformação longitudinal (uniaxial)}(\Delta l/l)}$$

Equação 4 – Módulo axial

Na Figura 8 está um esquema representativo de todos os módulos referidos anteriormente.

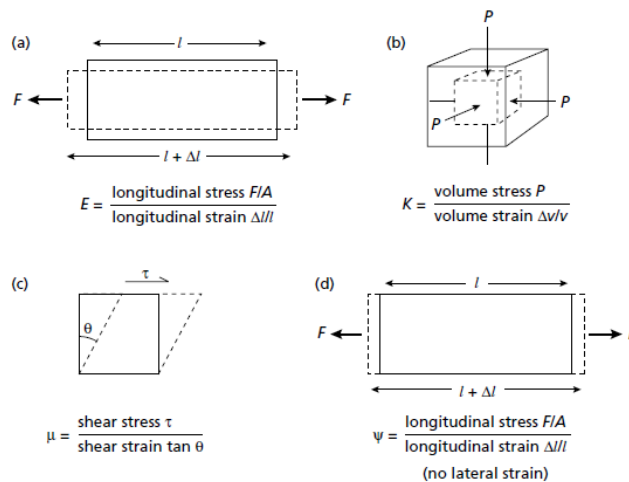


Figura 8 – a) módulo elástico. b) módulo de Young. c) módulo volumétrico. d) modulo axial (Kearey et al. ,2002).

3.2.2.2. Ondas sísmicas

As ondas sísmicas são parcelas de energia de deformação elástica que se propagam a partir de uma fonte sísmica, tais como um sismo ou uma explosão. Fontes sísmicas adequadas para o levantamento sísmico geram um conjunto de ondas de pouca duração, conhecidos como pulsos, que tipicamente contém uma ampla variedade de frequências. Exceto na vizinhança da fonte sísmica, em que as deformações associadas à passagem do pulso sísmico são muito pequenas e podem ser assumidas como elásticas. Nesta suposição a velocidade de propagação dos pulsos sísmicos é determinado pelo modulo elástico e densidades dos materiais por onde estas passam. Existem 2 grupos de ondas sísmicas, as ondas de corpo e as ondas de superfície.

- **Ondas de Corpo**

As ondas de corpo através do volume interno de um sólido elástico podem ser de 2 tipos. Compressivas (são longitudinais, primárias ou também conhecidas como ondas P em sismologia terrestre) propagam-se a partir de compressões e dilatações uniaxiais na direção de propagação da onda. O movimento das partículas está associado com a passagem de uma onda compressiva envolve oscilação, em relação a um ponto fixo, na direção de propagação da onda. As ondas de cisalhamento (transversas, secundárias ou ondas S na sismologia terrestre) propagam-se a partir de cisalhamento puro e são perpendiculares à direção de percurso da onda. Cada oscilação de partícula está associada a um movimento oscilatório, relativo a um ponto fixo, num plano com ângulos retos à direção de propagação de onda.

A velocidade de propagação de qualquer onda de corpo num corpo homogéneo e isotrópico é dado pela Equação 5.

$$v = \left[\frac{\text{modulo elástico do material}}{\text{densidade do material } (\rho)} \right]^{1/2}$$

Equação 5 – velocidade de propagação de uma onda de corpo num certo material

Consequentemente a velocidade v_p de uma onda de corpo compressiva, que envolve uma deformação compressiva uniaxial é dada por,

$$vp = \left[\frac{\Psi}{\rho} \right]^{1/2}$$

Equação 6 – velocidade de propagação das ondas P simplificada

ou visto que $\Psi = K + \frac{4}{3} \mu$ pode ser traduzida em,

$$vp = \left[\frac{K + \frac{4}{3} \mu}{\rho} \right]^{1/2}$$

Equação 7 – Velocidade de propagação das ondas P

e a velocidade de v_s (velocidade das ondas de cisalhamento) , que envolve cisalhamento puro é dada por,

$$vs = \left[\frac{\mu}{\rho} \right]^{1/2}$$

Equação 8 – Velocidade de propagação das ondas S

A partir destas equações é possível concluir que as ondas P são mais rápidas que as ondas S no mesmo meio. A razão v_p / v_s em qualquer material é determinado somente pelo coeficiente de Poisson (σ) para esse material

$$vp/vs = \left[\frac{2(1-\sigma)}{(1-2\sigma)} \right]^{1/2}$$

Equação 9 – Razão v_p / v_s para qualquer material

e visto que o coeficiente de Poisson para rochas consolidadas é cerca de 0.25, $v_p \approx 1.7v_s$. O conhecimento da velocidade das ondas P é útil, porém são um fator muito ambíguo da litologia. A razão v_p / v_s , contudo, é independente da densidade e pode ser usado para retirar o coeficiente de Poisson, que é um fator que indica melhor a litologia do local. Caso esta informação seja necessária tanto as ondas P como as ondas S devem ser medidas no ensaio de refração sísmica.

Estas relações fundamentais entre as velocidades de propagação das ondas e as propriedades físicas por onde a onda sísmica vai atravessar são independentes da frequência de onda. As ondas de corpo são não-dispersivas, isto é, todos os componentes de frequência num

pulso de onda atravessam determinada material à mesma velocidade, determinado unicamente pelo módulo elástico e densidade do material.

Historicamente, a maior parte dos levantamentos sísmicos era feito só analisando as ondas S, pois simplifica o método de duas maneiras. Na primeira, com geofones que só detetavam movimentos verticais no solo eram usados, sendo que estes eram insensíveis aos movimentos horizontais das ondas S. Na segunda, a maior velocidade das ondas P assegurava sempre que as primeiras ondas a ser detetadas eram as P antes de qualquer onda relacionada com as ondas S e consequentemente as ondas P são mais fáceis de reconhecer. Fazer o levantamento sísmico de ondas S, para uma menor extensão de ondas superficiais, dá muito boa informação acerca do subsolo, mas com o custo de uma maior quantidade de dados (levantamento de 3 componentes) e consequentemente uma maior complexidade no tratamento de dados. Os avanços tecnológicos têm permitido um levantamento de várias componentes ao mesmo tempo.

Uma aplicação das ondas S é em prospecção local para obras de engenharia, onde a medição separada de v_p e v_s para camadas superficiais permite o cálculo direto do coeficiente de Poisson e a estimação do módulo elástico, o que fornece uma valiosa informação geotécnica *in situ* das propriedades do solo. Isto têm uma valiosa importância prática pois permite calcular a ripabilidade.

Na Figura 9, estão representadas as ondas P e S.

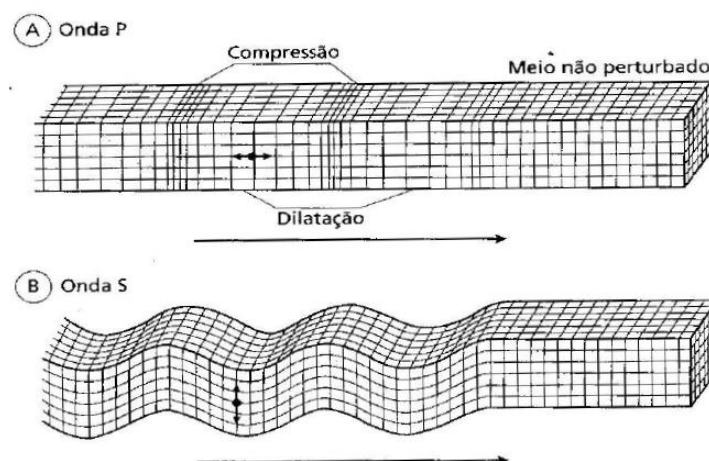


Figura 9 - Deformações e movimentos de partículas do terreno associadas à passagem de ondas de corpo: (A) ondas P; (B) ondas S (adaptado Kearey et al., 2002)

- **Ondas de Superfície**

Num determinado sólido elástico, as ondas sísmicas conhecidas por ondas de superfície podem-se propagar através do limite do sólido. As ondas *Rayleigh* propagam-se através de uma superfície livre ou através de um limite entre dois meios sólidos diferentes, sendo os movimentos das partículas associados a um movimento elíptico num plano perpendicular à superfície e conservando a direção de propagação. O movimento orbital das partículas tem um significado oposto ao movimento circular das partículas associado a uma onda oscilatória na água e é muitas vezes referida como retrograda. Existe outra grande diferença entre as ondas *Rayleigh* e as ondas oscilatórias da água é que as *Rayleigh* envolvem deformação cisalhante e estas deformações só acontecem em meios sólidos. A amplitude das ondas *Rayleigh* decresce exponencialmente com a profundidade. Estas ondas têm uma velocidade de propagação menores que as ondas S e num meio homogéneo “half-space” elas são não-dispersivas. Em prática, as ondas *Rayleigh* que são observadas na superfície terrestre são dispersivas, a sua forma de onda vai mudando durante a sua propagação como resultado dos diferentes componentes de frequência que viajam a diferentes velocidades. Esta dispersão é diretamente atribuída à variação de velocidade consoante a profundidade no interior da Terra. As análises observados aos modelos de dispersão das ondas sísmicas é um método poderoso no estudo da estrutura da velocidade na litosfera e astenosfera (Knopoff cit in Kearey et al. , 2002). A mesma metodologia, aplicada para as ondas de superfície geradas por uma marreta pode ser usada para determinar a resistência de matérias próximas da superfície para prospecção aplicada a engenharia civil/geotécnica.

Caso a superfície seja constituída por camadas, e se a camada que se encontra na superfície apresentar uma menor velocidade de ondas cisalhantes do que as camadas abaixo desta, então um segundo conjunto de ondas de superfície é formado. As ondas *Love* são ondas cisalhantes polarizadas com um movimento de partículas paralela a uma superfície livre e perpendicular à direção de propagação de onda. A velocidade das ondas *Love* encontra-se entre a velocidade de uma onda cisalhante em camadas superficiais e a velocidade da mesma onda em camadas profundas, e as ondas *Love* são intrinsecamente dispersivas. A observação do modelo da dispersão das ondas pode ser usa de uma forma semelhante às ondas *Rayleigh* para estudar as estruturas do subsolo.

Na Figura 10 está representado um esquema das ondas Rayleigh e Love.

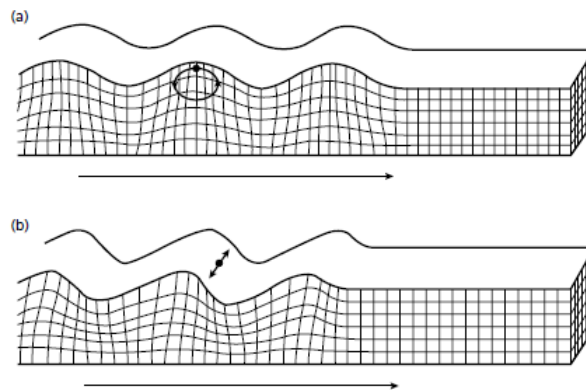


Figura 10 – Deformação elástica movimento do terreno associado à passagem de ondas de superfície. (a) onda Rayleigh. (b) onda Love (Kearey et al. 2002).

3.2.2.3. Ondas e Raios

Um pulso sísmico propaga-se de uma fonte sísmica a uma velocidade determinada pelas propriedades físicas das rochas por onde passa. Se este pulso se propagar num meio homogêneo este vai atravessá-lo a uma velocidade constante em todas as direções a partir da fonte, sendo que em qualquer determinado tempo a frente de onda, definida pelo conjunto de todos os pontos no qual o pulso atingiu num determinado ponto, ou seja, a sua representação pode ser definida por uma esfera. Os raios sísmicos são definidos como “lápiz finos” de energia sísmica que viajam através de uma trajetória do raio que são perpendiculares em todo o espaço à frente de onda, num meio isotrópico (Figura 11). Os raios não têm significado físico, mas representam um conceito útil na discussão das trajetórias da energia sísmica no subsolo.

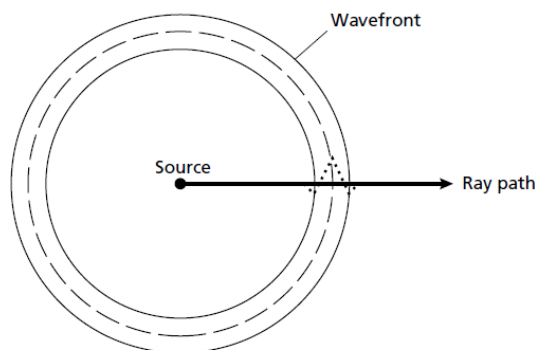


Figura 11 – Relação entre frente de onda e trajetória do raio. (Kearey et al. 2002)

Deve ser verificado que a velocidade de propagação de uma onda sísmica é a velocidade com que a energia sísmica atravessa um meio. Isto é completamente independente da velocidade de uma partícula num meio perturbado pela passagem da onda. No caso das ondas de corpo compressivas. Por exemplo, a sua velocidade de propagação através das rochas é tipicamente alguns milhares de metros por segundo. Os movimentos oscilatórios do solo associados, envolvem velocidades das partículas que depende da amplitude da onda. Para eventos sísmicos fracos que são registados, de uma forma constante, nos levantamentos sísmicos, a velocidade das partículas é muito pequena que chega a rondar os 10^{-8} ms^{-1} e está associado a deslocamentos do solo que rondam apenas os 10^{-10} metros. A deteção de ondas sísmicas envolve a deteção destas pequenas velocidades de partículas.

3.2.2.4. Velocidade das ondas sísmicas nas rochas

A velocidade das ondas sísmicas nas rochas pode ser medida *in situ* por ensaios de campo ou em laboratório usando amostras de rocha. Em campo, o levantamento sísmico estima a velocidade das ondas sísmicas para diferentes camadas delimitadas por interfaces refletoras ou refratoras. Se existirem furos nas proximidades do levantamento sísmico, poderá ser possível correlacionar os valores de velocidade com as unidades geológicas observáveis nesses furos. A velocidade das ondas sísmicas pode também ser obtida diretamente nesses furos utilizando uma sonda sónica, que emite pulsos de alta frequência e mede o tempo que demora a percorrer uma pequena parede rochosa vertical. Este ensaio vai permitir a obtenção de um registo sónico do furo ou um registo contínuo de velocidades (CVL), que grava as variações de velocidade ao longo do furo.

Em laboratório, as velocidades são determinadas a partir de ensaios de tempo-distância através de pulsos acústicos de alta frequência que são transmitidos para amostras cilíndricas da rocha a estudar. Por este meio significa que o efeito na velocidade da temperatura, pressão, pressão do fluido nos poros e composição pode ser quantitativamente avaliada. É necessário dizer que os ensaios de laboratório com amostras de baixa pressão confinante são duvidosos. A velocidade intrínseca na rocha não é conseguida a uma pressão abaixo de 100 MPa, ou 1 kbar, no qual a é a pressão original ao qual a rocha estava sujeita, reestabelecendo assim as características de contacto entre os grãos.

As seguintes descobertas empíricas no estudo das velocidades devem ser tidas em conta:

- A velocidade das ondas compressivas aumenta com a pressão confinante (muito rápido nos primeiros 100 MPa).
- Os arenitos e xistos demonstram um aumento de velocidades com o aumento da profundidade e com a idade, devido ao efeito combinado de compactação e cimentação.
- Para uma vasta variedade de rochas sedimentares, a velocidade das ondas compressivas é relacionada com a densidade. Consequentemente as densidades de materiais inacessíveis podem ser previstas a partir da sua velocidade, retiradas do levantamento sísmico.
- A presença de gás nos poros das rochas sedimentares reduz o módulo elástico das mesmas, o coeficiente de Poisson e a razão v_p / v_s . O valor da razão v_p / v_s para areias não consolidada é maior que 2.0, ou seja, valores menores que 2.0 podem indicar um arenito consolidado ou uma areia não consolidada, mas com os poros preenchidos com gás. O potencial valor de v_s para a deteção de sedimentos preenchidos com gás conta com o atual interesse no levantamento sísmico de ondas cisalhantes.
- A presença de água também faz com que a velocidade das ondas sísmicas aumente ou reduza, no geral, a presença de água em estruturas sedimentares não compactadas faz com que essa velocidade aumente, e no caso de rochas, faz com que a velocidade diminua.

Valores de velocidade para ondas compressivas para vários materiais terrestre, são observados na

Tabela 5.

Tabela 5 - Velocidade das ondas compressivas em materiais terrestre (adaptado Kearey et al.,2002).

	v_p ($km\ s^{-1}$)
<i>Materiais não consolidados</i>	
Areia (seca)	0.2 – 1
Areia (saturada com água)	1.5 – 2
Argila	1 – 2.5
Tilito glacial	1.5 – 2.5
Permafrost	3.5 – 4
<i>Rochas sedimentares</i>	
Arenitos	2 – 6
Calcários	2 – 6
Dolomites	2.5 – 6.5
Halite	4.5 – 5
Anidrite	4.5 – 6.5
Gesso	2 – 3.5
<i>Rochas ígneas e metamórficas</i>	
Granito	5.5 – 6
Gabro	6.5 – 7
Rochas Ultramáficas	7.5 – 8.5
Serpentinito	5.5 – 6.5
<i>Fluidos nos poros</i>	
Ar	0.3
Água	1.4 – 1.5
Gelo	3.4
Petróleo	1.3 – 1.4
<i>Outros Materiais</i>	
Aço	6.1
Ferro	5.8
Alumínio	6.6
Betão	3.6

3.2.2.5. Reflexão e refração de raios oblíquos incidentes

Quando o raio de uma onda P incide obliquamente numa interface com um contraste de impedância acústica, ondas refletidas e transmitidas são formadas no caso de uma incidência normal. Adicionalmente, alguma da energia compressiva incidente é convertida em ondas S refletidas e transmitidas (Figura 12) que são polarizadas num plano vertical. Os raios convertidos podem atingir uma magnitude significativa para grandes ângulos de incidência. A deteção e identificação de ondas convertidas pode ser difícil em levantamentos sísmicos, mas elas têm o potencial de providenciar mais contrastes nas propriedades físicas do meio na interface. As considerações aqui feitas serão restritas a ondas P.

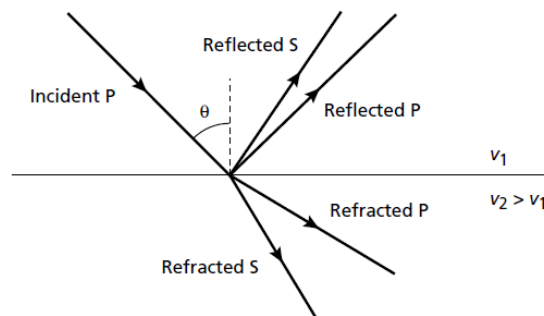


Figura 12 - Raios das ondas P refletidas e refratadas. Raios das ondas S geradas, refletidas e refratadas, a partir de um raio de onda P que incidiu obliquamente à interface de um contraste de impedância acústica. (Kearey et al . 2002).

No caso de uma incidência oblíqua, os raios das ondas P transmitidas viajam através da camada inferior, mas com uma direção de propagação diferente, ou seja, este raio foi refratado (Figura 13). Uma situação similar ao comportamento de um raio de luz que incide obliquamente no limite, por exemplo, de ar e água e a lei de Snell aplica-se igualmente ao caso da ótica e da sísmica. Snell definiu o parâmetro de raio como $p = \sin i / v$, onde i é o ângulo de inclinação do raio na camada onde este viaja com a velocidade v . A forma generalizada da lei de Snell diz que, ao longo de um raio, o parâmetro do raio é uma constante.

