



Universidade de Aveiro

Departamento de Geociências

2016

**Mirian Vaz D'Almeida
De Jesus Pires**

**Caracterização Geofísica e Geotécnica de um Campo de
Testes de Métodos Geofísicos, na Universidade de
Aveiro**

**Geophysical and Geotechnical Characterization of a
Geophysical Methods Test Field, at the University of
Aveiro**



Universidade de Aveiro
2016

Departamento de Geociências

Mirian Vaz D'Almeida De Jesus Pires **Caracterização Geofísica e Geotécnica de um Campo de Testes de Métodos Geofísicos, na Universidade de Aveiro**

Geophysical and Geotechnical Characterization of a Geophysical Methods Test Field, at the University of Aveiro

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau Mestre em Engenharia Geológica, realizada sob orientação do Professor Doutor Luís Filipe Fuentefria Menezes Pinheiro, Professor Associado do Departamento Geociências da Universidade de Aveiro e Coorientação do Professor Doutor Rui Miguel Marques Moura, Professor Auxiliar do Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da Engenharia Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

Dedico esta dissertação ao meu esposo Daniel Assunção e aos meus pais pelo incansável apoio.

O júri

Presidente	Prof. Doutor Jorge Manuel Pessoa Girão Medina Professor Auxiliar do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro
Arguente	Prof. Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro
Orientador	Prof. Doutor Luís Filipe Fuentefria Menezes Pinheiro Professor Associado do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Primeiramente agradeço à Deus por me proporcionar mais vez a oportunidade alcançar mais uma etapa na minha vida.

Ao Professor Luís Menezes Pinheiro pela sua orientação e ensinamentos que foram de grande valia.

Ao Professor Rui Moura pela sua disponibilidade e pela ajuda durante aquisição dos dados geofísicos.

Quero deixar um profundo agradecimento à Empresa Morph e ao Engenheiro Nuno Barraca pela disponibilidade, pelos conhecimentos transmitidos e pelos equipamentos concedidos para a aquisição dos dados. Ao professor Agostinho Benta pela colaboração e o apoio do Departamento Civil da Universidade de Aveiro e pela disponibilidade dos equipamentos.

Agradeço aos meus colegas e amigos Raquel Ribeiro, Ricardo Correia, Cláudia Santos, Cíntia Pereira, Laurício Terra, Marta Palmeirim e ao Angel Pérez pela ajuda na realização deste trabalho.

Por último agradeço à minha irmã Jodzinda Pires pelo apoio nesta jornada.

Palavras-chave

Métodos geofísicos; geotecnia; penetrómetro DPSH; georadar; refração Sísmica, aterro.

Resumo

No âmbito do projeto de dissertação foram adquiridos dados geofísicos e geotécnicos de uma zona de aterro da Universidade de Aveiro, com o objetivo de caracterizar a área de estudo através da correlação dos métodos geofísicos e geotécnicos. Para este efeito, foram realizados ensaios geotécnicos através do Penetrómetro Dinâmico Super Pesado (DPSH) com o intuito de determinar a resistência do solo à penetração dinâmica e estimar a litologia dos solos da sub-superfície. Utilizou-se o *software RockWorks 17* para a interpretação e representação dos dados. Relativamente aos métodos geofísicos, foram realizadas malhas de perfis de georadar e 2 perfis de refração sísmica. Os dados adquiridos pela refração sísmica foram processados e interpretados com os *softwares RadEXPRO e Ra2dTomo*, o que permitiu identificar as primeiras chegadas e determinar o modelo de velocidade das camadas. Os dados adquiridos pelo georadar foram processados pelo *software ReflexWin* e para a sua interpretação recorreu-se ao *software KingDom Suite* de modo a determinar as diferentes interfaces das camadas de enchimento do aterro e das camadas geológicas subjacentes.

A interpretação combinada destes métodos permitiu fazer uma caracterização a nível litológico, caracterizar a espessura das várias camadas sub-superficiais e melhor compreender o comportamento espacial das estruturas geológicas em sub-superfície, o que permitirá calibrar outros ensaios geofísicos no futuro.

Keywords

Geophysical methods; geotechnical; penetrometer DPSH; georadar; refraction seismic, landfill.

Abstract

In the scope of the dissertation project, geophysical and geotechnical, data were acquired in a landfill area in the University of Aveiro, in order to characterize the study area through the correlation of the geotechnical and geophysical methods. For this purpose, geotechnical tests were performed using the *Dynamic Probing Super Heavy* to determine the soil resistance to dynamic penetration and to estimate a lithology of the subsoil soils. The *RockWorks17* software was used for the interpretation and representation of data. As concerns the geophysical methods, 2 seismic refraction and a grid of georadar profiles were acquired. The seismic refraction profiles were processed and interpreted with the softwares *RadEXPRO* and *Ra2dTomo*, and allowed to identify the first arrivals and to determine a seismic velocity model for the various layers.

The georadar data, were processed with the *ReflexWin* software and for their interpretation the *KingDom Suite* software was used, so as to determine the different interfaces between the landfill filling layers and the underlying geological units.

The combined interpretation of these methods allowed the lithological characterization and the determination of the thickness of the various layers providing an improvement of the knowledge of the spatial behaviour of the geological structures in the subsurface, and will allow the calibration of other geophysical surveys in this area in the future.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1 Natureza e âmbito deste trabalho	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Enquadramento geológico da área de estudo	2
1.4 Metodologia	3
1.5 Estrutura da dissertação	3
2. Ensaio de Penetrómetro Dinâmico Super Pesado (DPSH)	5
2.1 Penetrómetro Dinâmico.....	5
2.2 Características dos penetrómetros dinâmicos	6
2.3 Características dos solos e resistência à penetração	8
2.4 Resistência dinâmica de ponta.....	9
2.5 Estudos geotécnicos anteriores na área de estudo	10
2.6 Equipamento e procedimento do ensaio.....	12
2.6.1 Equipamento DPSH.....	12
2.6.2 Procedimento do ensaio.....	13
2.7 Apresentação e análise dos resultados obtidos.....	15
2.7.1 Correlação espacial no Software RockWorks 17	22
2.7.2 Interpretação dos dados	26
3. Aquisição de perfis de refração sísmica.....	31
3.1 Refração sísmica.....	31
3.2 Ondas Elásticas.....	32
3.3 Lei de Snell.....	35
3.4 Equação da onda refratada para modelo de 2 camadas com interface horizontal	36
3.5 Metodologia de Interpretação dos dados de refração sísmica	37
3.6 Equipamento e Aquisição de Dados.....	39
3.7 Apresentação dos resultados e interpretação dos dados	42
3.7.1 Resultados obtidos	46
3.7.2 Interpretação dos dados	49

4.	Aquisição dos perfis de Georadar.....	50
4.1	Georadar	50
4.2	Propagação das ondas eletromagnéticas e as propriedades elétricas dos solos 53	
4.3	Procedimento de aquisição e equipamento utilizado no campo	54
4.4	Processamento dos dados de Georadar	58
4.5	Interpretação e análise dos dados.....	61
5.	Interpretação integrada dos dados geofísicos e geotécnicos	66
6.	Discussão e Conclusões	71
7.	Bibliografia.....	73
	Anexos	78

Lista de Figuras

Figura 1: Localização da área de estudo. Imagem Satélite (Google Earth).....	2
Figura 2: Resistência à penetração em solos de grãos finos e grosseiros (Spagnoli, 2007). 8	
Figura 3:Localização aproximada do ensaio realizado por Bonito (2008), no Esteiro de São Pedro.	10
Figura 4: Resultado do ensaio geotécnico CPTu realizado por Bonito (2008) no Esteiro de São Pedro. Ver a localização na figura 3.....	11
Figura 5: Penetrómetro DPSH Pagani 2004, usado neste trabalho.	12
Figura 6: Vara de 1 metro usada durante o ensaio.	13
Figura 7: Localização espacial da planificação dos pontos para execução do ensaio de penetrómetro DPSH na área de estudo. A verde estão representados os pontos em que foram realizados ensaios e a amarelo os pontos para os quais tal não foi possível.....	14
Figura 8: Número de pancadas (N_{20}) (à esquerda) em função da profundidade do Ponto P1, e resistência dinâmica de ponta (q_d) do Ponto P1 (à direita).	16
Figura 9: Exemplo da individualização dos diferentes "pacotes" litológicos em 3 locais da área de estudo (ver localização na Figura 7).....	16
Figura 10: Resistência dinâmica de ponta q_d em função da profundidade, nos ensaios correspondentes aos pontos P1-16.....	18
Figura 11:Resistência dinâmica de ponta q_d em função da profundidade, nos ensaios correspondentes aos pontos P7-17.....	19
Figura 12:Resistência dinâmica de ponta q_d em função da profundidade, nos ensaios correspondentes aos pontos P3-13.....	20
Figura 13:Resistência dinâmica de ponta q_d em função da profundidade, nos ensaios correspondentes aos pontos P9-20.....	21
Figura 14: Projeção dos Furos DPSH no Campo.	22
Figura 15: Perfil paralelo à Ria de Aveiro, dos pontos P1-16.	23
Figura 16:Perfil paralelo à Ria de Aveiro, dos pontos P7-17.	23
Figura 17:Perfil paralelo à Ria de Aveiro, dos pontos P3-18.	23
Figura 18:Perfil paralelo à Ria de Aveiro, dos pontos P9-19.	23
Figura 19:Perfil paralelo à Ria de Aveiro, dos pontos P10-20.	24
Figura 20:Perfil perpendicular à Ria de Aveiro, dos pontos P1-3.....	24
Figura 21:Perfil perpendicular à Ria de Aveiro, dos pontos P6-10.....	24
Figura 22:Perfil perpendicular à Ria de Aveiro, dos pontos P11-14.....	24
Figura 23: Perfil perpendicular à Ria de Aveiro, dos pontos P16-20.....	25
Figura 24:Localização espacial das secções transversais (<i>cross-section</i>). A verde estão representados os pontos em que foram realizados ensaios e as linhas amarelas estão representadas as <i>cross-sections</i>	25
Figura 25: Litologia.	26

Figura 26: Modelo Sólido 3D dos dados obtidos no campo pelo penetrómetro DPSH.....	27
Figura 27: Visualização dos dados em 3D.	27
Figura 28: Projeção do diagrama de cerca (Fence Diagram), através do <i>Google Earth</i> integrado no Software <i>RockWorks 17</i>	28
Figura 29: Perfil interpretado dos pontos P1-16.....	28
Figura 30: Perfil interpretado dos pontos P7-17.....	29
Figura 31: Perfil interpretado dos pontos P3-18.	29
Figura 32: Perfil interpretado dos pontos P9-19.	29
Figura 33: Perfil interpretado dos pontos P10-20.	29
Figura 34: Perfil interpretado dos pontos P1-3.....	30
Figura 35: Perfil interpretado dos pontos P6-10.	30
Figura 36: Perfil interpretado dos pontos 11-14.....	30
Figura 37: Perfil interpretado dos pontos P16-20.	30
Figura 38: Execução do Método Sísmico de Refração, e a propagação das ondas refratadas. Fonte: http://www.portalsatc.com/site/adm/arquivos/	32
Figura 39: Propagação das Ondas P (Kearey <i>et al.</i> , 2009).....	33
Figura 40: Propagação das Ondas S (Kearey <i>et al.</i> , 2009).....	34
Figura 41: Propagação das ondas de Love (Kearey <i>et al.</i> , 2009).....	35
Figura 42: Propagação das Ondas de Rayleigh (Kearey <i>et al.</i> , 2009).....	35
Figura 43: Representação da Lei de Snell, θ_i ângulo de incidência e θ_r ângulo do raio refratado, e a velocidade de propagação dos diferentes meios.....	35
Figura 44: Propagação das ondas refratas, modelo de duas camadas. Posições de frente de Onda da onda incidente em diferentes instantes provocadas pela fonte sísmica A (Kearey, et al, 2013).....	36
Figura 45: Curvas <i>tempo x distância</i> para a onda direta e a onda refratada para modelo de duas camadas com interface horizontal e plana (Kearey <i>et al.</i> , 2013).....	38
Figura 46: Exemplo de Curvas tempo x distância do tempo com direto e inverso (Kearey <i>et al.</i> , 2013).....	38
Figura 47: Martelo (Fonte Sísmica) e Placa de aço (à esquerda). Geofone (à direita), Fonte: http://inter-geo.org	40
Figura 48: Distribuição dos geofones ao longo da superfície.	40
Figura 49: Computador de Aquisição (à esquerda) e sismógrafo (à direita).	41
Figura 50: Interface gráfica do Software Doremi.....	41
Figura 51: Localização dos perfis sísmicos P1 e P2 realizados no campo (representados pelas linhas pretas).....	42
Figura 52: Estrutura do projeto para diferentes linhas em RadExPro.	43
Figura 53: Fluxo para visualização dos dados sísmicos.....	43
Figura 54: Definição da geometria dos dados.....	44
Figura 55: Registos de tiro dos dados obtidos no campo.	45
Figura 56: Identificação e registo das primeiras chegadas.	45

Figura 57: Valores obtidos pelos <i>Picks</i> das primeiras chegadas.	46
Figura 58: Gráfico do tempo em função da distância, obtida pelo <i>Excel</i>	46
Figura 59: Grelha triangular usada para a inversão tomográfica.	47
Figura 60: Modelo preliminar para inversão dos dados.	47
Figura 61: Gráfico tempo x distância, interpretado para os pontos de tiro referentes da linha sísmica com marcações das primeiras chegadas.	48
Figura 62: Modelo interpretado de velocidades das camadas para o Perfil 1.	48
Figura 63: Modelo de velocidades das camadas para o Perfil 2.	48
Figura 64: Modelo interpretado de velocidade de propagação das camadas do Perfil 1. ..	49
Figura 65: Modelo interpretado de velocidades do Perfil 2.	49
Figura 66: Aquisição de dados pela penetração de GPR no solo e radargrama. Fonte: http://www.geo-analysis.com/utilitymapping/georadar.html	50
Figura 67: Propagação das Ondas eletromagnéticas, direta e refletida.	51
Figura 68: Vários tipos de Dispersão das ondas eletromagnéticas (Adaptado de Barraca, 2013).	52
Figura 69: Dispersão cônica da propagação da onda eletromagnética.	53
Figura 70: Antenas GPR 100MHz (à esquerda) e de 500MHz (à direita), utilizadas nos levantamentos de campo efetuados neste trabalho.	54
Figura 71: Linhas de aquisição obtida pela antena de 500MHz.	56
Figura 72: Linhas de aquisição obtida pela antena de 100MHz.	57
Figura 73: Fluxo de Processamento.	58
Figura 74: Radargrama obtido pelo georadar. Dados originais sem processamento.	58
Figura 75: Aplicação do Filtro 1D <i>Subtract Mean (dewow)</i>	59
Figura 76: Correções Estáticas.	60
Figura 77: Ajuste das Hipérboles.	60
Figura 78: Radargrama obtido após o processamento dos dados brutos representados na Figura 73.	61
Figura 79: Radargrama do Perfil 0543 adquirido pela antena de 100 MHz (<i>shot point x time</i>).	62
Figura 80: Radargrama do Perfil 0543 com interpretação dos horizontes (<i>shot point x time</i>).	63
Figura 81: Radargrama do Perfil 0561 adquirido pela antena de 500 MHz (<i>shot point x time</i>).	63
Figura 82: Radargrama do Perfil 0561 com a interpretação dos horizontes (<i>shot point x time</i>)	64
Figura 83: Visualização em 3D dos horizontes interpretados pelas secções de georadar obtidos com a antena de 100MHz (à esquerda) e com a antena de 500MHz (à direita). ..	64
Figura 84: Visualização em 3D dos horizontes interpretados (Antena de 100 MHz).	65
Figura 85: Correlação entre os resultados obtidos pelo DPSH e pela sísmica de refração do perfil 1.	67

Figura 86: Correlação entre os resultados obtidos pelo DPSH e pela sísmica de refração do perfil 2.	67
Figura 87: Correlação entre os resultados obtidos pelo DPSH e os dados obtidos pelo georadar com a antena de 100MHz. Identificação do contacto dos Lodos (linha vermelha).	68
Figura 88: Correlação entre os resultados obtidos pelo DPSH e georadar com antena de 100MHz.	68
Figura 89: Correlação entre os resultados obtidos pelo DPSH e pelos dados obtidos pelo georadar com a antena de 100MHz.	69
Figura 90: Correlação entre os resultados obtidos pelo DPSH e pelos dados obtidos pelo georadar com a antena de 500MHz.	69
Figura 91: Correlação entre os resultados obtidos pelo DPSH e pelos dados obtidos pelo georadar com a antena de 500MHz.	70

Lista de Tabelas

Tabela 1: Características dos penetrômetros dinâmicos (Adaptado de EN ISO 22476-2:2005).....	7
Tabela 2: Classificação do solo em função da Resistência de ponta dinâmica (q_d) (Waschkowski, 1983).....	10
Tabela 3: Características do equipamento DPSH Pagani usado no campo.	13
Tabela 4: Dados para cálculo de R_d e q_d	15
Tabela 5: Classificação litológica em função da resistência dinâmica de ponta (q_d).	17
Tabela 6: Velocidade de propagação das ondas P em alguns materiais (Miranda <i>et al.</i> , 2010)	33
Tabela 7: Parâmetros de Aquisição de dados de refração.	39

1. Introdução

1.1 Natureza e âmbito deste trabalho

O presente trabalho de dissertação consiste na investigação geofísica e geotécnica de um campo de testes geofísicos localizado no Campus Universitário de Aveiro com o intuito de poder servir como uma área de testes de métodos geofísicos em que a estrutura sub-superficial está bem caracterizada, através da interpretação integrada dos métodos utilizados (ensaios de penetrómetro DPSH e aquisição de perfis de refração sísmica e GPR).

O trabalho foi desenvolvido sob a orientação científica do Professor Doutor Luís Menezes Pinheiro do departamento de Geociências da Universidade de Aveiro, e Co-orientação do Professor Doutor Rui Miguel Marques Moura, Professor Auxiliar do Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território da Engenharia Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. A planificação da execução dos métodos, processamento e interpretação foram realizados no Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

No âmbito desta dissertação, foram adquiridos perfis de refração sísmica e de georadar segundo uma malha, complementados com a aquisição de dados geotécnicos com um Penetrómetro Dinâmico Super Pesado (*Dynamic Probing Super Heavy*, DPSH). Para este efeito, criou-se uma malha no *Software ArcGIS* para a planificação dos levantamentos a realizar. Devido a problemas logísticos e limitação de tempo não foi contudo possível a realização completa dos perfis de refração sísmica inicialmente planeados. Pelas mesmas razões só foi também apenas possível realizar cerca de 53% dos ensaios de DPSH inicialmente previstos. No entanto, foi possível a conclusão completa da malha prevista o georadar, com dupla frequência.

1.2 Objetivos

O presente trabalho de dissertação teve como objetivo principal caracterizar a geologia da sub-superfície da área em estudo, através da correlação entre os resultados dos métodos geotécnicos e geofísicos utilizados para esse efeito.

Objetivos secundários incluem a familiarização com a aquisição dos métodos geofísicos (georadar e refração sísmica) e de penetrómetro, assim como com as respetivas técnicas e *Software* de processamento e interpretação dos dados resultantes.

1.3 Enquadramento geológico da área de estudo

A área de estudo trata-se de uma zona de aterro localizada no Campus Universitário de Aveiro (Figura 1) e que se pretende que seja utilizada para a realização de testes geofísicos e para apoio das aulas da disciplina de Geofísica Aplicada à Engenharia do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

Esta área está localizada na Bacia Sedimentar de Aveiro que constitui o sector mais setentrional da Orla Ocidental Meso-Cenozóica (a Bacia Lusitânica), situada a ocidente do Maciço Hespérico.

As litologias presentes da idade Meso-Cenozóica da Bacia Sedimentar de Aveiro compreendem areias (finas, médias e grosseiras), muitas vezes com níveis argilosos e lodos, calcários margosos, argilas, margas arenosas, margas com níveis calcários, e grés argilo-margosos (Rocha 1993).

Estratigráficamente, o substrato da Bacia de Aveiro consiste em gnaisses e migmatitos do Proterozóico, assim como granitóides do Paleozóico no extremo norte, micaxistos e xistos do Proterozóico nas demais zonas (Rocha, 1993).

A área de estudo situa-se nos depósitos aluvionares associados à presença do sistema lagunar Ria de Aveiro. A área é aplanada, devido à realização de vários aterros, de baixa altitude e abrangida por canais da Ria de Aveiro. Os sedimentos destes depósitos aluvionares são ricos em matéria orgânica (Bonito, 2008).



Figura 1: Localização da área de estudo. Imagem Satélite (Google Earth).

1.4 Metodologia

Com o intuito de cumprir os objetivos propostos para o desenvolvimento da presente dissertação, foi utilizada a seguinte metodologia:

- Para a planificação dos levantamentos geofísicos e geotécnicos, criou-se uma malha projetada, através do *Software ArcGIS*;
- Para a aquisição de dados geotécnicos foi utilizado um Penetrómetro Dinâmico Super Pesado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro;
- Para a visualização, interpretação e correlação espacial dos dados adquiridos pelo DPSH foi utilizado o *Software RockWorks 17*, que permitiu obter imagens *cross-section 2D*, e a visualização da geologia da área de estudo em 3D;
- A aquisição dos dados geofísicos da refração sísmica foi realizada através de um sísmógrafo de 24 canais, utilizando como fonte um martelo;
- Para fazer a marcação dos *picks* das primeiras chegadas nos registos sísmicos (ondas refratadas) utilizou-se o *Software RadExPro*;
- Para a interpretação dos dados da refração sísmica foi utilizado o *Software Ra2dtomo*;
- Os dados de georadar foram adquiridos com o sistema de *ProEx* da *MALA Geoscience* com antenas blindadas, com frequências de 100MHz e 500MHz, na configuração de mochila e antena com GPS acoplado;
- Os dados de georadar adquiridos foram processados no *software ReflexWin* e para a sua interpretação foi utilizado o *Software Kingdom Suite*;
- Para correlação dos dados dos vários métodos e visualização 3D, recorreu-se ao *Software RockWorks 17*.
- Todos os dados foram posicionados com GPS diferencial portátil.

1.5 Estrutura da dissertação

No Capítulo 1 faz-se uma introdução ao trabalho, apresentando a natureza e o âmbito do trabalho realizado, os objetivos da presente dissertação e a metodologia utilizada para a sua realização.

No Capítulo 2 é abordado o modo de funcionamento do ensaio DPSH como método geotécnico, a sua aplicabilidade na caracterização dos solos, a metodologia utilizada para a classificação e caracterização dos solos e os resultados obtidos.

O Capítulo 3 aborda sucintamente a refração sísmica como método geofísico, a metodologia utilizada para a aquisição e processamento dos dados no campo e a interpretação dos resultados obtidos.

O Capítulo 4 apresenta os conceitos principais sobre a aquisição de perfis de georadar e descreve os resultados obtidos e o procedimento aplicado no seu processamento.

O Capítulo 5 é dedicado à interpretação integrada dos métodos geofísicos e geotécnicos.

O Capítulo 6 apresenta uma breve discussão dos resultados e as conclusões da dissertação, assim como possíveis trabalhos futuros.

2. Ensaio de Penetrómetro Dinâmico Super Pesado (DPSH)

2.1 Penetrómetro Dinâmico

O ensaio de penetrómetro dinâmico é um dos mais antigos métodos geotécnicos *in situ* inventado para investigar as características mecânicas dos solos na realização de trabalhos de engenharia. Em geral, as sondagens de penetração servem para investigar solos com um perfil irregular, para individualizar as possíveis zonas com pouca resistência que não foram determinadas por sondagens diretas, e para obter uma possível avaliação da densidade relativa dos solos com escassa ou coesão nula (Spagnoli, 2007). O ensaio de penetrómetro, em combinação com outros ensaios geotécnicos, tem vindo a desempenhar um papel muito importante na área geotécnica no que diz respeito à caracterização dos solos *in situ* antes de se desenvolver qualquer tipo de construção de engenharia. Tal permite que, na maioria dos casos, se possa prever o comportamento dos solos quando são submetidos a um estado de tensão. Uma má execução e interpretação destes ensaios produz consequências graves, como a deformação e ou deslizamento do solo, que se podem verificar ao longo do tempo após a construção. Tal também envolve uma perda financeira no que respeita ao investimento para a execução dos ensaios e construções das obras.

Os ensaios de penetrómetro permitem ter uma ideia do nível de compactação dos solos, de algumas propriedades físicas e mecânicas dos solos da sub-superfície, determinar as litologias, e detetar solos que têm maior probabilidade de sofrerem colapso ou deslizamento. Nalguns casos, estes ensaios também permitem inferir o módulo de deformabilidade do solo, possibilitando assim avaliar um conjunto de parâmetros geomecânicos e determinar as condições das edificações das obras. Alguns ensaios de penetrómetro são mais completos e complexos; além de determinarem as características físicas e mecânicas dos solos da sub-superfície, também permitem fazer uma recolha de amostras do solo da sub-superfície, com vista a ser feita a sua análise laboratorial. Estes ensaios de penetrómetro, como é o caso do SPT (*Standard Penetration Test*), permitem obter uma caracterização mais completa da área de interesse oferecendo uma melhor precisão dos resultados.

No presente caso de estudo, o ensaio de penetrómetro serviu para a calibração dos perfis de refração sísmica e georadar. Para esse efeito, foi utilizado o DPSH de forma a determinar a resistência do solo, os possíveis níveis de interfaces de cada camada e estimar o tipo de litologia presente.

Os penetrómetros são aparelhos que medem a resistência do solo à penetração de uma vara consoante o número de pancadas. No geral, permitem fazer a caracterização das

camadas subterrâneas, a determinação das litologias, do nível de compactação do solo e da resistência do solo.

O objetivo do ensaio de penetração dinâmica é determinar a resistência dinâmica de ponta que caracteriza uma camada do solo qualquer que seja a sua profundidade, a sua posição, a sua natureza, a sua densidade ou a sua espessura (Spagnoli, 2007).

2.2 Características dos penetrómetros dinâmicos

As propriedades mecânicas determinadas a partir dos ensaios de penetrómetro possibilitam ter uma ideia quantitativa e qualitativa dos solos da sub-superfície permitindo, assim, avaliar os solos antes de se elaborar algum trabalho de engenharia geotécnica e civil.

Os ensaios de penetrómetro dinâmico são realizados a partir da cravação vertical provocada pela queda livre do peso do martelo ou pilão a uma determinada distância sobre as varas cilíndricas fixadas topo a topo e que vão penetrando no solo consoante o número pancadas consecutivas. O número de pancadas varia consoante as propriedades mecânicas dos solos e, tal como a resistência, dependem muito do seu estado de densidade, do teor de humidade e da granulometria dos grãos.

Ao executar os ensaios com penetrómetros dinâmicos há que se ter em conta algumas particularidades para não afetar os resultados e a interpretação dos dados; para tal, deve manter-se constante o peso do martelo, a altura da queda do martelo, o espaçamento das varas a penetrar no solo. Para além disso, o equipamento deve estar bem nivelado, as varas devem estar na perpendicular em direção ao solo e deve-se ter atenção no registo das pancadas de forma a não obter erros durante o ensaio (em casos em que os registos são feitos manualmente).

Durante o ensaio, são registados o número de pancadas necessárias para que determinada profundidade da vara penetre no solo. Os dados obtidos permitem a construção de um gráfico com o número de pancadas em função da profundidade, no qual o eixo das ordenadas indica as profundidades e o das abcissas indica o número de pancadas. Os dados obtidos dão-nos uma ideia das propriedades físicas e mecânicas dos solos. Ao interpretar os resultados, especialmente nos solos coesivos, deve ter-se algum cuidado: durante a penetração há fricção nas hastes do equipamento o que faz com que haja dissipação de energia das hastes e, conseqüentemente, o número de pancadas cresce sem que corresponda à respetiva resistência do solo.

Normalmente, nos penetrómetros dinâmicos são definidas distâncias nas varas para penetrarem consoante o número de pancadas, mas estas variam de país para país consoante o tipo de norma a ser utilizada. Consoante as especificações do equipamento,

podem ser de 10, 20 ou 30 cm, a que chamamos respetivamente N₁₀, N₂₀, N₃₀. O procedimento para execução do ensaio é o mesmo para todos os tipos de penetrómetros dinâmicos: deixar cair de uma altura constante um martelo com um determinado peso e registar o número de pancadas necessárias para penetração da distância definida. A Tabela 1 mostra os vários tipos de ensaios de penetrómetros dinâmicos e as respetivas ferramentas que permitem a sua realização. Embora o modo de execução seja semelhante entre eles, para cada tipo de ensaio de penetrómetro dinâmico é diferente o peso das varas, a altura da queda, o diâmetro e a massa do batente, a massa do pilão e a energia de penetração; são estes os parâmetros que definem a profundidade de penetração de cada um dos ensaios.

Tabela 1: Características dos penetrómetros dinâmicos (Adaptado de EN ISO 22476-2:2005).

	DPL (leve)	DPM (médio)	DPH (pesado)	DPSH (super pesado)
Dispositivo de cravação				
Pilão massa m (kg)	10±0,1	30±0,3	50±0,5	63,5±0,5
Altura de queda h (mm)	500±10	500±10	500±10	750±20
Razão comprim./diâm. (D _h)	≥1 ≤2	≥1 ≤2	≥1 ≤2	≥1 ≤2
Batente				
Diâmetro (mm)	50<d<0,5	50<d<0,5	50<d<0,5	50<d<0,5
Massa (kg) (max.) (vara guia incluída)	D _h 6	D _h 18	D _h 18	D _h 30
Cone de 90º				
Área da base nominal A (cm ²)	10	15	15	20
	35,7±0,3	43,7±0,3	43,7±0,3	51±0,5
Diâmetro da base (D) novo (mm)	34	42	42	49
Diâmetro da base, usado (mm) min.	35,7±1	43,7±1	43,7±1	51±2
Comprimento da manga (mm)	17,9±0,1	21,9±0,1	21,9±0,1	25,3±0,4
Comprimento da ponta do cone (mm)	3	4	4	5
Desgaste máx. da ponta (mm)				
Varas				
Massa (kg/m) (máx)	3	6	6	8
Diâmetro OD (mm) (máx)	22	32	32	32
Desvio da vara:				
5m inferiores %	0,1	0,1	0,1	0,1
Restante %	0,2	0,2	0,2	0,2
Energia específica por pancada				
(mgh/A) em kJ/m ²	50	100	167	238

2.3 Características dos solos e resistência à penetração

A resistência à penetração dos solos depende muito do tipo de material que os constitui, da sua natureza e da sua forma. Geralmente, há maior resistência à penetração nos solos com grãos angulosos ou superfícies irregulares do que os solos com partículas redondas e lisas. Grãos grosseiros oferecem maior resistência à penetração do que solos de grãos mais finos e moles. Nos solos moles, o atrito gerado entre as varas e a parede do furo influencia grandemente a resistência à penetração; por este motivo e porque oferecem melhores resultados, os ensaios dinâmicos são geralmente utilizados em solos granulares (Spagnoli, 2007).

O nível de compactidade e a densidade do solo também influenciam muito a resistência à penetração. Solos muito compactos são menos suscetíveis à penetração que solos menos compactos. Segundo Spagnoli (2007), a resistência à penetração aumenta mais do que linearmente com o aumento do índice de densidade do solo.