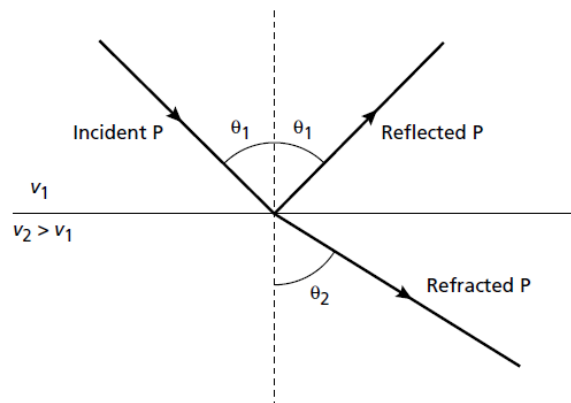


Figura 13 – Raio de onda P refletida e refractada associada a incidência oblíqua de um raio de onda P numa interface com um contraste de impedância acústica. (Kearey et al. 2002)

Para um raio de onda P refractado, como na Figura 13 indica,

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2}$$

Equação 10 – Lei de Snell

ou,

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Equação 11 – Lei de Snell

Verifica-se que se $v_2 > v_1$ o raio é refratado para lá da normal da norma da interface, isto é, $\theta_2 > \theta_1$. A lei de Snell também se aplica para o raio refletido, sendo o ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência (Figura 13) .

3.2.2.6. Refração crítica

Quando a velocidade é maior numa camada inferior forma-se um ângulo de incidência particular, conhecido como ângulo crítico θ_c , para o qual o seu angulo de refração é de 90° . Isto enaltece um raio criticamente refratado que viaja ao longo de uma interface a uma maior velocidade v_2 . Para um maior ângulo de incidência há uma reflexão interna total da energia

incidente (diferente dos raios de ondas S convertidas para uma maior variedade de ângulos). O Ângulo crítico é dado por :

$$\frac{\sin \theta_c}{v_1} = \frac{\sin 90^\circ}{v_2} = \frac{1}{v_2}$$

Equação 12 – Ângulo crítico

Ou seja

$$\theta_c = \sin^{-1}(v_1/v_2)$$

Equação 13 - Ângulo crítico

A passagem de um raio criticamente refratado ao longo do topo de uma camada abaixo provoca uma perturbação na camada acima desta que viaja a uma velocidade v_2 , no qual é maior que a velocidade sísmica na camada acima v_1 . Esta situação é comparável com um projétil a viajar pelo ar a uma velocidade maior que a do som no qual o resultado é o mesmo, a criação de uma onda de choque. No caso da sísmica, esta onda é conhecida como *head wave* e passa obliquamente pela camada de cima até à superfície. Qualquer outro raio associado à *head wave* é inclinado em relação ao ângulo crítico θ_c . Através da *head wave*, a energia sísmica retorna à superfície depois da refração crítica ter ocorrido na camada abaixo de maior velocidade. Na Figura 14 encontra-se um esquema que representa a refração crítica e a *head wave*.

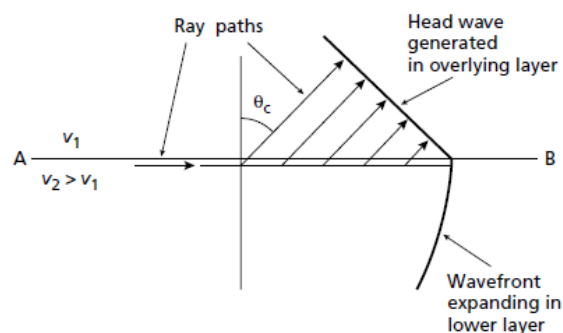


Figura 14 – Formação de uma head wave na camada acima devido à propagação de onda através da camada abaixo (Kearey et al ,2002)

3.2.2.7. Difração

Acima, foi discutido a reflexão e transmissão da energia sísmica em interfaces com um contraste de impedância acústica e era assumido que as interfaces era contínuas e aproximadamente planares. Quando existe uma abrupta descontinuidade na interface, ou estruturas do qual no raio de curvatura é mais pequeno que o comprimento de onda das ondas incidentes, as leis de refração e reflexão já não se aplicam. Este fenómeno dá origem a uma dispersão radial da energia sísmica incidente conhecida como difração. As fontes mais comuns de difração no terreno são arestas de camadas falhadas (Figura 15) e objetos pequenos isolados tais como seixos ou pedaços de rochas em camadas homogéneas.

As fases difratadas são muito comuns em levantamentos sísmicos e algumas vezes são difíceis de discriminar das fases refletidas e refratadas.

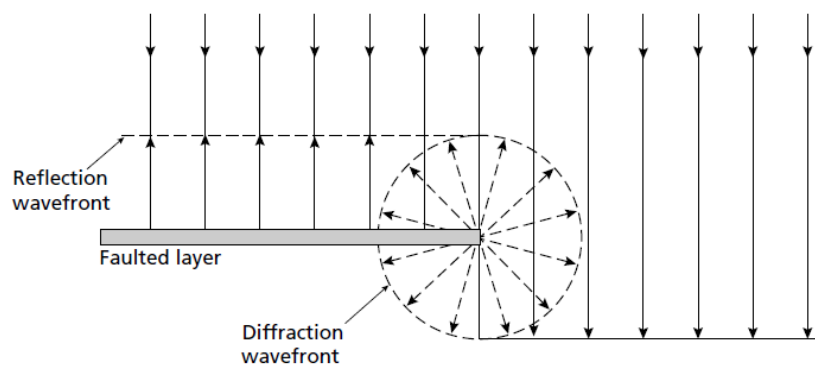


Figura 15 – Difração causada pelo fim cortado de uma camada falhada (Kearey et al.,2002)

3.2.2.8. Sistema de aquisição de dados da sísmica

O propósito fundamental do levantamento sísmico é gravar de uma forma precisa os movimentos do terreno causados por uma fonte e localização conhecidos. Essa gravação do movimento do terreno com o tempo constitui um sismograma que é a informação básica para a interpretação e modelação a partir dos dados obtidos. A instrumentação essencial para que isto ocorra é,

- Geração de um pulso sísmico a partir de uma fonte adequada
- Detecção das ondas sísmicas com um transdutor adequado
- Gravação e representação das formas de ondas sísmicas a partir de um sismograma

A metodologia geral para examinar estruturas escondidas estudando os efeitos de ondas acústicas/sísmicas geradas artificialmente têm um grande campo de aplicação cobrindo várias escalas. Provavelmente a menor escala conhecida é o ultrassom aplicado à medicina e que também pode ser aplicado para examinar estruturas de engenharia. Dentro da geofísica, estes métodos podem ser aplicados a uma escala de metros (engenharia, ambiente, arqueologia) até a uma escala de dezenas de quilômetros (estudo da crosta e manto superior).

Para cada aplicação existe um limite de menor tamanho no qual é possível detectar, conhecido como a resolução do levantamento. A resolução é determinada pelo comprimento do pulso, ou seja, para um pulso com determinado comprimento existe uma mínima separação abaixo onde haverá uma sobreposição do pulso no tempo na gravação sísmica. Apesar disso o comprimento do pulso pode ser encurtado na fase de processamento por desconvolução, sendo isto possível quando os dados têm boa qualidade sendo isto um bom complemento (não um substituto) para uma boa avaliação dos dados. A largura do pulso é determinada tanto pela frequência máxima do pulso assim como a largura de frequência do sinal gravado. Visto que os materiais terrestres absorvem energia sísmica de uma forma seletiva de frequências, a forma de onda ótima será específica para cada levantamento. Uma característica importante, sobretudo na sísmica, é que cada levantamento geofísico tem de ser projetados individualmente para cada caso específico.

- **Fontes sísmicas e o espectro sísmico/acústico**

A fonte sísmica está localizada num local onde de repente se liberta energia a qual conduz a uma tensão rápida do meio que se localiza no meio circundante desta fonte. A fonte sísmica que se utiliza mais são os explosivos. Enquanto os explosivos continuam a ser utilizados, vão aparecendo outros meios mais sofisticados, eficientes e seguros de forma a adquirir dados sísmicos.

Os requisitos necessários para uma fonte sísmica são:

- Energia suficiente em toda a faixa de frequências possível, estendendo-se até às frequências mais altas.
- A energia deve ser concentrada no tipo de onda necessário para o levantamento, ou ondas P ou ondas S, e gerar o mínimo de energia de outro tipo de ondas. Tais energias indesejadas vão degradar os dados gravados e deve ser classificada como ruído.

- A fonte da forma de onda deve ser repetível. Os levantamentos sísmicos envolvem a comparação de sismogramas gerados por uma série de fontes em diferentes localizações. Variações dos sismogramas deve ser diagnostico da estrutura do terreno e não devido a variações aleatórias da fonte.
- A fonte deve ser segura, eficiente e ecologicamente aceitável. A maior parte dos levantamentos sísmicos são feitos a partir de operações comerciais que são regidas por legislação de segurança e ambiental. Devem ter em conta a questão custo-eficácia. Por vezes os requisitos de eficiência conduzem a uma maior segurança e menor impacto ambiental do que a lei exige.

O espetro da sísmica completo encontra-se na Figura 16. Existem muitos tipos de fontes sísmicas que se diferenciam pelo seu nível de energia e frequências. No geral, as fontes sísmicas contem um grande campo de frequências variando de 1 Hz até algumas centenas de hertz, apesar de a energia se concentrar num limite de intervalo de frequências.

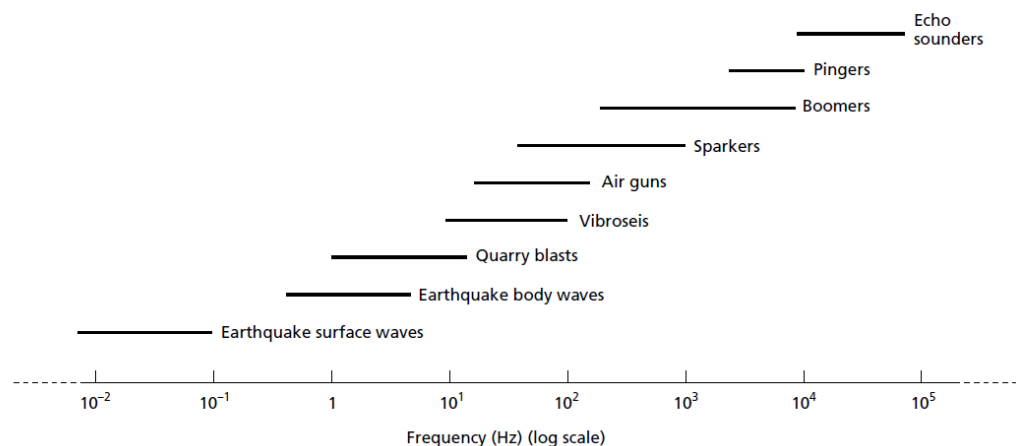


Figura 16 – O espetro sísmico /acústico (Kearey et al., 2002)

As fontes sísmicas podem-se dividir em 3 tipos, as explosivas, as não explosivas e as marinhas. Na figura 21 estão representadas as fontes sísmicas conforme os seus tipos.

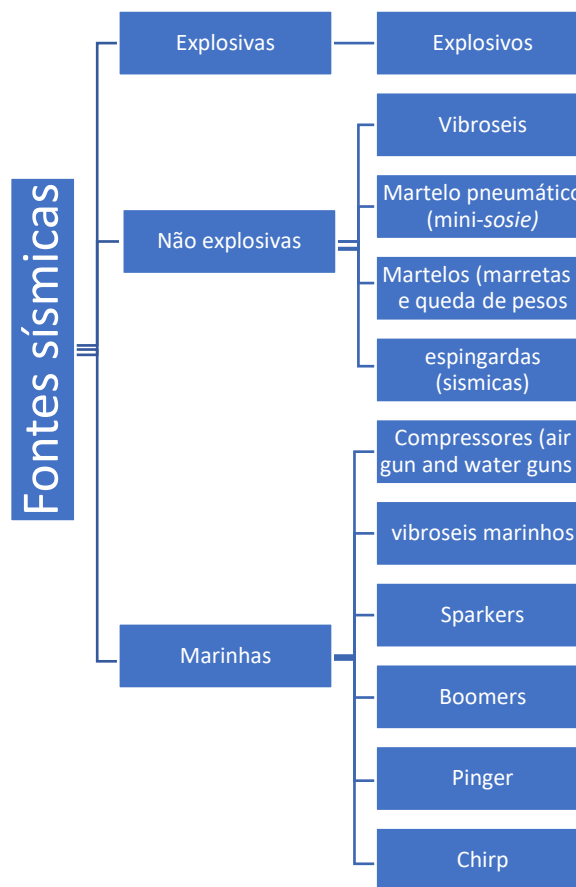


Figura 17 – Esquema dos diferentes tipos de Fonte sísmica (Kearey et al, 2002)

Seguidamente, vai-se proceder à explicação dos métodos mais usados para cada tipo.

- Fontes sísmicas explosivas

No terreno, os explosivos são normalmente detonados em furos de pouca profundidade de forma a melhorar o acoplamento da energia da fonte e minimizar os estragos à superfície. Os explosivos oferecem uma fonte sísmica razoavelmente barata e eficiente com um largo espectro de frequências, porém o seu uso normalmente exige permissões específicas e dificuldades logísticas de armazenamento e transporte. É uma fonte sísmica demorada pois exige a perfuração dos furos para a sua detonação. Porém o seu ponto negativo é que não fornecem uma fonte precisamente repetitiva como exigem os sistemas modernos de processamento, nem a detonação de explosivos

pode ser repetitiva num certo e preciso intervalo de tempo como exigido para um perfilamento eficiente realizado no oceano a partir de navios. Visto que a fonte sísmica feita por explosivos pode falhar em duas ou até três exigências básicas para a prospecção moderna, o seu uso decresceu estando limitadas a locais onde outras fontes sísmicas não podem ser usadas.

- Fontes sísmicas não explosivas

Os *Vibroseis*[®] são a fonte não-explosiva mais usada em levantamento de reflexão sísmica.

Estes estão cupulados a um camião, que transmitindo vibrações no terreno de pouca amplitude e continuamente mudando de frequência, conhecida por *sweep signal*. Um típico *sweep signal* dura de poucos segundos até a algumas dezenas de segundos e varia progressivamente de frequência nos limites de 10 a 80 Hz.

Os *Vibroseis*[®] são rápidos e convenientes para uso, pois, o seu sinal é precisamente conhecido e repetível. A unidade vibratória precisa de uma base firme que possibilite operar em, por exemplo, alcatrão, porém este equipamento não opera muito bem em terrenos brandos.

Uma vantagem particular dos vibroseis é que estes podem ser usados em cidades pois não criam distúrbios significativos no meio envolvente. Porém a grande desvantagem é que cada camião configurado para estes equipamentos têm um custo de quase meio milhão de euros, ou seja, este preço é impraticável para o caso de pequenas prospecções/levantamentos.

A queda de um peso ou o uso de um martelo é provavelmente a fonte sísmica de mais simples aplicação no terreno. Foram desenvolvidas várias formas de queda de peso que vão desde um camião que deixa cair um peso de várias toneladas até ao uso individual como uma marreta. Se a energia da fonte sísmica exigida for pequena estas ferramentas podem ser usadas rapidamente e com uma boa eficácia.

- Fontes sísmicas marinhas

Os compressores de ar são fontes pneumáticas nos quais contêm uma câmara onde o ar se encontra a uma grande pressão (cerca de 10-15 MPa). Este ar é transportado para a câmara a partir de um compressor localizado num barco e está ligado a partir de uma mangueira. O ar é, depois, libertado, por aberturas para a água na forma de bolhas de alta pressão. Existem vários tipos de

volumes de camaras disponíveis, levando a diferentes outputs de energia e de características de frequência. O pulso primário gerado pelo compressor de ar é seguido de um conjunto de pulsos conhecidos como pulsos de bolhas (*bubble pulses*) que geralmente aumentam o comprimento do pulso. Os pulsos de bolha são causados pela expansão oscilatória e colapso de bolhas de gás secundárias seguindo o colapso das bolhas iniciais. Estes têm o efeito de aumentar excessivamente o comprimento do pulso sísmico. Porém medidas podem ser tomadas para suprimir o efeito do pulso de bolhas, realizando a detonação perto da superfície da água para que as bolhas de gás escapem para o ar. Enquanto ocorre esta remoção, o pulso provocado pelas bolhas, muita da energia é desperdiçada e o pulso sísmico fica mais fraco. Métodos mais sofisticados podem ser usados para ultrapassar o problema dos pulsos provocados pelas bolhas e preservar a eficiência do pulso sísmico. Um conjunto de compressores de diferentes tamanhos é detonado, apresentando assim diferentes períodos de pulsos de bolha que podem ser combinados para produzir uma fonte energética nos quais os pulsos primários interferem construtivamente e os pulsos secundários (pulsos de bolhas) interferem destrutivamente. Para uma penetração mais profunda do levantamento sísmico a energia total transmitida deve ser aumentada usando múltiplos conjuntos de compressores montados num quadro que é rebocado por um navio. Os compressores de ar são mecanicamente simples e podem operar com grande confiança e repetição. Os compressores a ar tornaram-se a fonte sísmica marinha mais comum.

Os compressores a água são uma adaptação dos compressores a ar de forma a evitar o problema do pulso de bolhas. O ar comprimido em vez de ser libertado na água é usado para empurrar um pistão que vai empurrar a água fora do sistema. Quando o pistão para é criada uma cavidade de vácuo e ao puxar o pistão vai permitir a entrada de água no sistema e assim repetir o processo anteriormente referido. O resultado do pequeno comprimento do pulso permite adquirir uma maior resolução do que é adquirida com compressores de água, mas há uma maior complexidade na interpretação dos dados devido ao movimento do pistão. A Figura 18 representa as diferenças entre um compressor de ar e de água.

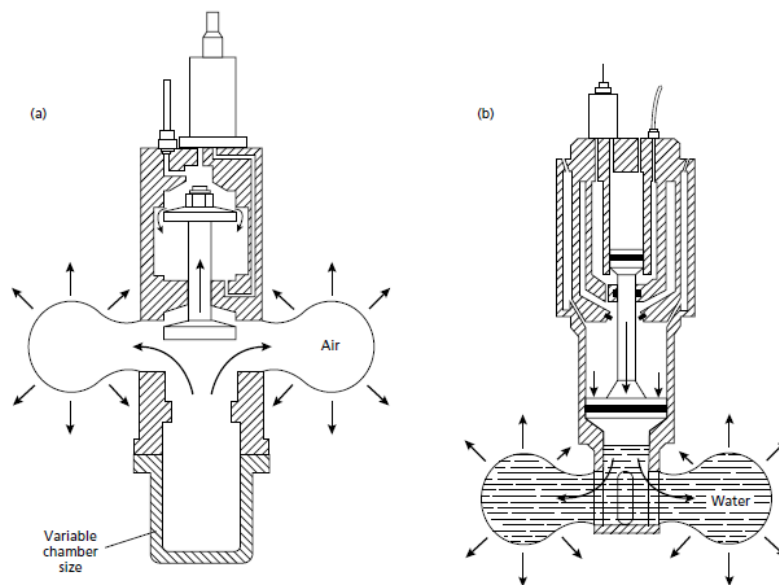


Figura 18 – (a) – compressor de ar. (b) -compressor de água (Kearey, 2002)

- **Transdutores sísmicos**

Para converter o movimento do terreno em sinal elétrico é necessário o uso de um transdutor sensível inserido no terreno e que possa registrar um intervalo de frequências e amplitudes exigidos sem nenhuma distorção. A primeira questão a aparecer é qual a componente do movimento do solo a medir. Enquanto o terreno oscila é possível medir o deslocamento, velocidade ou aceleração das partículas do terreno enquanto a onda passa. O movimento do terreno também se apresenta em 3 dimensões. Para fazer uma captação confiável das ondas sísmicas é necessário ter um conhecimento dos componentes dos movimentos verticais este-oeste e norte-sul. Historicamente, a solução tem sido medir só a velocidade dos movimentos verticais. A componente vertical tem mais sensibilidade para as ondas P do que para as ondas S. A velocidade é tecnicamente mais fácil de detetar e gravar do que o deslocamento e aceleração. Gravar só um componente minimiza os problemas técnicos relativos ao armazenamento de dados.

Os equipamentos usados em terra para detetar os movimentos sísmicos do terreno são conhecidos por sismómetro ou geofones. Na água, a passagem das ondas compressivas é marcada por mudanças de pressão de pouco tempo de duração que são detetadas por hidrofones rebocados ou suspensos na superfície da água ou, em locais onde a profundidade da água é pouca, pousados no solo oceânico/fluvial.

Os geofones são feitos de várias formas, mas a mais comum é o geofone de bobine móvel (Figura 19). Uma bobine cilíndrica é suspensa por uma mola no campo de um íman permanente que se encontra preso ao involucro do equipamento. O íman tem um polo cilíndrico dentro da bobine e um polo nulo que se encontra em torno da bobina. A bobine suspensa representa um sistema oscilatório com uma frequência ressonante determinada pela massa da bobine e pela rigidez da mola suspensa.

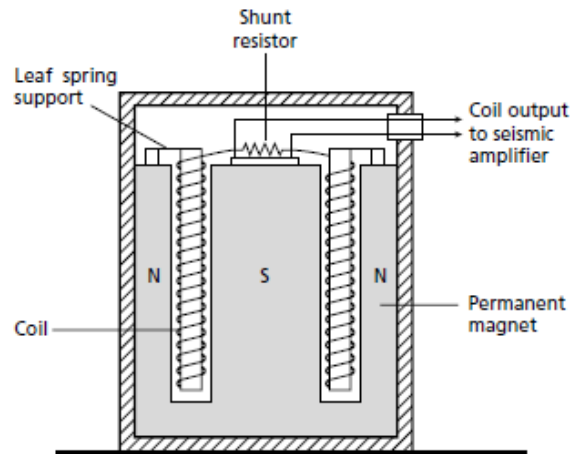


Figura 19 – Geofone de bobine móvel (Kearey,2002)

O geofone pode ser fixo por uma ponta de ferro caso se trate de um solo brando ou montado de forma a ficar bem fixo caso o solo seja rígido. Este move-se em sintonia com a superfície do terreno durante a passagem da onda sísmica, causando um movimento relativo entre a bobina suspensa e o íman fixo. O movimento da bobina no campo magnético cria uma voltagem ao longo dos terminais da bobine. O movimento oscilatório da bobina é inerentemente amortecido devido ao movimento da bobina que cria um campo magnético que interage com o campo magnético do íman, que é oposto ao movimento da bobina. A quantidade de amortecimento pode ser alterada conectando uma resistência do tipo *shunt* aos terminais da bobina de forma a controlar a corrente na mesma.

3.3. Sísmica de refração

3.3.1. Introdução

O levantamento de refração sísmica utiliza a energia sísmica que retorna à superfície depois de atravessar o terreno a partir de raios refratados. Este fato permite que os levantamentos de refração sísmica simples tenham foco só nas primeiras chegadas da energia sísmica, sendo que as resultantes destas primeiras chegadas são gráficas de tempo x distância no qual é possível retirar informação acerca da profundidade das interfaces refratoras. Este método é normalmente utilizado para localizar interfaces refratoras que separam camadas de diferentes velocidades sísmicas, mas o método também é aplicável em casos onde a velocidade varia muito pouco em função da profundidade ou lateralmente.

A maior parte dos levantamentos de refração são executados ao longo de perfis em linha que são feitas de forma a serem suficientemente longos para assegurar que as primeiras chegadas são raios refratados das camadas alvo.

3.3.2. Cálculo para a determinação de espessuras das camadas e profundidade do *bed-rock*

A partir deste método será feito o cálculo das espessuras e profundidade do *bed-rock* neste trabalho. Pois apesar de este método ser realizado para camadas horizontais, também é possível com o mesmo dimensionar camadas com inclinação, pois ao interligar os vários resultados dos pontos de embate, este (caso as camadas tenham inclinação) vai admitir que a velocidade de determinada camada se localiza a determinado ponto, enquanto que já noutro embate essa velocidade vai ser detetada a uma profundidade diferente, interligando estas velocidades/profundidades vamos então obter a espessura/superfície da camada inclinada.

Tendo isto em conta o primeiro ponto será seleccionar as primeiras chegadas de um sismograma de determinado embate. A partir do tempo dessas chegadas calcula-se a velocidade a partir de,

$$v = \frac{\text{distância (metros)}}{\text{tempo (segundos)}}$$

Equação 14 – Equação da velocidade

Seguidamente se calcula, a partir das velocidades obtidas anteriormente, a velocidade real da primeira cada, que é a média da primeira camada do perfil direto e do perfil inverso a este que é,

$$V_{oreal} = \frac{V_{oi} + v_{od}}{2}$$

Equação 15 – Equação de V_{oreal}

Em que,

- V_{od} - Velocidade da primeira camada do tiro direto
- V_{oi} - Velocidade da primeira camada do tiro inverso

Porém é importante referir que este cálculo só se aplica na primeira camada identificada.

Depois, para se calcular a velocidade real da camada seguinte, numa primeira fase é necessário calcular o ângulo de inclinação (il) do raio a partir da fórmula,

$$il = \frac{1}{2} \times \left[\arcsen\left(\frac{v_{xreal}}{v_{x+1i}}\right) + \arcsen\left(\frac{v_{xreal}}{v_{x+1d}}\right) \right]$$

Equação 16 – Ângulo de inclinação

Seguidamente, calcula-se então a velocidade real de uma determinada camada a partir de,

$$V_{x+1real} = \frac{V_{xreal}}{\text{sen}(il)}$$

Equação 17 – equação da velocidade real de uma camada

Depois segundo a U.S. Army Corps of Engineers (1995), a equação da profundidade é dada por:

$$h_x = \frac{d_x}{2} \times \sqrt{\frac{v_{x+1real} - v_{xreal}}{v_{x+1real} + v_{xreal}}}$$

Equação 18 – Equação da espessura de camadas

Seguidamente executa-se o mesmo cálculo para cada embate e para cada embate traça-se uma linha vertical num perfil e marca-se os pontos das profundidades. A partir daí liga-se esses pontos entre embates e obtemos assim o perfil correspondente à linha estudada.

3.3.3. Geometria de perfil para estudar problemas de camadas planas

A geometria convencional para um perfil de refração envolve um tiro em cada ponta do perfil e gravar as chegadas sísmicas ao longo da linha dos dois tiros. As profundidades interpretadas do refrator abaixo das pontas do perfil, usando as equações dadas acima, não são diretamente medidas, mas sim inferidas com base na geometria do refrator através do comprimento mais curto da amostra do refrator (BC). Onde uma cobertura contínua da geometria do refrator é necessária ao longo de uma série de perfis inversos, as linhas individuais dos perfis devem ser organizadas a sobrepor todas as partes do refrator de forma a se amostrar diretamente todos os raios criticamente refratados.

Para além, do perfil reverso convencional, ilustrado na Figura 20, outros métodos de se obter outras interpretações para o caso de camadas planas com inclinação incluindo o método de *split-profile* (Johnson,1976 cit in Kearey et al,2002) e o método *single-ended profile* (Cunningham,1974 cit in Kearey et al,2002).

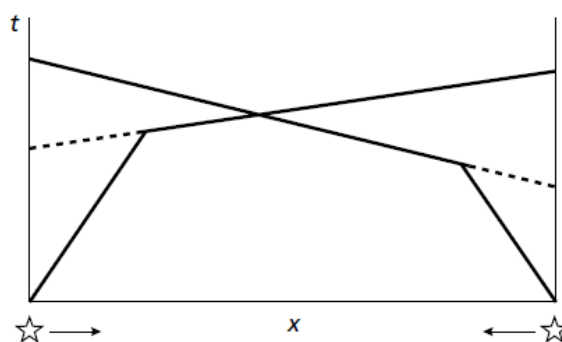


Figura 20 - Perfil reverso convencional com 2 tiros, um em cada pont do perfil (Kearey et al, 2002)

O método de *split-profile* (Figura 21) envolve gravar as ondas sísmicas do centro do perfil, onde é realizado o tiro, para fora.

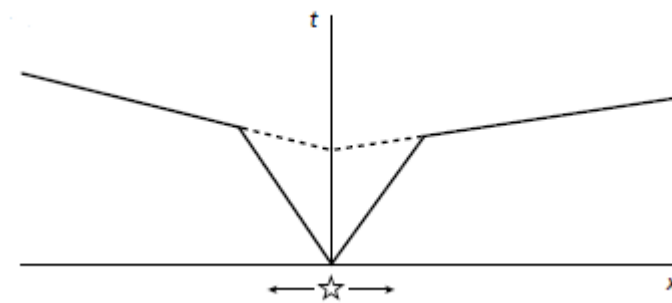


Figura 21 – *Split-profile*, com um tiro central (Kearey ,2002)

O método *single-ended profile* (Figura 22) foi desenvolvido para interpretar camadas superficiais de velocidades baixas representadas pelas chegadas refratadas num perfil com fim único (só com um tiro numa ponta) para o cálculo de correções estáticas.

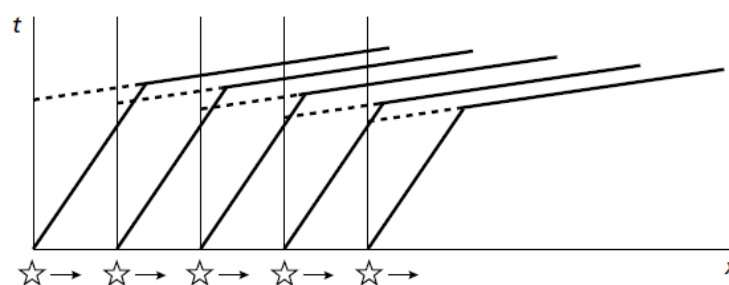


Figura 22 – *Single-ended profile* com repetição de tiros (Kearey ,2002)

3.3.4. Problemas das camadas cegas e escondidas

É possível existir na Terra camadas que não produzam nenhuma refração das primeiras ondas de chegada. Neste caso as camadas não serão detetáveis numa primeira chegada simples de um levantamento de refração. Os dados observados podem ser interpretados usando métodos anteriormente referidos e produzir mesmo uma solução consistente, mas errada. Por esta razão a possibilidade de encontrar camadas indetetáveis deve ser sempre considerada. Em prática, existem dois tipos de problema. De forma a que uma camada seja detetada como uma primeira chegada, uma camada deverá ter outra por baixo com uma velocidade sísmica maior para que as frentes de onda sejam produzidas e terem espessura e velocidade para que as frentes de onda se tornem as primeiras chegadas numa certa distância. (moodey)

Uma camada escondida (*hidden layer*) é uma camada que produz ondas, mas que não dá origem a primeiras chegadas. Os raios ao viajar em níveis mais profundos chegam antes destes serem criticamente refratados na camada acima em questão (Figura 23). Isto pode resultar devido à espessura da camada ou devido a ter uma velocidade muito idêntica à camada de cima. Neste caso, um método de pesquisa que envolve o reconhecimento só das primeiras chegadas, não vai detetar esta camada. Deve-se então, examinar os sismogramas para possíveis chegadas que ocorrem atrás das primeiras chegadas.

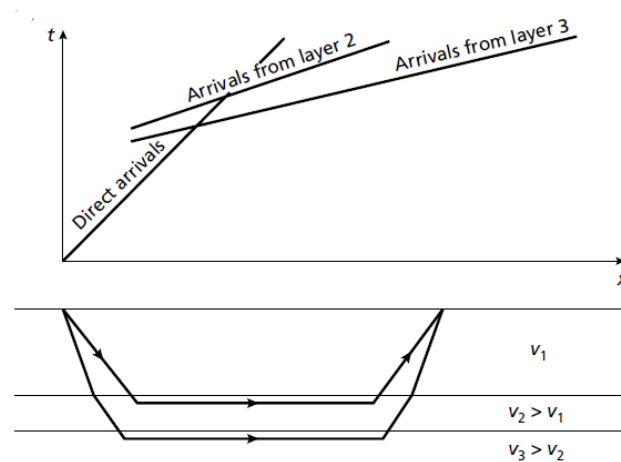


Figura 23 - Camada escondida: camada fina que não dá origem a primeiras chegadas (Kearey et al,2002)

Uma camada cega (*blind layer*) apresenta um problema mais insidioso, resultante de uma camada de baixa velocidade como demonstra a Figura 24. Os raios não podem ser criticamente refratados no topo de tal camada e esta camada não irá dar origem a frentes de onda. Consequentemente, uma camada de baixa velocidade não pode ser detetada por um levantamento de refração apesar de o topo desta camada dar origem a um vasto angulo de reflexões que podem ser detetadas como chegadas mais tardias durante o levantamento de refração.

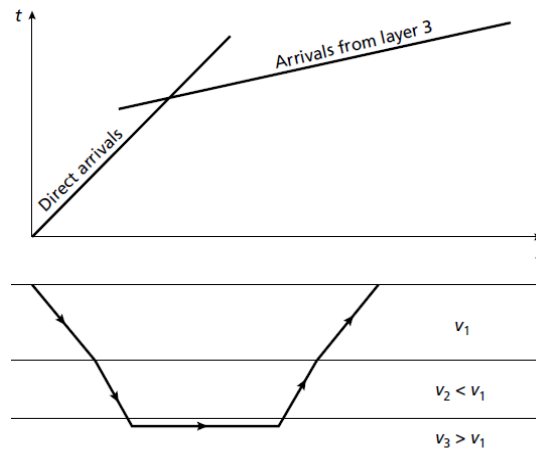


Figura 24 - Camada cega: uma camada de baixa velocidade que não origina frentes de onda (Kearey et al, 2002)

Na presença de uma camada de baixa velocidade, a interpretação dos gráficos de distância x tempo conduz a uma superestimação da profundidade das interfaces das camadas. As camadas de baixa velocidade são um risco em todos os tipos de sismologia de refração. Numa pequena escala, uma camada de turfa em lamas e areis acima do *bed-rock* poderá não ser detetável, conduzindo a uma falsa estimativa de condições de fundação e profundidades da superfície do *bed-rock* abaixo de um local de construção. Numa maior escala, as zonas de baixa velocidade de extensão regional são conhecidas dentro da crosta continental e podem escapar à deteção em experimentos de sísmica crustal.

3.4. Penetrometro dinâmico médio

3.4.1. Boletim de campo, RDA e tensão admissível

Depois de todos os ensaios realizados, o boletim de campo devidamente preenchido, devemos transportar os dados do boletim para uma folha de *Excel* que é fornecida pelo Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC).

A estrutura e organização desta folha de excel é igual ao boletim de campo, tendo como principal finalidade de facilitar o cálculo dos parâmetros em estudo, assim como posterior obtenção de gráficos que relaciona a profundidade com número de golpes.

Esta folha de cálculo compila uma série de dados, que são necessários para se calcular as tensões admissíveis, nos quais alguns deste dados são obtidos em campo e outros calculados a partir de expressões matemáticas que são referidas mais à frente.

De seguida, na Figura 25, é apresentado um exemplo de um boletim de campo.

ENSAIOS DE CAMPO - PDM Requerente: tese MEGG Obra: Campo experimental Porto Realizado por: (Rui Pinto) Verificado por: (João Paulo Meixedo) Director do LGMC: (José Augusto Fernandes)											
Ensaio nº 1 PENETRAÇÃO DINÂMICA MÉDIA (DMP 30) Setembro de 2018											
Prof.	Nº de	Nº de	Rda	Tensões	Prof.	Nº de	Nº de	Rda	Tensões		
(m)	Varas	Golpes	K	N x K	Admissíveis	(m)	Varas	Golpes	K	N x K	Admissíveis
		N	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)			N	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)		(kg/cm ²)
0, 10	1	13	3.837	49.88	1.65	10	6	46	3.060	140.76	4.65
20	1	53	3.837	203.36	6.71	20	6	42	3.060	128.52	4.24
30	1	39	3.837	149.64	4.94	30	6	44	3.060	134.64	4.44
40	1	25	3.837	95.93	3.17	40	6	46	3.060	140.76	4.65
50	1	14	3.837	53.72	1.77	50	6	47	3.060	143.82	4.75
60	1	14	3.837	53.72	1.77	60	6	47	3.060	143.82	4.75
70	1	10	3.837	38.37	1.27	70	6	42	3.060	128.52	4.24
80	1	13	3.837	49.88	1.65	80	6	46	3.060	140.76	4.65
90	1	35	3.837	134.30	4.43	90	6	50	3.060	153.00	5.05
1, 00	1	10	3.837	38.37	1.27	6,00	6	49	3.060	149.94	4.95

Figura 25 - Exemplo de boletim de campo PDM

A primeira coluna é referente à profundidade que a vara atingiu, sendo considerado, intervalos de 10 centímetros, como já referido.

Na segunda coluna é então apresentado o número de varas que foram necessárias para penetrar certa profundidade, sendo que o seu valor aumenta em 1 unidade quando é perfurado 1 metro de terreno, visto que o comprimento de cada vara é de 1 metro.

A terceira coluna é referente ao número de golpes, um dos parâmetros mais importantes, necessário para penetrar 10 centímetros de terreno. Também este será o parâmetro necessário para a realização dos gráficos pela tradução de uma forma superficial sobre a evolução do índice de capacidade de resistência do solo à penetração em profundidade, de cada furo.

Na quarta coluna, o K está diretamente relacionado com o tipo e número de varas, sendo utilizado para calcular a Resistência dinâmica aparente (RDA). Este valor é obtido da Equação 19.

$$K = \frac{M^2 \times h}{s \times ((M + p) - pv) + (pv \times Nv)} / pn$$

Equação 19 – Equação para a obtenção do parâmetro K

Onde M é a massa do pilão (Kg), h é a altura da queda do pilão (cm), s a secção da ponteira cônica (cm^2), $(M + p)$ é o total do conjunto da massa do pilão e a massa do conjunto do equipamento excluindo o pilão, pv é o peso de uma vara (Kg), Nv é o número de varas e pn a penetração (cm).

O RDA, que se localiza na quinta coluna, diz respeito à resistência dinâmica aparente como já foi referido, importante para o conhecimentos das tensões admissíveis finais, obtendo-se este parâmetro através da multiplicação dos números de golpes para dada penetração (N), pelo parâmetro referido anteriormente, o K, pela Equação 20 .

$$RDA (kg/cm^2) = N \times K$$

Equação 20 – Parâmetro RDA

Por fim, e igualmente importante, segue-se a tensão admissível. Este valor corresponde ao parâmetro que é obtido através do produto apresentada na Equação 21.

$$Tensão Admissível (kg/cm^2) = RDA \times 0,33$$

Equação 21 – Tensão admissível

Todos os parâmetros considerados são calculados para toda a profundidade final de cada um dos furos, podendo esta ir de 10 cm a 10 m, dependendo do resultada do cada ensaio.