Na figura 2 está representado um gráfico típico resultante do ensaio de penetrômetro dinâmico leve DPL (*Dynamic Probing Light*). Uma análise rápida do gráfico permite constatar que nas profundidades que correspondem aos materiais mais grosseiros (*sand/gravel*) a resistência à penetração varia mais acentuadamente do que nos solos de grãos mais finos (*silt*). O intervalo de variação é mais acentuado nos cascalhos do que nas areias.

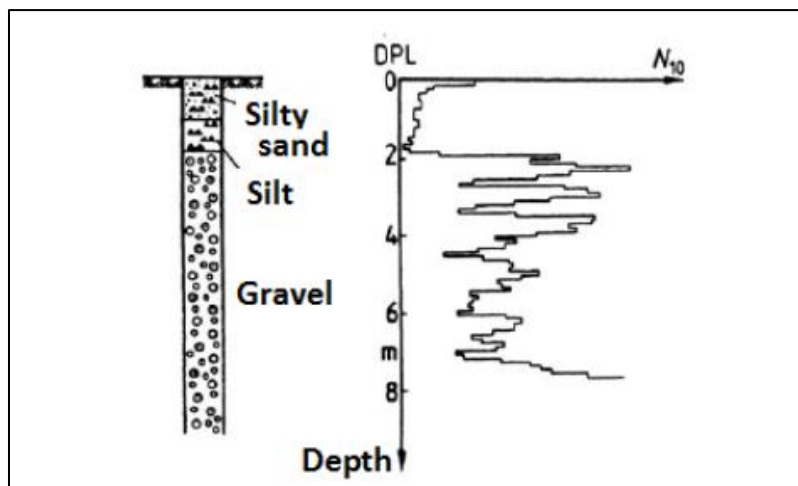


Figura 2: Resistência à penetração em solos de grãos finos e grosseiros (Spagnoli, 2007).

A interpretação dos dados obtidos pelo ensaio de penetrômetro dinâmico é feita com maior facilidade quando se compreendem os conceitos e as propriedades envolvidas no ensaio, tal como foi possível verificar.

2.4 Resistência dinâmica de ponta

Os resultados obtidos pelo ensaio de penetrômetro DPSH geralmente podem ser apresentados de três maneiras diferentes, em função da profundidade:

- Pelo número de pancadas N_d ,
- Pela resistência de ponta R_d ,
- Pela resistência dinâmica de ponta, q_d .

O R_d e q_d são calculados a partir da expressão holandesa (Eq. 1 e 2). Os valores de N_d podem ser projetados em conjunto com a resistência de ponta (R_d), ou com a resistência dinâmica de ponta (q_d) (EN ISO 22476-2:2005).

$$R_d = \frac{M \times g \times h}{A_b \times e} \quad (\text{Eq.1})$$

$$q_d = \frac{M}{M + M'} \times R_d \quad (\text{Eq.2})$$

- R_d : resistência de ponta (MPa)
- q_d : resistência dinâmica de ponta (MPa)
- M: massa do pilão (kg)
- g: aceleração da gravidade (m/s^2)
- h: Altura de queda do pilão (m)
- A_b : área da base do cone (m^2)
- M' : massa total do conjunto de varas, batente e vara guia (Kg)
- e: penetração média por pancada (m)

Devido ao atrito entre o conjunto de varas e as paredes do furo, às características do próprio solo e à dissipação da energia pelas roscas de ligação entre as varas, a variação do ritmo de pancadas, ou as eventuais interrupções durante o ensaio, podem fazer com que o número de pancadas em profundidade aumente, principalmente em solos coesivos. Ao calcular o q_d admite-se que toda a energia é absorvida pelo solo (Veigas, 2011).

O N_d (número de pancadas) não pode ser uma característica dinâmica porque é influenciado por muitos fatores, tais como a energia de impacto, o diâmetro e a largura da ponta cônica, e a relação variável da massa de impacto e a massa batida (Spagnoli, 2007). Assim sendo, o q_d permite obter resultados mais fiáveis em profundidade em relação ao número de pancadas.

A resistência dinâmica de ponta (q_d) permite fazer a classificação do solo quanto à sua natureza (Tabela 2) mas, geralmente, é aplicada quando se tem um conhecimento prévio do tipo do material que constitui o solo.

Tabela 2: Classificação do solo em função da Resistência de ponta dinâmica (q_d) (Waschkowski, 1983).

Nature du sol	q_d (MPa)
vase	0,1 à 1
limon	0,6 à 1,5
argile molle	0,1 à 1,5
argile consistante	1,5 à 3
argile raide	3 à 5
argile raide caillouteuse	3 à 7
sable lâche	0,2 à 4
sable dense	5 à 30
sable argileux	4 à 7
sable et graviers lâches	0,5 à 4
sable et graviers denses	7 à 35
craie molle	0,7 à 4
craie indurée	10 à 50
marne	6 à 15
marne raide ou indurée	20 à 100

2.5 Estudos geotécnicos anteriores na área de estudo

A resistência dinâmica de ponta (q_d) medida nos ensaios realizados contribuiu para a classificação dos solos na área de estudo mas também se recorreram a trabalhos geotécnicos anteriormente realizados nesta área. Bonito (2008), no âmbito da sua tese de doutoramento, realizou alguns ensaios geotécnicos *in situ* e laboratoriais na área de Aveiro. Um dos que foi objeto de estudo localiza-se perto da área investigada no presente trabalho de dissertação (Figura 3).

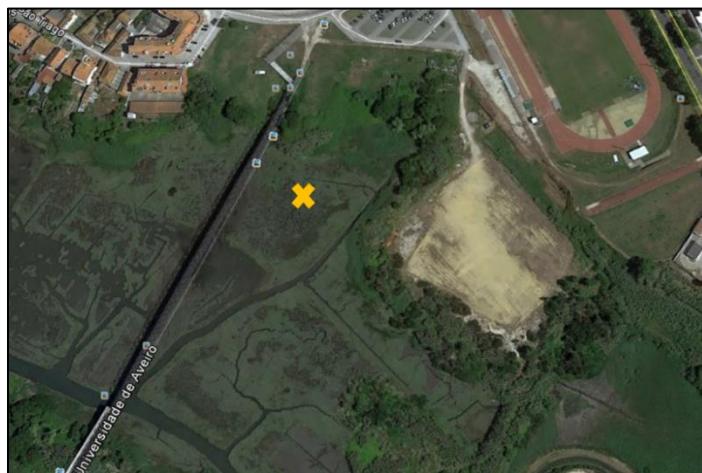


Figura 3: Localização aproximada do ensaio realizado por Bonito (2008), no Esteiro de São Pedro.

A área estudada por Bonito (2008), o Esteiro de São Pedro, atravessa os terrenos do Campus Universitários de Santiago, sendo caracterizada predominantemente por solos moles designados por lodos, ricos em matéria orgânica e compreendidos entre siltes-argilosos e silto-arenosos.

A Figura 4 apresenta o perfil de resistência resultante do tratamento das leituras de campo feito por este autor. Segundo os resultados obtidos pelo ensaio CPTu, no Esteiro de São Pedro, as primeiras camadas dizem respeito à camada de aterro, seguidas de uma camada lodosa, cascalho e argila rija. Os ensaios foram executados até os 26,5m de profundidade. No Esteiro de São Pedro há um predomínio da formação lodosa, com valores de resistência de ponta corrigida baixos e com uma pequena faixa de variação. Na formação lodosa, a fração arenosa ganha importância com o aumento da profundidade. A transição para as argilas rijas cretácicas é marcada por um nível pouco espesso de cascalho (Bonito, 2008).

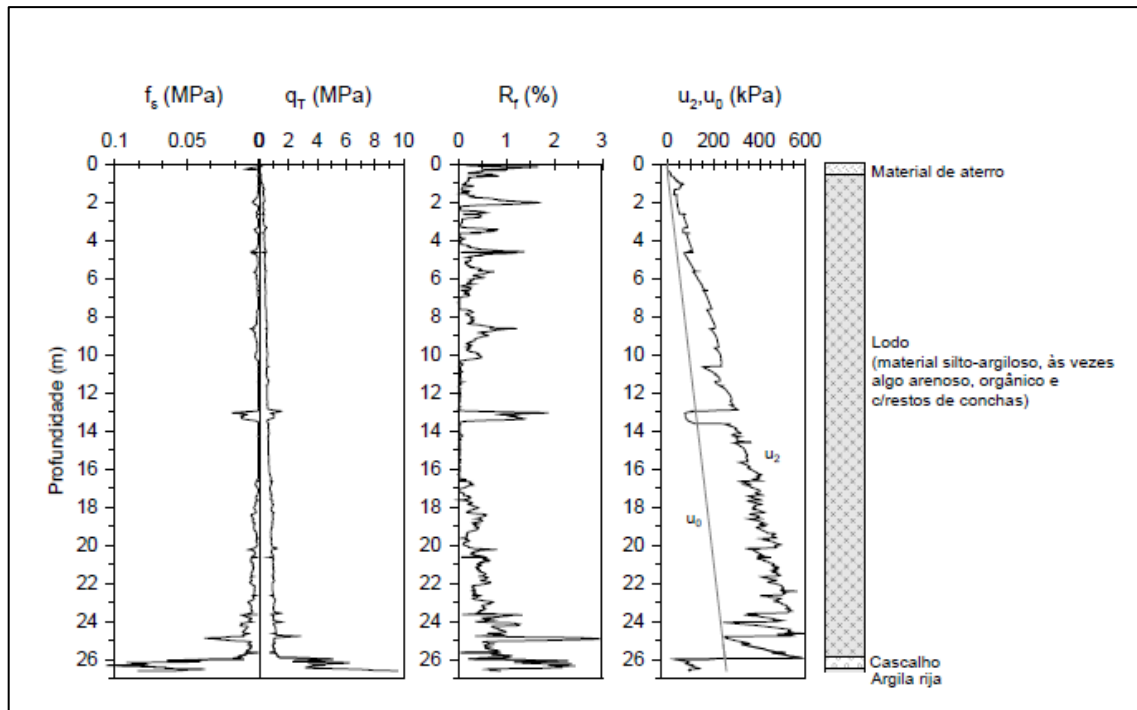


Figura 4: Resultado do ensaio geotécnico CPTu realizado por Bonito (2008) no Esteiro de São Pedro. Ver a localização na figura 3.

2.6 Equipamento e procedimento do ensaio

2.6.1 Equipamento DPSH

O DPSH conhecido por *Dynamic Probing Super Heavy* é um penetrómetro dinâmico constituído por um conjunto de varas de um metro (Figuras 5 e 6), com marcas espaçadas de 20 centímetros. Este equipamento permitiu determinar a resistência e a compacidade dos solos em função da profundidade, consoante o número de pancadas provocadas pela queda livre de massa de um martelo.

O ensaio DPSH foi realizado segundo a Norma EN ISO 22476-2:2005. Utilizou-se um martelo (pilão) de 63,5 kg, com uma elevação de 75 centímetros o que forneceu energia às varas que penetraram no solo devido sua queda sobre as varas. Neste tipo de ensaios há apenas o registo do número de pancadas à medida que as varas vão penetrando no solo; não há recolha de amostras, o que constitui uma das desvantagens deste tipo de ensaio.

Apesar de ser um método intrusivo, os danos provocados nos solos não foram significativos. No entanto, após a execução dos ensaios, tiveram que se verificar as condições do solo e, por precaução, embora sejam de muito pequenas dimensões e não promovam quaisquer perturbações no terreno, taparam-se os pequenos furos provocados pela penetração.

O DPSH é um equipamento de fácil transporte e manuseamento, necessitando apenas de dois operadores.



Figura 5: Penetrómetro DPSH Pagani 2004, usado neste trabalho.



Figura 6: Vara de 1 metro usada durante o ensaio.

2.6.2 Procedimento do ensaio

O ensaio DPSH foi realizado segundo a Norma EN ISO 22476-2:2005. Para a realização deste trabalho foi utilizado o equipamento PAGANI 2004 (Figura 5).

Tabela 3: Características do equipamento DPSH Pagani usado no campo.

Designação	DPSH Pagani
Peso do Pilão (Kg)	63.5
Elevação/ Altura de queda do Pilão (cm)	75
Secção transversal do cone (cm ²)	20
Peso das varas+batente (Kg)	30
Penetração Standard (cm)	20
Ângulo no vértice do cone	90º
Massa da Vara (kg)	8
Número de pancadas por penetração unitária	1 a 60

Antes de avançar para o ensaio propriamente dito, foram necessários alguns procedimentos prévios:

1. Reconhecimento preliminar da área;
2. Planificação dos trabalhos a executar;
3. Elaboração de uma malha esquemática dos pontos e das linhas a executar os ensaios, usando o *ArcGIS*;
 - 3.1 Seleção do sistema de coordenadas, neste caso UTM (WGS-84, hemisfério 29N);
 - 3.2 Criação de um *basemap* da região em estudo;
 - 3.3 Construção de um *shapfile* com linhas paralelas e perpendiculares igualmente espaçadas;
 - 3.4 Cálculo das coordenadas dos pontos de interseção;
4. Extração das coordenadas do *ArcGIS* dos pontos de interesse;

5. Marcação dos pontos no terreno com auxílio de um GPS diferencial;

Em relação ao equipamento DPSH, há ainda algumas particularidades que se devem ter em conta:

- O equipamento deve ser devidamente montado;
- A intensidade da queda do pilão deve ser constante;
- Tem de se verificar se o equipamento está bem nivelado na vertical, de modo a que as varas estejam na perpendicular em relação à camada a penetrar;
- A distância pré-definida nas varas (N_{20}) deve ser constante.
- Os resultados devem ser anotados numa tabela;

Aquando da realização do ensaio é importante:

- Proceder-se ao registo do número de pancadas para fazer penetrar 20 cm;
- Quando o número de pancadas for superior a 60 sem que ocorra a penetração dos 20 cm da vara, o ensaio é interrompido; nestes casos, diz-se que o terreno a esta dar uma “nega”, ou seja, o solo não é penetrável.

A Figura 7 mostra a localização dos pontos do ensaio de acordo com a planificação prévia, assim como os pontos em que efetivamente foram realizados os ensaios (a verde).

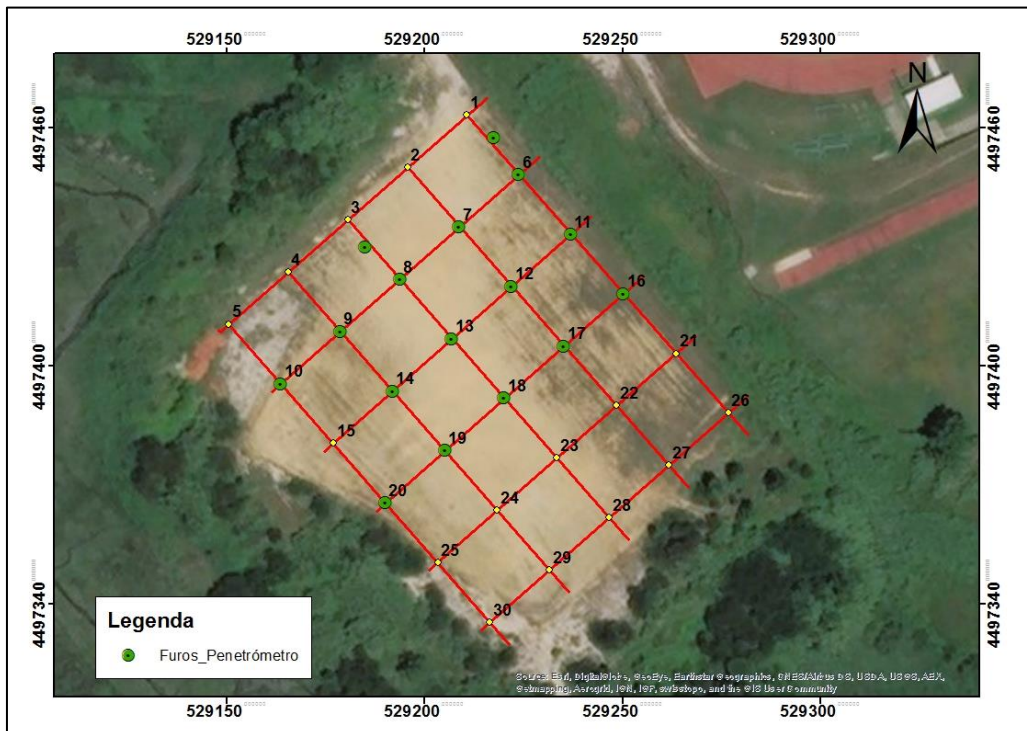


Figura 7: Localização espacial da planificação dos pontos para execução do ensaio de penetrómetro DPSH na área de estudo. A verde estão representados os pontos em que foram realizados ensaios e a amarelo os pontos para os quais tal não foi possível.

2.7 Apresentação e análise dos resultados obtidos

O ensaio de DPSH não permite a classificação direta e precisa em termos da litologia, mas permite fazer uma estimativa do tipo de litologias e verificar os limites de transição das várias camadas através da resistência dinâmica de ponta (q_d).

Os dados registados no campo foram colocados numa folha de *Excel (Microsoft Excel 2010)* para a construção de gráficos. Os resultados obtidos permitem observar a variação da curva N_{20} ao longo da profundidade. Além do gráfico do número de pancadas em função da profundidade (Figura 8) foi possível calcular a resistência de ponta (R_d) e a resistência dinâmica de ponta (q_d) dados em MPa. Os cálculos R_d e q_d foram baseados nos dados apresentados na tabela seguinte (Tabela 4), segundo a expressão holandesa (Eq. 1 e 2) apresentada anteriormente:

Tabela 4: Dados para cálculo de R_d e q_d .

Massa do pilão, M	63.5	Kg
Altura de queda, h	0.75	m
Aceleração gravítica, g	9.80665	m/s ²
Base do cone, Ø	0.051	m
Área base do cone, A	0.00204	m ²
Massa do batente + vara guia, M'	30	Kg
Massa vara guia	8	Kg

O gráfico do número de pancadas em função da profundidade permitiu diferenciar zonas com baixa e elevada resistência à penetração, solos moles e rijos. O gráfico que se obteve através do cálculo do q_d é muito semelhante ao que se obteve para N_d (ver Figura 8), mas está associado a um erro menor. A analogia utilizada para avaliar o nível de resistência do solo consoante o número de pancadas é a mesma utilizada para o q_d . Nas profundidades em que o q_d apresenta valores baixos, o nível de resistência é baixo; quando apresenta valores elevados, o solo é mais resistente.

Depois de se obterem os gráficos de resistência dinâmica de ponta (q_d) para todos os pontos onde foram realizados os ensaios DPSH, começou-se primeiramente por os organizar em perfis e diferenciar entre eles os vários “pacotes” similares que poderiam corresponder a uma mesma camada geológica (ver Figura 9). Dentro desses pacotes, efetuou-se uma sub-divisão consoante os valores da resistência dinâmica de ponta q_d . Este passo foi fundamental porque permitiu definir as interfaces das várias camadas, nomeadamente o topo e a base, para introdução no *software RockWorks 17* e calibração dos dados geofísicos.

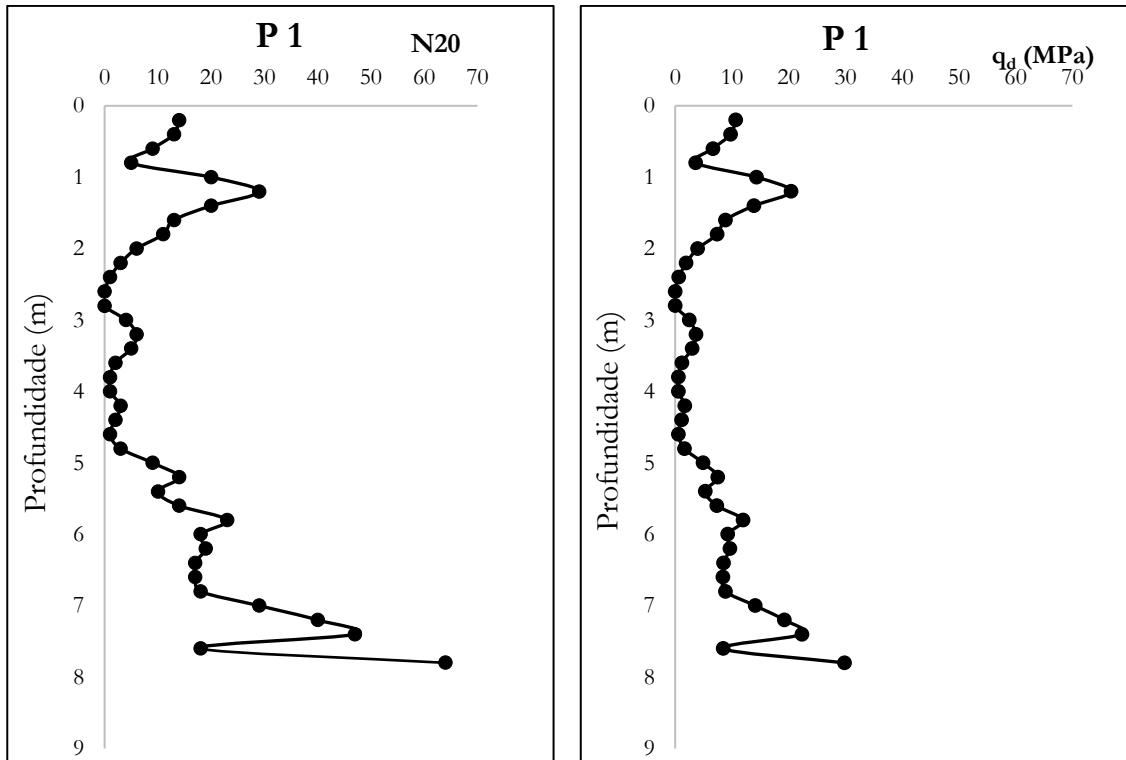


Figura 8: Número de pancadas (N_{20}) (à esquerda) em função da profundidade do Ponto P1, e resistência dinâmica de ponta (q_d) do Ponto P1 (à direita).

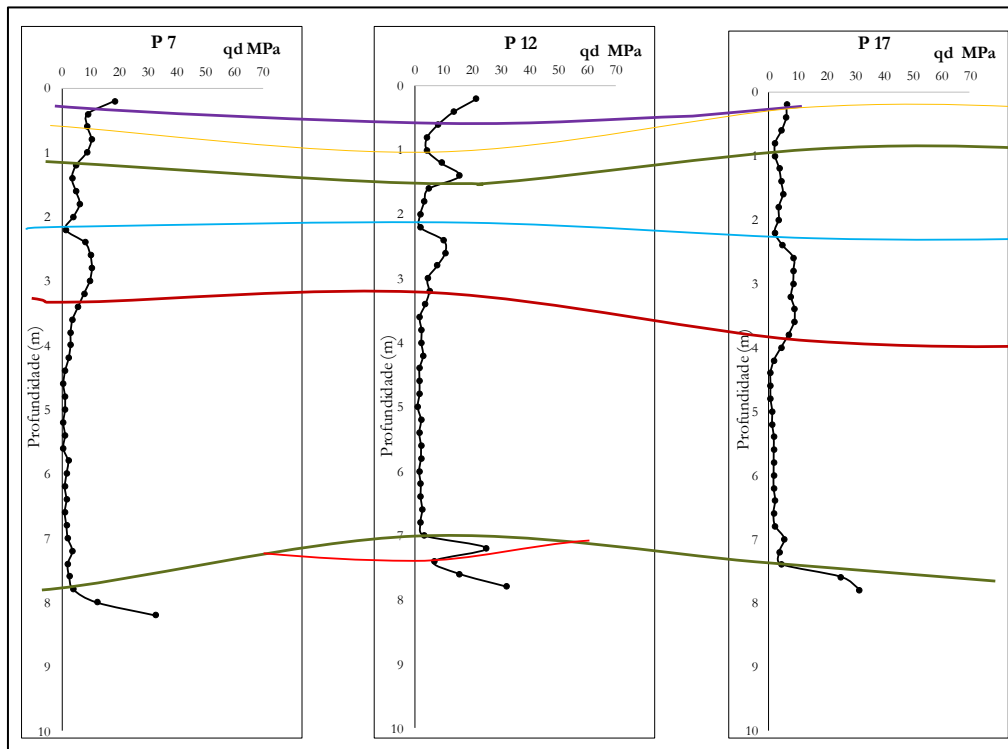


Figura 9: Exemplo da individualização dos diferentes "pacotes" litológicos em 3 locais da área de estudo (ver localização na Figura 7).

De acordo com os valores obtidos de q_d e pela análise do seu comportamento em profundidade, foi possível fazer a classificação litológica do solo em função resistência dinâmica de ponta (q_d) das camadas geológicas evidenciadas (Tabela 5).

Tabela 5: Classificação litológica em função da resistência dinâmica de ponta (q_d).

Natureza do solo		q_d (MPa)
Camada de aterro	Compacidade baixa	$q_d < 5$
	Compacidade média	$5 < q_d < 15$
	Compacidade elevada	$q_d > 15$
Lodos		$q_d < 4$
Areia Lodosa		$4 < q_d < 10$
Areia Cascalhenta		$10 < q_d < 30$
Argila de Aveiro		$q_d > 60$

Nas Figuras 10 a 13 estão representados os gráficos obtidos no *Excel* com a variação do q_d em profundidade.

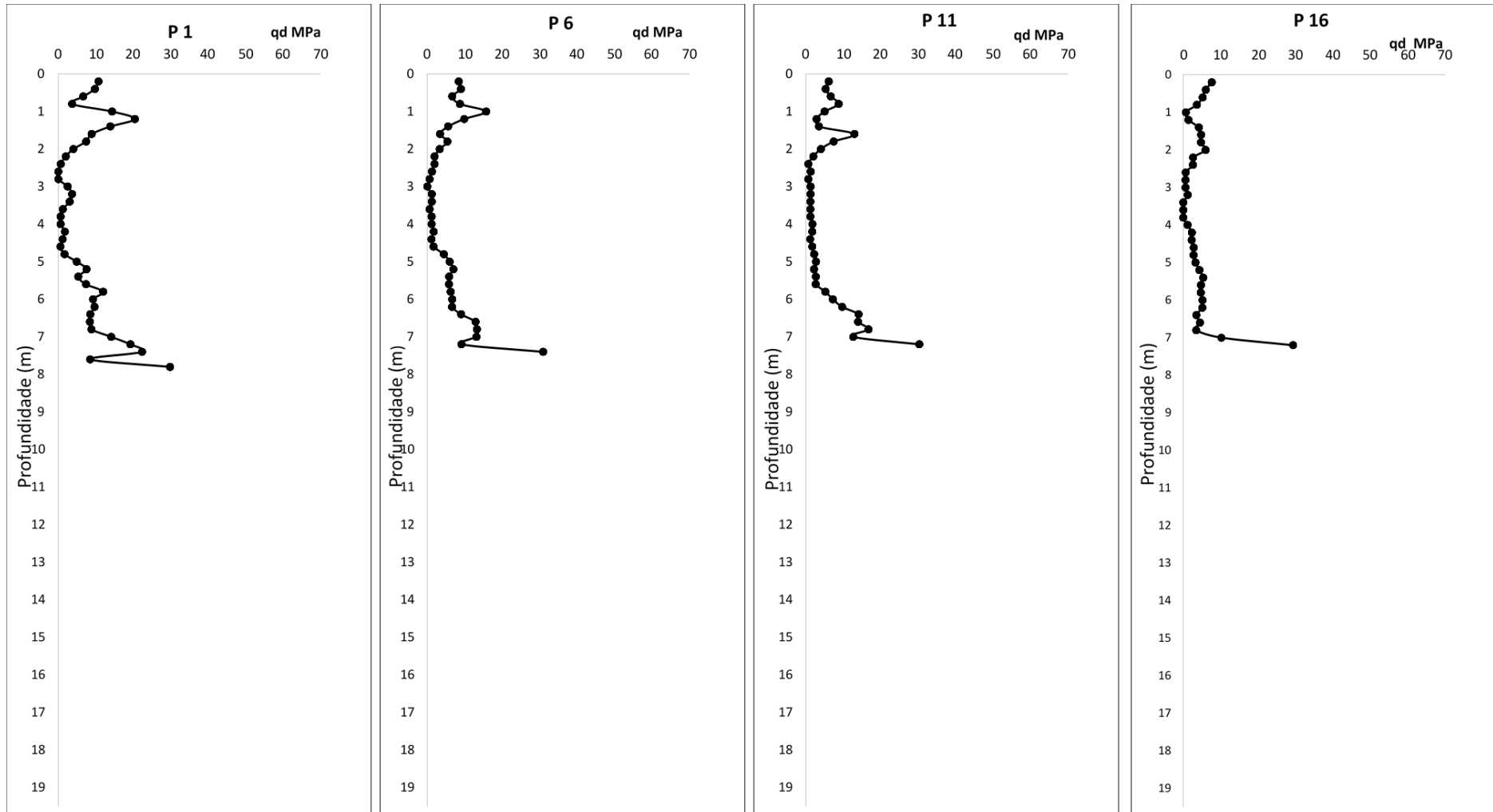


Figura 10: Resistência dinâmica de ponta q_d em função da profundidade, nos ensaios correspondentes aos pontos P1-16.

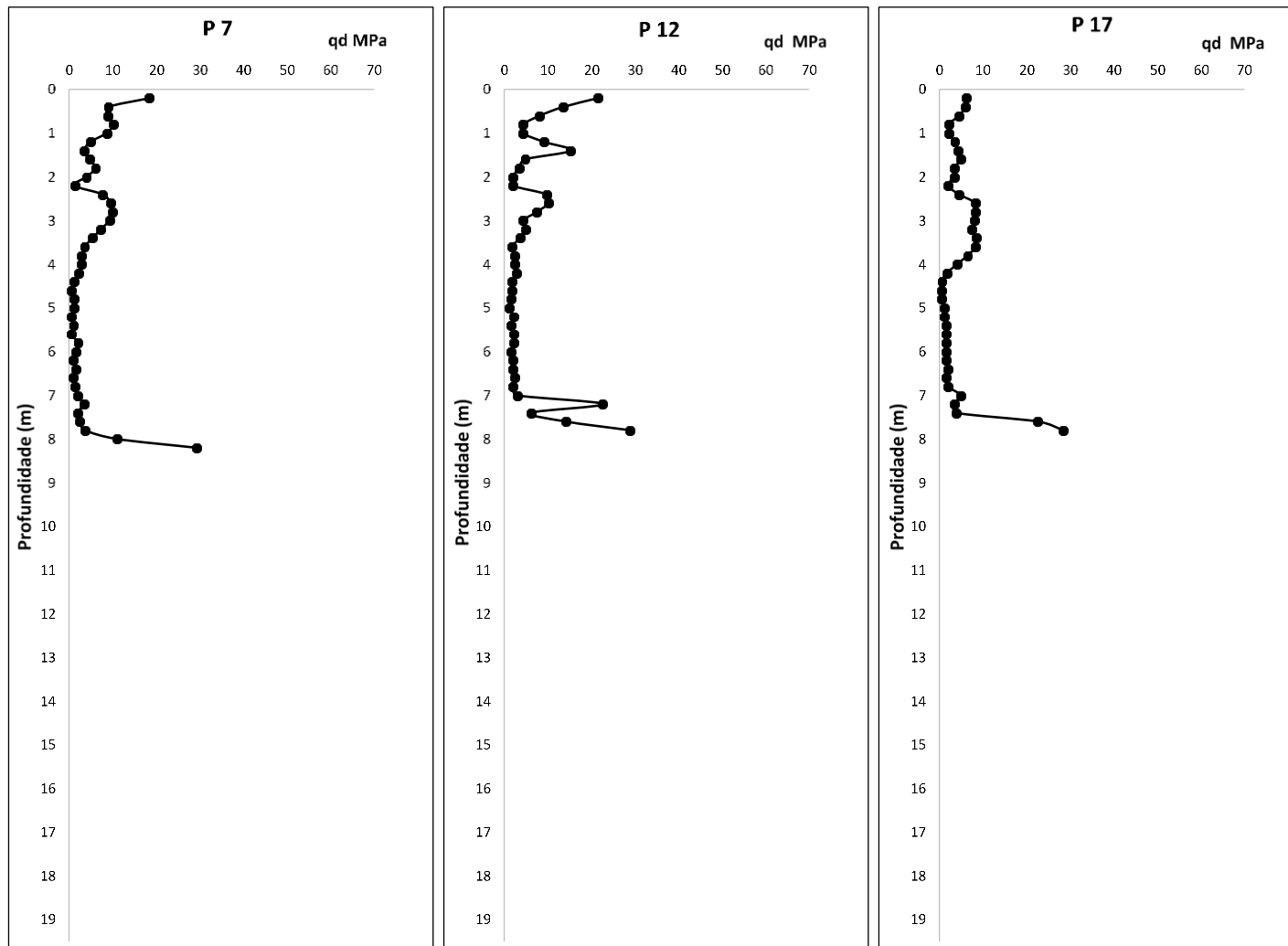


Figura 11: Resistência dinâmica de ponta q_d em função da profundidade, nos ensaios correspondentes aos pontos P7-17.

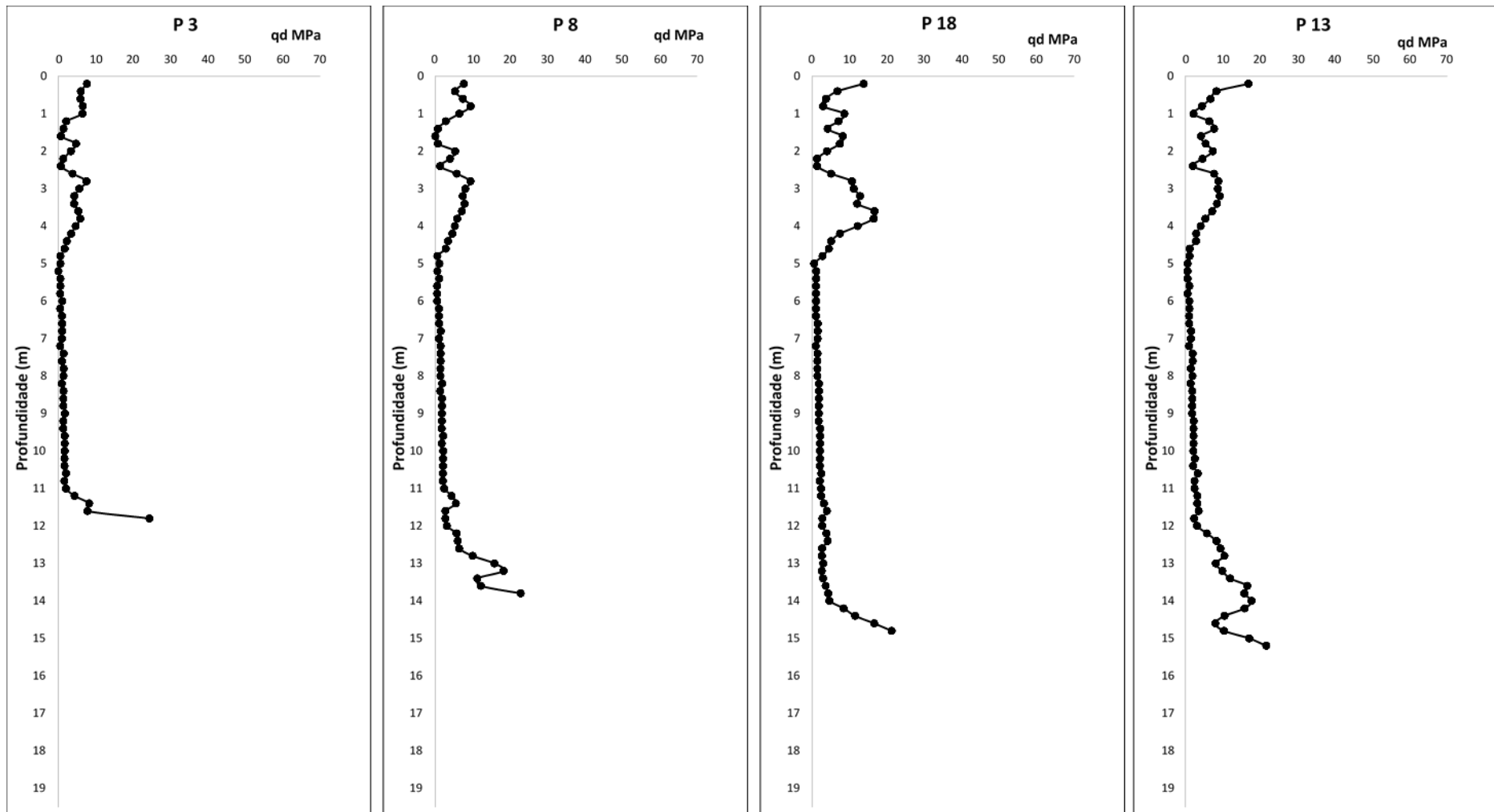


Figura 12: Resistência dinâmica de ponta q_d em função da profundidade, nos ensaios correspondentes aos pontos P3-13.

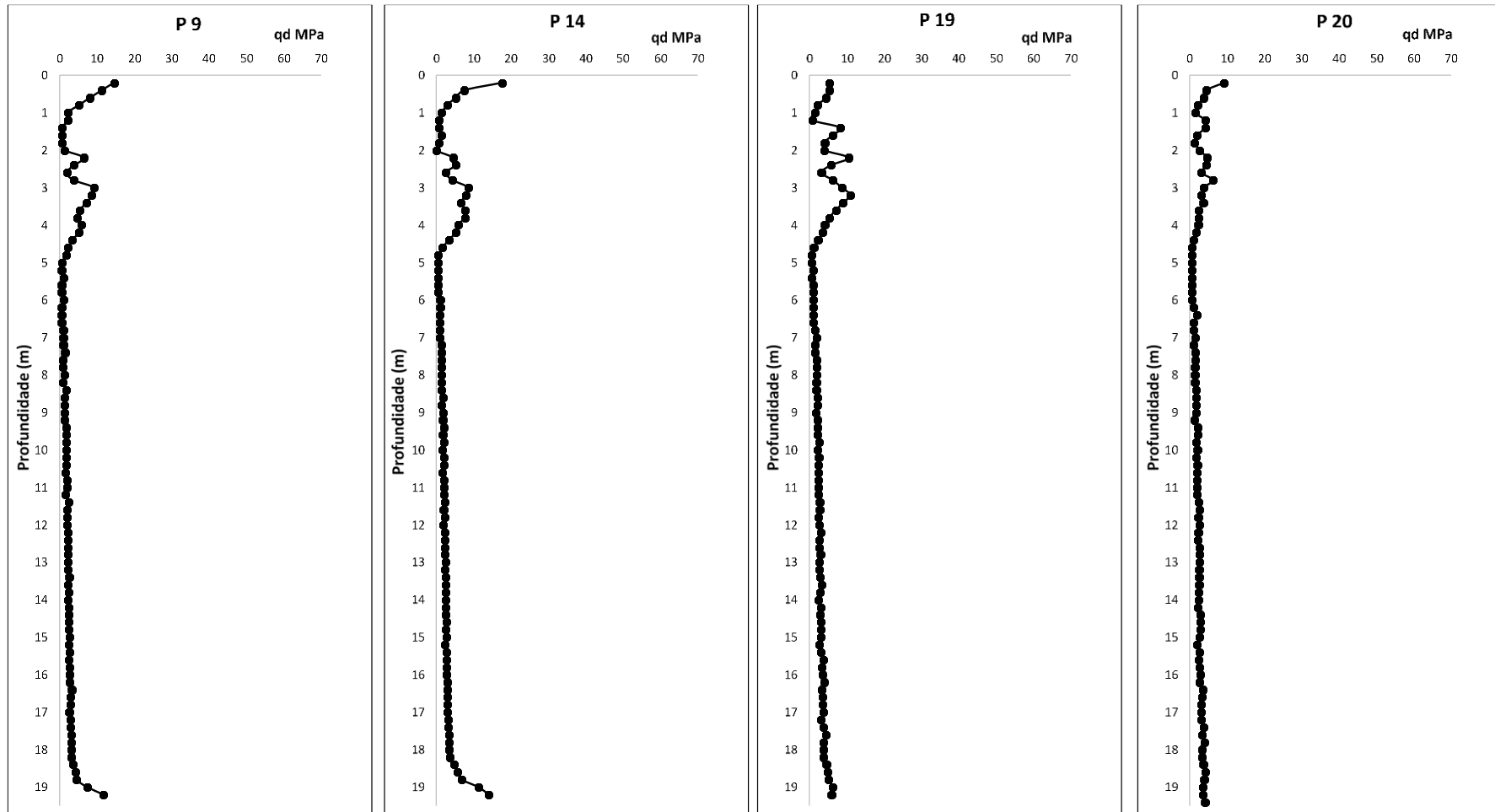


Figura 13: Resistência dinâmica de ponta q_d em função da profundidade, nos ensaios correspondentes aos pontos P9-20.

2.7.1 Correlação espacial no Software RockWorks 17

O *RockWorks 17* é um pacote de *Software* integrado para gestão de dados geológicos, a sua análise, correlação espacial e visualização. Este programa permite a visualização de dados de sub-superfície através da projeção de diagrfias, seções transversais (*cross-section*), diagramas de cerca (*fence diagrams*), modelos sólidos, mapas estruturais e isópacos em 2D e 3D.

Depois de uma familiarização com o *Software*, iniciaram-se alguns procedimentos para criar um novo projeto, com a finalidade de fazer a correlação litológica dos dados obtidos pelo DPSH no campo (procedimento em anexo 2).

Utilizando o *Google Earth* que pode ser acedido pelo *RockWorks 17*, é possível visualizar os furos projetados (Figura 14).

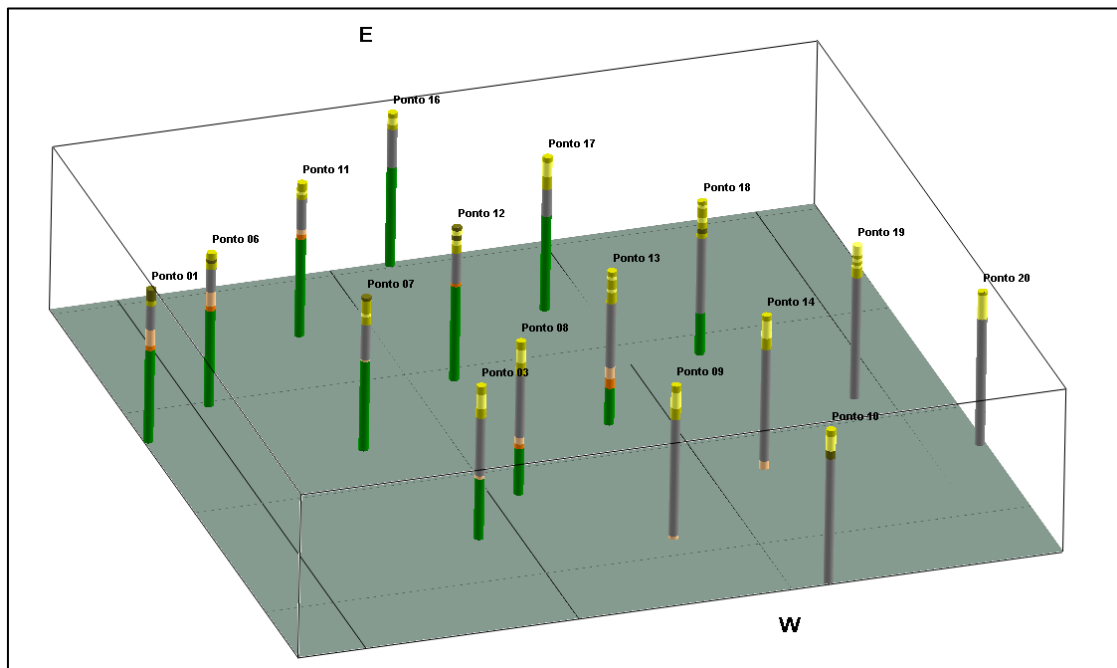


Figura 14: Projeção dos Furos DPSH no Campo.

Os dados dos furos do DPSH permitiram fazer a correlação espacial das litologias, identificando o topo e a base das camadas como ilustrado nas Figuras 15 a 23. A Figura 24 mostra a localização das *cross-sections*.

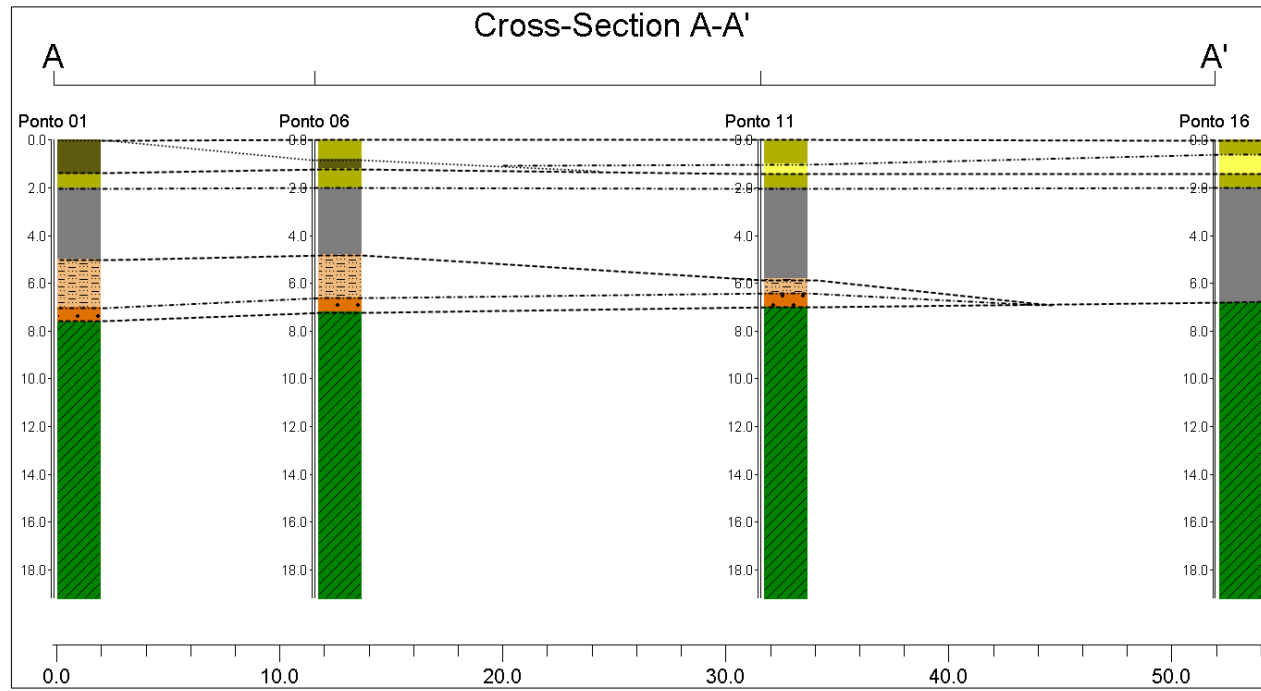


Figura 15: Perfil paralelo à Ria de Aveiro, dos pontos P1-16.

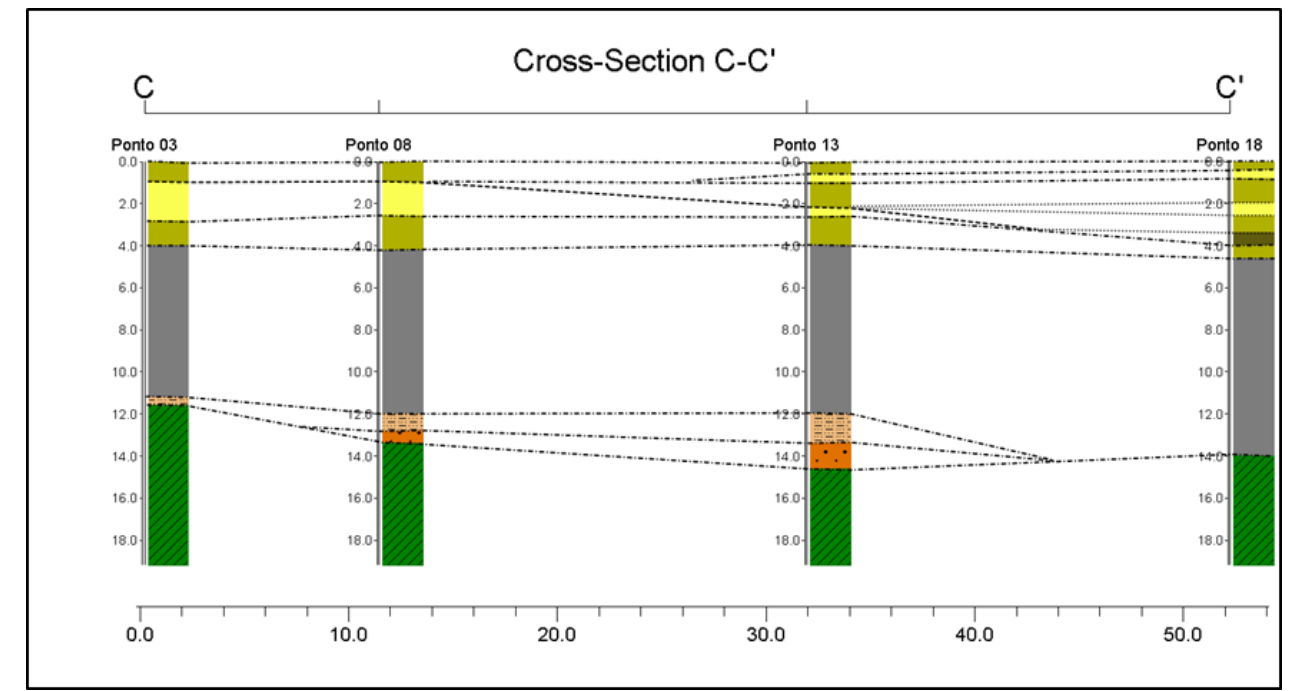


Figura 17: Perfil paralelo à Ria de Aveiro, dos pontos P3-18.

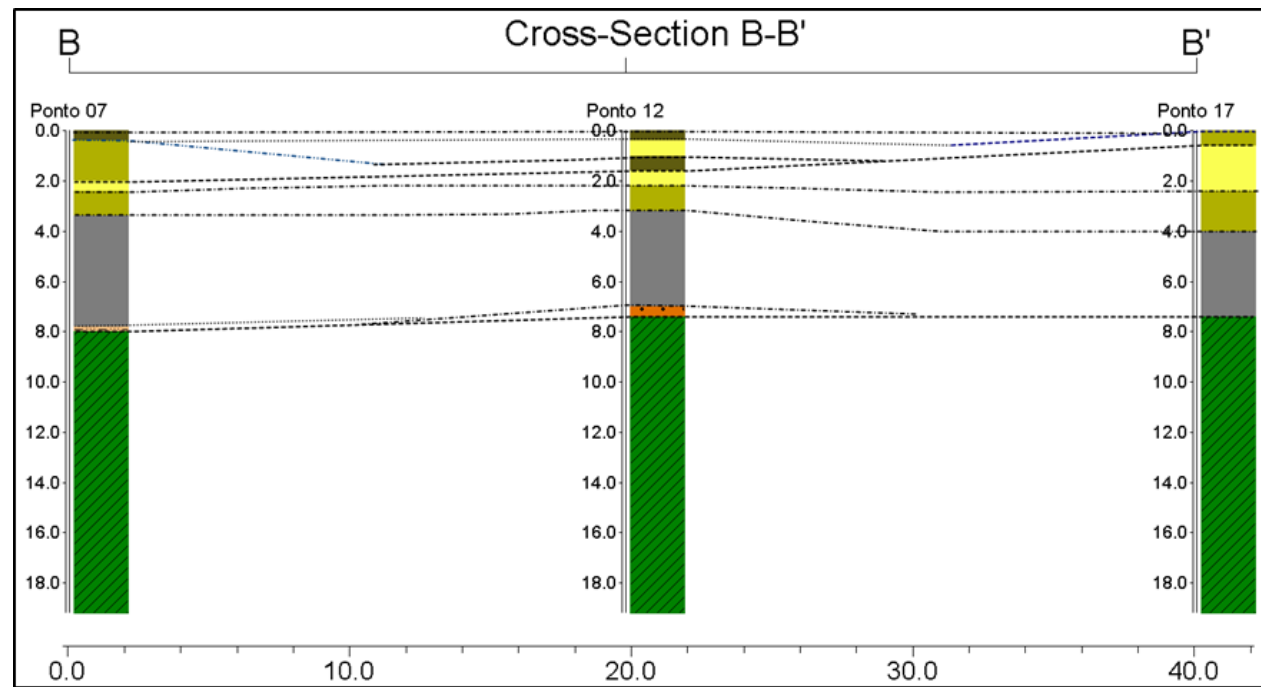


Figura 16: Perfil paralelo à Ria de Aveiro, dos pontos P7-17.

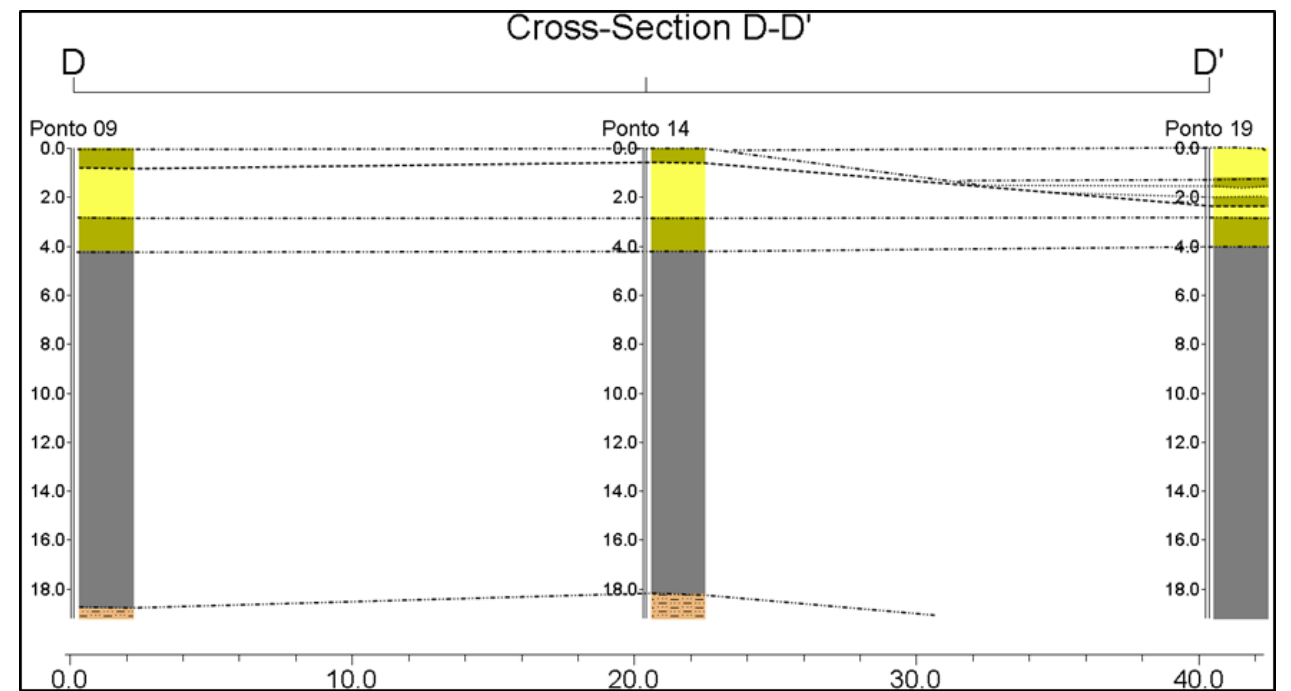


Figura 18: Perfil paralelo à Ria de Aveiro, dos pontos P9-19.

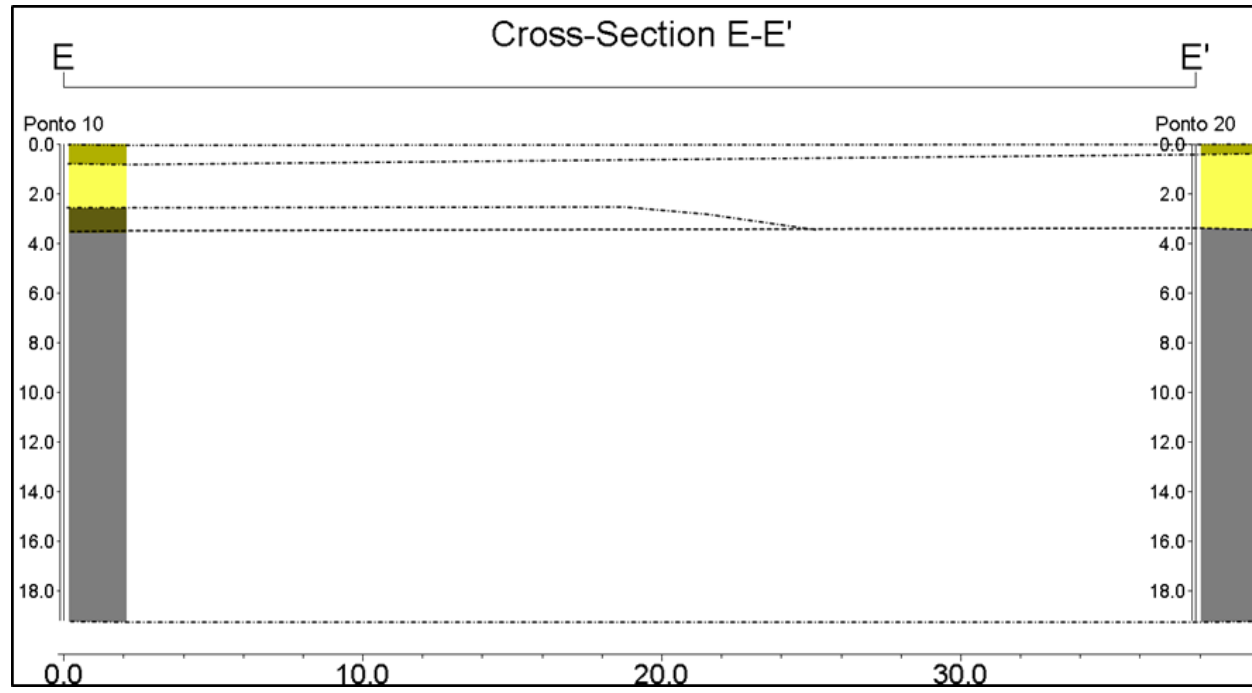


Figura 19: Perfil paralelo à Ria de Aveiro, dos pontos P10-20.

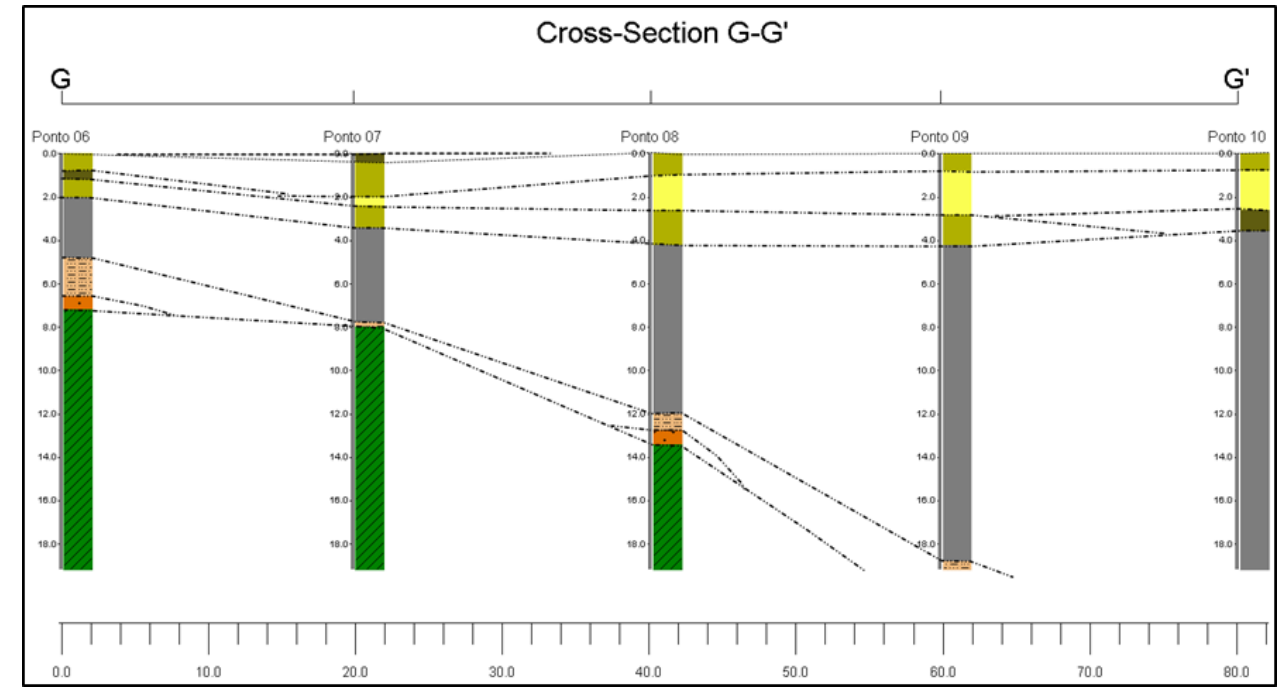


Figura 21: Perfil perpendicular à Ria de Aveiro, dos pontos P6-10.