Tendo isto em conta, é possível então realizar-se gráficos, já referidos anteriormente, sendo que o eixo das abcissas representa o número de golpes necessários para a penetração de cada 10 cm, e o eixo das coordenadas, a profundidade correspondente. Na Figura 26, está representado um gráfico que representa parte do estudo realizado de cada ensaio. Importa referir que todos os gráficos, tal como os boletins estarão devidamente apresentados no Anexo x (CD-ROM).

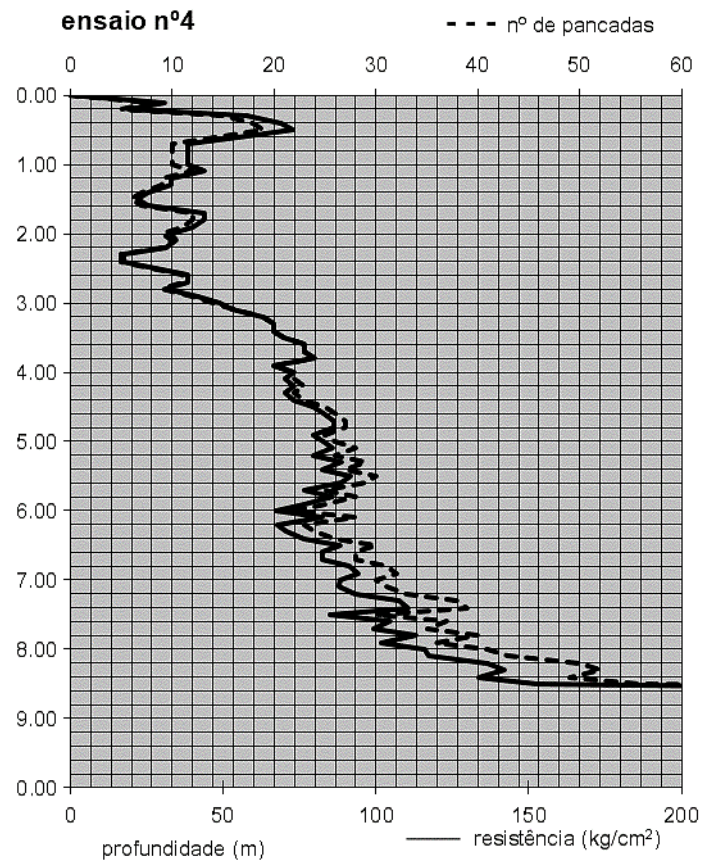


Figura 26 – Gráfico de índice de resistência do solo à penetração

4. Tipologia das Camadas e perfil do *bed-rock* no campo de testes da FEUP através de ensaios de campo

4. Tipologia das camadas e perfil do bed-rock no campo de testes da FEUP através de ensaios de campo.

4.1. Apresentação do local de estudo

4.1.1. Enquadramento Geográfico

O local em estudo localiza-se na cidade do Porto a noroeste (NO) da Península Ibérica e também de Portugal continental.

O distrito do Porto corresponde ao núcleo da província do Douro Litoral, onde se encontra limitado a Norte pelo distrito de Braga, a Este pelo distrito de Vila Real, a Sul por Viseu e Aveiro e a Oeste pelo Oceano Atlântico.

Dentro do distrito do Porto encontra-se a freguesia de Paranhos, no qual apresenta o maior polo de ensino superior da cidade, o Polo universitário da Asprela. Neste polo pode-se encontrar muitas universidades assim como o ISEP e FEUP, cujo no último referido encontra-se um campo de testes onde será realizado este trabalho.

Na Figura 27 está representado a localização da FEUP.

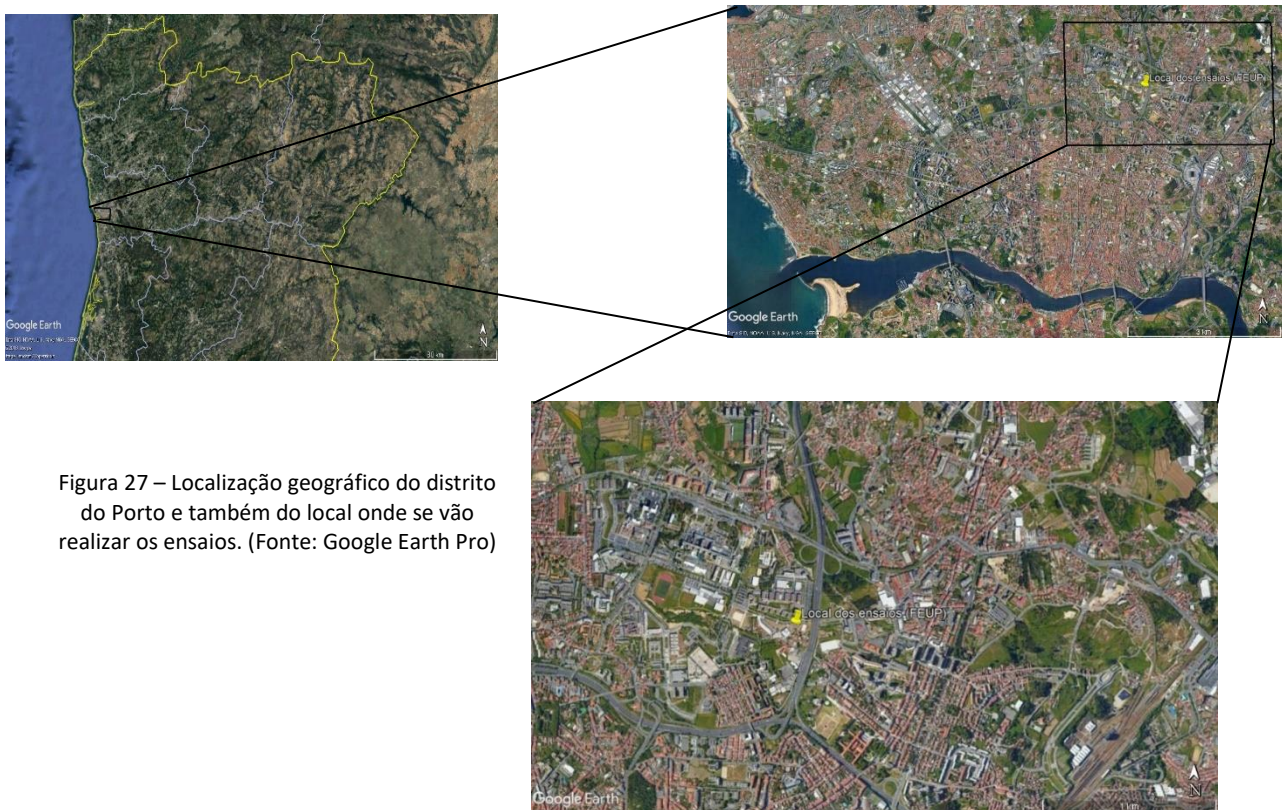


Figura 27 – Localização geográfica do distrito do Porto e também do local onde se vão realizar os ensaios. (Fonte: Google Earth Pro)

4.1.2. Enquadramento Geológico

A área urbana do Porto encontra-se inserida no domínio do complexo do Maciço Ibérico, na Zona da Ossa Morena, que faz fronteira com a Zona Central Ibérica na fronteira a Oeste da zona de Cisalhamento Porto-Tomar-Ferreira do Alentejo (Chaminé et al. 2003, Ribeiro et al. 2007).

No Geral, esta zona é constituída por três tipos de formações: as formações sedimentares de cobertura, as formações metamórficas e as formações ígneas. Destas três formações, a que têm uma maior expressão são as formações de origem ígnea, mais precisamente, rochas graníticas de idade hercínica ou varisca (340 aos 270 Ma) (Noronha, 2003).

Na Figura 28 observa-se o enquadramento geológico regional da zona acima referida.

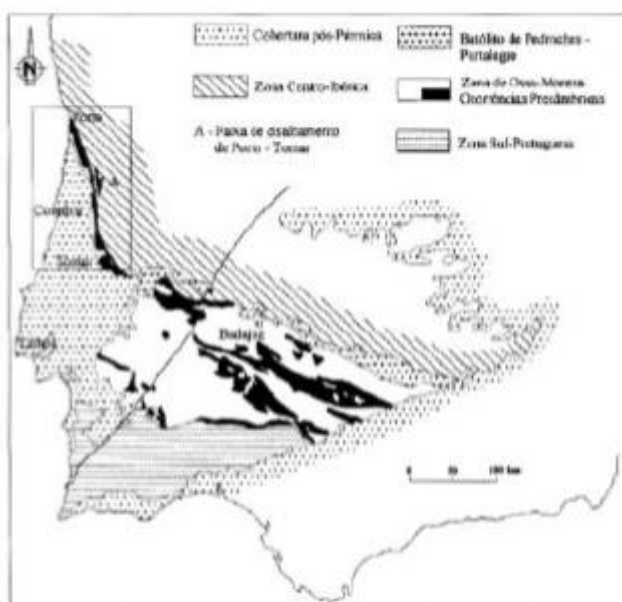


Figura 28 – Enquadramento geotécnico regional da faixa de cisalhamento de Porto–Coimbra-Tomar (Zona da Ossa Morena de Portugal) no Maciço Ibérico (Chaminé et al., 2003)

A nível geológico, a região insere-se ainda um substrato cristalino da zona oriental e um complexo de gnaisses e micaxistos na região ocidental, que se encontram bastante deformados com uma complexa história tectonometamórfica do Proterozóico superior/Paleozóico.

Pela classificação dada pela Carta Geotécnica do Porto, o Granito do Porto caracteriza-se por ser um granitoide de grão médio a grosso, de duas micas, cinzento podendo este apresentar um tom amarelado quando se encontra com algum grau de alteração. O mesmo encontra-se, geralmente, meteorizado em diferentes graus. Desde rocha sã a solo residual, exibindo condições

geotécnicas variáveis, que resultam essencialmente da arenização e caulinação, as quais podem atingir profundidades superiores a 100m.

Pode-se referir, que esta zona também está incluída no complexo xisto-grauváquicos e metamórfico da foz do Douro.

No que diz respeito à geomorfologia, a zona do Porto apresenta uma plataforma litoral caracterizada por uma superfície ligeiramente inclinada a Oeste, culminando a cerca de 120 metros acima do nível do mar por uma série de colinas (250 – 300m a.n.m). Esta plataforma é cortada pelo rio Douro, num vale de encostas altas e inclinadas, que constituem a chamada zona ribeirinha (Afonso,2010; Carrington da Costa, 1958; Chaminé et al. 2003a, b).

4.1.3. Local dos ensaios

O local em questão, é um campo de testes onde foi enterrada alguma sucata com o propósito de experimentar métodos de prospeção, como os abordados neste trabalho.

Na Figura 29 está apresentado o local em questão.

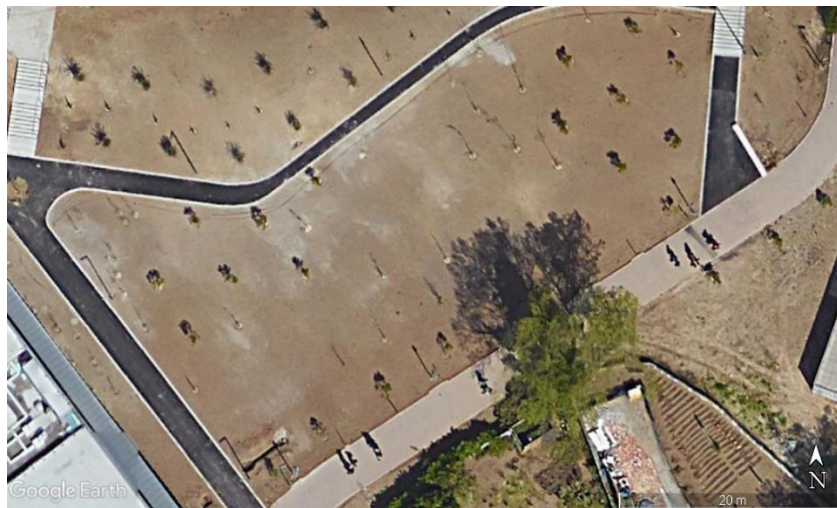


Figura 29 - Local onde foram realizados os ensaios (Fonte: Google Earth)

4.2. Perfis de distribuição dos *shot points*, geofones e dos furos do PDM

4.2.1. Perfis de distribuição dos *shot points* e geofones (Refração sísmica)

Depois da escolha do local deu-se então início à execução dos ensaios, mas primeiro definiu-se a disposição dos perfis de sísmica e penetrómetro. Na Figura 30 e Figura 31 estão apresentados esses perfis.



Figura 30 - Distribuição dos geofones e locais de embate para os ensaios de sísmica.

Como é possível verificar na Figura 30, existem 4 linhas de geofones e estes estão separados entre si a uma distância de 3 metros. No que diz respeito aos locais de embate já não se verifica isto, sendo que estes estão às distâncias (em cada linha):

- 0 metros;
- 3 metros;
- 11,25 metros;
- 22,5 metros;
- 33,75 metros;
- 42 metros;
- 45 metros.

Na Figura 31 estão representadas as linhas e organização nominal dos perfis retirados em cada local de *shot point*.

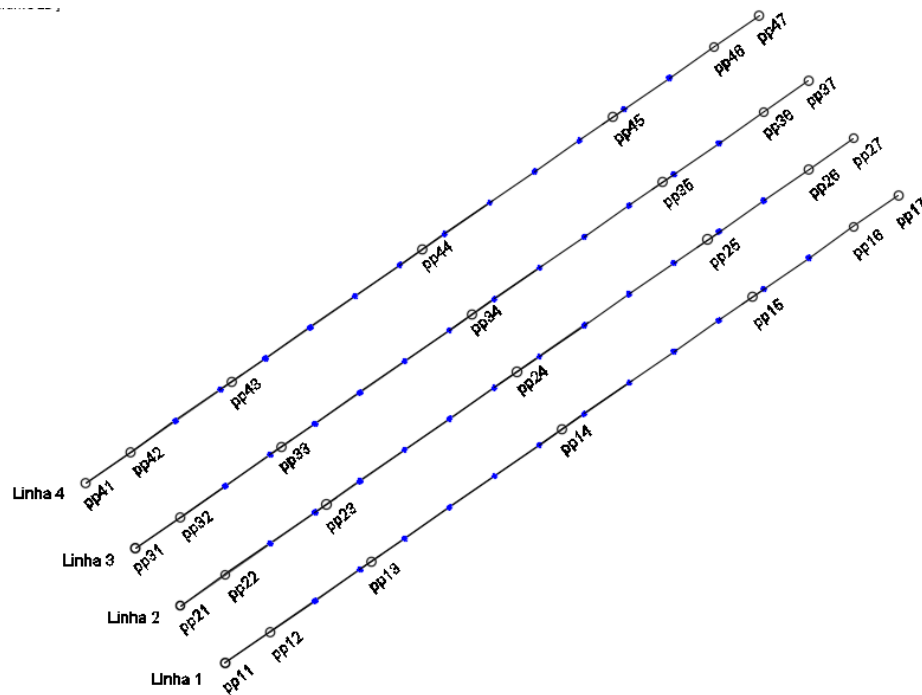


Figura 31 – Organização das linhas e locais do *shot point* de forma nominal

Os nomes “ppxx” foram dados de forma a ser mais fácil a identificação do *shot point* e linha. O “pp” significa perfis porto do qual não têm muita relevância, quanto ao primeiro número que aparece significa o número da linha e o segundo número o número do *shot point*, por exemplo, o perfil corresponde a pp23, representa um perfil da linha 2 correspondente ao terceiro *shot point*. Na tabela abaixo, estão representadas as nomações dos perfis sísmicos divididas pela distância de *shot point* do perfil.

Tabela 6 – Perfis sísmicos divididos pela distância do *shot point*.

Nome dos perfis	Distância do <i>shot point</i> (metros)
pp11; pp21; pp31; pp41	0
pp12; pp22; pp32; pp42	3
pp13; pp23; pp33; pp43	11,25
pp14; pp24; pp34; pp44	22,5
pp15; pp25; pp35; pp45	33,75
pp16; pp26; pp36; pp46	42
pp17; pp27; pp37; pp47	45

Em cada local de *shot point* for feito *stacking*, isto é, em cada local de *shot point* foram feitos 5 embates e o resultado de cada um foi somado no fim pelo *software*, obtendo-se assim um sismograma mais próximo e real daquele que representa um determinado embate. O *stacking* também têm como função eliminar o máximo de ruído possível dos sismogramas.

4.2.2. Penetrómetro dinâmico médio (PDM) – distribuição dos furos

Depois da realização do método da refração sísmica, escolheu-se os pontos no terreno onde se efetuará os ensaios do PDM. Esta escolha foi feita tendo sempre em conta que estes locais teriam de estar sobrepostos (ou bastante próximos disso) dos locais de embate da refração sísmica. Em cada linha (já definidas pelo ensaio de refração sísmica) realizou-se 3 furos, um furo central e dois nas extremidades, sendo que os furos que se encontram mais próximos do caminho (a SW) deu-se um espaçamento de 1,5 metros, de forma a evitar algum objecto resultante da construção desse caminho fosse atravessado pelo penetrómetro (Figura 32). Também é possível verificar que no primeiro perfil a contar de NW há um espaçamento maior numa das extremidades entre linhas, devido a uma árvore ali existente, pois era maior a probabilidade de ao realizar o ensaio, o penetrómetro ter de atravessar raízes o que adulteraria os dados face à realidade, daí deslocar-se um pouco o local do furo.

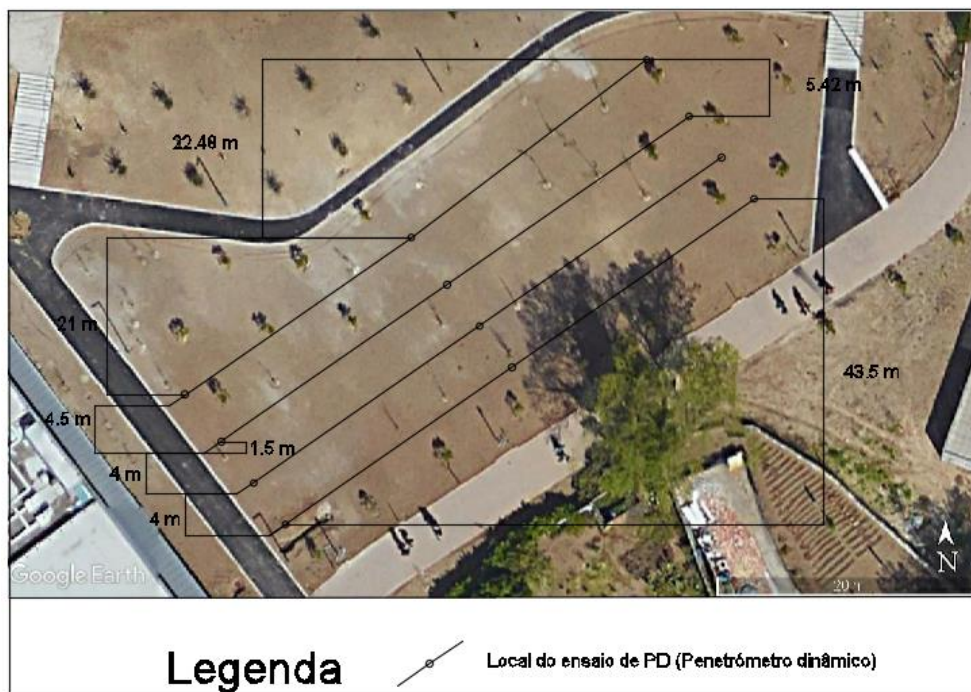


Figura 32 - Local de realização dos furos do PDM

Na Figura 33 temos a numeração dos furos, no qual cada número representa o ensaio realizado no local. Também na Figura 33, como já acima explicado, o furo correspondente ao furo que teve de ser deslocado devido à árvore existente é o furo número 3.