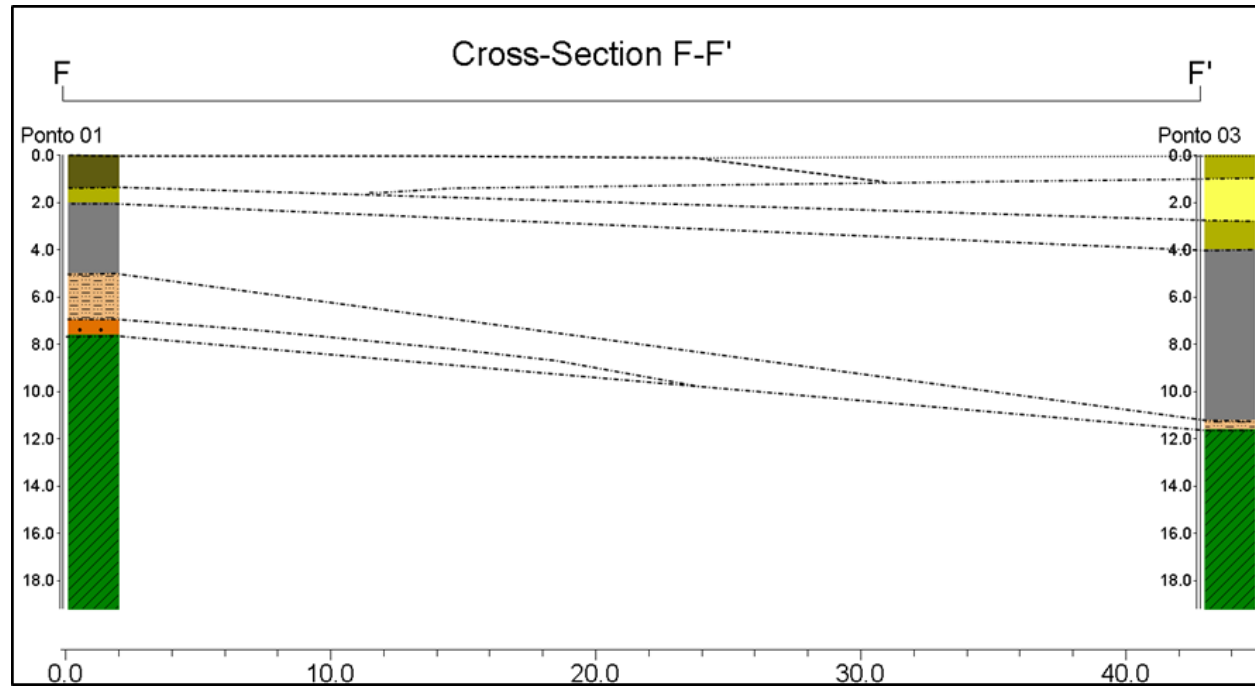


Figura 20: Perfil perpendicular à Ria de Aveiro, dos pontos P1-3.

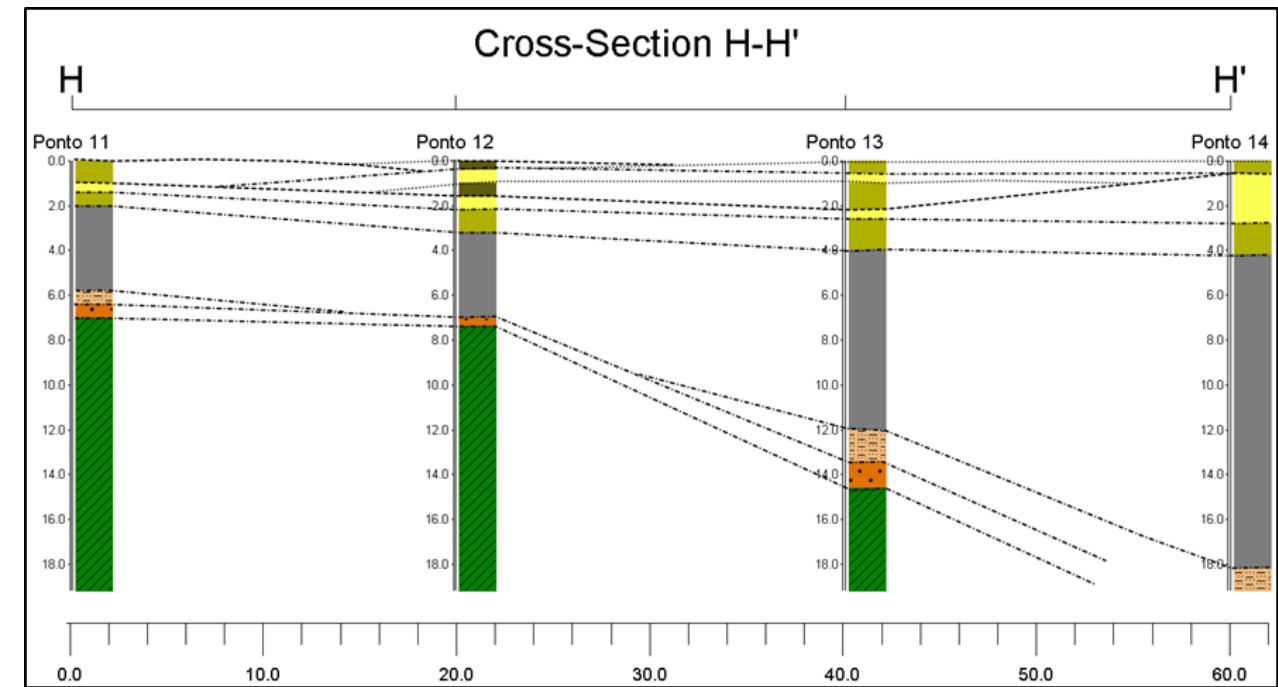


Figura 22: Perfil perpendicular à Ria de Aveiro, dos pontos P11-14.

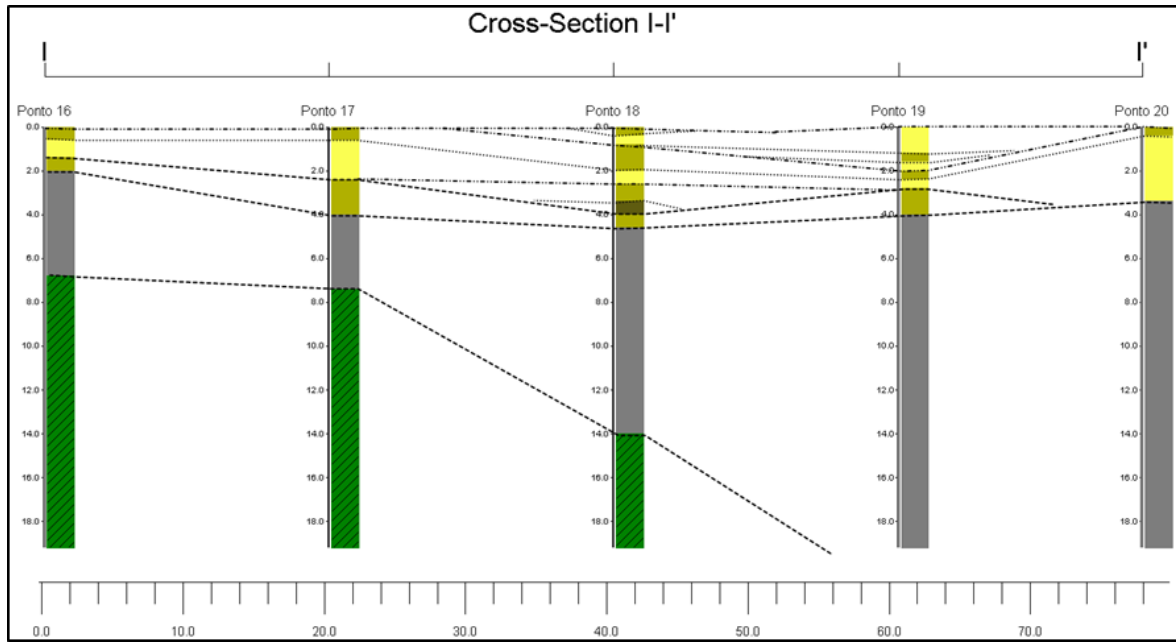


Figura 23: Perfil perpendicular à Ria de Aveiro, dos pontos P16-20.

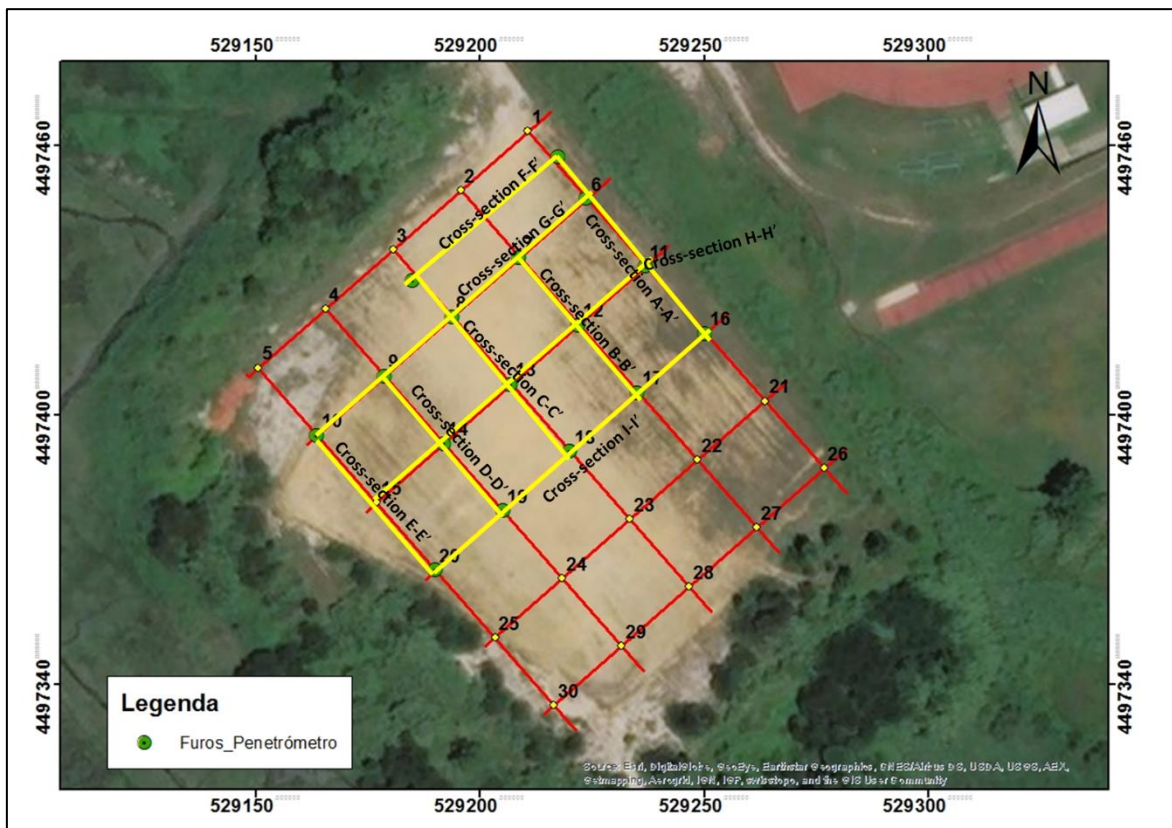


Figura 24: Localização espacial das secções transversais (*cross-section*). A verde estão representados os pontos em que foram realizados ensaios e as linhas amarelas estão representadas as *cross-sections*.

2.7.2 Interpretação dos dados

Com o intuito de obter uma boa interpretação dos dados do ensaio de DPSH recorreu-se a uma diversidade de fontes de informação, especialmente aos trabalhos geotécnicos realizados perto da área de estudo, mas não só.

Compilando todas as informações, pela observação dos gráficos obtidos no *Excel* e pela resistência dinâmica de ponta (q_d) foi possível individualizar e classificar os dados obtidos pelo DPSH em cinco classes (Figura 25): (1) Aterro; (2) Lodos (às vezes com um nível arenoso); (3) Areia lodosa; (4) Areia Cascalhenta; (5) Argilas de Aveiro (Argila rija do Cretácico).

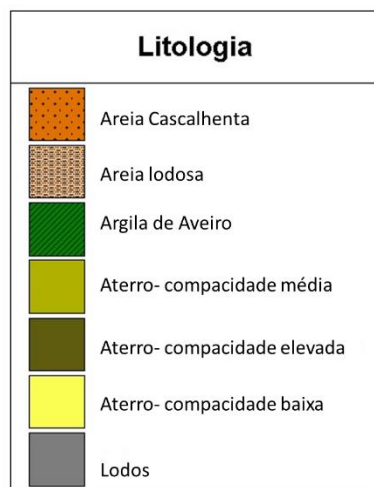


Figura 25: Litologia.

Pela análise das secções transversais obtidas pelo *RockWorks17* conclui-se que a área é caracterizada predominantemente por uma formação lodosa, apresentando valores baixos de q_d e com uma pequena variação devida à fração mais arenosa, que no geral cresce com a profundidade. A espessura da formação lodosa cresce no sentido NE-SW. Quando se atingem as argilas rijas do Cretácico, a sua transição é caracterizada por uma camada mais arenosa e cascalhenta.

Em relação à camada do aterro, há uma discrepância em relação aos valores de q_d : existe uma flutuação dos valores. Isto sugere que durante o enchimento das camadas de aterro não houve seleção dos materiais em termos de granulometria.

Além das secções transversais obtidas pelo *RockWorks 17*, também se obteve um modelo sólido 3D (Figura 26) e diagramas de cerca (Figuras 27 e 28). Estes criam um modelo sólido tridimensional com a interpolação das litologias. Esta interpolação é realizada através do algoritmo *Lateral Blending*, que cria dados com extrusão horizontal, com correlações

aleatórias dentro da zona intermédia e produz (“zigzague”) correlações transgressivas/regressivas. As estruturas em “zigzague” que se obtém com este algoritmo por vezes criam estruturas que geologicamente não são muito realistas. No entanto, permitem-nos ter uma ideia do desenvolvimento das camadas em profundidade.

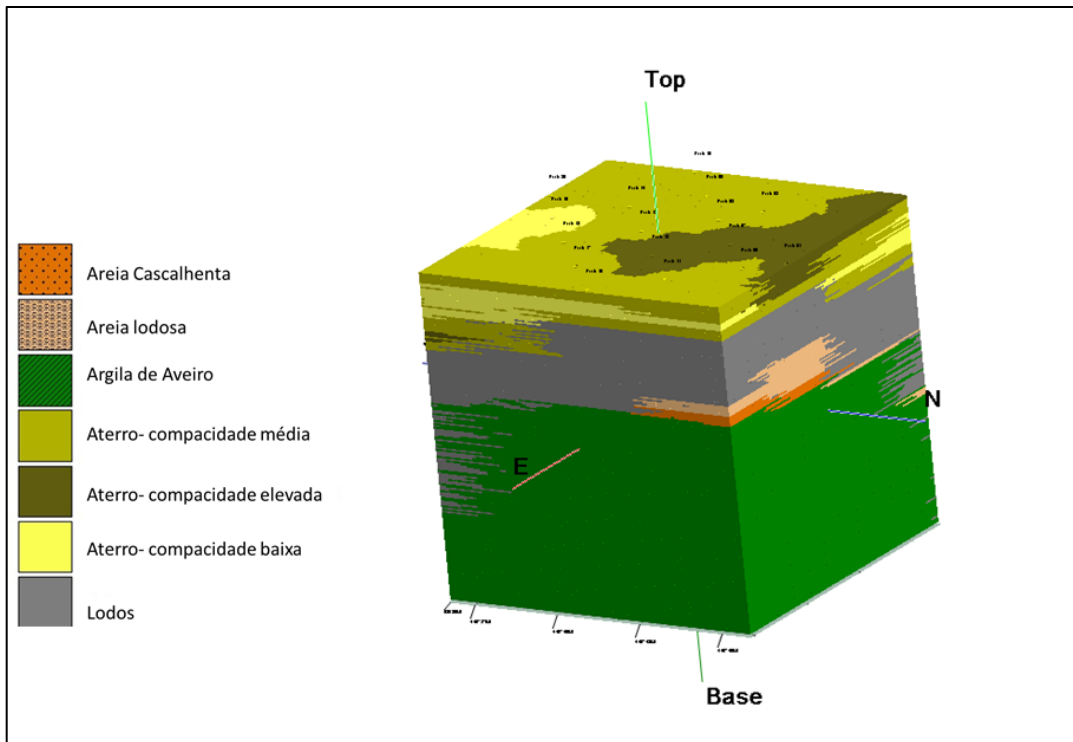


Figura 26: Modelo Sólido 3D dos dados obtidos no campo pelo penetrómetro DPSH.

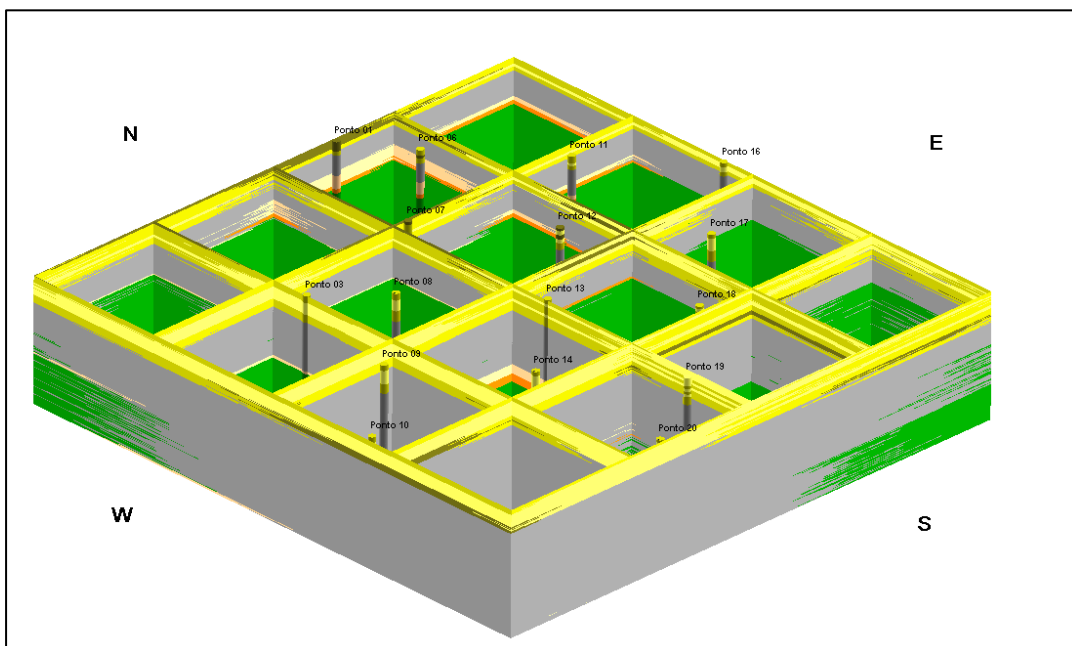


Figura 27: Visualização dos dados em 3D.

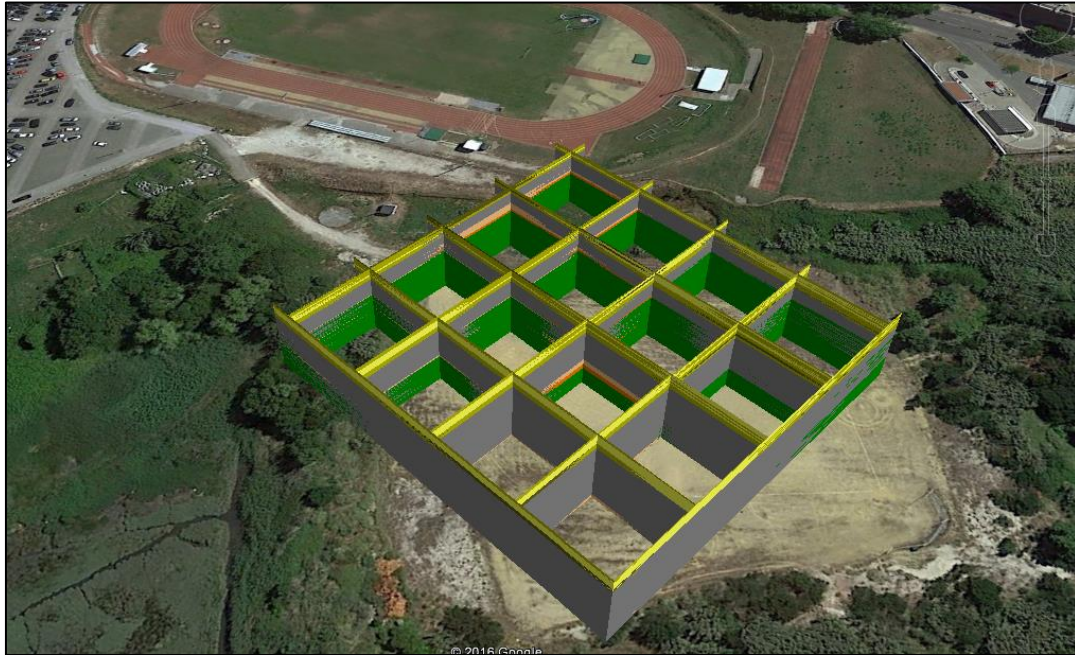


Figura 28: Projeção do diagrama de cerca (Fence Diagram), através do *Google Earth* integrado no Software *RockWorks 17*.

As Figuras 29 a 37 mostram os perfis interpretados na região de estudo (ver localização na figura 24). No Capítulo 5 estes dados serão correlacionados com os dados geofísicos.

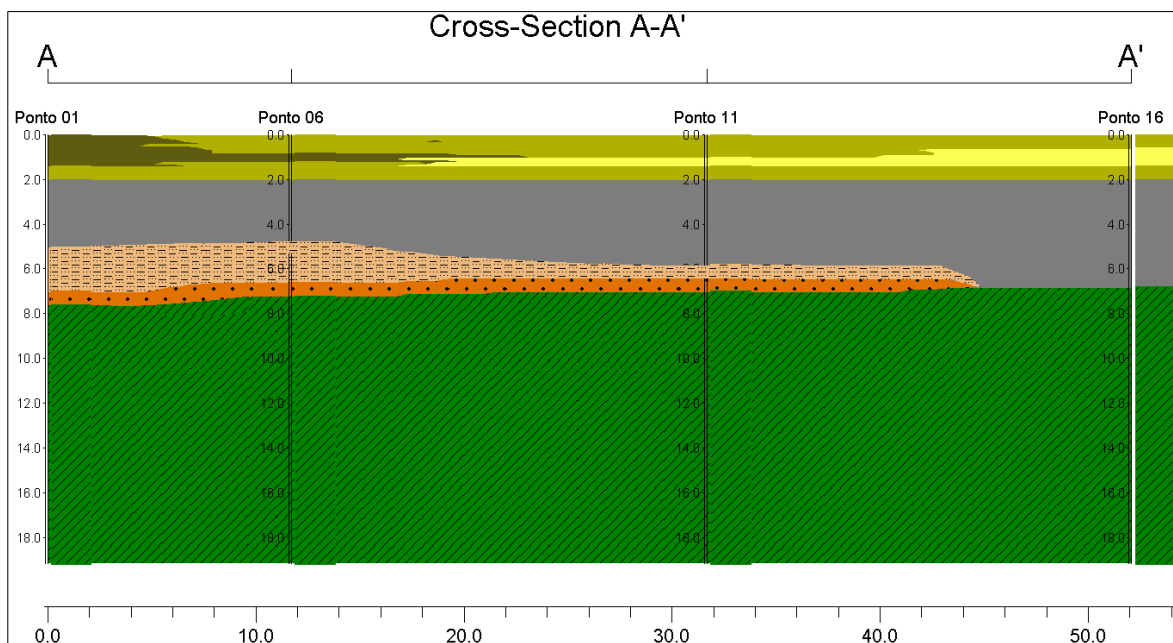


Figura 29: Perfil interpretado dos pontos P1-16.

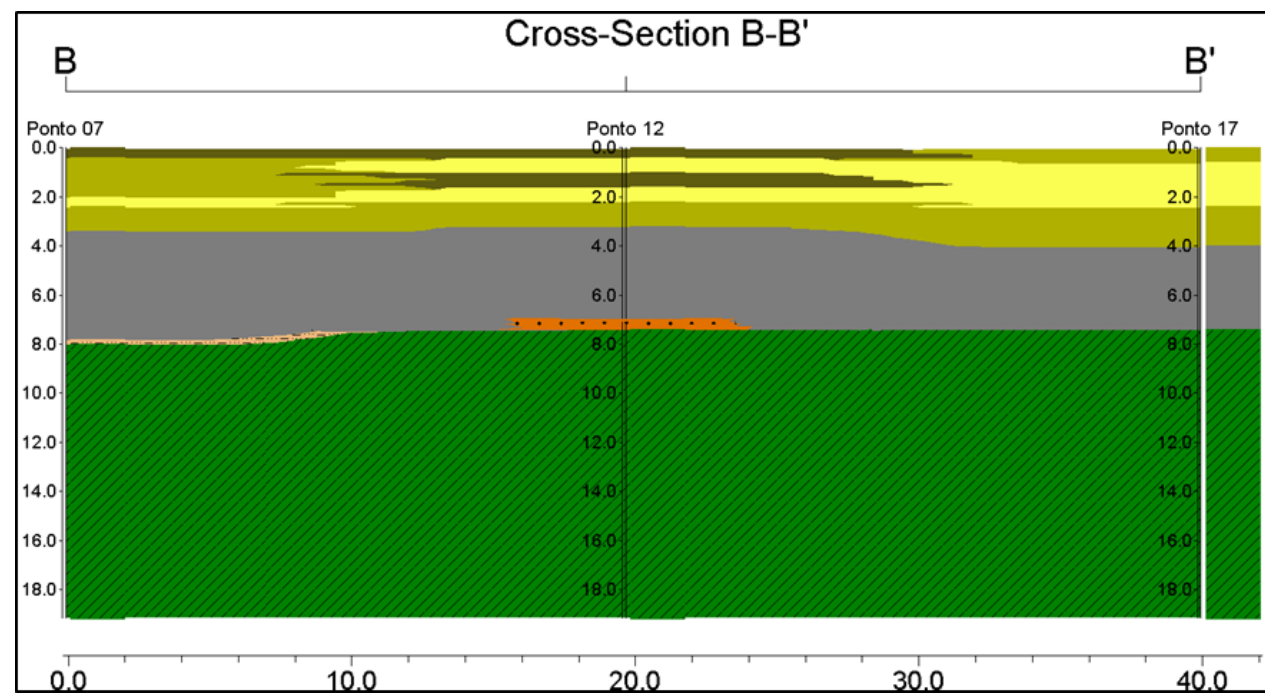


Figura 30: Perfil interpretado dos pontos P7-17.

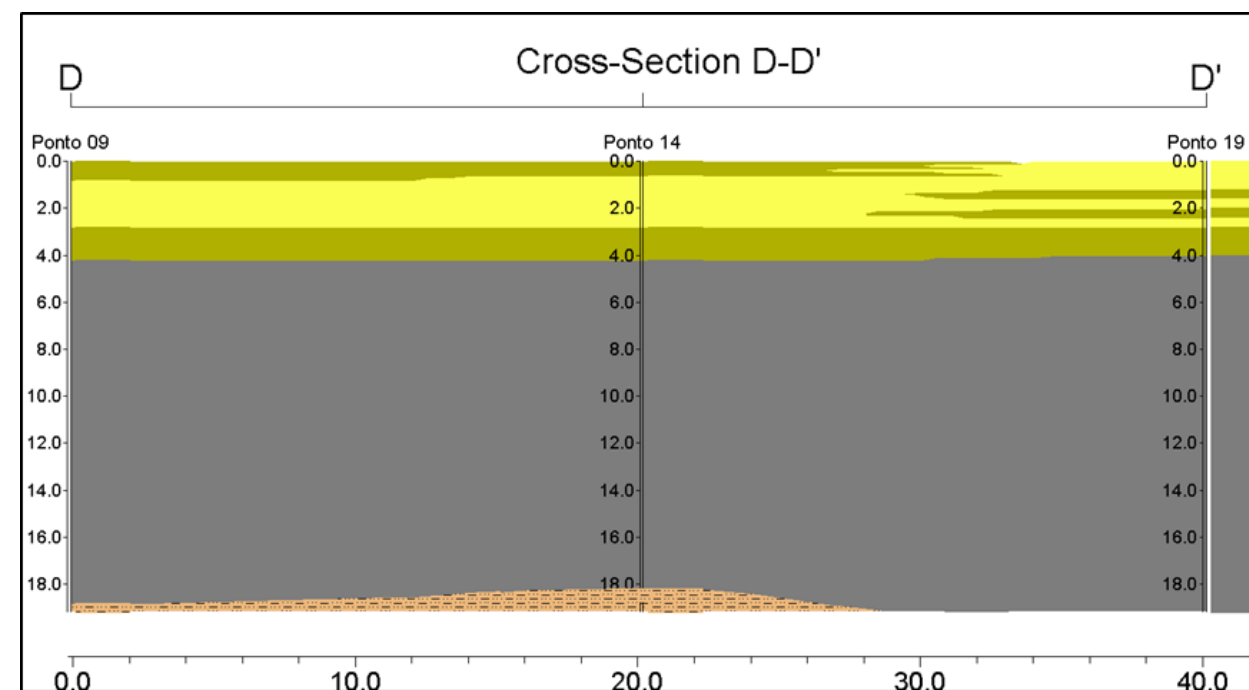


Figura 32: Perfil interpretado dos pontos P9-19.

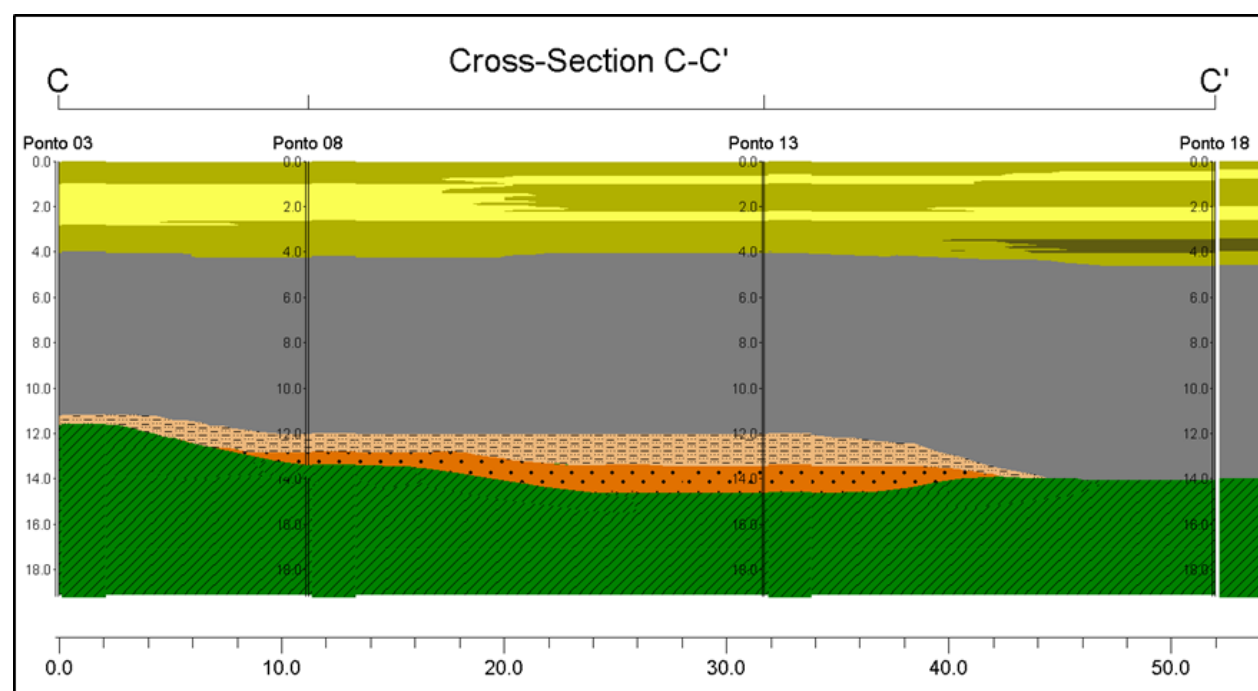


Figura 31: Perfil interpretado dos pontos P3-18.