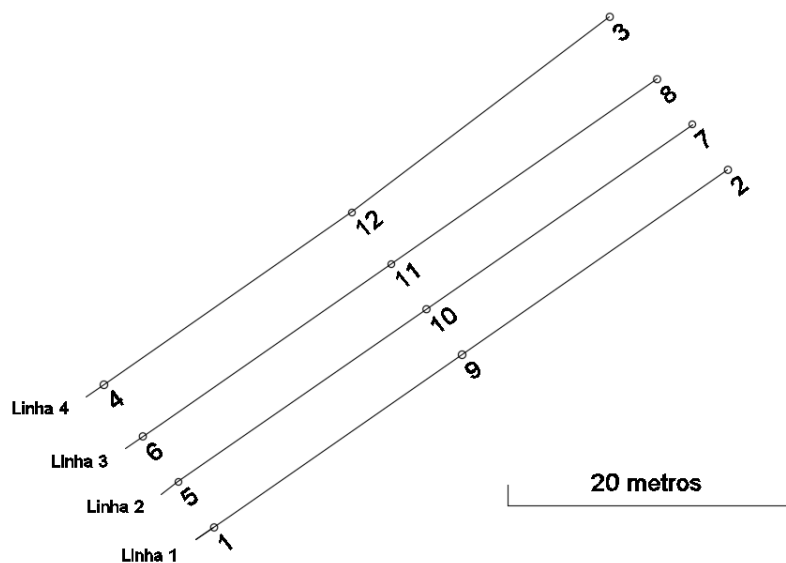


Figura 33 – Numeração dos furos realizados no ensaio de PDM

4.3. Resultados obtidos, cálculo de velocidades sísmicas, profundidades e perfis (Refração sísmica)

4.3.1. Tempos de Chegada e Dromocrónicas

Depois de realizados os ensaios de todas as linhas, o resultado destes foram os sismogramas que se encontram no Anexo 1. Estes sismogramas apresentam várias chegadas de ondas, sendo que para este trabalho só foram usadas as primeiras chegadas das ondas aos geofones, em forma de tempo em milissegundos (ms), visto que se trata de um trabalho de refração. Abaixo vão estar apresentados os tempos de chegada das primeiras ondas aos geofones tendo a linha e locais onde foram realizados os embates.

- **Linha 1**

Na Tabela 7 estão apresentados os tempos de chegada a cada geofone tendo em conta o local de *shot point* na Linha 1. E na Figura 34 as dromocrónicas correspondentes aos tempos obtidos.

Tabela 7 – Tempos de chegada obtidos para a linha 1 tendo em conta os locais do *shot point*.

Geofone	Distância (m)	Tempos de chegada (ms)						
		pp11	pp12	pp13	pp14	pp15	pp16	pp17
1	6	18.5	9.75	16.38	49.25	81	94	111.5
2	9	27.13	18.75	7.38	40.25	72	85.5	105.5
3	12	36.25	28.25	4.25	32	64.5	78	83
4	15	44.25	36.75	12.25	22.25	55.75	65	70.25
5	18	53.5	48.5	21.5	14	46.25	62.5	64.5
6	21	62.13	58.75	30.25	5.25	38.25	60.5	63
7	24	70.5	65.5	38.75	5.75	29	55.5	61.88
8	27	79	71.25	47.75	14.5	20.25	45.5	54.5
9	30	88.88	80.75	56.75	23.75	12.5	37.75	45.5
10	33	96.5	87.75	65.75	31.75	3	28.75	36
11	36	105.25	92	73.5	40.75	8	20	27.5
12	39	109.75	92.5	78.13	54.88	17.5	11.25	19.5

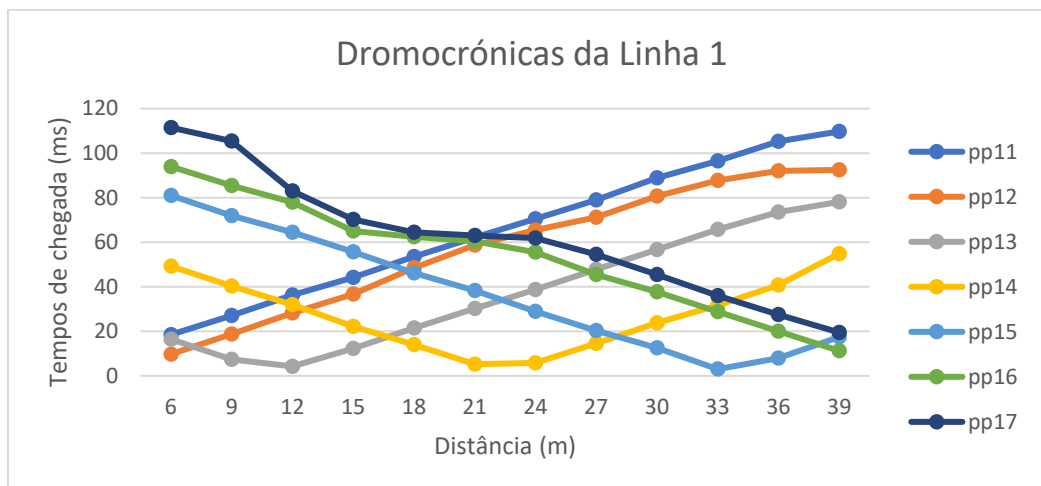


Figura 34 – Dromocrónicas correspondentes aos tempos de chegada obtidos na Linha 1

• **Linha 2**

Na Tabela 8, apresentam-se os tempos de chegada obtidos pelos geofones de acordo com os locais de *shot point* da Linha 2 e a partir destes, na Figura 35 encontram-se as dromocrónicas resultantes. De referir que nesta linha o último geofone não apresentou leitura e por isso foi excluído.

Tabela 8 - Tempos de chegada obtidos para a linha 2 tendo em conta os locais do *shot point*

Geofone	Distância (m)	Tempos de chegada (ms)						
		pp21	pp22	pp23	pp24	pp25	pp26	pp27
1	6	18.75	9.75	18.75	49.25	81	67.5	71.5
2	9	27	18.88	11.25	41	73	66.5	69.63
3	12	35.75	27.75	4	32	65	68.25	71.73
4	15	46	37.25	18	24.25	55.5	65.75	69.75
5	18	55.63	45	29	12.5	47.75	65	65.63
6	21	61.5	55.5	40.75	5	39.25	62.5	63.75
7	24	66.75	64	47.75	5.5	30	54.5	60
8	27	67.5	67	59.5	14.75	21.5	45.25	54.75
9	30	72.63	66.13	68.25	23	12	36	42.5
10	33	68.13	66.38	71	31	2.75	26.75	34
11	36	71.25	66	78.75	38.25	9	18.25	25.5

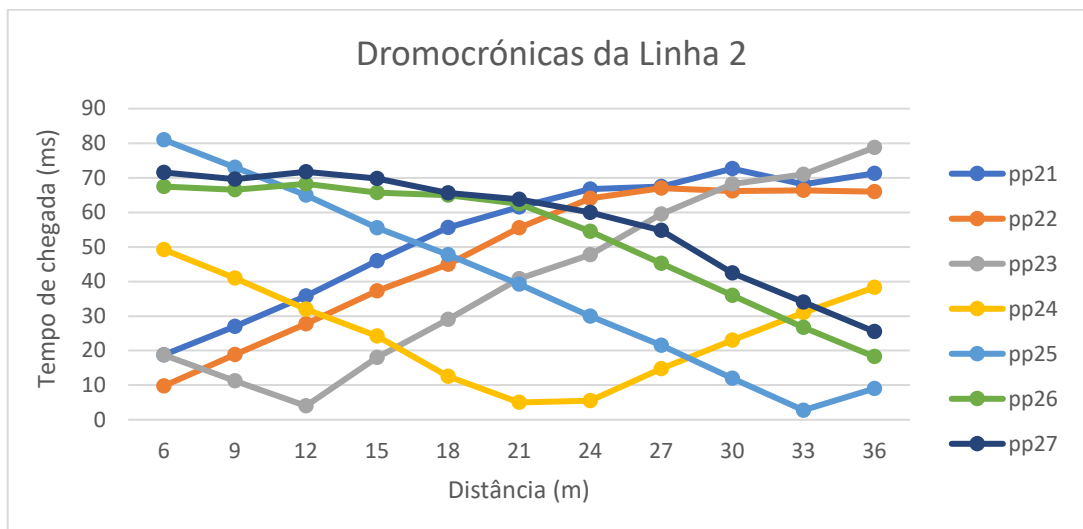


Figura 35 -Dromocrónicas correspondentes aos tempos de chegada da linha 2

• **Linha 3**

Na Tabela 9 estão apresentados os tempos de chegada a cada geofone tendo em conta o local de *shot point* na Linha 3. E na Figura 36 as dromocrónicas correspondentes aos tempos obtidos.

Tabela 9 - Tempos de chegada obtidos para a linha 3 tendo em conta os locais do *shot point*

Geofone	Distância (m)	Tempos de chegada (ms)						
		pp31	pp32	pp33	pp34	pp35	pp36	pp37
1	6	18.75	8	18.25	49.5	61.5	62.75	67.75
2	9	27.75	17.25	8	40.25	60.5	61.5	67
3	12	36.5	25.75	3.5	32	62.25	64	66
4	15	44.63	34.25	11.75	22.75	56.25	62	64.5
5	18	53.5	43	18.5	14	46.5	60.5	62
6	21	62.75	51.5	29.5	5.25	38.25	58.5	61.75
7	24	64	60	38.25	5.5	29.5	51.5	59
8	27	64.5	61.25	46.5	13.75	20.25	44.75	51.25
9	30	64.75	64	55	22.75	11.75	35.75	44.63
10	33	64.25	62	62.25	31.88	3	27	36.13
11	36	64	61.75	63.25	40.63	7.75	18.75	27.63
12	39	66	62.5	66.25	49.75	16.5	10	19

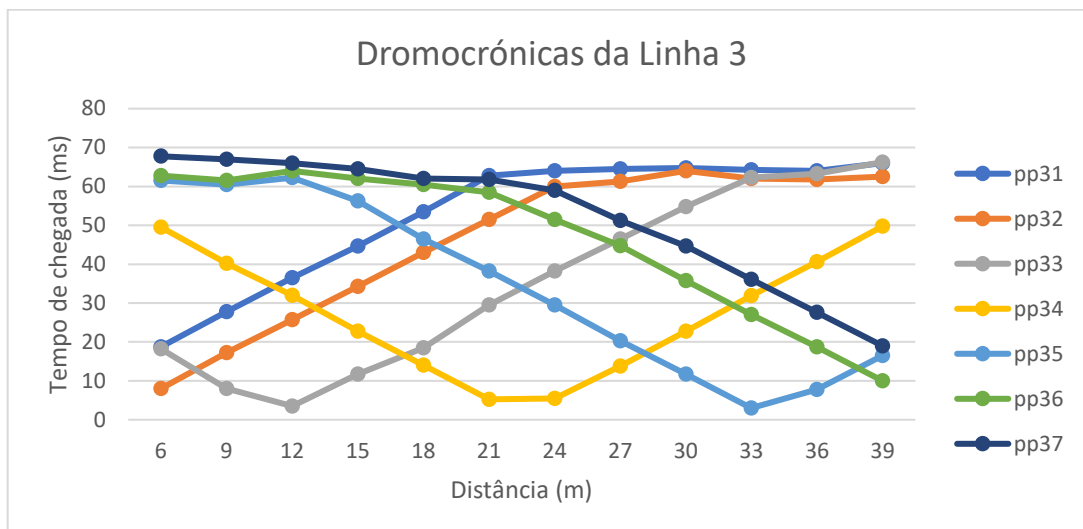


Figura 36 - Dromocrónicas correspondentes aos tempos de chegada da linha 3

• **Linha 4**

Na Tabela 10, apresentam-se os tempos de chegada obtidos pelos geofones de acordo com os locais de *shot point* da Linha 4 e a partir destes, na Figura 37, encontram-se as dromocrónicas resultantes.

Tabela 10 - Tempos de chegada obtidos para a linha 4 tendo em conta os locais do *shot point*

Geofone	Distância (m)	Tempos de chegada (ms)						
		pp41	pp42	pp43	pp44	pp45	pp46	pp47
1	6	18.5	10	17	50	61.25	62.25	65.75
2	9	27.5	19	7.75	40.75	58	60.5	64.25
3	12	36	27.5	3.5	31.75	57	58.5	62.25
4	15	44.5	36	10	23.25	56	57	59.75
5	18	53.25	44.5	22	14.25	46.5	56.25	57.25
6	21	59.75	53.5	30	5.88	39.5	55.75	58.25
7	24	62.5	59.75	38.5	5.63	27	52.5	56.25
8	27	60.25	63	47.5	14	21.75	46.25	54.25
9	30	62	63.75	56	22.88	12.25	37.5	48.5
10	33	64.88	62.75	57	32.63	3.75	24.75	44
11	36	67.5	63.88	58	41.13	7.88	15.75	28
12	39	68.5	64.75	61.5	50.5	11.75	7.5	17.25

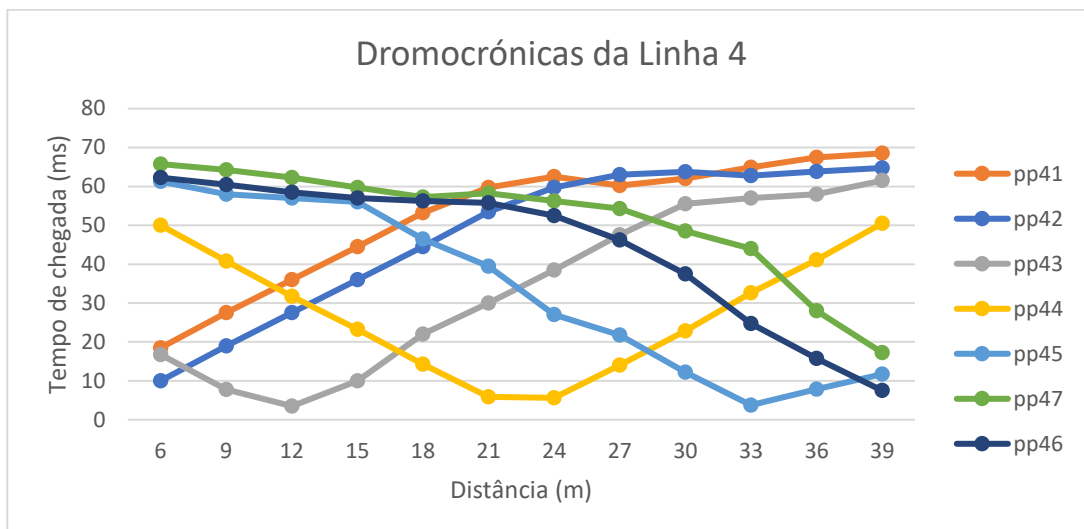


Figura 37 - Dromocrónicas correspondentes aos tempos de chegada da linha 4

4.3.2. Velocidades sísmicas

A partir dos tempos obtidos no capítulo anterior foi possível calcular as velocidades. Para cada linha as velocidades obtidas foram:

- **Linha 1**

Tabela 11 – Velocidades obtidas para as diferentes camadas na linha 1

Foco	Velocidades (m/s)									
	pp11	pp12	pp13e	pp13d	pp14e	pp14d	pp15e	pp15d	pp16	pp17
V0_x	342.04	366.41	320.51	347.32	365.48	327.99	342.59	300.00	324.32	339.37
V1_x	666.67	404.49		647.95					600.00	2290.08
V2_x		705.88							1333.33	324.32
V3_x		6000.00							310.34	133.33
V4_x										500.00

- **Linha 2**

Tabela 12 - Velocidades obtidas para as diferentes camadas na linha 2

Velocidades (m/s)										
Foco	pp21	pp22	pp23e	pp23d	pp24e	pp24d	pp25e	pp25d	pp26	pp27
V0_x	323.57	328.13	200.00	268.48	335.03	272.73	187.50	334.08	336.00	328.77
V1_x	539.57	1000.00	400.00	571.43		412.21	347.83		1846.15	800.00
V2_x	2666.67	9000.00							5142.86	5142.86

- **Linha 3**

Tabela 13 - Velocidades obtidas para as diferentes camadas na linha 3

Velocidades (m/s)										
Foco	pp31	pp32	pp33e	pp33d	pp34e	pp34d	pp35e	pp35d	pp36	pp37
V0_x	334.66	350.00	287.67	344.68	333.33	331.66	333.33	318.18	335.20	254.24
V1_x	5538.46	6000.00		1500.00			500.00		436.36	417.54
V2_x							8000.00		1636.36	2057.14
V3_x									4800.00	

- **Linha 4**

Tabela 14- Velocidades obtidas para as diferentes camadas na linha 3

Velocidades (m/s)										
Foco	pp41	pp42	pp43e	pp43d	pp44e	pp44d	pp45e	pp45d	pp46	pp47
V0_x	351.46	351.46	328.36	214.29	330.00	326.73	200.00	285.53	324.32	272.73
V1_x	1090.91	923.08		346.15			344.50	775.19	631.58	585.37
V2_x	2500.00	6857.14		1500.00			1714.29		2307.69	1826.09

4.3.3. Cálculo das velocidades reais

A partir das velocidades obtidas anteriormente, é possível calcular os ângulos de inclinação dos raios e recalculá-las suas velocidades reais. Os resultados obtidos são:

• **Linha 1**

Tabela 15 – Velocidades reais das camadas para a linha 1

	pp11/pp17		
	v.real	il (radianos)	il(graus)
V0_real	340.70	0.34	19.65
V1_real	477.02		
V2_real			

	pp12/pp16		
	v.real	il (radianos)	il (graus)
V0_real	345.37	0.59	33.65
V1_real	439.04	0.50	28.84
V2_real	815.83		

• **Linha 2**

Tabela 16 – Velocidades reais das camadas para a linha 2

	pp21/pp27		
	v.real	il (radianos)	il(graus)
V0_real	326.17	0.53	30.63
V1_real	459.54	0.13	7.52
V2_real	485.60		

	pp22/pp26		
	v.real	il (radianos)	il (graus)
V0_real	332.06	0.26	14.88
V1_real	450.01	0.07	3.94
V2_real	626.46		

	pp23d/pp25e		
	v.real	il (radianos)	il (graus)
V0_real	227.99	0.56	32.24
V1_real	312.04		
V2_real			

• **Linha 3**

Tabela 17 – Velocidades reais das camadas para a linha 3

	pp31/pp37		
	v.real	il (radianos)	il(graus)
V0_real	294.45	0.42	23.95
V1_real	317.7		
V2_real			

	pp32/pp36		
	v.real	il (radianos)	il (graus)
V0_real	342.60	0.48	27.50
V1_real	491.24		
V2_real			

	pp33d/pp35e		
	v.real	il (radianos)	il (graus)
V0_real	339.01	0.49	27.88
V1_real	872.57		
V2_real			

• **Linha 4**

Tabela 18 – Velocidades reais das camadas para a linha 4

	pp41/pp47		
	v.real	il (radianos)	il(graus)
V0_real	312.10	0.43	24.42
V1_real	478.20	0.23	13.10
V2_real	933.11		

	pp42/pp46		
	v.real	il (radianos)	il (graus)
V0_real	337.89	0.47	26.91
V1_real	345.09	0.10	5.74
V2_real	670.38		

	pp43d/pp45e		
	v.real	il (radianos)	il (graus)
V0_real	207.14	0.64	36.86
V1_real	278.23	0.94	53.68
V2_real	1038.95		

4.3.4. Profundidade do bed – rock e espessuras das camadas

A partir das velocidades reais obtidas é possível calcular as espessuras das camadas e a profundidade a que se encontra o bed-rock. Os resultados obtidos foram:

• **Linha 1**

Tabela 19 – Espessuras das camadas identificadas pelo método sísmico para a Linha 1

Foco	Profundidade (m)									
	pp11	pp12	pp13e	pp13d	pp14e	pp14d	pp15e	pp15d	pp16	pp17
V0_x	7.35	4.67							3.11	4.29
V1_x		2.47							0.82	
Total	7.35	7.13							3.93	4.29

- **Linha 2**

Tabela 20 - Espessuras das camadas identificadas pelo método sísmico para a Linha 2

	Profundidade (m)									
Foco	pp21	pp22	pp23e	pp23d	pp24e	pp24d	pp25e	pp25d	pp26	pp27
V0_x	3.71	4.08		3.40			0.44		4.08	3.71
V1_x	0.50	0.61							1.21	1.00
Total	2.41	4.68		3.40			0.44		5.29	4.70

- **Linha 3**

Tabela 21 - Espessuras das camadas identificadas pelo método sísmico para a Linha 3

	Profundidade (m)									
Foco	pp31	pp32	pp33e	pp33d	pp34e	pp34d	pp35e	pp35d	pp36	pp37
V0_x	2.05	5.07		5.72			5.97		3.17	1.46
Total	2.05	5.07		5.72			5.97		3.17	1.46

- **Linha 4**

Tabela 22 - Espessuras das camadas identificadas pelo método sísmico para a Linha 4

	Profundidade (m)									
Foco	pp41	pp42	pp43e	pp43d	pp44e	pp44d	pp45e	pp45d	pp46	pp47
V0_x	4.81	1.08		0.14			0.14		0.77	2.75
V1_x	0.85	0.85		6.84			6.84		1.70	1.70
Total	5.67	1.93		6.98			6.98		2.47	4.45

4.3.5. Perfis obtidos, caracterização e análise

A partir dos dados obtidos anteriormente, é possível construir perfis, com auxílio do software *Autocad*, uma vez que já se conhece as profundidades calculadas.