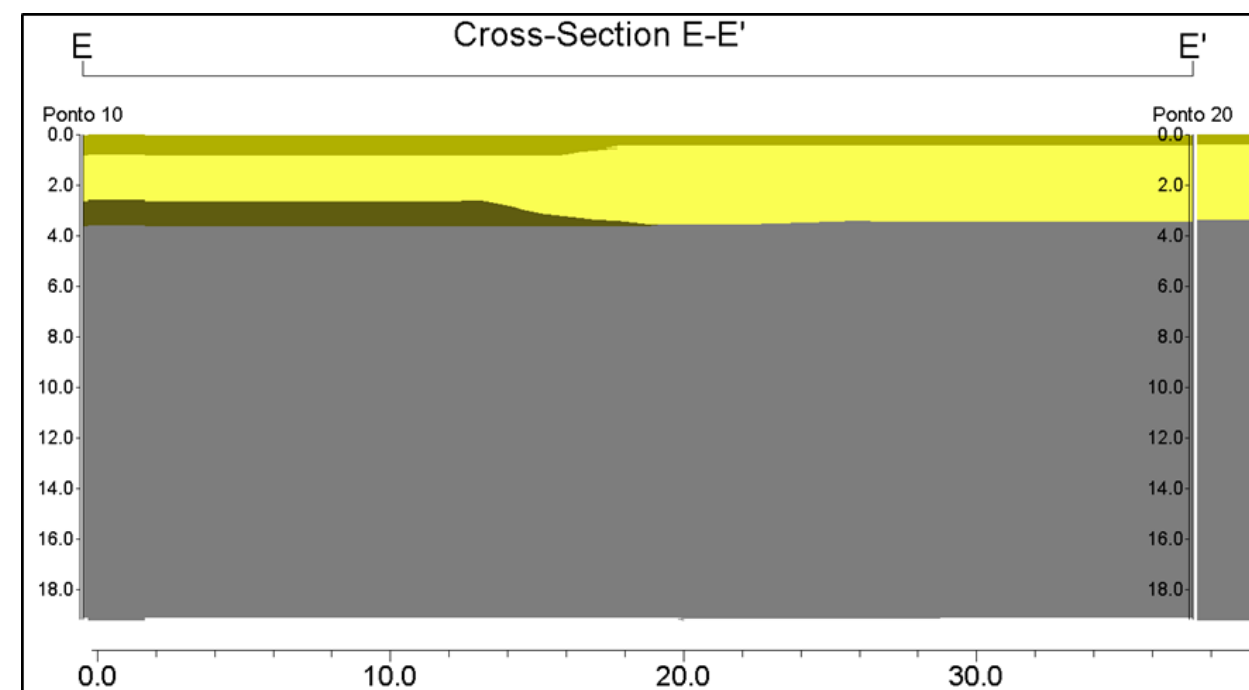


Figura 33: Perfil interpretado dos pontos P10-20.

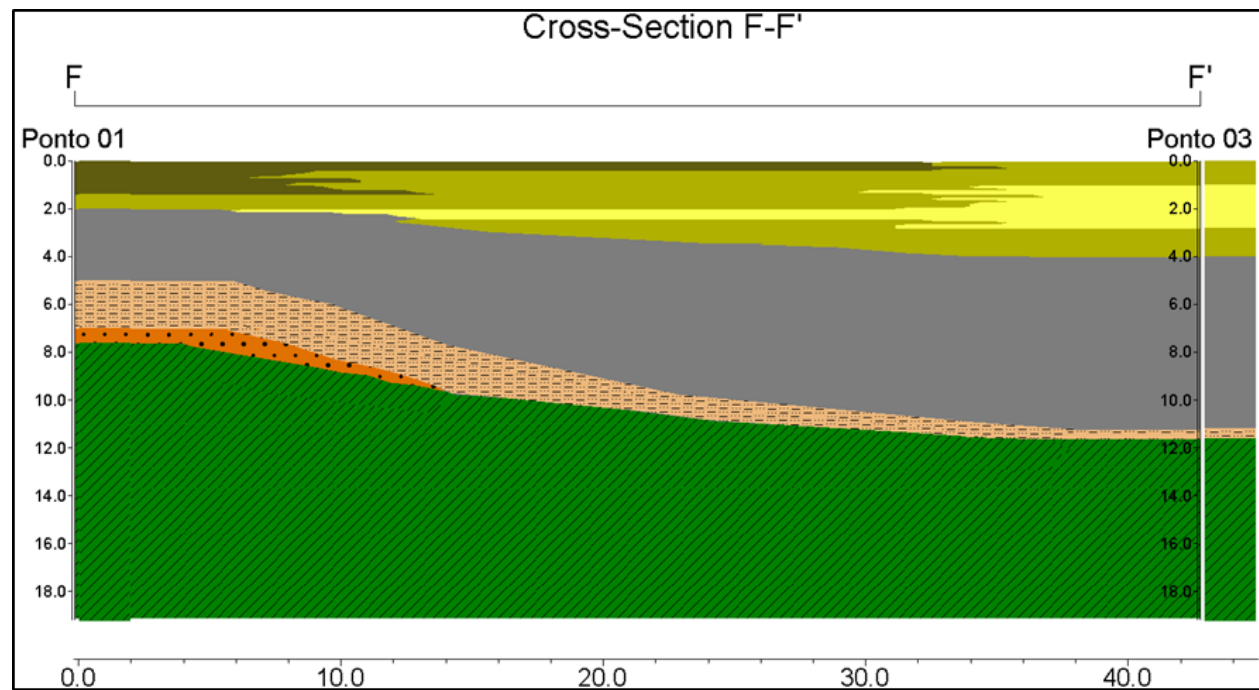


Figura 34: Perfil interpretado dos pontos P1-3.

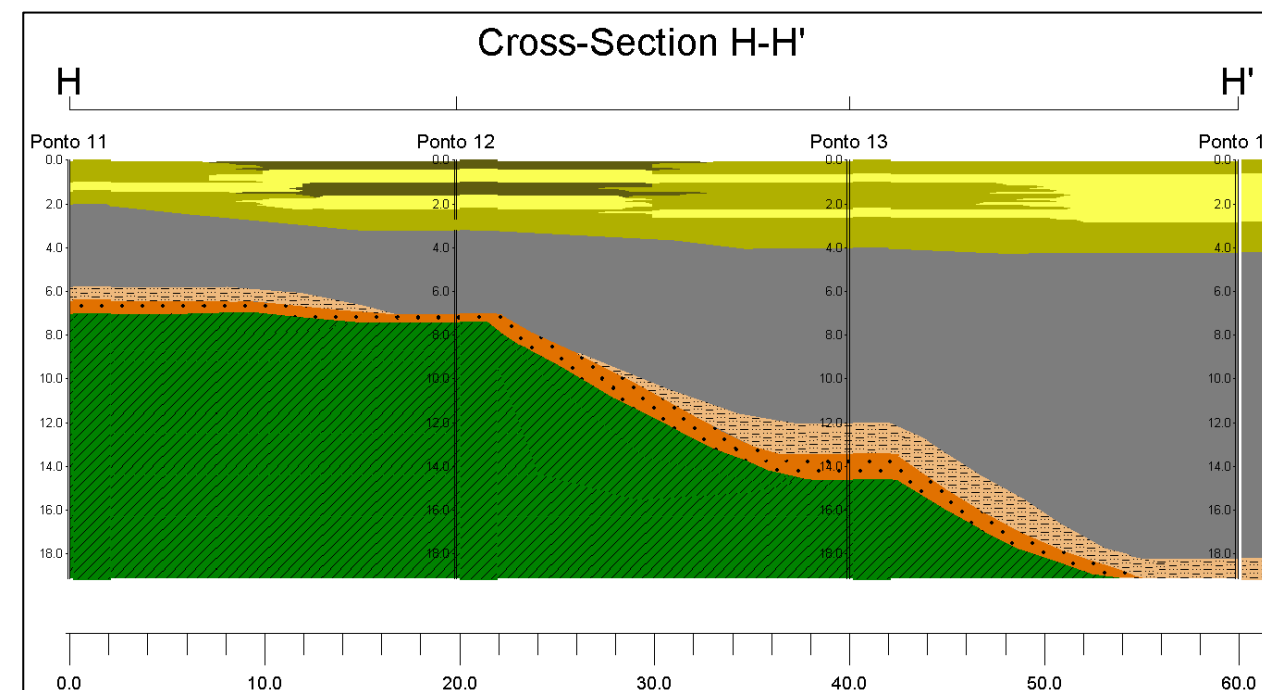


Figura 36: Perfil interpretado dos pontos 11-14.

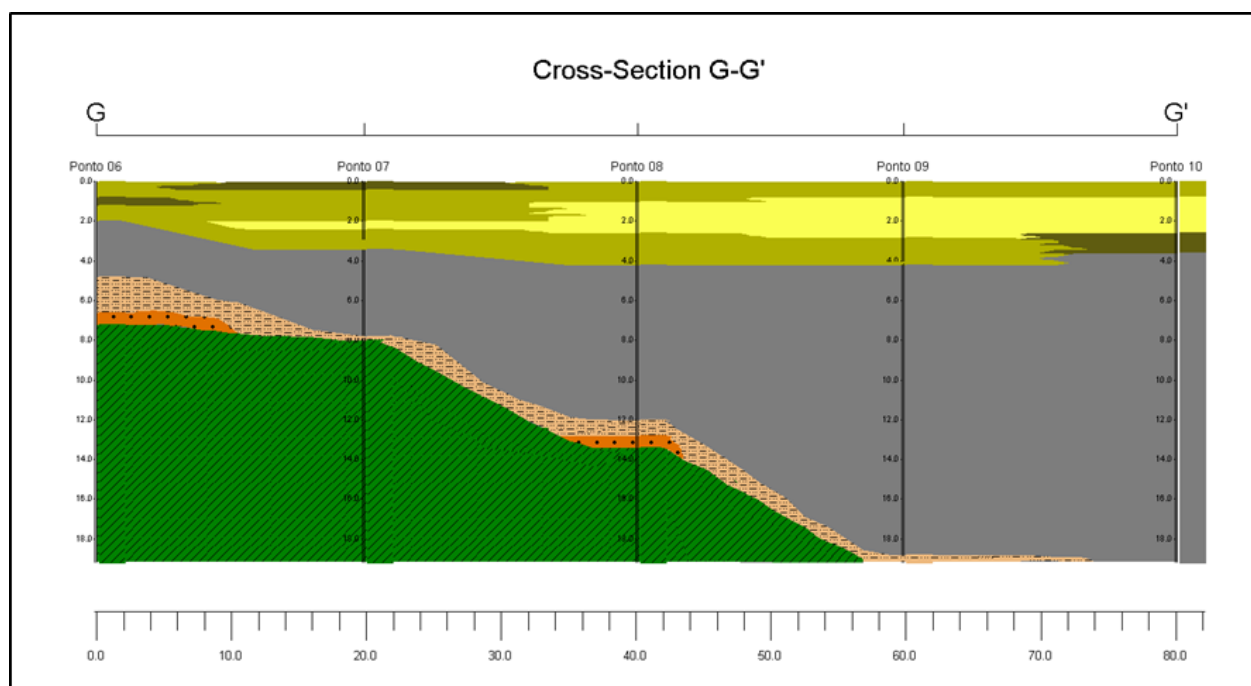


Figura 35: Perfil interpretado dos pontos P6-10.

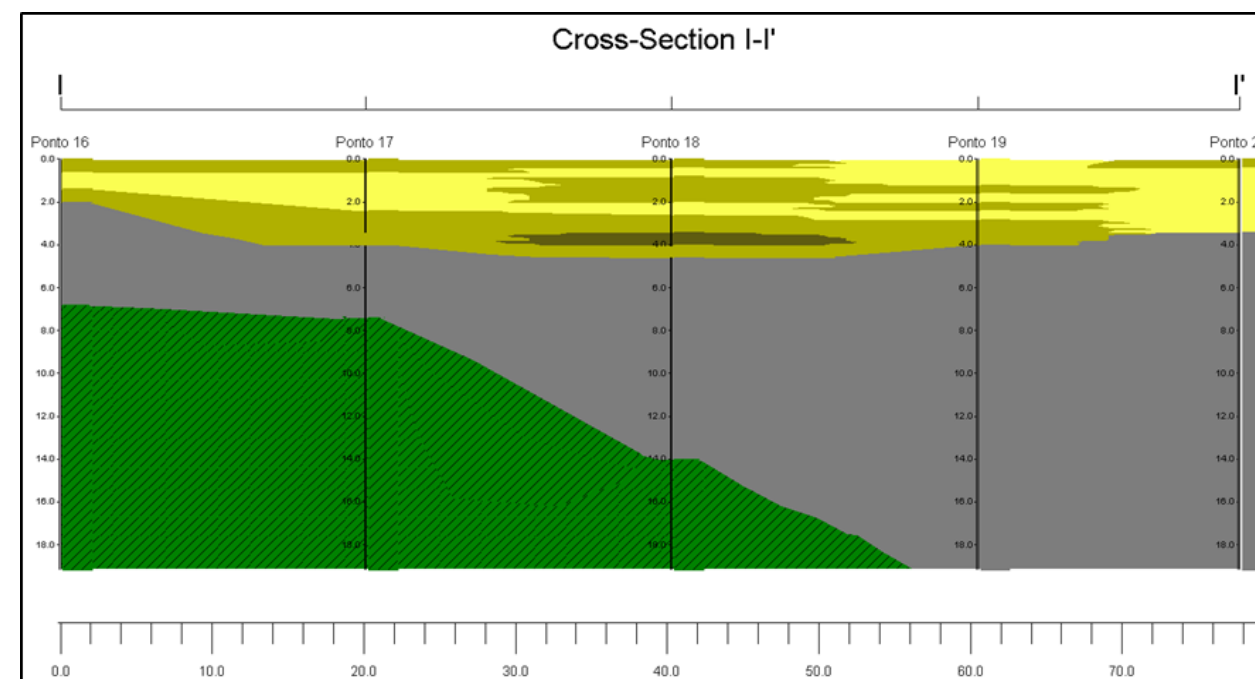


Figura 37: Perfil interpretado dos pontos P16-20.

3. Aquisição de perfis de refração sísmica

3.1 Refração sísmica

O método de refração sísmica consiste no estudo de propagação das ondas sísmicas geradas por uma fonte artificial que induz vibrações que se propagam no meio, se refratam nas interfaces dos meios com velocidades de propagação diferentes, que geralmente aumentam em profundidade, e regressam à superfície, onde são registadas numa série de recetores (geofones) distribuídos segundo um determinado arranjo geométrico. As velocidades de propagação das ondas nas várias camadas são calculadas a partir da determinação do tempo de percurso entre os tiros e os vários geofones, cuja localização é bem conhecida, podendo esse percurso corresponder a refrações ou reflexões, mas neste caso são apenas as primeiras que são processadas.

As ondas sísmicas, quando se propagam no interior de um meio sólido, homogéneo e isotrópico podem propagar-se como ondas volumétricas de dilatação, longitudinais ou ondas P; ondas volumétricas de corte, transversais ou ondas S; e ondas superficiais quando se propagam na superfície do meio considerado, nomeadamente as ondas de Rayleigh e ondas de Love. As velocidades de propagação destas ondas sísmicas dependem das propriedades dos materiais: densidade, módulo de rigidez e módulo de compressão.

A grande maioria dos levantamentos de refração é realizada ao longo de linhas de perfis suficientemente longas para assegurar que as chegadas refratadas das camadas alvo sejam registadas como primeiras chegadas para, pelo menos a metade do comprimento da linha refratada (Kearey *et al.*, 2009).

Quando a energia é libertada pela fonte sísmica ela propaga-se em todas direções sob a forma de ondas sísmicas, que são captadas pelos geofones ligados por um cabo conectado com um sismógrafo que armazena os dados. Estes dados são transferidos para o computador de aquisição para serem processados e interpretados (Figura 38).

Geralmente, o método de refração sísmica a pequena profundidade é utilizado para investigar a geologia de sub-superfície nas primeiras dezenas de metros e identificar e cartografar as interfaces refratoras que separam camadas de diferentes velocidades sísmicas, com aplicação em estudos de geologia, hidrogeologia e de geotecnia, permitindo calcular a velocidade de propagação das ondas nas várias camadas e determinar a geometria dessas camadas e as respetivas espessuras.

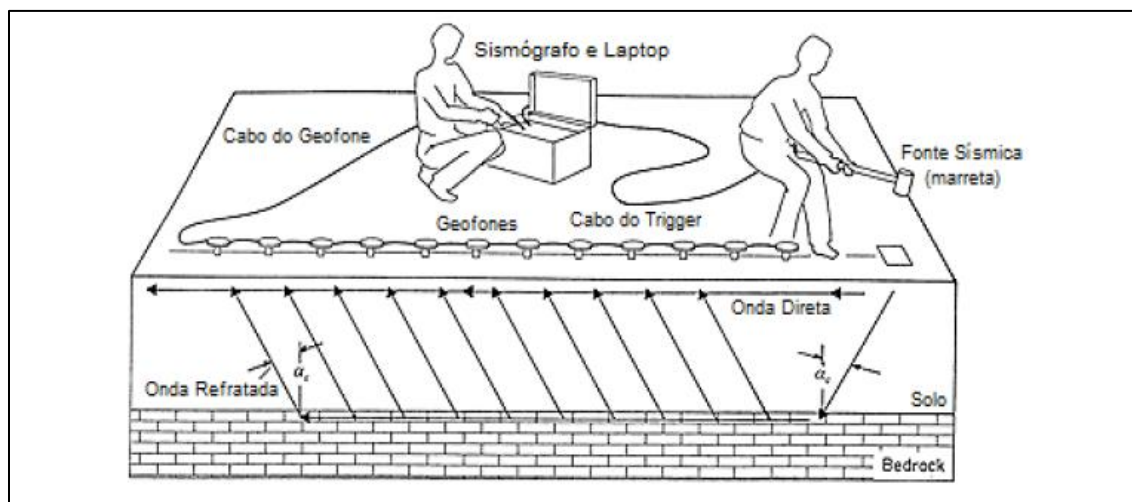


Figura 38: Execução do Método Sísmico de Refração, e a propagação das ondas refratadas. Fonte: <http://www.portalsatc.com/site/adm/arquivos/>.

3.2 Ondas Elásticas

As ondas elásticas, também designadas ondas sísmicas, são originadas quando se aplica uma tensão sobre um meio, causando uma deformação que se propaga nesse meio sob a forma de ondas elásticas. Os corpos sólidos, após serem submetidos a um estado de tensão, são deformados mas recuperam essa deformação quando as forças externas são removidas.

As ondas elásticas podem ser divididas em duas categorias: ondas volúmicas e ondas superficiais. As ondas volúmicas propagam-se radialmente a partir da fonte sísmica em todo o volume do meio e as ondas superficiais devem-se ao facto de existir uma superfície livre no meio e propagam-se essencialmente à superfície.

As ondas volúmicas que se propagam no interior da terra podem ser divididas em ondas P e ondas S. A velocidade de propagação das ondas volúmicas depende essencialmente da densidade, compressibilidade e rigidez dos materiais, *i.e.* quanto maior a rigidez, maior será a velocidade e quanto maior a densidade, menor será a velocidade.

As ondas P, ou ondas primárias como são comumente designadas, pelo facto de se propagarem no meio com maior velocidade relativamente às outras ondas elásticas, são as primeiras a chegar e a ser registadas pelo sismógrafo, independentemente da distância a que se encontram da fonte sísmica. Estas ondas propagam-se por deformação uniaxial; com um movimento vibratório, provocando a vibração das partículas de frente para trás no sentido da propagação da onda assim como a dilatação e a compressão dos materiais

(Figura 39). À medida que as ondas P atravessam os meios, a sua velocidade de propagação vai de uma forma geral crescendo com a profundidade havendo refração e reflexão sempre que atravessa a interface para um meio diferente. No que diz respeito às amplitudes, as ondas P, no geral, são ondas que apresentam menor amplitude.

Equação de Velocidade das ondas P

$$V_p = \sqrt{\frac{k + 4\mu/3}{\rho}} \quad (\text{Eq.3})$$

ρ - Densidade do material;

μ - Módulo de rigidez;

K- Módulo de Compressão;

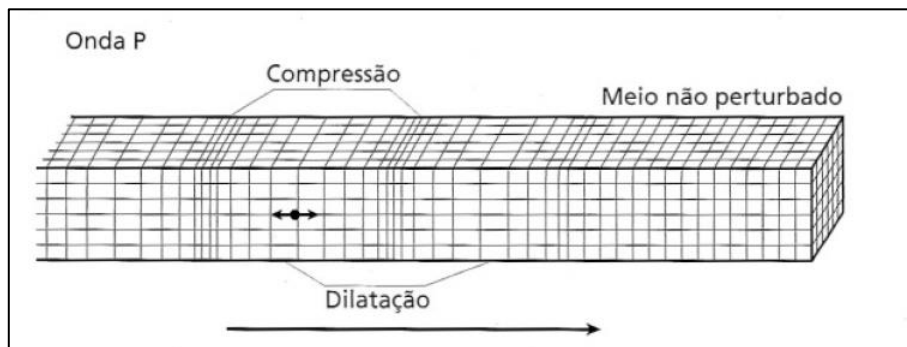


Figura 39: Propagação das Ondas P (Kearey *et al.*, 2009).

A tabela 6 apresenta a velocidade de propagação das ondas P presentes em alguns materiais.

Tabela 6: Velocidade de propagação das ondas P em alguns materiais (Miranda *et al.*, 2010)

Materiais	Velocidade das ondas P (m/s)
Zona superficial aterrada	300-700
Água	1450-1500
Gelo	3400-3800
Areia seca	400-1200
Areia saturada com água	1500-4000
Marga	2000-3000
Grés	3000-45000
Calcário-Dolomite	3500-6500
Sal	4500-55000
Granito	4500-6000
Basalto	5000-6000

As ondas S, propagam-se por meio de cisalhamento, com o movimento das partículas num plano perpendicular à sua direção de propagação (Figura 40). Ao contrário das ondas P, as ondas S propagam-se apenas em meios sólidos, não se propagando em meios líquidos.

Equação de Velocidade das ondas S

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (\text{Eq.4})$$

ρ - Densidade do material;

μ - Módulo de rigidez;

Pela Equação 4, constata-se que a única propriedade elástica que condiciona a velocidade das ondas S é a rigidez. Como nos líquidos e gases o módulo de rigidez μ é zero, neste tipo de meios não é possível propagarem-se ondas S (Miranda *et al.*, 2010).

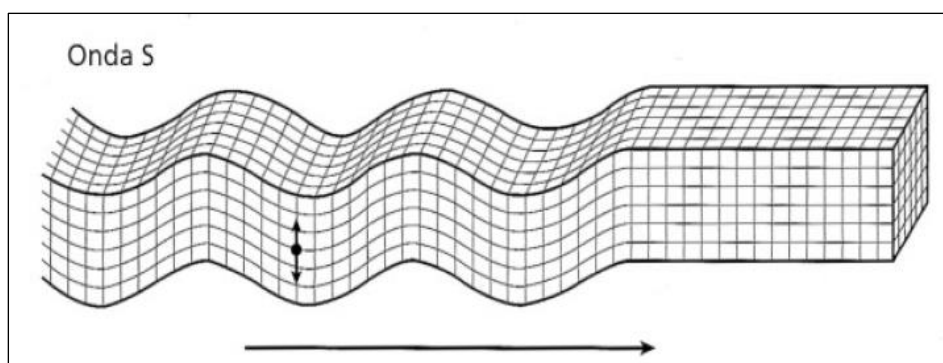


Figura 40: Propagação das Ondas S (Kearey *et al.*, 2009).

As ondas superficiais são originadas quando as ondas volúmicas chegam à superfície. Estas são ondas de grandes amplitudes e apresentam uma velocidade de propagação quase constante e que é inferior à das ondas volúmicas. As ondas superficiais dividem-se em ondas de Love e ondas de Rayleigh.

Nas ondas de Love as partículas vibram na horizontal perpendicular à direção da propagação da onda e sem movimento vertical (Figura 41); propagam-se de modo semelhante às ondas S.

Nas ondas de Rayleigh, as partículas vibram sobre um plano vertical que indica a trajetória de propagação da onda, com movimentos elíptico retrógrado (Figura 42).

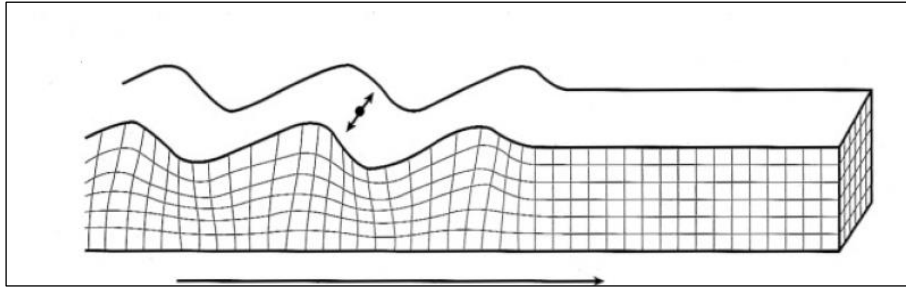


Figura 41: Propagação das ondas de Love (Kearey *et al.*, 2009).

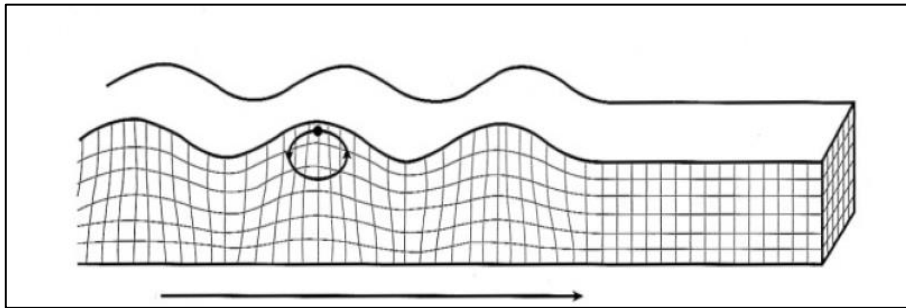


Figura 42: Propagação das Ondas de Rayleigh (Kearey *et al.*, 2009).

3.3 Lei de Snell

A geometria da refração sísmica é expressa pela Lei de Snell. De acordo com a lei de Snell (Eq.5, onde θ_i representa o ângulo incidente, θ_r o ângulo refratado, e V_1 e V_2 as velocidades do meio) quando uma onda sísmica atravessa meios com propriedades sísmicas distintas, uma parte do raio incidente é refletida e outra parte é refratada (ver Figura 43).

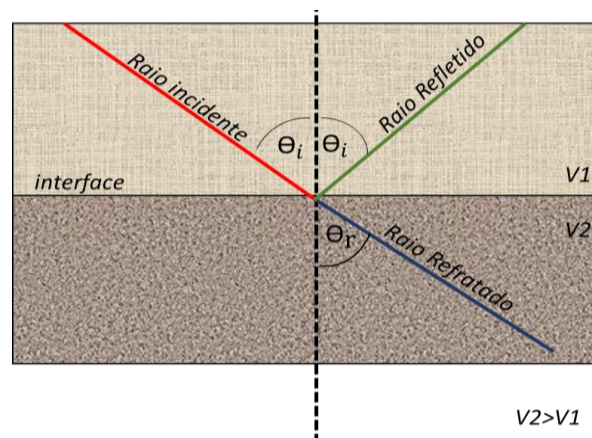


Figura 43: Representação da Lei de Snell, θ_i ângulo de incidência e θ_r ângulo do raio refratado, e a velocidade de propagação dos diferentes meios.

O ângulo de incidência e o ângulo de reflexão são iguais. O ângulo de refração vai depender do ângulo incidente e da relação das velocidades dos meios (V_1 e V_2). Quando o ângulo de refração é igual a 90° , ocorre refração crítica; o ângulo θ_r é denominado de ângulo crítico (θ_c ($\text{sen}(\theta_r) = 1$, em que $\theta_r=90^\circ=\theta_c$). O ângulo crítico só pode ocorrer quando $V_2 > V_1$ (Kearey *et al.*, 2013).

$$\frac{\text{sen}(\theta_i)}{V_1} = \frac{\text{sen}(\theta_r)}{V_2} \quad (\text{Eq.5})$$

Quando o ângulo de refração é igual ou superior a 90° ($\theta_r > 90^\circ$), ocorre reflexão total e nenhuma energia é refratada (assumindo que apenas estamos a tratar de um tipo de ondas, P neste caso).

3.4 Equação da onda refratada para modelo de 2 camadas com interface horizontal

A Figura 44 ilustra a propagação da onda refratada no meio. A energia gerada pela fonte sísmica A produz ondas sísmicas que se propagam ao longo da superfície. Uma parte da energia viaja diretamente na camada superior e outra parte é refratada criticamente na camada inferior. O raio direto viaja horizontalmente através do topo da camada superior com uma velocidade V_1 . O raio refratado propaga-se ligeiramente abaixo da interface dos meios com uma velocidade V_2 na direção paralela à interface e volta para a superfície à velocidade V_1 . A interface de refração encontra-se a uma profundidade Z . As energias direta e refratada são captadas pelo recetor D, que se encontra a uma distância x da fonte sísmica (Kearey *et al.*, 2013).

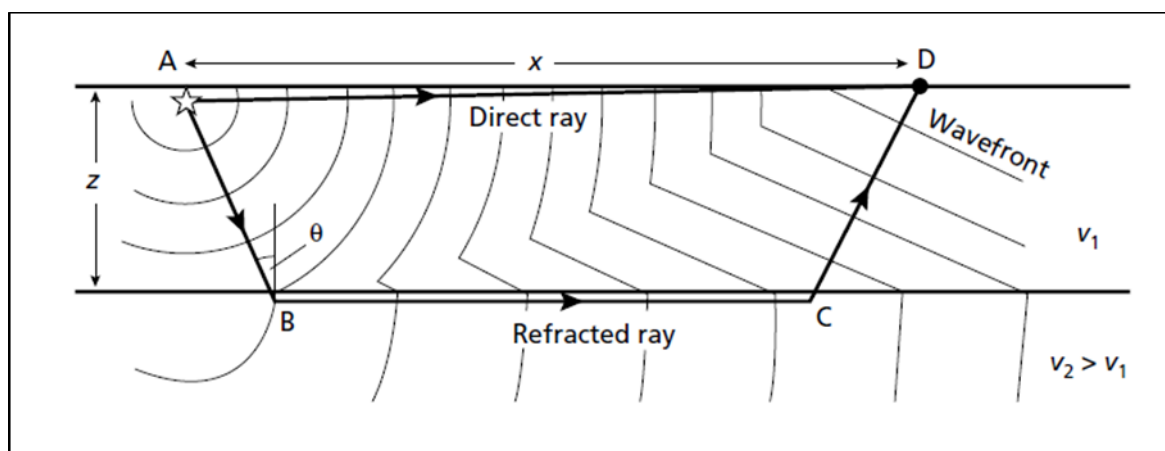


Figura 44: Propagação das ondas refratadas, modelo de duas camadas. Posições de frente de onda da onda incidente em diferentes instantes provocadas pela fonte sísmica A (Kearey, et al, 2013).