Inicia-se então o desenho dos perfis considerando: profundidade, espessura das camadas e velocidade. De referir que a definição das camadas e sua espessura provém das velocidades sísmicas obtidas.

Os perfis encontram-se a uma escala de 1:100, ou seja, um centímetro no programa corresponde a um metro na realidade.

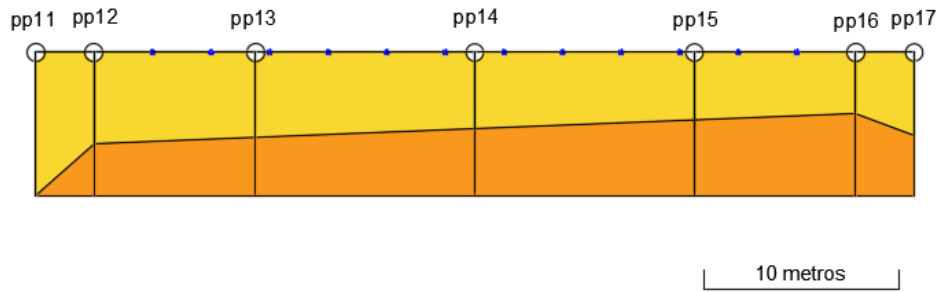
Com base nas profundidades e espessuras das camadas obtidas a partir das velocidades sísmicas (que são o principal factor de definição de camadas, estando as camadas divididas em intervalos de velocidades sísmicas, estando estes intervalos definidos nas legendas dos perfis), começou-se então a traçar estes perfis no *software* já indicado.

Posto isto, e tendo em conta as condições geológicas do local foram definidas quatro camadas, que correspondem a quatro diferentes intervalos de velocidades sísmicas.

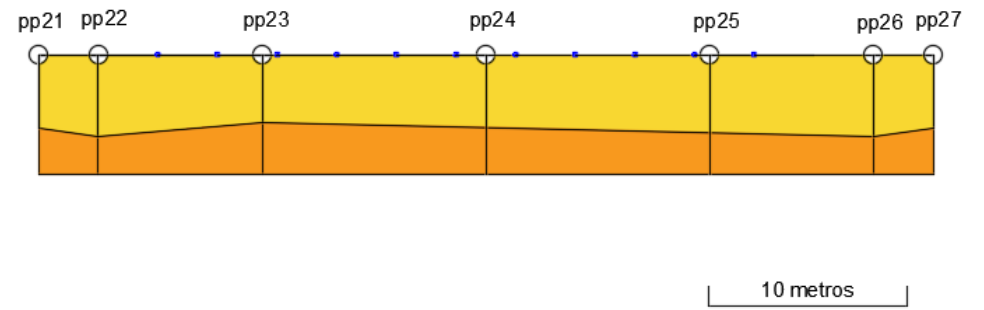
A primeira camada, correspondente à camada mais superficial que corresponde a velocidades sísmicas menores a 420 m/s que correspondem ao ZG1. Já a segunda camada, ZG2, que correspondem a um intervalo de velocidades sísmicas de 420 m/s a 1000 m/s. Já a terceira camada (ZG3), que têm um intervalo de velocidades sísmicas de 1000 m/s a 3000 m/s . Por último, temos a quarta camada (ZG4), no qual as velocidades sísmicas correspondem a valores superiores a 3000 m/s.

Posto isto, são então apresentados de seguida os perfis realizados, a partir dos cálculos efectuados anteriormente e os intervalos das velocidades sísmicas definidos.

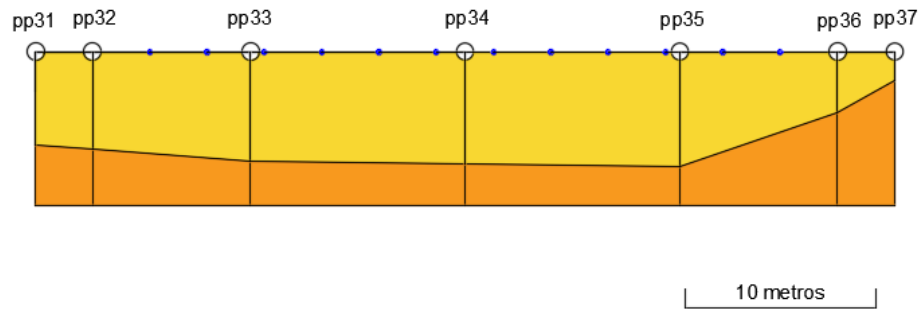
1) Perfil Linha 1



2) Perfil Linha 2



3) Perfil Linha 3



4) Perfil Linha 4

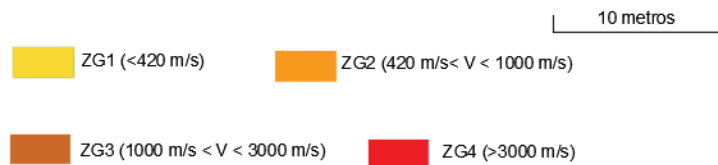
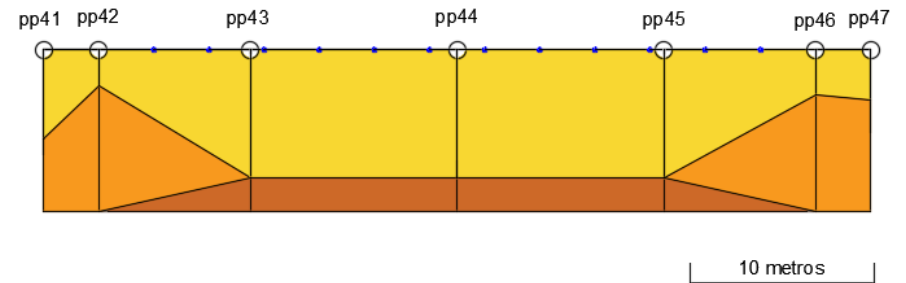


Figura 38 - Perfis obtidos a partir do método de refração sísmica: 1) Perfil da Linha 1 ; 2) Perfil da linha 2; 3)Perfil da Linha 3 ; 4) Perfil da linha 4

- Perfil da Linha 1,2 e 3

Nestes perfis podemos verificar a existência de duas camadas designadamente ZG1 e ZG2

Podemos assim observar que existe bastante homogeneidade entre estes 3 perfis, exceto nos *shot points* pp36 e pp37 (Perfil da Linha 3), onde ZG2 começa a uma menor profundidade, nomeadamente aos 3,17 e 1,46 metros, respectivamente.

- Perfil da Linha 4

Neste perfil, já não se verifica tantas semelhanças comparativamente aos outros perfis, pois as camadas correspondentes a ZG1 e a ZG2 já não apresentam tanta horizontalidade como nos perfis anteriores. Porém neste perfil é possível observar a presença de ZG3, mais ao centro do perfil, correspondendo a uma profundidade de 6,98 metros.

- Perfis Transversais

Estes perfis foram traçados a partir dos perfis obtidos anteriormente. A sua orientação é perpendicular ao alinhamento das linhas realizadas, interceptando sempre os locais de embate como se pode verificar na Figura 39.

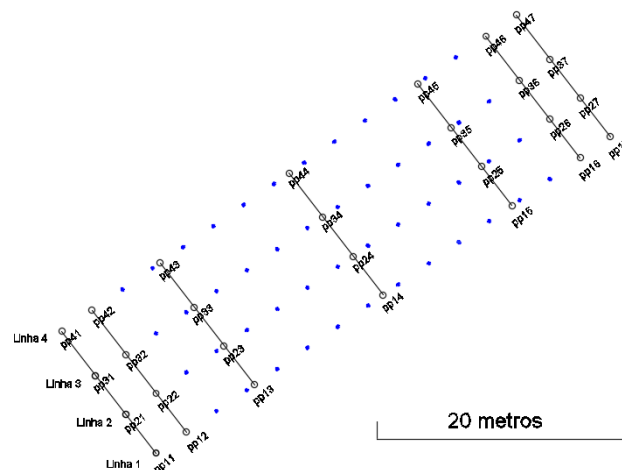


Figura 39 - Orientação dos perfis transversais

Posto isto, iremos passar à apresentação dos perfis transversais, que como os anteriores, foram realizados no *software Autocad* (Figura 40).

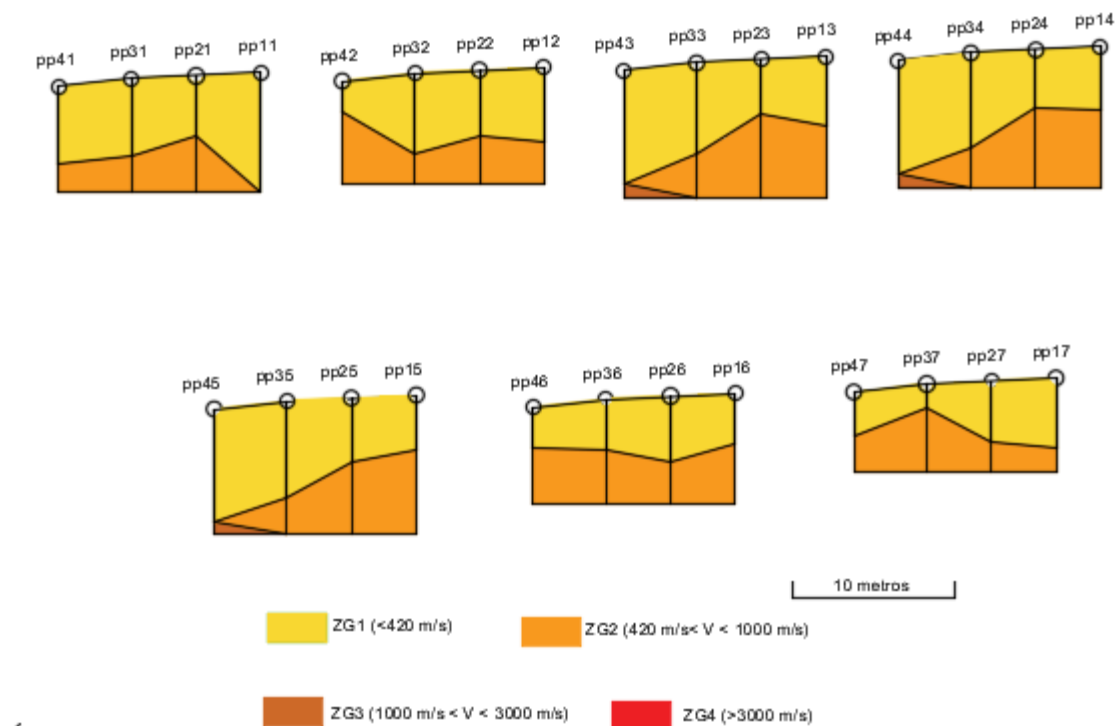


Figura 40 – Perfis transversais do método de refração sísmica

Ao se observar os perfis é possível verificar que os perfis correspondentes aos perfis das pontas (ppx1, ppx2, ppx6 e ppx7) não detetaram a camada correspondente ao *bed-rock* alterado, porém os perfis mais centrais (devido aos valores centrais do perfil da linha 4), acabaram por detetar essa camada.

Também de referir que o embate que apresenta maior espessura de ZG1 é o *shot point* pp11 com 7,35 metros (onde também é o *shot point* que apresenta mais profundidade no geral), o *shot point* que apresentou mais espessura em ZG2 foi o embate pp12 com 2,47 metros porém este valor é maior pois a camada abaixo detetada desta têm um valor de 815,83 m/s de velocidade que está inserido no intervalo de valores definidos para a definição das camadas, ou seja esta camada, na verdade, é mais espessa.

4.4. Resultados obtidos, profundidades e perfis (Penetrómetro dinâmico médio – “PDM”)

Depois dos ensaios de PDM realizados em campo e preenchidos os boletins com o número de pancadas, transferiu-se então esse número de pancadas para várias folhas de *Excel* e assim se calculou o RDA (resistência dinâmica aparente) e as tensões admissíveis para cada número de golpes a cada 10 centímetro de cada ensaio. Devido à enorme densidade de dados, estes boletins já com o RDA e tensões admissíveis calculados estarão em anexo (Anexo 2).

A partir do cálculo do RDA foi nos possível traçar gráficos de índice de resistência ao solo que também se encontram em anexo (Anexo 3).

4.4.1. Perfis obtidos, caracterização e análise

O procedimento de realização destes perfis foi semelhante à realização dos perfis anteriores, utilizando-se da mesma o software *Autocad* para a sua realização, tendo em conta a sua cota, profundidade e espessura.

A partir destas profundidades (de *bed-rock*) e espessuras obtidas a partir de intervalos de número de pancadas (estando estas camadas divididas por intervalos de golpes/pancadas que estão presentes nas legendas dos perfis).

Posto isto, e tendo em conta as condições geológicas do local foram definidas quatro camadas, que correspondem a quatro diferentes intervalos de golpes do penetrómetro. É importante referir que para espessuras menores ou iguais a 40 centímetros não foram discriminadas como uma camada pois poderão corresponder a detritos que estejam encaixados no solo que apresentam uma maior resistência, visto que se trata de um terreno remexido e com sucata enterrada a probabilidade de isso acontecer é maior.

A primeira camada definida foi a ZG1 que corresponde a um intervalo de golpes de 0 a 19, ao qual corresponde à camada menos resistente. Seguidamente temos a ZG2 que corresponde ao intervalo de 20 a 39 golpes. Depois temos a ZG3 que representa o intervalo de 40 a 60 golpes. E por último temos a ZG4 que se encontra nos valores de golpes superior a 60.

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.

Posto isto, serão de seguida apresentados os perfis obtidos do ensaio de PDM.

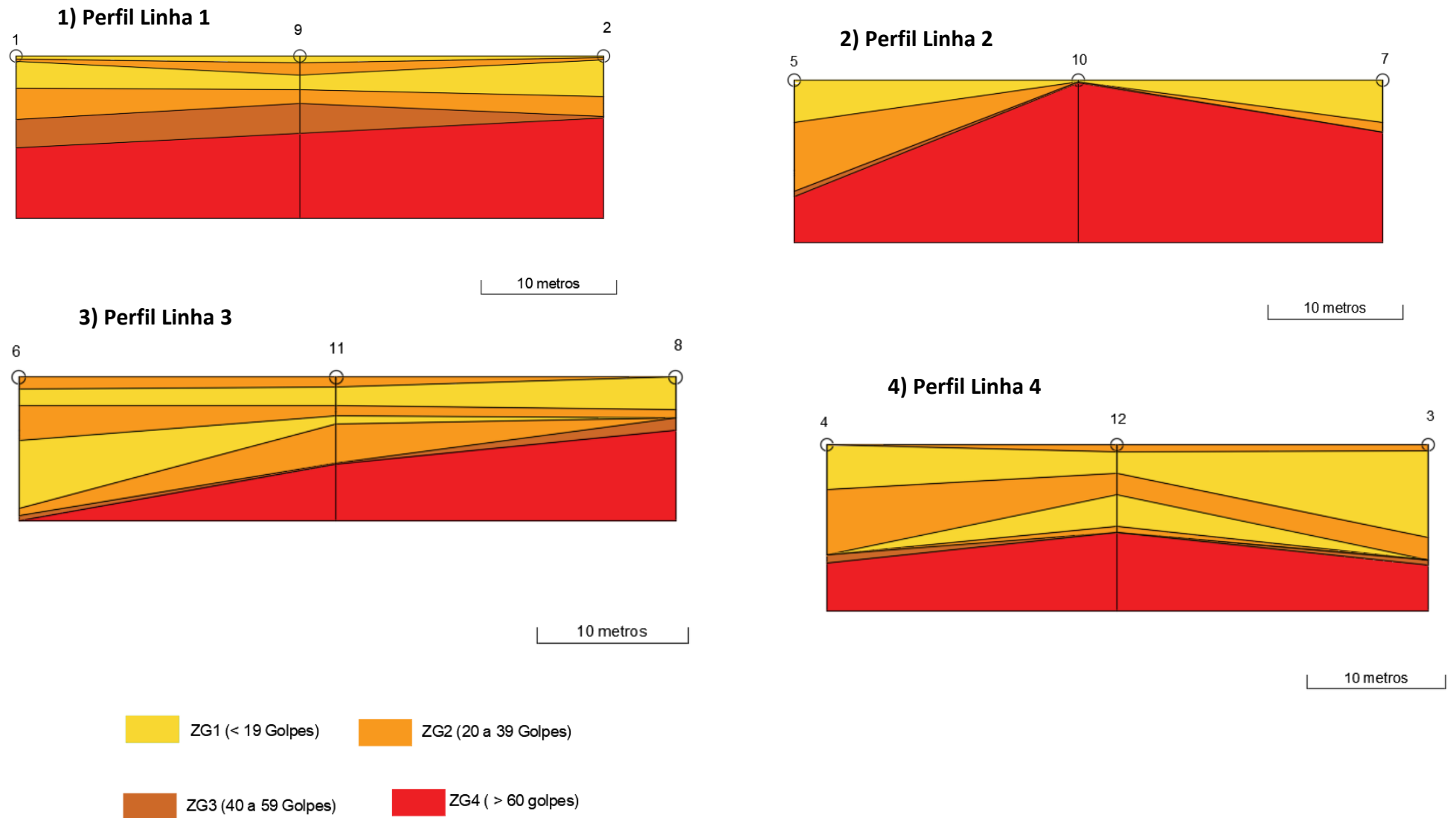


Figura 41 - Perfis obtidos a partir do método do penetrômetro dinâmico médio: 1) Perfil da Linha 1 ; 2) Perfil da linha 2; 3)Perfil da Linha 3 ; 4) Perfil da linha 4

- **Perfil da Linha 1**

Neste perfil é possível observar-se que há alternâncias entre ZG1 e ZG2 que no furo 1 vai até aos 4,7 metros, no furo 9 aos 3,5 metros e no furo 2 até aos 4,5 metros. No que diz respeito a ZG3 este no furo 1 apresenta uma espessura de 2,1 metros, enquanto que no furo 9 a espessura é de 2,2 metros e no furo 2 quase inexistente só apresentando 10 centímetros. Já ZG4 no qual representa o firme, temos no furo 1 a uma profundidade de 6,8 metros, no furo 9 a 5,7 metros e no furo 2 a 4,2 metros.

No que diz respeito a valores anormais, não pelo número de pancadas em si, mas sim pela profundidade em que estes se localizam, no furo 1 temos 10 centímetros percorridos pelo penetrómetro, a uma profundidade de 20 centímetros com cerca de 53 pancadas. No furo 9 aos 70 centímetros percorridos temos um valor de 40 pancadas e no furo 2 os valores de 28 e 30 pancadas aos 20 e 30 centímetros percorridos respetivamente.

- **Perfil da Linha 2**

Este perfil diferencia-se dos outros devido ao furo 10 no qual o firme foi detetado aos 30 centímetros.

No que diz respeito às zonas geotécnicas, a ZG1 no furo 5 temos uma espessura de 3,1 metros no furo 10 temos uma espessura de 10 centímetros e no furo 7 uma espessura de também de 3,1 metros. Quanto à ZG2 no furo 5 temos uma espessura de 5,1 metros, no furo 10 esta zona é inexistente, e no furo 7 uma espessura de 70 centímetros. A ZG3, no furo 5 têm uma espessura de 40 centímetros, no furo 10 de 10 centímetros e no furo 7 é inexistente. Por último a ZG4 apresenta uma profundidade de 8,6 metros no furo 5, no furo 10 já foi referido anteriormente que foi aos 30 centímetros e por último o furo 7 aos 3,8 metros.

Quanto a valores anormais no furo 5 ao 20 e 30 centímetros percorridos pelo PDM, temos 44 e 49 pancadas, respetivamente. No furo 10 o facto de o firme ser detetado aos 30 centímetros é anormal e no furo 7 existe aos 30 e 40 centímetros valores como 27 e 26 respetivamente.

- **Perfil da Linha 3**

Neste perfil, em semelhança com o perfil da linha 1, é possível verificar alternâncias entre ZG1 E ZG2 que no furo 6 têm uma espessura de 9,2 metros, no furo 11 de 5,7 metros e no furo 8 de 2,7 metros. No que diz respeito à ZG3 no furo 6 a sua espessura é de 30 centímetros, porém poderá ser mais pois não existiam mais varas continuar o ensaio, no furo 11 é de 10 centímetros e no furo 8 é de 80 cm. Quanto à ZG4, no furo 6 não foi possível verificá-la devido à razão anteriormente referida, no furo 11 foi detetada aos 5,8 metros e no furo 8 foi detetada aos 3,5 metros.

Os valores anormais são possíveis verificar no furo 6, aos 50 e 60 cm no qual o número de pancadas são 100 e 91 respetivamente. No furo 11 nos 30, 40 e 50 centímetros são possíveis verificar valores como 42, 44 e 40 golpes respetivamente. Por último, no furo 8 estes tipos de valores não são encontrados.

- **Perfil da Linha 4**

Este perfil também apresenta alternâncias entre ZG1 e ZG2, porém só entre o furo 12 e 3 no qual apresentam uma espessura de 6,3 e 8,3 metros, respetivamente. Porém no furo 4 a ZG1 tem uma espessura de 3,2 metros e a ZG2 uma espessura de 4,7 metros. Quanto à ZG3 esta só se apresenta no furo 4 e 3 com a espessura de 60 e 40 centímetros, respetivamente. A ZG4 é detetada no furo 4 a uma profundidade de 8,5 metros, no furo 12 a 6,3 metros e no furo 3 a 8,7 metros.

No que diz respeito a valores anormais, o furo 4 não os apresenta. O furo 12, aos 20 centímetros de penetração no solo apresentou um valor de 42 golpes e no furo 3 aos 20 , 30 e 40 centímetros , apresenta os valores 27, 37 e 25 golpes , respetivamente.

- Perfis Transversais

Estes perfis foram traçados a partir dos perfis obtidos anteriormente. A sua orientação é perpendicular ao alinhamento das linhas realizadas, interceptando sempre os locais onde os furos foram realizados como se pode verificar na Figura 42.

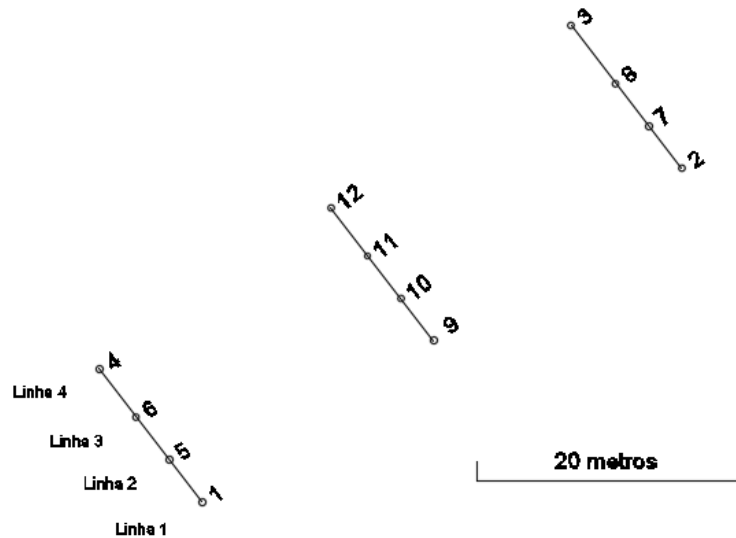


Figura 42 – Orientação dos perfis transversais do PDM

Tendo isto em conta, os perfis serão apresentados abaixo no Figura 43.

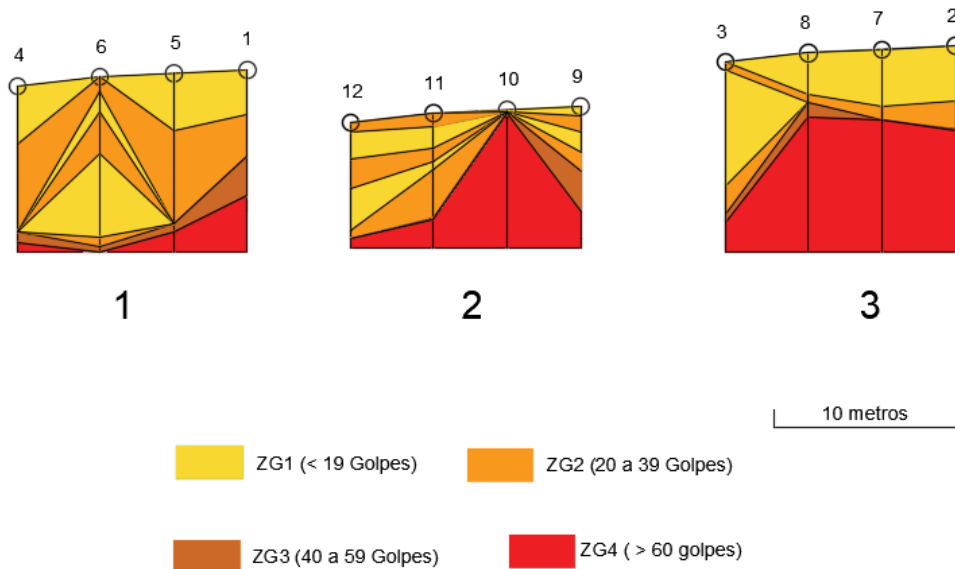


Figura 43 – Perfis transversais do PDM

Nestes 3 perfis é possível observar que existe alternâncias entre ZG1 e ZG2 muito frequentemente, como se pode verificar nos furos 6, 12,11, 9 e 3. No que diz respeito à ZG3 no perfil 1 transversal existe continuidade em todo o perfil, enquanto no perfil 2 e 3 já não se verifica essa continuidade, devido ao furo 12 e 7 não apresentarem esta zona. No que diz respeito à ZG4 só no furo 6 é que não foi detetada esta zona, devido à falta de varas, como já foi referido anteriormente.

4.5. Modelagem 3D do firme

Neste capítulo utilizou-se o *software Surfer 9* para proceder à modelagem em questão. Para isso usou-se 3 métodos diferentes de interpolação que estão disponíveis neste software que foram a Krigagem, o inverso do quadrado da distância e o vizinho natural. Foram escolhidos estes 3 métodos de forma analisar de uma forma tridimensional os ensaios de PDM da zona correspondente a ZG4, pois esta zona poderá estar mais próxima daquilo que é o *bed-rock* que o método sísmico, pois neste método o *bed-rock* não se conseguiu atingir. Este software também nos permite obter vários tipos de modelação, porém aqueles que nos permitem ter melhor observação a três dimensões são o *Wideframe* e *3D surface*.

Estes métodos de interpolação permitem produzir modelos 3D da distribuição espacial das profundidades do *Bed-rock* para o método de PDM. Tendo isto em conta iremos avançar para a apresentação destes modelos 3D.

4.5.1. Modelagem 3D do firme com os dados obtidos pelo PDM

- 3D Wireframe

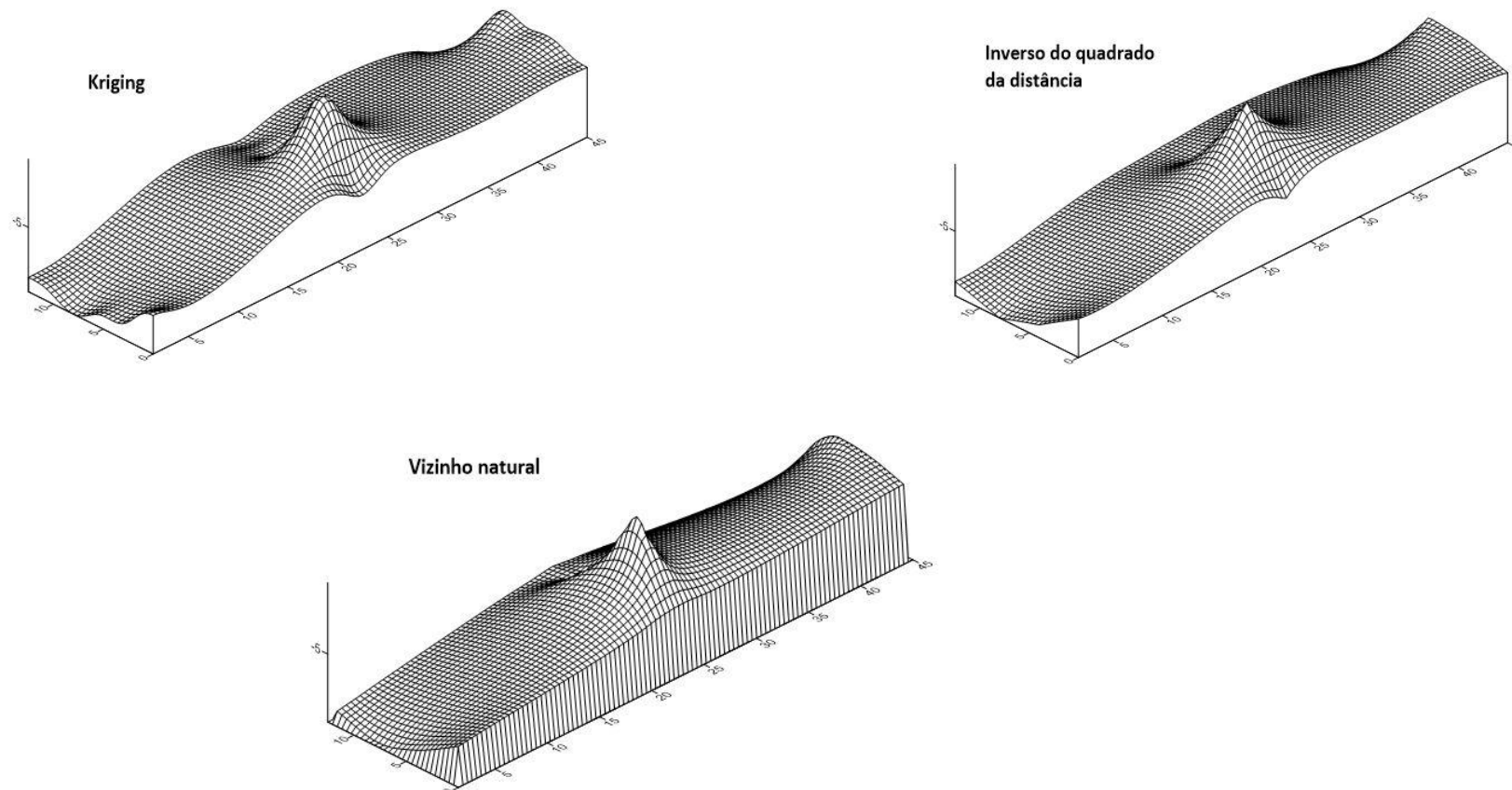


Figura 44 - Compilação de mapas do tipo Wireframe, com os diferentes métodos de interpolação para o firme no método PDM.

- 3D Surface

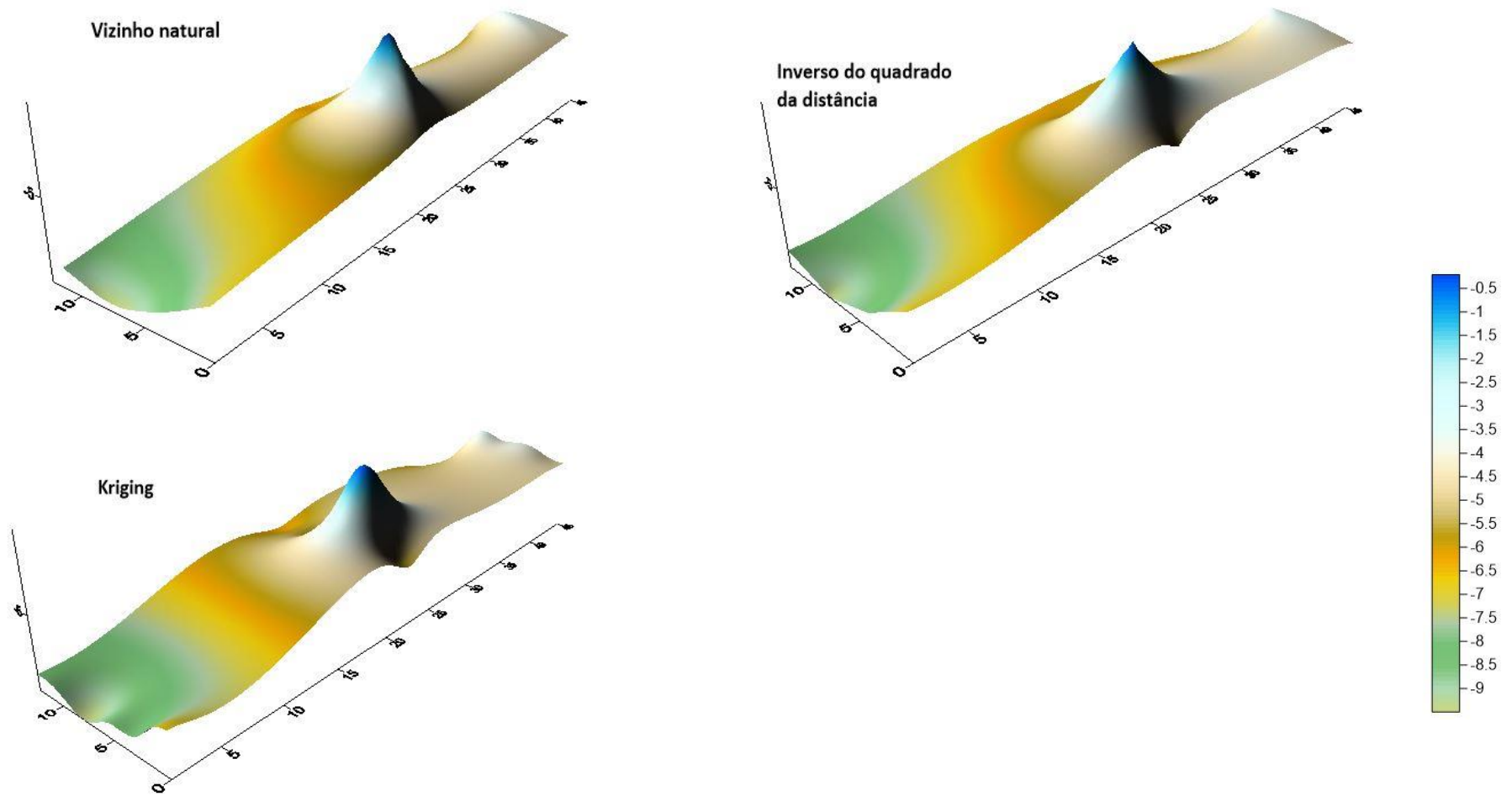


Figura 45 - Compilação de mapas do tipo 3D Surface, com os diferentes métodos de interpolação para o firme no método PDM

4.6. Análise e discussão de resultados

Depois da análise cuidada e pormenorizada de cada perfil, para cada método, tanto no seu desenho como na sua reflexão, são várias conclusões que se podem referir.

No que diz respeito à refração sísmica, logo na linha 1 obtemos para os locais de *shot point* pp16 e pp17 resultados estranhos de velocidade que estão referenciados abaixo na Tabela 23 a amarelo.

Tabela 23 – Valores de velocidades para camadas da Linha 1 do ensaio de refração sísmica

		Velocidades (m/s)								
Foco	pp11	pp12	pp13e	pp13d	pp14e	pp14d	pp15e	pp15d	pp16	pp17
V0_x	342.04	366.41	320.51	347.32	365.48	327.99	342.59	300.00	324.32	339.37
V1_x	666.67	404.49		647.95					600.00	2290.08
V2_x		705.88							1333.33	324.32
V3_x		6000.00							310.34	133.33
V4_x										500.00

Estas velocidades foram obtidas, a partir da fórmula simples da velocidade ($v = \frac{\text{distância}}{\text{tempo}}$). Isto poderá indicar que estamos na presença de uma camada cega (*Blind layer*) ou uma camada escondida (*hidden layer*). Caso estajamos na presença de uma camada cega significa que existe uma camada de baixa velocidade (por exemplo, uma camada de turfa, lamas ou areias acima do bed-rock), o que não permite os raios serem criticamente refratados no seu topo o que não vai originar frentes de onda, e que faz com que não seja possível detetar esta camada a partir deste método apesar de o topo desta camada dar origem a um vasto angulo de reflexões que podem ser detetadas como chegadas mais tardias durante o levantamento de refração. Isto poderá conduzir a uma superestimação da profundidade das interfaces das camadas.