O tempo de percurso da onda direta é dado pela seguinte expressão:

$$t = \frac{x}{V_1} \quad (\text{Eq.6})$$

O tempo de viagem total ao longo do percurso do raio refratado ABCD é (figura 53):

$$t = t_{AB} + t_{BC} + t_{CD} \quad (\text{Eq.7})$$

$$t = \frac{Z}{V_1 \cos \theta} + \frac{(x - 2Z \tan \theta)}{V_2} + \frac{Z}{V_1 \cos \theta} \quad (\text{Eq.8})$$

Sendo $\cos \theta = (1 - \frac{V_1^2}{V_2^2})^{1/2}$ o tempo de percurso da onda refratada pode ser expresso pela seguinte expressão:

Equação da Onda refratada:

$$t = \frac{x}{V_2} + \frac{2Z \cos \theta}{V_1} \quad (\text{Eq.9})$$

3.5 Metodologia de Interpretação dos dados de refração sísmica

Na refração sísmica a atenção é concentrada nas primeiras chegadas da energia sísmica e os gráficos de tempo-distância dessas primeiras chegadas são interpretados para se obterem informações sobre as interfaces refratoras em profundidade (Kearey *et al.*, 2009). Os dados obtidos pela refração sísmica permitem construir um gráfico tempo em função da distância (dromocrónicas) para as diferentes chegadas (Figura 45). Estes traçados permitem calcular as velocidades de propagação das ondas elásticas nos solos. Cada segmento de reta nos traçados de dromocrónicas corresponde a uma camada geológica (Redpath, 1973). Contudo, há casos em que as camadas não são suficientemente espessas ou não apresentam um contraste de velocidade de propagação da onda em relação à anterior o que implica que não se consiga traçar o segmento de reta que corresponde a esta camada.

As primeiras chegadas da energia sísmica a um geofone estão sempre relacionadas com o raio direto ou refratado. O raio direto, em princípio, será sempre detetado pelos geofones como primeira energia a ser captada; tal acontece até uma certa distância, que se designa distância de cruzamento (xcross) e a partir da qual as primeiras chegadas passarão a ser as

ondas refratadas. A distância de cruzamento é onde o raio direto e o raio refratado chegam ao mesmo tempo (Kearey *et al.*, 2009).

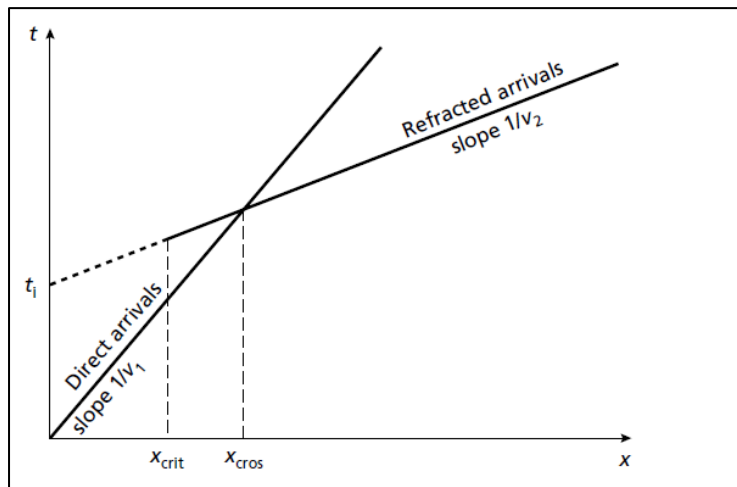


Figura 45: Curvas *tempo x distância* para a onda direta e a onda refratada para modelo de duas camadas com interface horizontal e plana (Kearey *et al.*, 2013).

Quando os segmentos correspondentes à onda direta e à onda refratada se intersectam, o tempo de interseção (t_i sobre o eixo do tempo de um gráfico tempo x distância) é dado pela seguinte expressão:

$$t_i = \frac{2Z(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}}{V_1 V_2} \quad (\text{Eq.10})$$

O método convencional para determinar a possível presença de uma camada inclinada é fazendo o tiro direto e inverso em cada extremidade da linha de perfil e registrar as chegadas sísmicas ao longo da linha a partir de ambos os tiros (ver Figura 46). Deste modo, podemos calcular as espessuras e inclinação da interface entre as 2 camadas.

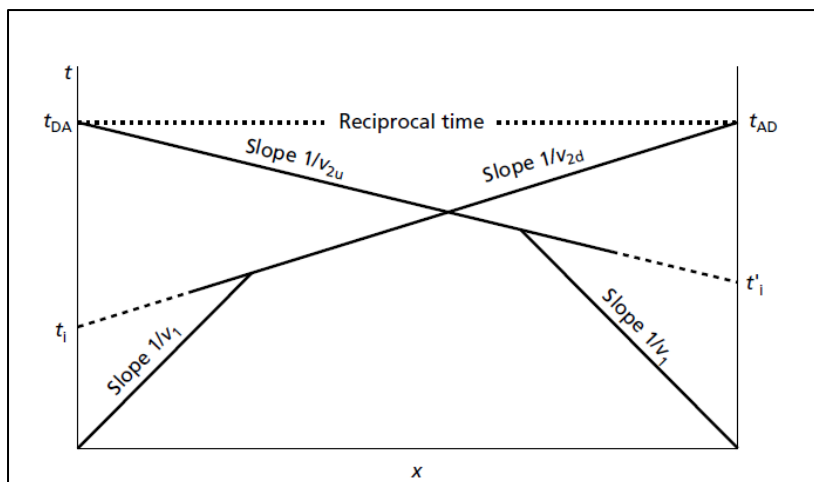


Figura 46: Exemplo de Curvas tempo x distância do tempo com direto e inverso (Kearey *et al.*, 2013).

Estes métodos podem ser generalizados para “n” camadas horizontais ou inclinadas e existem vários métodos para interpretar camadas com interfaces irregulares (e.g. Keary et al., 2013).

3.6 Equipamento e Aquisição de Dados

A aquisição dos dados de campo foi feita a partir de uma fonte artificial controlada (martelo) que gerou ondas sísmicas que se propagaram ao longo da sub-superfície e que foram detetadas pelos geofones distribuídos à superfície (Figura 47). Os dados foram armazenados num sismógrafo e de seguida transferidos para um computador com um *Software* específico para processamento preliminar de campo.

Equipamentos utilizados:

- Geofones
- Sismógrafo
- Computador de aquisição de dados
- Martelo como fonte de energia
- Placa de aço

Tabela 7: Parâmetros de Aquisição de dados de refração.

Parâmetros de aquisição de dados de refração sísmica	
Sistema de aquisição de dados	Sismógrafo
Fonte	Martelo
Passo de amostragem	0.5 ms
Comprimento do registo	75 m
Geofones	24
Intervalo entre os geofones	3 m
Distância do offset	3 m
Formato	SEG-2

Os geofones são instrumentos que convertem o sinal sísmico em sinal elétrico e que captam tanto as ondas sísmicas como diversos tipos de ruídos (Figura 47). Os geofones são distribuídos na superfície e estão frequentemente espaçados entre si de distâncias constantes. Geralmente, em sísmica a pequena profundidade, a distância entre os geofones não deve ser superior a 5 metros de forma a obter dados mais precisos, com uma

melhor cobertura da sub-superfície. No presente caso de estudo, optou-se por 3 metros de espaçamento entre os geofones.

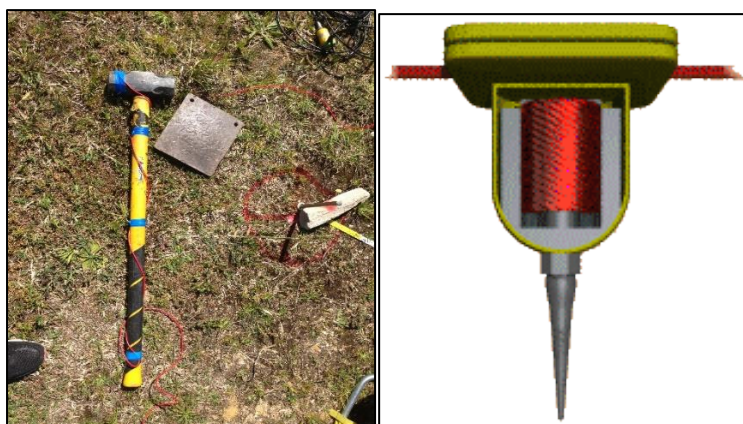


Figura 47: Martelo (Fonte Sísmica) e Placa de aço (à esquerda). Geofone (à direita), Fonte: <http://inter-geo.org>.

Utilizou-se uma linha de 75 metros de extensão com 24 geofones espaçados uniformemente. Foram feitos 5 tiros ao longo da linha, de forma a obter uma melhor cobertura das camadas da sub-superfície e poder definir convenientemente a sua geometria em profundidade. O primeiro geofone foi colocado a 3 metros no início da linha seguido de outro geofone a 3 metros e assim sucessivamente até aos 72 metros (com o último tiro a 3 metros para além do último geofone). No final, havia um total de 24 geofones implantados na superfície. O primeiro tiro foi disparado aos 0 metros, no início da linha, o segundo tiro foi dado aos 19,5 metros, o terceiro aos 37,5 metros (metade do perfil), o quarto tiro aos 55,5 metros e o último tiro aos 75 metros. A Figura 48 mostra o alinhamento do perfil no campo.



Figura 48: Distribuição dos geofones ao longo da superfície.

Os sinais registados pelos geofones são enviados para o sismógrafo através de um cabo que está conectado ao geofone. O sismógrafo regista e armazena os dados, que posteriormente são transferidos para um computador de aquisição que permite gravar os dados sísmicos para processamento e interpretação (ver Figura 49).



Figura 49: Computador de Aquisição (à esquerda) e sismógrafo (à direita).

O computador de aquisição de dados tinha como *Software* de aquisição o *Doremi*. O *Doremi* é um *Software* produzido pela SARA instrumentos eletrónicos srl. Este *Software* é utilizado para pesquisas sísmicas e pode ser aplicado para estudos de MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), SASW (*Spectral Analysis of Surface Waves*), REMI (*Refraction Microtremor*), reflexão e refração. Podem criar-se as configurações desejadas dependendo do tipo de trabalho a executar devendo definir-se o passo de amostragem, a frequência, o ganho e o número de canais (ver Figura 50).

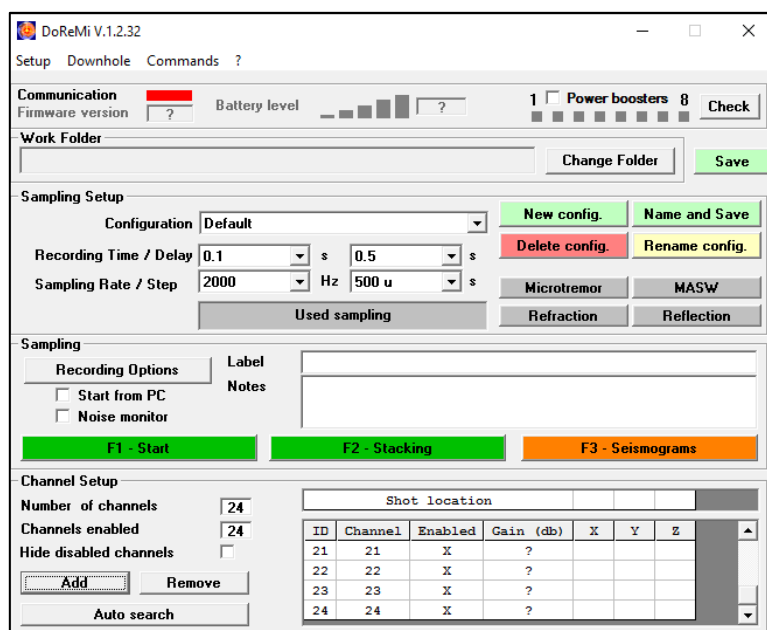


Figura 50: Interface gráfica do Software Doremi.

A Figura 51 está representada a localização espacial dos 2 perfis de refração sísmica realizados no campo: Perfil 1 e Perfil 2.

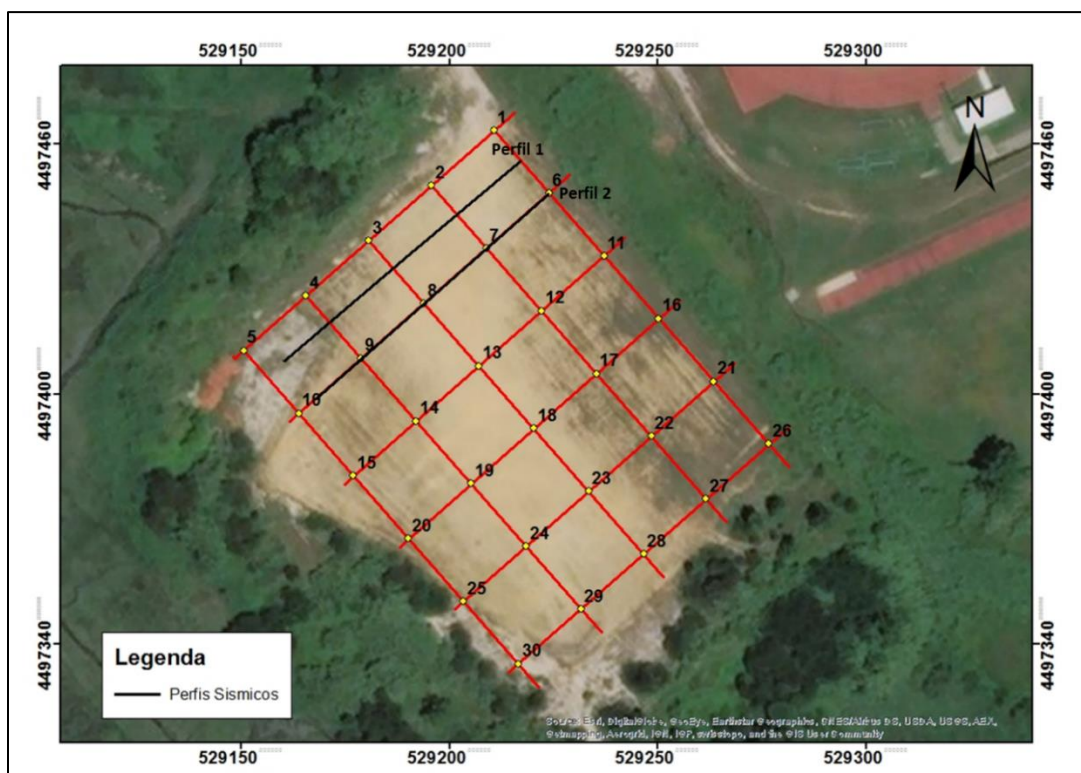


Figura 51: Localização dos perfis sísmicos P1 e P2 realizados no campo (representados pelas linhas pretas).

3.7 Apresentação dos resultados e interpretação dos dados

Com auxílio do *Software RadExPro* da empresa *DECO Geophysical* procedeu-se ao carregamento e visualização dos dados de refração sísmica. Para tal, alterou-se os *common parameters* nomeadamente os ganhos, a *variable density*, a *display mode* e outros parâmetros de visualização.

Procedimento em *RadExpro*:

- Criação de um novo projeto;
- Carregamento dos dados em formato SEG-Y;
- Definição da geometria;
- Identificação das primeiras chegadas (*picking* dos dados);

O primeiro passo em *RadExpro* é a criação de um novo projeto. O projeto consistiu em carregar dados em formato SEG-Y; estes dados contêm a informação em sinal. O banco de dados do *RadExpro* tem três níveis estruturais. O primeiro nível corresponde à área do

projeto, o segundo à linha e o último corresponde ao fluxo de processamento. O *RadExpro* permite armazenar áreas dentro de um projeto e várias linhas dentro de uma área. Cada linha é processada por vários fluxos. Dentro do fluxo de processamento leem-se os dados e define-se a geometria e os *picking* (ver Figura 52).

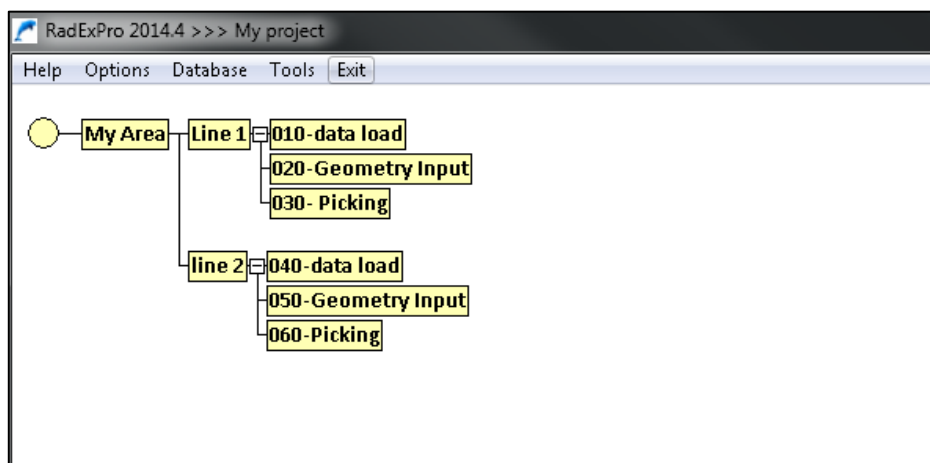


Figura 52: Estrutura do projeto para diferentes linhas em RadExPro.

Ao criar o fluxo dos dados tem que se definir a entrada *SEG-Y* e a saída *Trace Output* (Figura 53). Este módulo guarda os dados de leitura no banco de dados para que eles possam ter uma geometria atribuída num momento posterior. Ao definir a geometria é necessário indicar as coordenadas das fontes (*SOU_X*) e dos recetores (*REC_X*) aos dados sísmicos. Além disso, é necessário especificar manualmente o espaçamento entre os geofones, o número de geofones, o número de fontes e o *offset* (ver Figura 54).

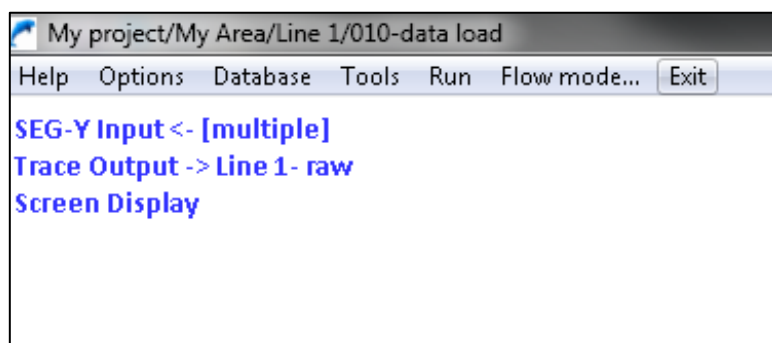


Figura 53: Fluxo para visualização dos dados sísmicos.

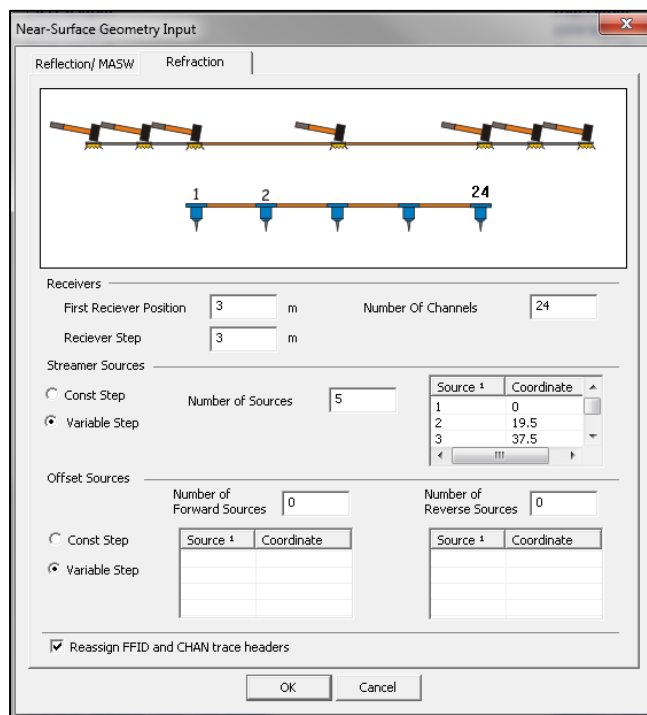


Figura 54: Definição da geometria dos dados.

O *RadExPro* permite efetuar outros procedimentos de processamento adicionais como aplicar filtros passa-banda e passa baixo, entre outros que podem ser adicionados se necessário. No entanto, deve-se ter em atenção que as filtragens (especialmente de fase zero-fase) interferem com as primeiras chegadas, o que impede a sua correta identificação. Assim, o *picking* dos dados (identificação das primeiras chegadas) deve ser feito antes de filtragem. No entanto, neste caso só nos interessava marcar as primeiras chegadas pois a inversão do modelo de velocidade das camadas foi feita noutra *Software*. Tendo isto em mente, nenhum filtro foi aplicado nos dados, de forma a preservar o máximo de informação para marcar as primeiras chegadas.

Houve uma certa dificuldade em marcar alguns *picks*, uma vez que muitas das primeiras chegadas não eram nítidas. No entanto, fez-se *zoom*, aumentou-se os ganhos de forma marcar *picking* melhores.

Cada geofone, quando capta as ondas sísmicas, gera um traço sísmico e a composição desses traços sísmicos dá origem aos sismogramas dos registos de tiro (ver Figura 55). Através do *RadExPro* é possível verificar no cabeçalho dos sismogramas os recetores, os traços sísmicos e a posição dos tiros. De certo modo, a visualização dos recetores no cabeçalho dos sismogramas facilita a marcação dos *picks* das primeiras chegadas, uma vez que é necessário marcar as primeiras chegadas nos recetores correspondentes (ver Figura

56). Os *picks* das primeiras chegadas detetadas foram guardados e exportados em formato texto (*txt*).

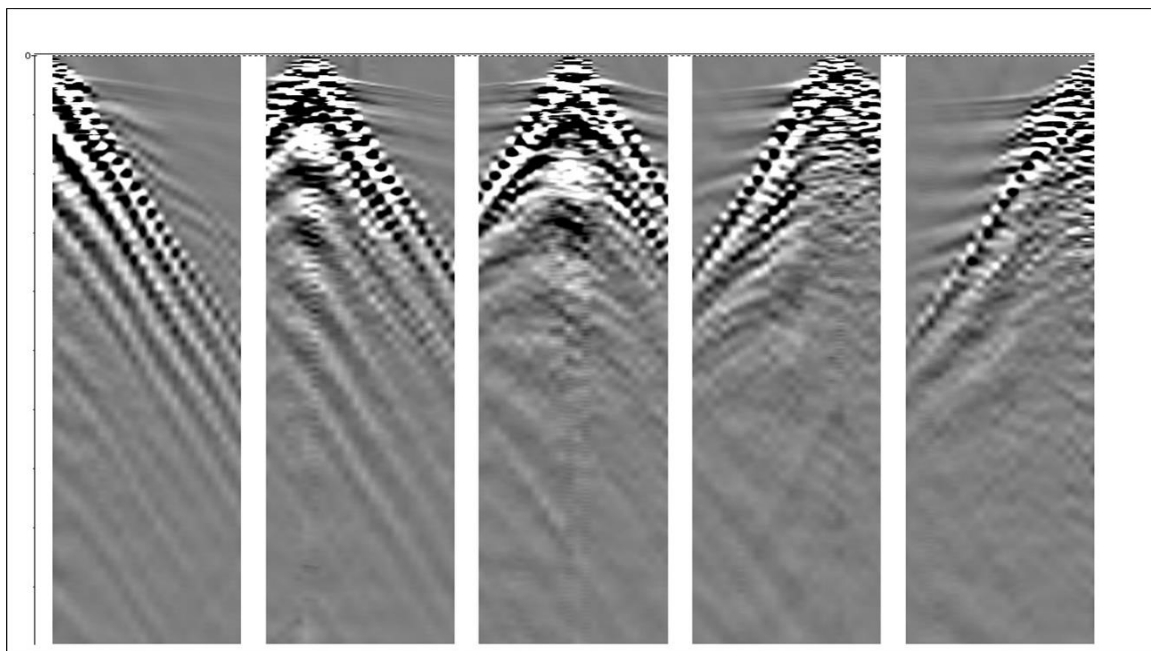


Figura 55: Registos de tiro dos dados obtidos no campo.

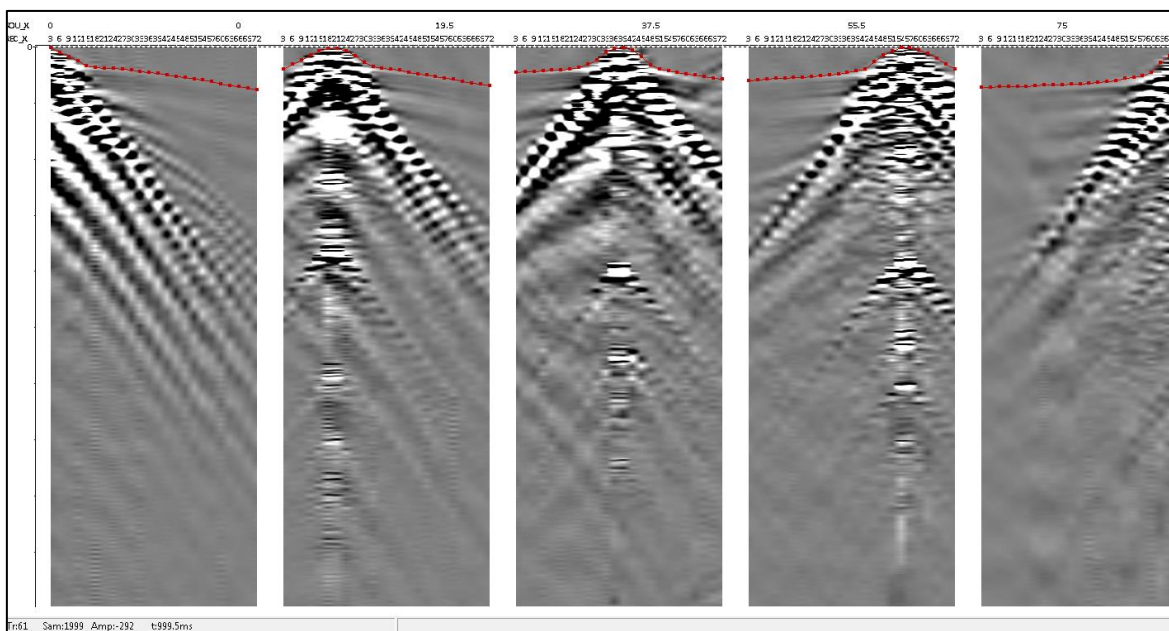


Figura 56: Identificação e registo das primeiras chegadas.

3.7.1 Resultados obtidos

Depois de marcados os *picks* das primeiras chegadas, estes foram guardados e exportados para a realização do modelo de velocidade das camadas no *Software Ra2Dtomo* (ver Figura 58; Günther, 2005). Antes disso, os dados das primeiras chegadas obtidas pelo *RadExPro*, foram colocados numa folha de *Excel* (Figura 58), com objetivo de construir o gráfico tempo em função da distância. Este passo também ajuda a verificar se os *picks* foram marcados nas respectivas posições dos geofones.

Station number	Position (x,m)	Arrival SPO	Times in milliseconds				Elevation (m)
			SP19.5	SP37.5	SP55.5	SP75	
1	3	1.465	39.065	45.093	59.885	72.785	0
2	6	10.143	31.442	44.522	58.403	71.478	0
3	9	17.199	23.344	43.74	57.513	71.042	0
4	12	25.137	14.768	42.746	56.624	70.17	0
5	15	34.398	8.099	41.752	55.73	70.17	0
6	18	36.162	2.858	40.758	54.572	70.17	0
7	21	38.367	2.382	39.956	54.027	69.735	0
8	24	38.808	6.67	36.782	52.662	68.427	0
9	27	40.131	16.232	30.817	51.584	67.991	0
10	30	41.454	27.678	22.864	50.102	67.555	0
11	33	44.1	35.709	8.717	48.024	66.248	0
12	36	45.423	38.071	2.404	45.951	65.812	0
13	39	47.628	40.186	1.803	42.839	64.94	0
14	42	50.715	41.596	5.894	39.429	63.197	0
15	45	52.479	45.121	17.681	26.74	61.889	0
16	48	54.243	47.941	31.811	14.238	59.71	0
17	51	56.889	50.761	39.451	6.954	56.659	0
18	54	59.094	53.321	42.746	1.743	54.044	0
19	57	62.181	55.696	45.729	1.743	50.993	0
20	60	65.709	58.121	48.711	6.622	45.327	0
21	63	68.796	61.336	50.699	12.137	27.894	0
22	66	71.442	64.861	53.681	20.54	15.69	0
23	69	73.647	66.22	55.67	30.81	8.717	0
24	72	76.294	69.078	57.658	40.146	1.444	0

Figura 57: Valores obtidos pelos *Picks* das primeiras chegadas.

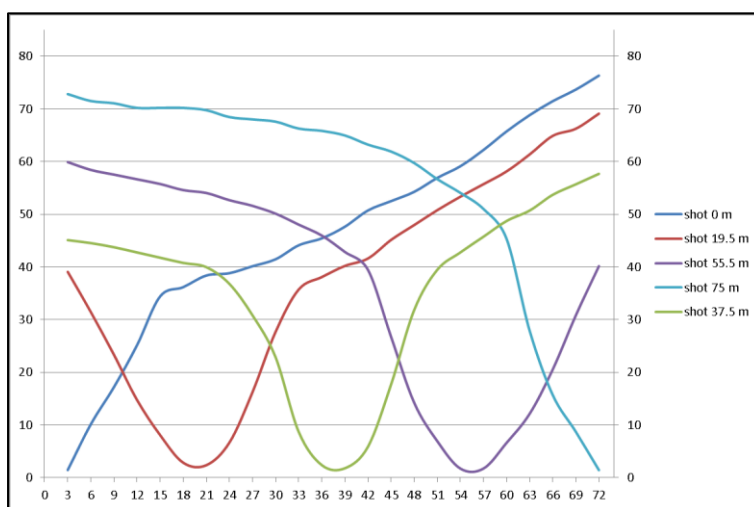


Figura 58: Gráfico do tempo em função da distância, obtida pelo *Excel*.

Importou-se os *picks* do Software *RadExpro* para o *Ra2Dtomo* para realizar a inversão tomográfica de refração. Esta inversão baseia-se num algoritmo (Gauss-Newton) que tem como objetivo encontrar uma distribuição de velocidade (plausível) com variações laterais e verticais que seja capaz de explicar os tempos de viagem medidos (*picking*) (Günther, 2005).

Para o efeito, criou-se primeiro uma malha triangular (Figura 59 e 60). A precisão dos resultados depende da forma e das dimensões das malhas; as malhas mais finas permitem obter melhor aproximação das velocidades.

A Figura 61 mostra os pontos de tiro, os tempos de viagem (percurso) medidos (que estão codificados por cores) e o modelo de velocidade obtido pela inversão.

Nas Figuras 62 e 63 estão representados os modelos de velocidades obtidos no campo para os perfis 1 e 2.