Caso o que esteja presente seja uma camada escondida, trata-se então de uma camada que produz ondas, mas não origina primeiras chegadas. Isto pode-se dever à espessura de uma camada ou devido à camada ter uma velocidade sísmica muito idêntica à de cima. Neste caso, como se tratou de uma pesquisa que envolve só o reconhecimento das primeiras chegadas, não se vai conseguir detetar a camada. Analisando estes dois casos, parece o mais razoável admitir que o caso que temos presente é o caso de uma camada cega, pois apesar de esta não se poder detetar, foram originadas outras ondas de chegada mais tardias e no qual a velocidade foi possível detetar como uma camada de menor velocidade. Porém, devido à fórmula de cálculo de inclinação, velocidade real e profundidades não admitir camadas com menor velocidade antecedidas de uma

camada com maior velocidade, os valores obtidos de seguida não foram considerados, pois poderiam levar a uma superestimação de profundidades/espessuras, típico de uma camada cega.

De referir que nos restantes perfis da sísmica, só apontando para o cálculo do ângulo de inclinação na linha 4 para os perfis centrais pp43d(direito) e pp45e (esquerdo) no qual é originado um ângulo de inclinação para V1 que é maior que V0 (Tabela 24 assinalado a amarelo), o que não é suposto acontecer pois visto que conforme a profundidade das camadas (geralmente) , estas vão ser mais compactas e com velocidades sísmicas maiores , o que deveria conduzir para uma redução do ângulo de inclinação dos raios refractados , de forma a estes refractarem criticamente e voltarem à superfície, ou seja , o valor de velocidade poderá estar superestimado e não corresponder na verdade a ZG3 e sim a ZG2 . Estes valores poderão ter origem, mais uma vez, de uma camada cega.

Tabela 24 - valores de velocidade real e ângulo de inclinação dos raios refratados

	pp43d/pp45e		
	v.real	il (radianos)	il (graus)
V0_real	207.14	0.64	36.86
V1_real	278.23	0.94	53.68
V2_real	1038.95		

No que diz respeito ao penetrómetro, era de esperar a presença de valores estranhos pois o local de estudo é um terreno remexido onde foi enterrada sucata. O melhor exemplo disso é o furo 10 onde o firme é encontrado aos 30 cm. Porém, é importante referir que houve valores altos de golpes encontrados muito à superfície o que poderá indicar a presença de pedras, raízes ou até mesmo outros objectos durante a perfuração.

Tendo em conta os ensaios de refração sísmica era de se esperar que na maior parte dos locais o penetrómetro conseguisse atingir maior profundidade, o que realmente aconteceu e foi verificado nos furos 9 ,2 ,5 ,7 ,6 ,8 ,4 e 3. Porém alguns destes furos (nomeadamente nos furos onde ZG4 é menor que 7 metros) ou nos restantes furos onde isto não aconteceu , é provável que tenha sido encontrado algum objeto que tenha impedido o penetrómetro avançar, o caso mais flagrante deste exemplo é o furo 10 onde não foi possível ultrapassar os 30 centímetros, o que poderá indicar presença de sucata naquele local.

Considerando que ZG1/ZG2 (PDM) correspondem a ZG1 (Sísmica), ZG3 (PDM) à camada de ZG2 (sísmica) e ZG4 (PDM) a ZG3 (sísmica), podemos obter algumas concordâncias de valores. Nas

tabelas seguintes será feita a comparação de valores entre as profundidades máximas que cada método atingiu.

Tabela 25 – Comparação dos valores máximos obtidos para cada método, de profundidade, na linha 1

Linha 1			
PDM		Refração sísmica	
nº furo	Profundidade máxima (metros)	nº shot point	Profundidade máxima (metros)
1	6.8 (ZG4)	pp11	7.35 (ZG1).
9	5.7 (ZG4)	pp14	3.8 (ZG1)
2	4.6 (ZG4)	pp17	4.29 (ZG1)

Tabela 26 - Comparação dos valores máximos obtidos para cada método, de profundidade, na linha 2

Linha 2			
PDM		Refração sísmica	
nº furo	Profundidade máxima (metros)	nº shot point	Profundidade máxima (metros)
5	8.6 (ZG4)	pp21	3.71 - (ZG1)
10	0.3 (ZG4)	pp24	3.65 (ZG1)
7	3.8 (ZG4)	pp27	3.71 (ZG1)

Tabela 27 - Comparação dos valores máximos obtidos para cada método, de profundidade, na linha 3

Linha 3			
PDM		Refração sísmica	
nº furo	profundidade máxima (metros)	nº shot point	profundidade máxima (metros)
6	9.5 (ZG3)	pp31	4.83 (ZG1)
11	5.8 (ZG4)	pp34	5.84 (ZG1).
8	3.5 (ZG4)	pp37	1.46 (ZG1)

Tabela 28 - Comparação dos valores máximos obtidos para cada método, de profundidade, na linha 2

Linha 4			
PDM		Refração sísmica	
nº furo	profundidade máxima (metros)	nº shot point	profundidade máxima (metros)
4	8.5 (ZG4)	pp41	4.81 (ZG1)
12	6.3 (ZG4)	pp44	6.98 (ZG1; Abaixo ZG3)
3	8.7 (ZG4)	pp47	2.75 (ZG1)

Em alguns destes casos, observados nas tabelas, se transpusermos o valor de profundidade obtido pela refração sísmica para os valores obtidos no método de PDM, podemos verificar algumas concordâncias tendo em conta o que foi dito no parágrafo anterior. Ou seja, no caso da linha 1, o valor obtido de 4,29 metros no método de refração sísmica (pp17), ao se comparar esse valor nos valores obtidos de espessura no método de PDM, no furo 2, esse valor encontra-se na ZG2 o que é concordante com o que foi dito anteriormente. O mesmo acontece na linha 2 com o furo e *shot point* 5 e pp21, respetivamente, onde o valor de profundidade máxima de pp21 é de 3,71, e transferindo este valor para os valores obtidos no ensaio de PDM, este valor pertence ao ZG2, o que corresponde mais uma vez aquilo que foi dito. Estes casos acontecem mais vezes, nomeadamente nos furos/ *shot point*, 7/pp27, 6/pp31, 8/pp37 e em todos o furos/embates do perfil 4.

Quanto aos Modelos 3D produzidos, o mais adequado parece ser a modelação com Kriging, pois os outros modelos nos valores extremos apresentam uma maior agressividade na sua modelação e nos valores intermédios apresentam suavização exagerada.

5. Conclusão

5. Conclusão

O ensaio de PDM apresenta-se como um ensaio expedito para a determinação de um parâmetro de grande importância físico-mecânica, enquanto que o método de refração sísmica também sendo um método expedito, apresenta-se como determinante na definição de camadas de bastante contraste assim como a profundidade do *bed-rock*.

Estes dois métodos encontram várias vantagens em comum, sendo que estas vantagens partilhadas podem ser mais vantajosas num método que noutro. No que diz respeito ao baixo custo aqui o método que apresenta maior vantagem é o PDM pois o custo do equipamento em si é muito menor que o de refração sísmica, no qual até comparando o preço de cada um passa a ser uma desvantagem do método de refração sísmica.

Porém o método de Refração sísmica ganha importância quando se aborda questões como obtenção de resultados, no qual este método é capaz de obter uma maior quantidade de dados (sismogramas, velocidades sísmicas, espessuras, profundidades de camadas de contraste evidente, escavabilidade, etc) porém de mais difícil interpretação e tratamento, os danos causados e perturbações são nulos em comparação com o PDM que apesar de apresentar reduzidos danos no terreno, já são danos maiores que o método de refração sísmica.

O rendimento diário e a rapidez de execução dos ensaios, no caso do PDM dependerá do número de furos a executar e a profundidade a atingir, pois caso o número de furos seja grande e/ou a profundidade, o método sísmico será mais vantajoso, pois como se verificou neste trabalho, o método sísmico demorou cerca de um dia de trabalho (cerca de 8/10 horas) enquanto que o PDM demorou cerca de 4 dias, devido a algumas profundidades grandes atingidas e ao número de furos, que apesar de não ser um número muito grande este factor em conjunto com o factor profundidade faz com que o ensaio de PDM demora-se mais a ser realizado. No que diz respeito à versatilidade do ensaio, o ensaio que apresenta maior vantagem é o ensaio de PDM, pois o ensaio de refração sísmica necessita de uma maior área para ser realizado e o PDM não têm essa necessidade devido ao seu tamanho.

Por último, no que diz respeito à definição de camadas/zonas geotécnicas o ensaio de refração sísmica poderá apresentar mais vantagens pois não é sensível a pedras ou objectos de pequena dimensão que no caso do PDM é bastante sensível, o que poderá dar dados errados acerca da profundidade do firme, porém o ensaio de refração sísmica não nos permite calcular

tenções admissíveis e resistência dinâmica aparente a partir do método usado, que são factores importantes para projetos de fundações e também aparecimento de camadas escondidas/cegas é um problema para a definição dessas camadas .

Porém ambos os métodos têm algumas desvantagens, começando pelo ensaio de penetrómetro dinâmico médio, no qual têm algumas particularidades negativas no que diz respeito ao seu transporte e fácil manuseamento, pois também permite que este ensaio seja facilmente manipulado involuntariamente, sendo que os dados ficam alterados a grande escala distorcendo assim por completo a caracterização de um determinado solo. Ou seja, é necessário que todos os requisitos e providências sejam tomadas e acauteladas no momento em que o ensaio se encontre em execução, assim como na avaliação dos seus resultados, de forma a minimizar a possibilidade de erro. Também é importante referir que nenhum dos ensaios é capaz de recolher amostras.

No que diz respeito ao ensaio de refração sísmica, este ensaio ao ser realizado tem de se garantir que não existam outros movimentos perto, exceto o do *shot point*, de forma a não provocar ruído, que poderá enviesar os dados que poderão ser interpretados de uma forma errada devido à existência de outros movimentos/vibrações. Também deve ter-se de acautelar a área de estudo, pois caso seja ma área pequena este ensaio poderá não ser o melhor a ser realizado, pois as ondas sísmicas necessitam de uma certa distância para serem refratadas. E quanto à interpretação de dados também é necessário bastante atenção, principalmente na parte inicial onde se seleciona as primeiras chegadas, pois uma má seleção destas chegadas poderá dar uma interpretação menos correta do terreno em estudo. Também quando se pode estar perante uma camada escondida ou cega, estas representam um grande problema para a definição de espessuras de camadas pela sua complexidade.

Relativamente aos modelos 3D realizados a partir de diferentes métodos de interpolação, importa referir que estes ajudam a entender o comportamento do *bed-rock/* firme a partir das superfícies tridimensionais geradas. Traduzindo assim melhores resultados em relação aos perfis, já que para além de existir uma análise permenorizada de todos os dados analisados, também a verificação dos mesmos é facilitada pelos mapas.

No que diz respeito aos valores obtidos de profundidade, era espectável que o método de refração sísmica atingisse valores maiores, pois o penetrómetro é sensível a objetos de grande resistência e poderá não conseguir atravessar esses objetos dando uma ideia errada da localização do firme, porém nem sempre isso se verificou.

Para finalizar este conjunto de conclusões obtidas, é importante referir que este estudo perante as características do local, é incompleto. Tal afirmação deve-se ao facto de nenhum dos métodos conseguir discriminar de forma clara as zonas onde está localizada a sucata e a profundidade do *bed-rock* pelo método sísmico não foi atingido, assim como a falta de parâmetros que só podem ser obidos através de ensaios de laboratório, que como já foi referido anteriormente, seriam necessárias amostras para tal, porém nenhum dos ensaios é capaz de as colher.

O estudo realmente poderia ser completado, e atingir outras metas se fossem adotados, estudados e aplicados outros métodos de recolha de informação, completando assim o estudo feito. Porém a aplicação desses métodos não foi possível devido ao prazo limite da execução dos trabalhos que obrigam a mais demora, persistência e trabalho de campo ou simplesmente por não haver acesso a esses equipamentos.

Porém importa salientar o método de refração sísmica e do PDM é capaz de fornecer para este tipo de projeto, mas sempre alicerçado noutros métodos, sendo estes referidos nos desenvolvimentos futuros.

6.Desenvolvimentos Futuros

6. Desenvolvimentos Futuros

Tendo em conta o estudo e trabalho apresentado anteriormente para a concretização da dissertação, torna-se possível, considerar-se este como a continuidade para pesquisas futuras que possam aprofundar esta metodologia no âmbito de projetos geotécnicos.

Futuramente importa dar continuidade a este projecto, utilizando outros métodos, que permitam complementar os resultados obtidos pela refração sísmica e PDM, ou seja, pela complementação ou associação de outros equipamentos /métodos de investigação dos terrenos já conhecidos e avaliados.

Tendo isto em conta sugere-se:

- Aplicação do método de resistividade/condutividade eléctrica de forma a definir melhor as zonas de localização da sucata;
- Avaliar outros parâmetros em laboratório, como por exemplo, granulometria, teor de água, índice de plasticidade e limite de liquidez associando sempre estes parâmetros à profundidade da amostra recolhida, dá também se sugerir a recolha de amostras a diferentes profundidades, com importância especial acima e abaixo do limite entre camadas identificados pelos métodos de sísmica/penetrómetro. A recolha destas amostras deverá ser feita com métodos adequados para a recolha (sondagem);
- Aplicação dos métodos noutra campo experimental/sítio de obra;
- Uso de uma fonte sísmica mais potente;
- Utilizar o MASW (Multichannel Analysis of surface waves).

A partir destas considerações, em como se verifica em áreas relacionadas com a geotecnia, é referido neste contexto, um campo promissor de pesquisa em que os resultados obtidos traduzem uma vantagem para a possibilidade da melhoria de qualidade dos projectos a realizar e, tendo em conta isto, uma minimização de custos , visto que actualmente é um parâmetro fulcral para que um projecto se possa realizar.

7. Bibliografia

7. Bibliografia

Azevedo, P., Rocha, M. (2012). Estudo do método geofísico de sísmica de refração com aplicação no futuro trecho norte do metro de Brasília. Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. 4-10p.

Carrington da Costa, J. & Teixeira, C., (1957). Notícia explicativa da Carta Geológica na escala de 1/50000, Folha 9-C (Porto): Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Carvalho, J. M.; Chaminé, H. I.; Plasencia, N. (2003). Caracterização dos recursos hídricos subterrâneos do maciço cristalino do norte de Portugal: Implicações para o desenvolvimento regional. In: Portugal Ferreira M. (coord.), A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos: recursos geológicos e formação. Volume de homenagem ao Prof. Doutor Coteló Neiva, Imprensa da Universidade, Série de Investigação, Coimbra. 2: 245-264.

Cervi, A. (2009) Geotecnia Ambiental. Disponível em: <http://www.ebah.pt/content/ABAAAfiQAE/geotecnia-ambiental> [Consultado em 20/05/2017];

Dias, J. (2000). Sismos Disponível em: http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA5_Sismos/52_Sismologia/5203_OndasSismicas.html [Consultado em: 26/05/2017]

U.S. Army Corps of Engineers. (1995). Geophysical exploration for engineering and environmental investigations.

Ernesto, M., Ussami, N. (2002). Introdução à geofísica. Departamento de Geofísica – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.

Fernandes, M (2015). Mecânica dos solos – Introdução à Engenharia Geotécnica, Volume 2, 2ª edição. Porto: FEUP edições. 92-93p.

Ferreira, F. (2002). Métodos Sísmicos. Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná. 10p. 29-34

Folque, J. Características mecânicas de solos deduzidas de ensaios de penetração. Geotecnia – Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia. 73 – 83p.

Geologia da Engenharia. Disponível em:
https://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_8_GE.pdf [Consultado em 29/05/2017];

Geologia da Engenharia. Disponível em:
https://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_7_GE.pdf [Consultado em 29/05/2017];

Geologia da Engenharia. Disponível em:
https://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_6_GE.pdf [Consultado em 29/05/2017];

Geologia da Engenharia. Disponível em:
https://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_1_GE.pdf [Consultado em 29/05/2017];

Kearey, P., Michael, B., Ian, H (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration – Third Edition.* Blackwell Science. 21-30p.

Lima, A. (2013). *Notas de aula: Prospeção e amostragem dos solos.* Universidade Veiga de Almeida, Rio de Janeiro.

Marques, G. *Óptica – Reflexão da Luz* Disponível em:
https://midia.atp.usp.br/ensino_novo/optica/ebooks/reflexao_da_luz.pdf [Consultado em: 30/10/2017].
2p.

Martins, J.B., Miranda, T.S.F. (2003). *Ensaio de Penetração nos Solos Graníticos da região de Norte de Portugal: Algumas Correlações.* Universidade do Minho, Departamento de Engenharia de Guimarães. 5-18p.

Meixedo, J. (2012). *Notas de Aula: Prospeção Geofísica e Sondagens, Aula 9, ISEP.*

Meixedo, J. (2017). *Relatório dos trabalhos de prospeção Geotécnica – Parque Urbano da Anadia.* Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC), ISEP.

Noronha, F. (2003) *Geologia, tectónica, geomorfologia e sismicidade da cidade do Porto.* In: *Notícia explicativa da carta geotécnica do Porto. 2ª edição, COBA/FCUP/Câmara Municipal do Porto (CMP).*

Ribeiro, A.; Munhá, J.; Dias, R.; Mateus, A.; Pereira, E.; Ribeiro, L.; Fonseca, P.E.; Araújo, A.; Oliveira, J.T.; Romão, J.; Chaminé, H.I.; Coke, C. & Pedro J. (2007). *Geodynamic evolution of the SW Europe Variscides.*

Rodrigues, D. (2016). Caracterização geotécnica (ensaio do penetrómetro dinâmico médio) em pormenor do campus do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Departamento de Engenharia Geotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto.41-48p. [Dissertação de Mestrado].

Santos, R. Aplicações da sísmica. Disponível em: <http://www.uff.br/geofisica/index.php/aplicacoes> [Consultado em 3/06/2017];

Silva, M. (2013). Prospecção. Geofísica no Complexo Plutônico de Santa Eulália. Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. [Dissertação de Mestrado].

Vallejo, L. Ferrer, M. Ortuño, L. Oteo, C. (2002) Ingeniería Geológica. Prentice Hall. 304-329.

Vinagre, R. (2013). Análise comparativa de métodos de prospecção direta e indireta na determinação do topo rochoso p. fundações. Departamento de Engenharia Geotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto. [Dissertação de Mestrado].

Vitorino, G. (2010). Modelação das Ondas de Rayleigh. Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico. 2-3p. [Dissertação de Mestrado]

8.Anexos

8. Anexos

(Ver CD-ROM)

Anexo 1 – Sismogramas

Anexo 2 - Boletins de Campo do Penetrómetro dinâmico médio

Anexo 3 – Gráficos de índices de resistência do solo

Anexo 4 – Perfis do Terreno resultantes do Ensaio de Refração Sísmica: Perfis Longitudinais

Anexo 5 - Perfis do Terreno resultantes do Ensaio de Refração Sísmica: Perfis Transversais

Anexo 6 – Perfis do Terreno Resultantes do ensaio de penetrómetro dinâmico médio: Perfis Longitudinais

Anexo 7 – Perfis do Terreno Resultantes do ensaio de penetrómetro dinâmico médio: Perfis Transversais