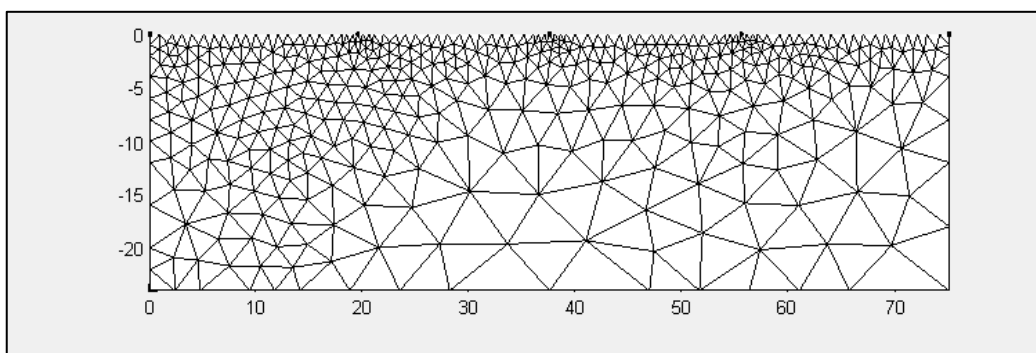


Figura 59: Grelha triangular usada para a inversão tomográfica.

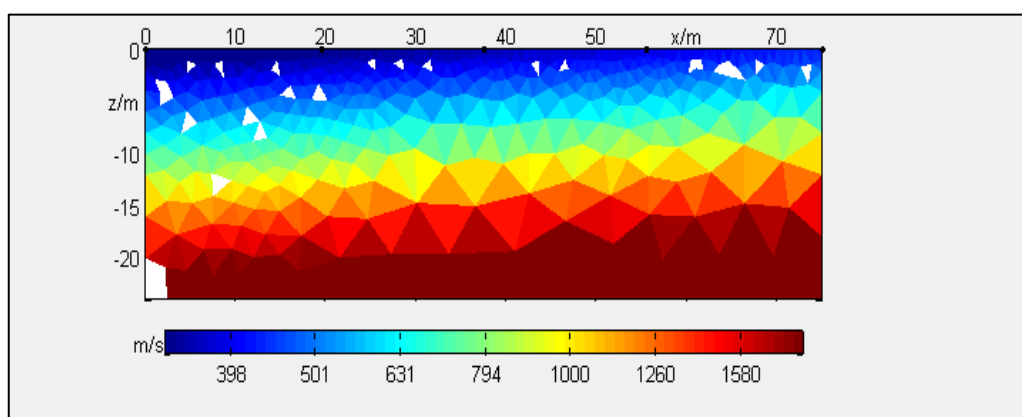


Figura 60: Modelo preliminar para inversão dos dados.

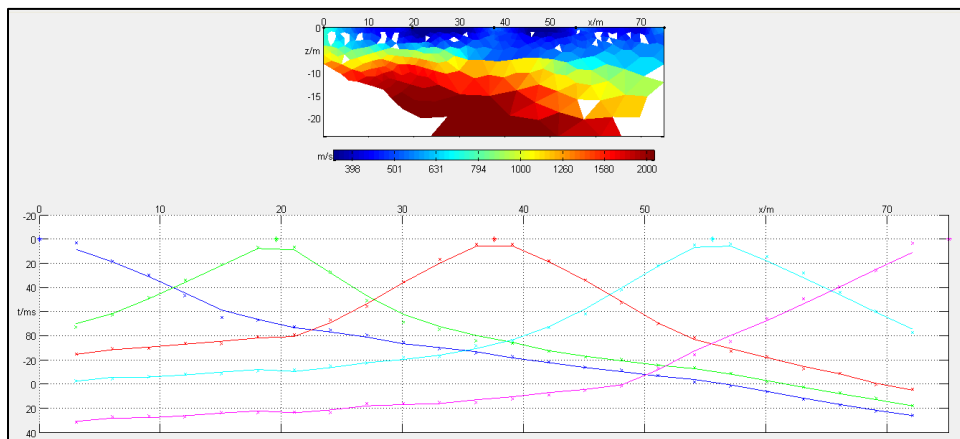


Figura 61:Gráfico tempo x distância, interpretado para os pontos de tiro referentes da linha sísmica com marcações das primeiras chegadas.

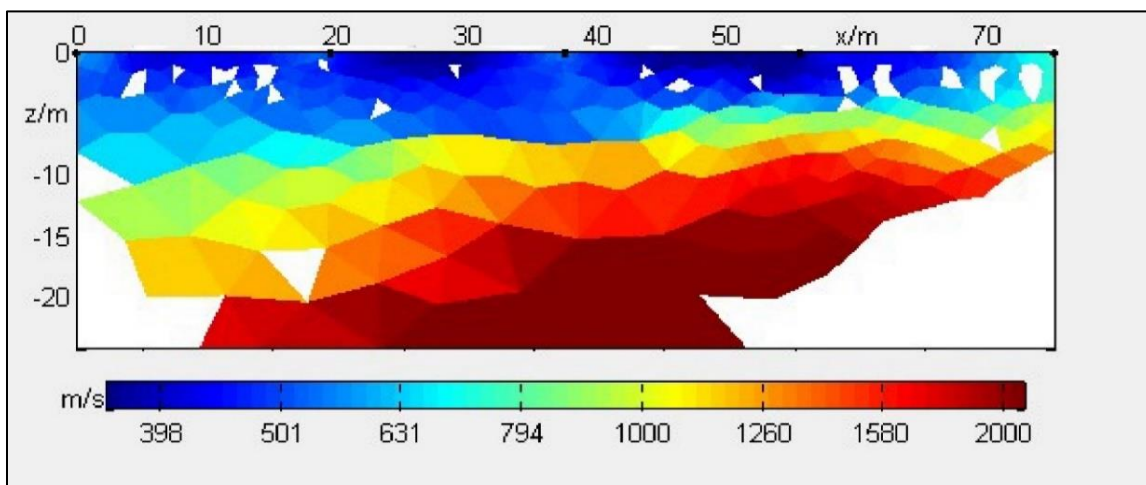


Figura 62:Modelo interpretado de velocidades das camadas para o Perfil 1.

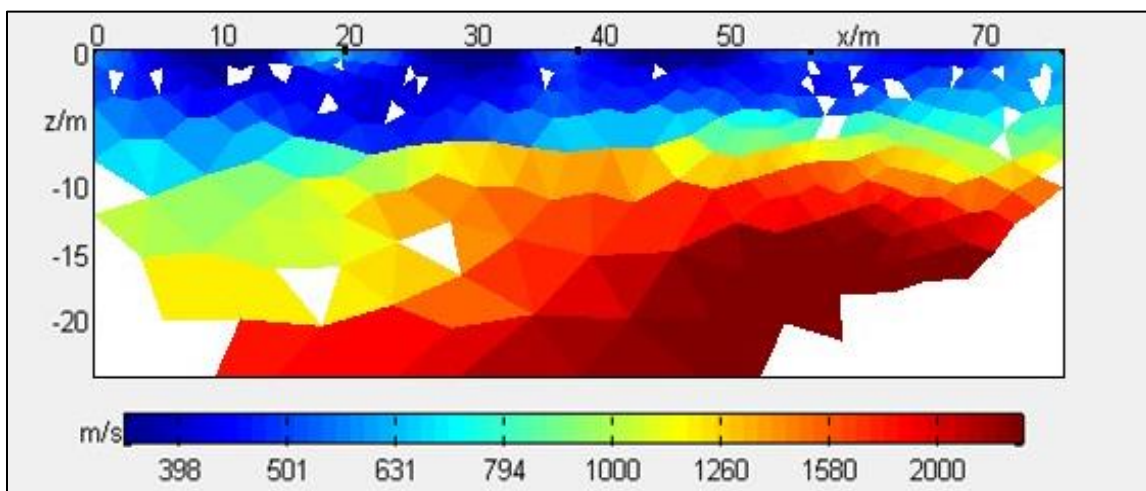


Figura 63:Modelo de velocidades das camadas para o Perfil 2.

3.7.2 Interpretação dos dados

Foram obtidos perfis de velocidade dos materiais que constituem os solos da área de estudo, o que permitiu identificar as várias interfaces e espessura das camadas assim como determinar a respetiva velocidade de propagação das ondas sísmicas. Com base nos resultados obtidos pela refração sísmica, não é possível definir com precisão as litologias do solo, sendo necessário comparar com os resultados obtidos por outros métodos realizados no campo. O método de refração sísmica permitiu no entanto caracterizar a estrutura geológica da área de estudo e identificar quatro a cinco camadas geológicas com velocidades e espessuras distintas (ver Figura 64 e Figura 65).

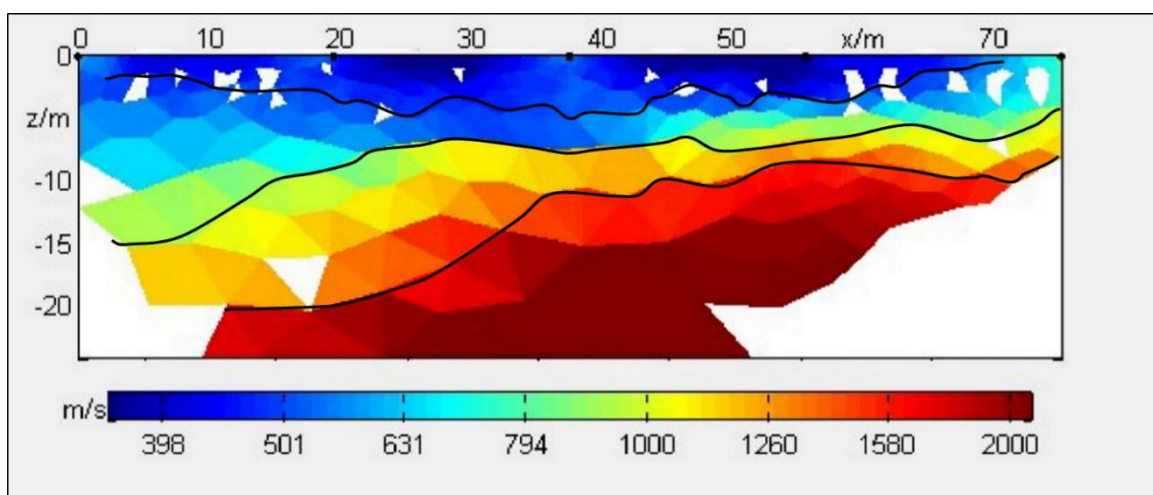


Figura 64: Modelo interpretado de velocidade de propagação das camadas do Perfil 1.

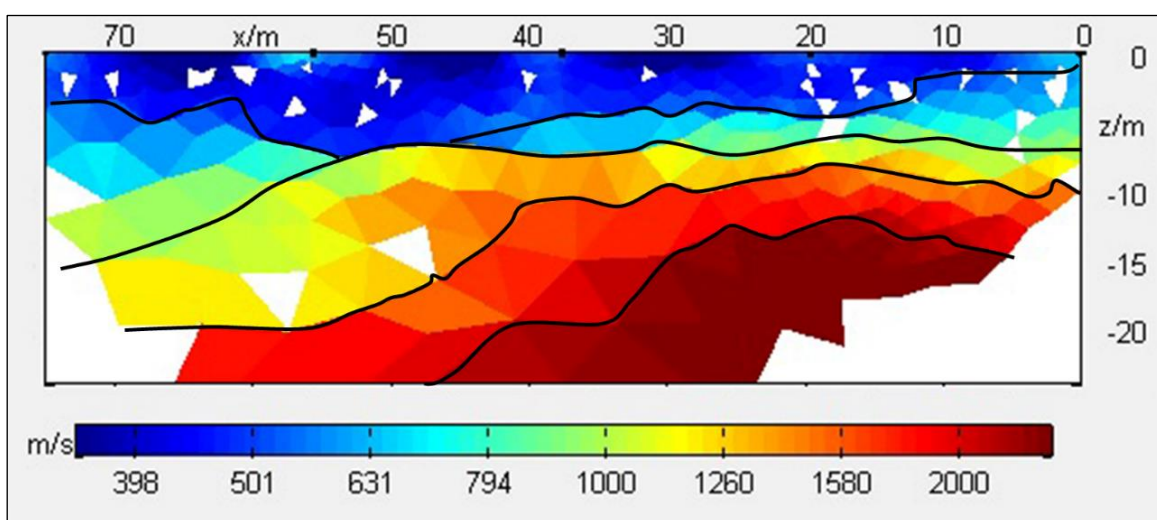


Figura 65: Modelo interpretado de velocidades do Perfil 2.

4. Aquisição dos perfis de Georadar

4.1 Georadar

O Georadar, ou GPR (*Ground Penetrating Radar*) é um método geofísico, que utiliza a radiação eletromagnética de alta frequência para obter uma imagem da sub-superfície e determinar a variação espacial das estruturas geológicas. Este método baseia-se na resposta do solo à penetração de ondas eletromagnéticas que são emitidas através de uma antena emissora e na recepção das reflexões provocadas pelas variações das propriedades elétricas presentes no solo que são atravessados pelas ondas eletromagnéticas (Figura 66).

As ondas eletromagnéticas são refletidas e difratadas pelas formações geológicas, por fácies anômalas, por objetos enterrados e por outros elementos que se encontram na superfície. Estas ondas, quando atravessam meios que exibem propriedades elétricas distintas umas das outras, refletem uma parte da energia, que é captada pela antena receptora, enquanto outra parte da energia propaga-se no meio.

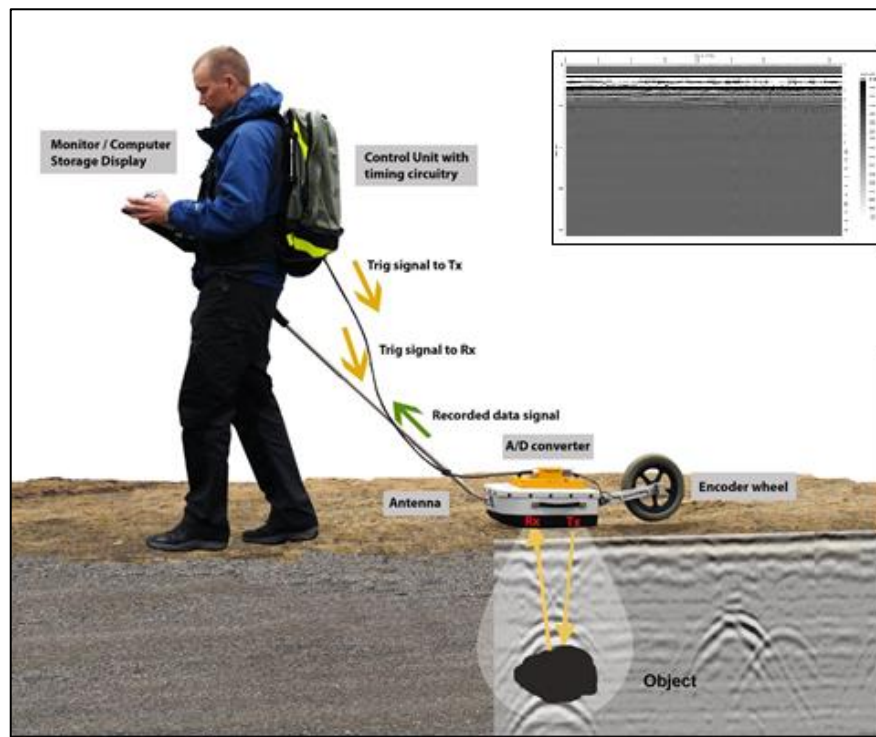


Figura 66: Aquisição de dados pela penetração de GPR no solo e radargrama. Fonte: <http://www.geo-analysis.com/utilitymapping/georadar.html>.

A energia refletida é causada por uma mudança abrupta nas propriedades dielétricas do material presente no solo, que pode estar associada a uma mudança na litologia, textura, humidade ou na condutividade elétrica (Howe, 2000).

O sinal captado pela antena recetora é registado, amplificado, digitalizado e armazenado no dispositivo de aquisição. O sinal é registado em função do tempo de percurso da onda que é dado pelo tempo de ida-e-volta (*travel time*) desde do momento em que a onda eletromagnética é transmitida até o momento em que é captada pelo recetor. Este tempo de percurso (*travel time*) é dado em nanosegundos (ns) $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$. A propagação das ondas eletromagnéticas no ar é de $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ($0,3 \text{ m/ns}$). Assim, o tempo de viagem de uma onda eletromagnética no ar é de aproximadamente $3,3333 \text{ ns}$ por cada metro percorrido. Como a velocidade é inversamente proporcional à raiz quadrada da permitividade do material e como a permitividade dos meios é sempre superior à permitividade do ar, o tempo de viagem de uma onda num material diferente do ar é sempre menor que $3,3333 \text{ ns/m}$ (Daniels, 2000).

A antena recetora recebe tanto as ondas diretas que se propagam no ar, como as ondas refletidas que se propagam no meio. As ondas diretas são as primeiras a ser recebidas seguidas das ondas refletidas (ver Figura 67).

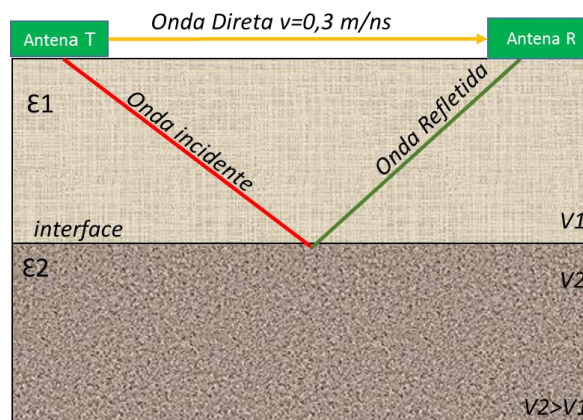


Figura 67: Propagação das Ondas eletromagnéticas, direta e refletida.

Ao longo de um determinado período de tempo, após a emissão das ondas eletromagnéticas, a antena recetora capta as diferentes reflexões nas interfaces dos meios que correspondem às diferentes camadas de sub-superfície. Os traços registados correspondem ao registo temporal de todas as reflexões provocadas pelos meios que a onda eletromagnética atravessa. O tempo de chegada para a onda refletida registada em cada traço, pode ser usado para determinar a profundidade do objeto enterrado, se a velocidade da onda na sub-superfície for conhecida (Daniels, 2000). A justaposição dos

traços adquiridos sequencialmente permite obter um radargrama que consiste na representação das amplitudes e intensidades dos refletores em sub-superfície.

Quando as ondas eletromagnéticas se propagam num meio, as suas propriedades elétricas (permeabilidade magnética, condutividade elétrica e permissividade) fazem com que a mesma tenha comportamentos de dispersão distintos, tal como é ilustrado na Figura 68. A refração em GPR não é muito comum, tendo em conta que a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas tende a diminuir com a profundidade e isto é uma consequência do facto das ondas eletromagnéticas serem afetadas principalmente pelo teor de água. A dispersão por difração ocorre quando a onda eletromagnética é bloqueada por um objeto pontual. Nestes casos, a onda dispersa-se (difrata) em diferentes direções. A dispersão ressonante ocorre quando uma onda incide sobre um objeto delimitado por 2 interfaces com elevado contraste e a onda sofre reflexões sucessivas dentro desse objeto (Daniels, 2000).

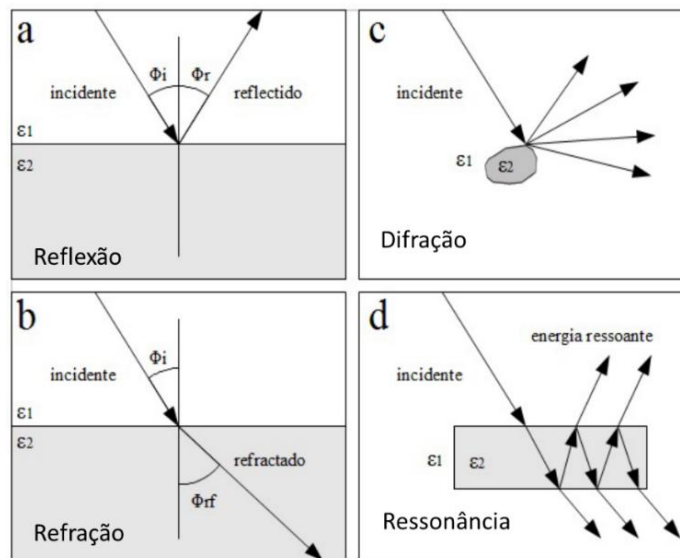


Figura 68: Vários tipos de Dispersão das ondas eletromagnéticas (Adaptado de Barraca, 2013).

A técnica do georadar é análoga em muitos aspetos à sísmica, mas existem grandes diferenças funcionais entre as duas técnicas. O sistema de radar transmite e recebe sinais milhares de vezes por segundo e não é necessário o contacto físico com o solo. Como resultado, os dados do radar podem ser recolhidos muito rapidamente (Davis *et al.*, 1987).

Em comparação com outros métodos convencionais de observação de solos de sub-superfície, as técnicas de georadar são mais rápidas e proporcionam uma melhor resolução espacial. Além disso, é um método não destrutivo, não exige a abertura de furos ou perfuração do solo o que, conseqüentemente, não altera a estrutura dos mesmos (Doolittle & Collins, 1995).

O georadar utiliza ondas eletromagnéticas na faixa de VHF/UHF. As frequências são entre 10 MHz e 1GHz, e podem chegar até aos 3 GHz. A frequência e as propriedades elétricas do meio determinam a resolução espacial e a profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas. A frequência utilizada nas antenas é escolhida de forma a fornecer a relação mais vantajosa entre a penetração e a resolução. Antenas de altas frequências, com curtos comprimentos de onda melhoram a resolução espacial mas sofrem uma atenuação do sinal, resultando em profundidades de penetração baixas. As antenas com frequências mais baixas possuem maior penetração, porém geram radargramas de menor resolução (Dourado *et al.*, 2003).

4.2 Propagação das ondas eletromagnéticas e as propriedades elétricas dos solos

A propagação da onda eletromagnética no georadar exhibe o formato de um cone, descrevendo o movimento de uma elipse que vai aumentando de dimensão no sentido ascendente em direção à sub-superfície (ver Figura 69).

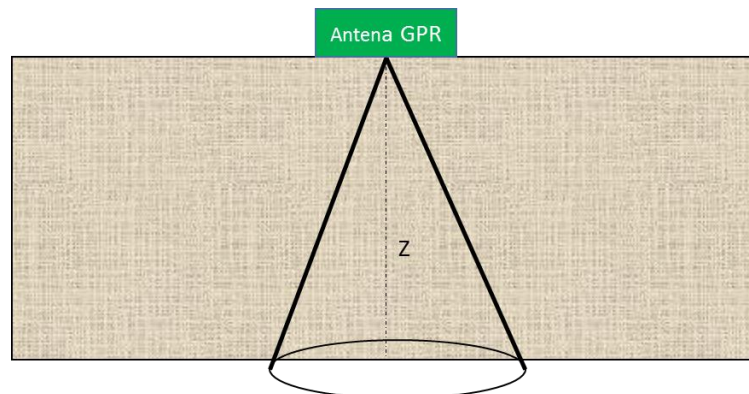


Figura 69: Dispersão cônica da propagação da onda eletromagnética.

Existem dois parâmetros que influenciam a propagação das ondas eletromagnéticas: a velocidade de propagação e a atenuação de sinal.

Em relação à velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas, em geral, estas decrescem em profundidade devido ao facto de os meios em profundidade estarem saturados de água o que, conseqüentemente aumenta a constante dielétrica.

Por outro lado, quando se propagam num meio geológico, as ondas eletromagnéticas sofrem efeitos de atenuação e dispersão, devido ao aumento da condutividade elétrica. Estes efeitos induzem a diminuição da energia da onda eletromagnética à medida que ela

se propaga. Nestas situações, o resultado é a degradação da intensidade e da qualidade do sinal do georadar.

Os parâmetros que mais controlam a resposta dielétrica de materiais geológicos são o teor de água, a porosidade, o teor de argila, a frequência das antenas e a salinidade. Solos salinizados ou constituídos por grande conteúdo de argilas induzem um aumento da condutividade elétrica, a atenuação e a dispersão da onda eletromagnética. Solos arenosos de baixo teor de argilas permitem uma menor dispersão de energia e, conseqüentemente, uma melhor propagação das ondas eletromagnéticas.

4.3 Procedimento de aquisição e equipamento utilizado no campo

Para execução do método de georadar na área de estudo foi utilizada uma malha definida no *ArcGIS*. Neste caso, o espaçamento entre os perfis foi menor ao que foi utilizado nos perfis de refração sísmica, com o intuito de obter uma malha mais apertada e obter resultados mais detalhados da sub-superfície.

Foi utilizado para aquisição dos dados o sistema de ProEx da MALA Geoscience, com duas antenas blindadas com frequências distintas, 100MHz e 500MHz, na configuração de mochila e com GPS acoplado.

O equipamento de georadar consiste em quatro elementos principais: a unidade de transmissão, a unidade de recepção, a unidade de controlo e a unidade de visualização. As antenas utilizadas (Figura 70) no campo possuem um painel de controlo de *Software* que, além de receber os sinais eletromagnéticos, faz a conversão dos dados brutos obtidos no campo em radargrama.



Figura 70: Antenas GPR 100MHz (à esquerda) e de 500MHz (à direita), utilizadas nos levantamentos de campo efetuados neste trabalho.

Os perfis de 500 MHz foram adquiridos segundo uma malha com espaçamento regular (Figura 71). Não foi possível a aquisição de uma malha regular com espaçamento mais ou menos constante nos perfis com a antena de 100 MHz devido a problemas de operação durante a aquisição dos dados (Figura 72).

Aquisição dos perfis de Georadar



Figura 71: Linhas de aquisição obtida pela antena de 500MHz.

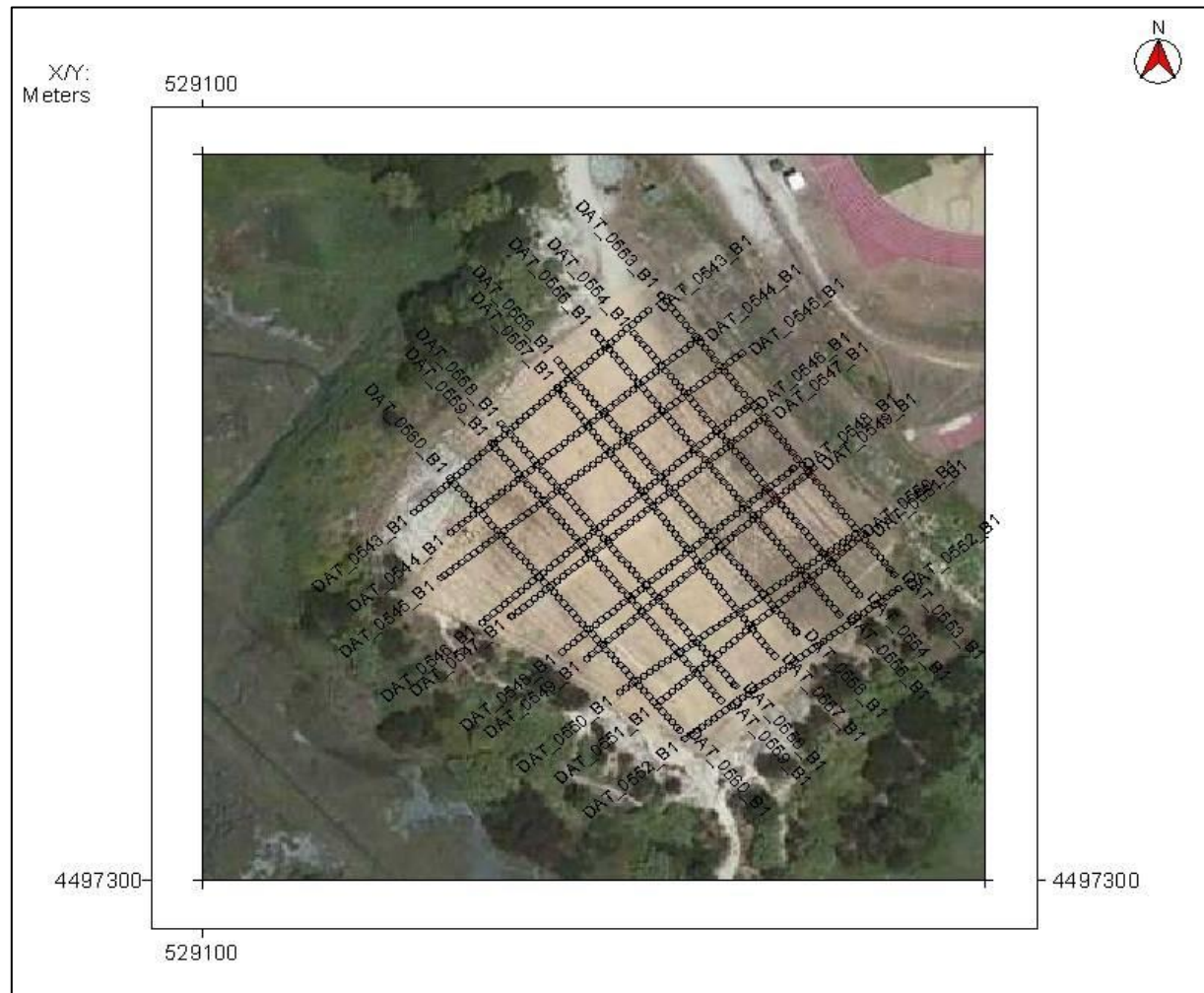


Figura 72: Linhas de aquisição obtida pela antena de 100MHz.

4.4 Processamento dos dados de Georadar

O objetivo do processamento de dados é separar ou eliminar os ruídos que interferem com os sinais e que dificultam a interpretação dos dados. Para este efeito utilizou-se o *Software ReflexWin v7.1* da *Sandmeier Scientific*. O *ReflexWin* permite o processamento e interpretação dos dados de reflexão e refração sísmica, e de georadar, assim como a interpretação dos dados em 2D e 3D.

O processamento dos dados de Georadar consistiu no fluxo apresentado na Figura 73.

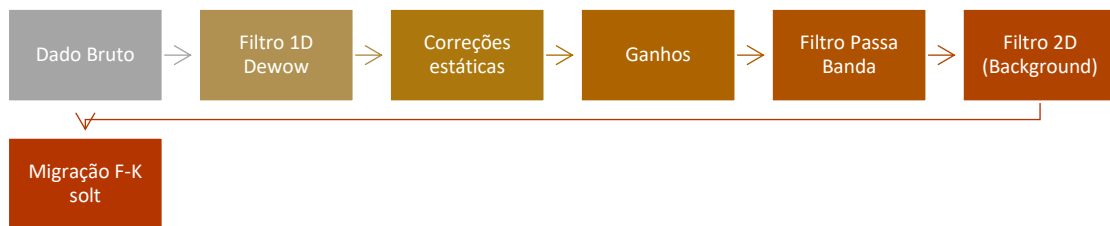


Figura 73: Fluxo de Processamento.

A Figura 74 mostra o radargrama obtido pelo georadar no campo, sem processamento.

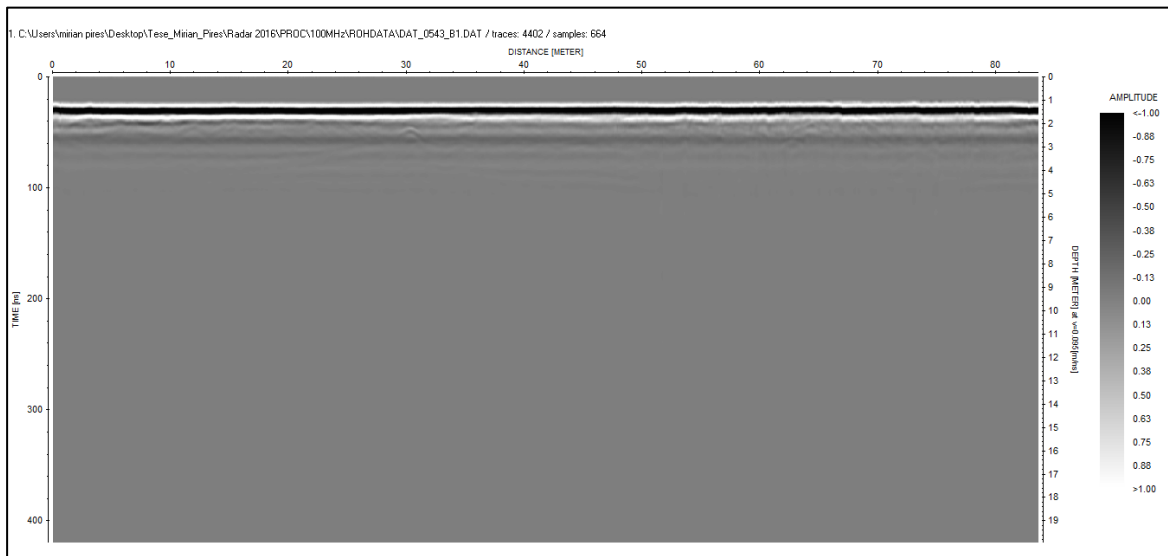


Figura 74: Radargrama obtido pelo georadar. Dados originais sem processamento.

Filtro 1D

Depois de fazer o *display* dos dados originais obtidos no campo, começou-se por fazer a sua filtragem. O primeiro filtro aplicado foi o filtro 1D *Dewow the data Subtract Mean*. Este

filtro tem como objetivo remover a saturação da amplitude que é causada pelas componentes de baixa frequência, registadas no sinal do georadar (Figura 75).

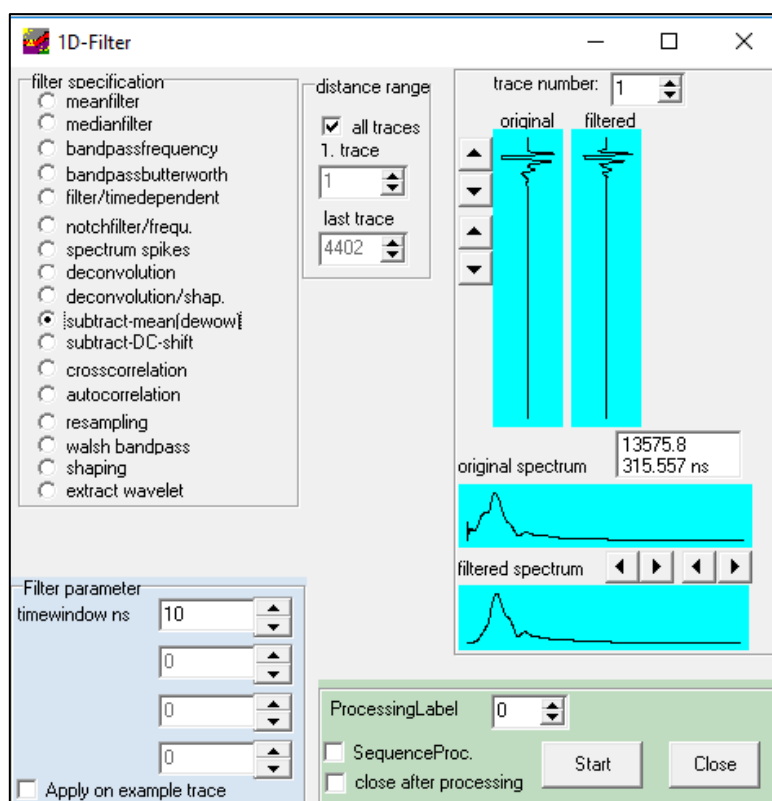


Figura 75: Aplicação do Filtro 1D Subtract Mean (dewow).

Ganhos

Para melhor visualização dos dados aplicaram-se ganhos nas secções. Os ganhos permitem diminuir a energia direta e de acoplamento, e amplificar a zona de interesse. Desta forma, há uma melhor observação das reflexões ou um destaque de alguma reflexão com alguma atenuação.

Correções estáticas

As correções estáticas consistem no ajuste do tempo zero, também denominado tempo de atraso. O tempo de atraso consiste no afastamento entre as antenas transmissoras de sinal e as recetoras, o que resulta num mau posicionamento dos refletores em profundidade.

Para tal, no *ReflexWin* devem seguir-se os seguintes passos: Correções estáticas, *Move Starttime*; abrir em simultâneo a janela *wiggle*. A janela *wiggle* permite determinar o tempo para subtrair da secção de modo a obter T0, Z=0 correto, e posiciona os dados na sua posição espacial correta (Figura 76).

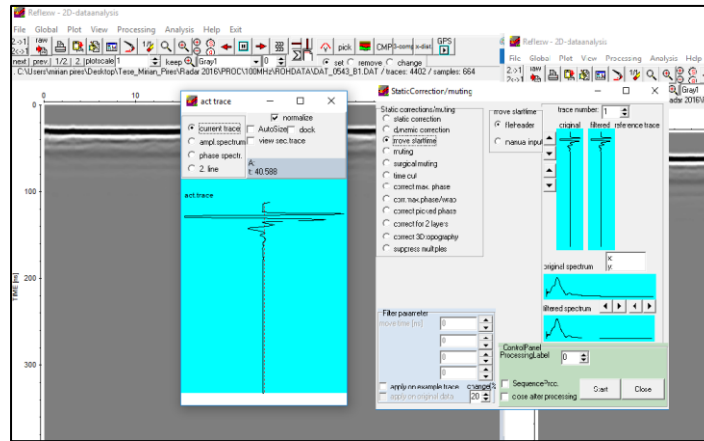


Figura 76: Correções Estáticas.

Filtro Passa Banda

O objetivo do filtro é aplanar o espectro para uma determinada banda de frequência (filtro *BandPass butterworth*).

Filtro 2D

Este passo consistiu na aplicação do filtro *BackGround Removal*. Os refletores curvos podem ser melhorados e os refletores horizontais podem ser atenuados.

Migração

O processo de migração tem como objetivo colapsar e reposicionar os refletores nos lugares corretos. Para efetuar a migração dos dados é necessário determinar a velocidade das ondas de radar. A determinação das velocidades das ondas é feita pelo ajuste manual das hipérbolas de reflexão presentes no perfil (Figura 77).

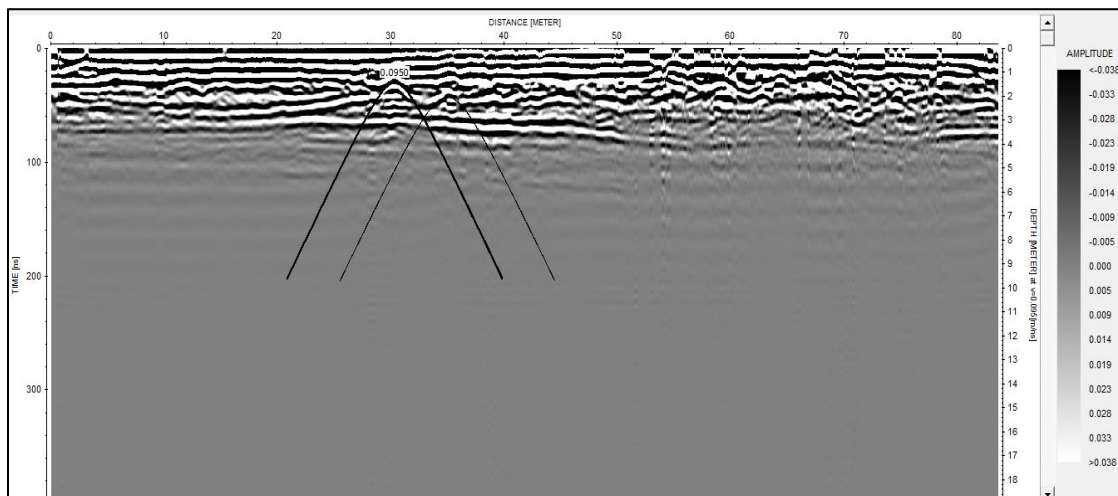


Figura 77: Ajuste das Hipérbolas.

Após o processamento dos dados obteve-se um radargrama satisfatório (Figura 78), o que permite identificar várias interfaces das camadas geológicas da sub-superfície.

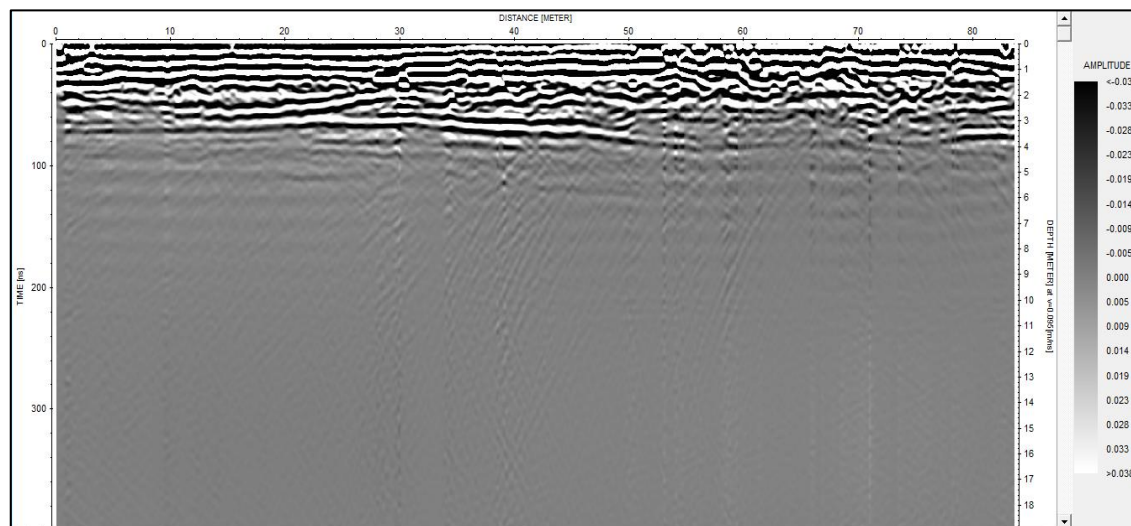


Figura 78: Radargrama obtido após o processamento dos dados brutos representados na Figura 73.

4.5 Interpretação e análise dos dados

A interpretação dos dados foi realizada a partir do *Software Kingdom Suite* (software de interpretação sísmica e geológica), e consistiu na identificação e cartografia das interfaces das várias camadas, representadas por refletores que separam unidades com caráter interno distinto.

A análise 2D das secções obtidas no campo pelas antenas de 100 MHz e 500 MHz permitiu identificar e marcar horizontes que correspondem às interfaces das camadas principais (Figuras 79 a 82). A antena de 100 MHz, cuja profundidade de penetração foi até aproximadamente 20 metros (considerando que a velocidade de propagação da onda eletromagnética é de 0.1 m/ns, se consideramos na escala de tempo metade, um refletor aos 100 ns estará a cerca de 5 m de profundidade), permitiu distinguir duas zonas: a primeira é marcada pelos refletores mais fortes até aproximadamente 4 metros (na escala do tempo corresponde 0.08 μ s) e a segunda é marcada pela atenuação forte de sinal à medida que a profundidade aumenta, o que dificultou a identificação dos refletores. Na primeira zona evidenciam-se refletores quase horizontais mais perto da superfície. Porém, em determinadas regiões os refletores aparecem “emaranhados”, o que pode ser devido aos materiais presentes ou devido ao erro de acoplamento que se verifica nas regiões onde,

à superfície, há mais vegetação. Esta zona também é marcada por refletores cuja forma se assemelha ao de um canal que pode estar relacionado a topografia da região antes do aterro, sendo uma região que é fortemente influenciada pelos canais da Ria de Aveiro. A segunda zona é marcada pela atenuação forte do sinal. Aproximadamente aos 4 metros começou a verificar-se uma atenuação forte do sinal, o que resulta numa degradação da intensidade e da qualidade do sinal do georadar, que não permite a identificação clara de refletores.

No que se refere à antena de 500 MHz, a profundidade de penetração foi aproximadamente até aos 5 metros (considerando a velocidade de propagação da onda eletromagnética 0.1 m/ns). No entanto, devido à atenuação do sinal só foi possível identificar as camadas até aproximadamente aos 3.5 metros (na escala do tempo corresponde 0.07 μ s). Foi possível obter dados de campo com melhor resolução, como seria de esperar, o que permitiu uma visão mais detalhada das camadas que se encontram mais à superfície.

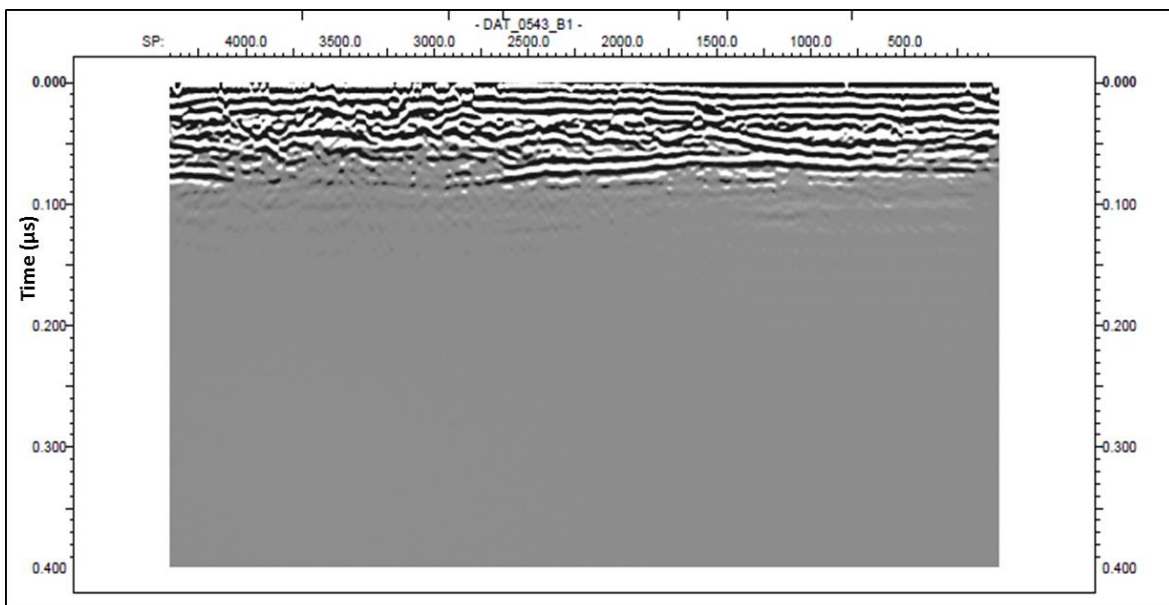


Figura 79: Radargrama do Perfil 0543 adquirido pela antena de 100 MHz (shot point x time).

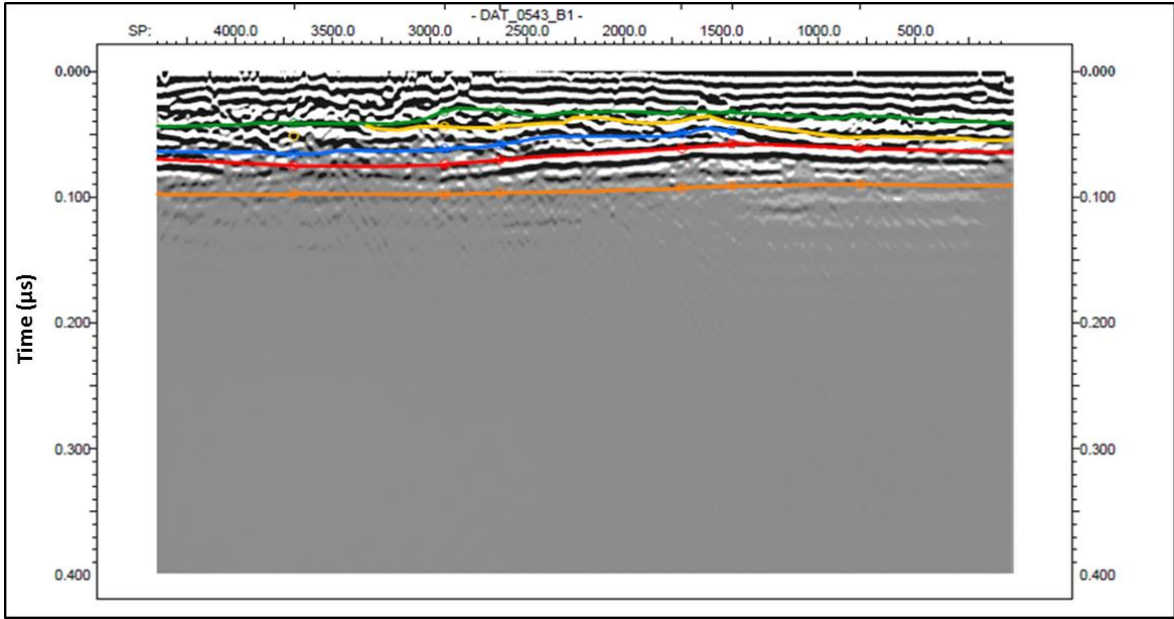


Figura 80: Radargrama do Perfil 0543 com interpretação dos horizontes (shot point x time).

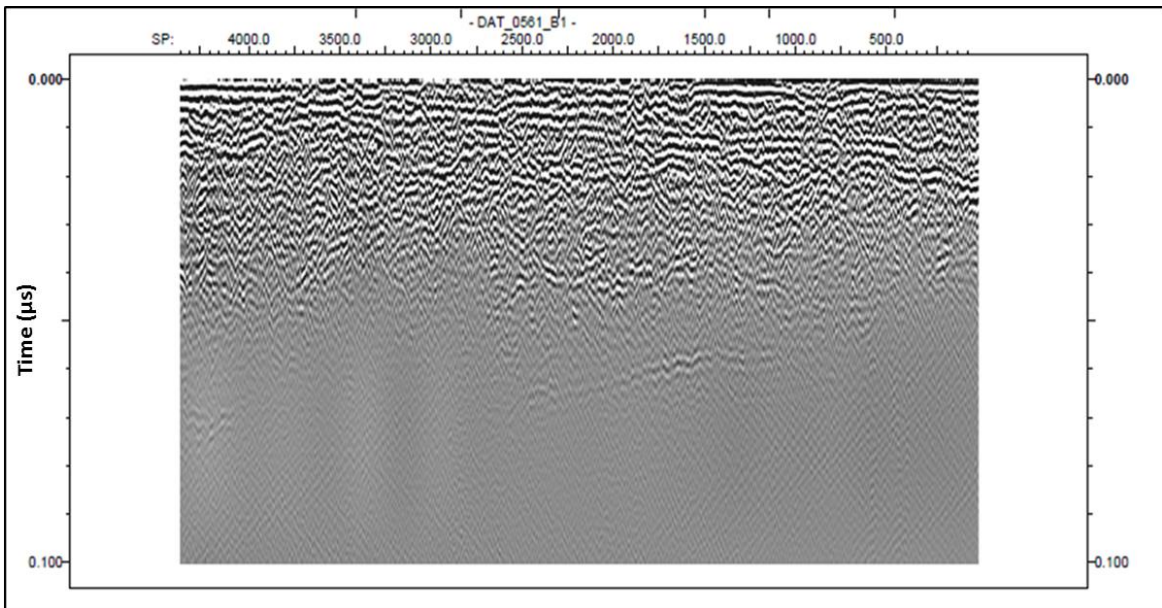


Figura 81: Radargrama do Perfil 0561 adquirido pela antena de 500 MHz (shot point x time).

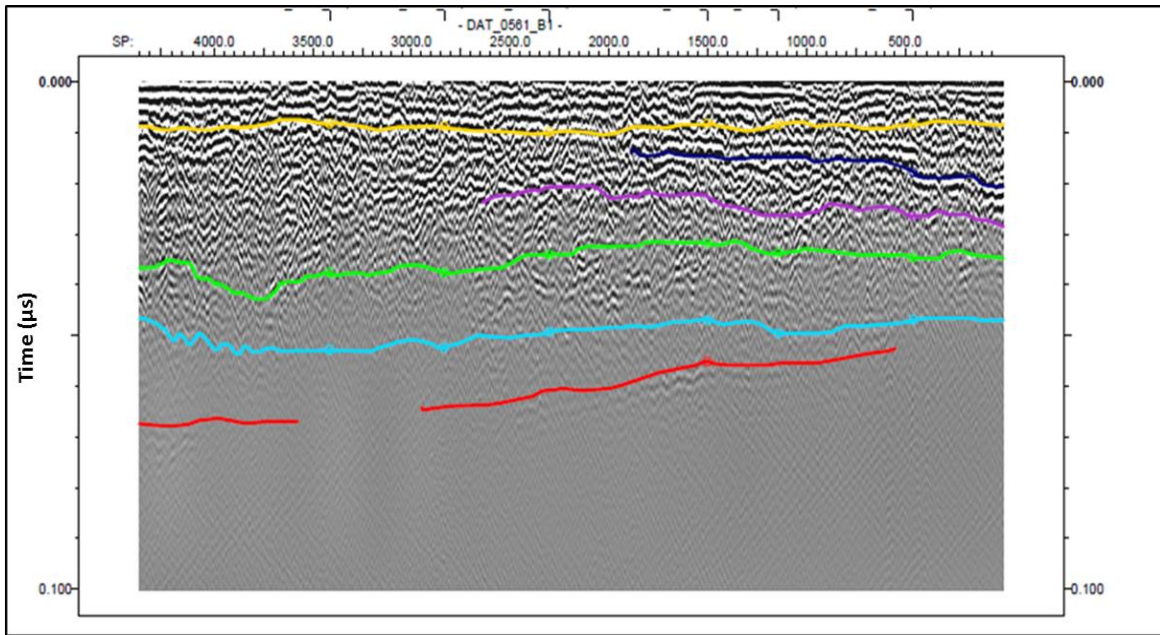


Figura 82: Radargrama do Perfil 0561 com a interpretação dos horizontes (shot point x time)

O Software *Kingdom Suite* utilizado permite também a visualização dos horizontes interpretados em 3D. Na análise em 3D dos horizontes chegou-se à seguinte conclusão: tanto a antena de 100 MHz como as de 500 MHz as zonas mais profundas (marcadas pelas cores mais frias, neste caso azul) encontram-se mais na região W, sendo esta região paralela à Ria de Aveiro (Figuras 83 e 84).

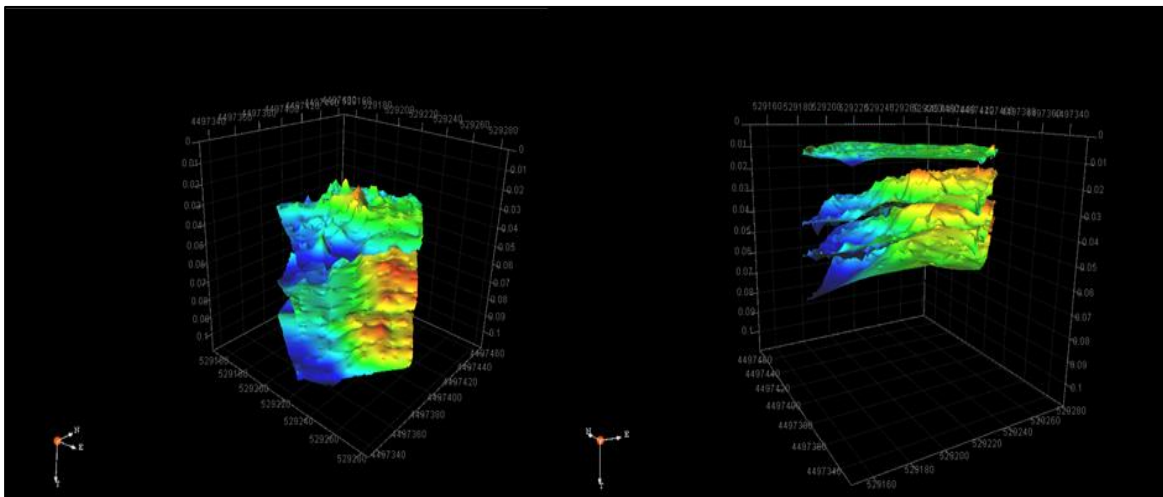


Figura 83: Visualização em 3D dos horizontes interpretados pelas secções de georadar obtidos com a antena de 100MHz (à esquerda) e com a antena de 500MHz (à direita).

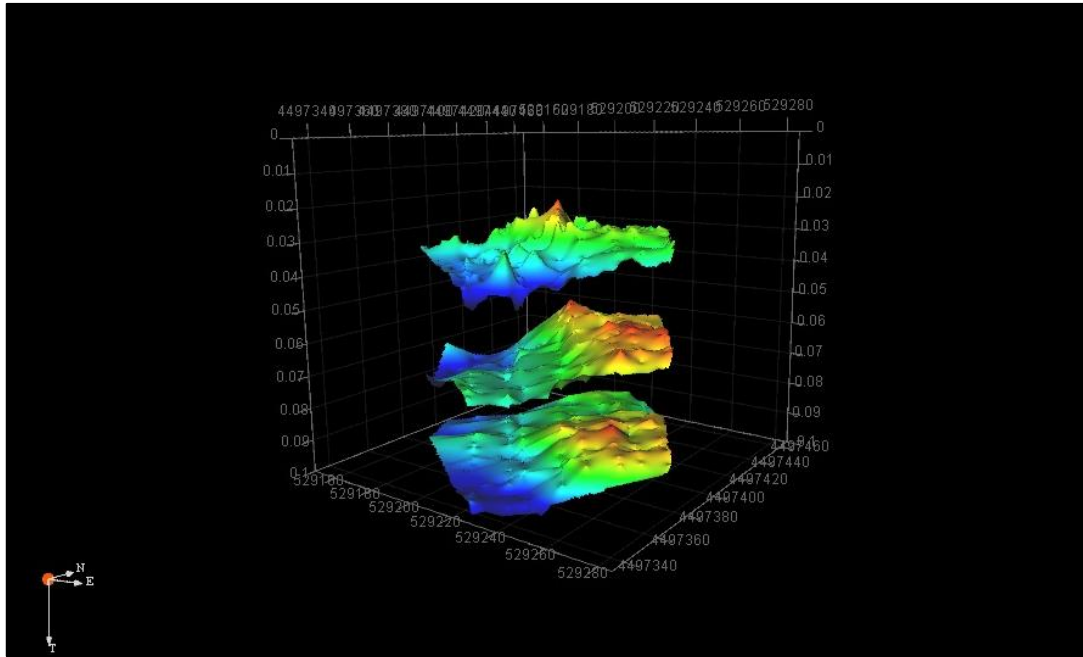


Figura 84: Visualização em 3D dos horizontes interpretados (Antena de 100 MHz).

5. Interpretação integrada dos dados geofísicos e geotécnicos

Neste capítulo efetua-se a correlação e interpretação integrada dos dados obtidos no campo pelos métodos geofísicos e ensaios geotécnicos. Para este efeito recorreu-se ao *Software RockWorks 17*. Para tal foram importados os resultados obtidos pela refração sísmica e pelo georadar e sobrepostos com os dados dos furos obtidos pelos ensaios com DPSH. A combinação destes métodos permite ajustar os resultados e verificar os padrões correlacionáveis entre eles.

O método geotécnico permite de uma forma direta estimar as litologias presentes na sub-superfície de acordo com as propriedades físicas e mecânicas dos materiais e com o conhecimento geológico prévio da região, mas trata-se de uma investigação pontual. A refração sísmica e o georadar como métodos indiretos permitem caracterizar as estruturas geológicas de sub-superfície e verificar como elas se comportam lateralmente e uma vez calibradas com os dados de DPSH permitem cartografar em 3D as várias unidades de sub-superfície.

O modelo de velocidades das camadas obtido pela aquisição dos perfis de refração sísmica apresenta resultados satisfatórios com ótima resolução, e quando combinado com os dados obtidos pelo DPSH pode-se perceber que existe um padrão claramente correlacionável (Figuras 85 e 86). Quando se sobrepõem os dados do DPSH com a refração sísmica permite-nos saber como as camadas se comportam lateralmente, a velocidade de propagação das ondas sísmicas P (V_p), a geometria das camadas e as espessuras das mesmas.

A camada de aterro corresponde a camada com baixa velocidade compreendidas entre 398-501 m/s (representado no modelo sísmico em tons azuis mais escuros), que pode ser interpretada como a camada superficial não consolidada. A espessura desta camada em ambos os métodos varia entre 2-4 metros de profundidade. Nos lodos a velocidade de propagação das ondas P (V_p) varia entre 501-1300 m/s. A espessura da camada dos lodos aumenta no sentido NE-SW, sendo neste caso a região SW mais profunda, atingindo profundidades até 20 metros aproximadamente.

Como as areias lodosas e cascalhentas aparecem em pequenas proporções em relação as outras camadas, não possível determinar a sua velocidade de propagação nem verificar como estas variam lateralmente.

As camadas das “Argilas de Aveiro”, do Cretácico, apresentam velocidades de propagação (V_p) superiores em relação às restantes formações, compreendidas entre 1300-2000 m/s, o que corresponde a uma camada bastante mais consolidada.

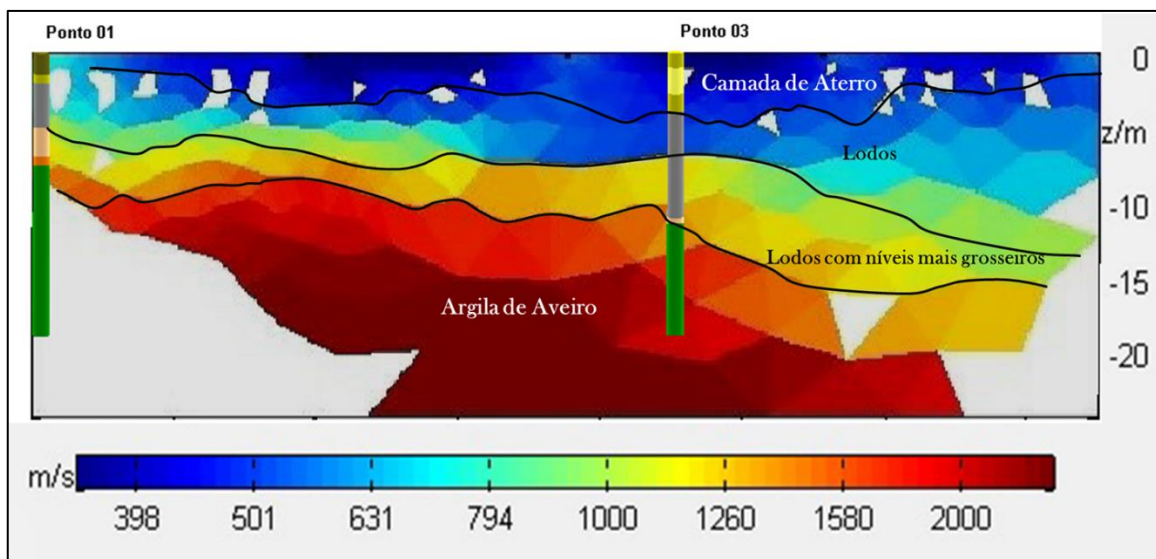


Figura 85: Correlação entre os resultados obtidos pelo DPSH e pela sísmica de refração do perfil 1.

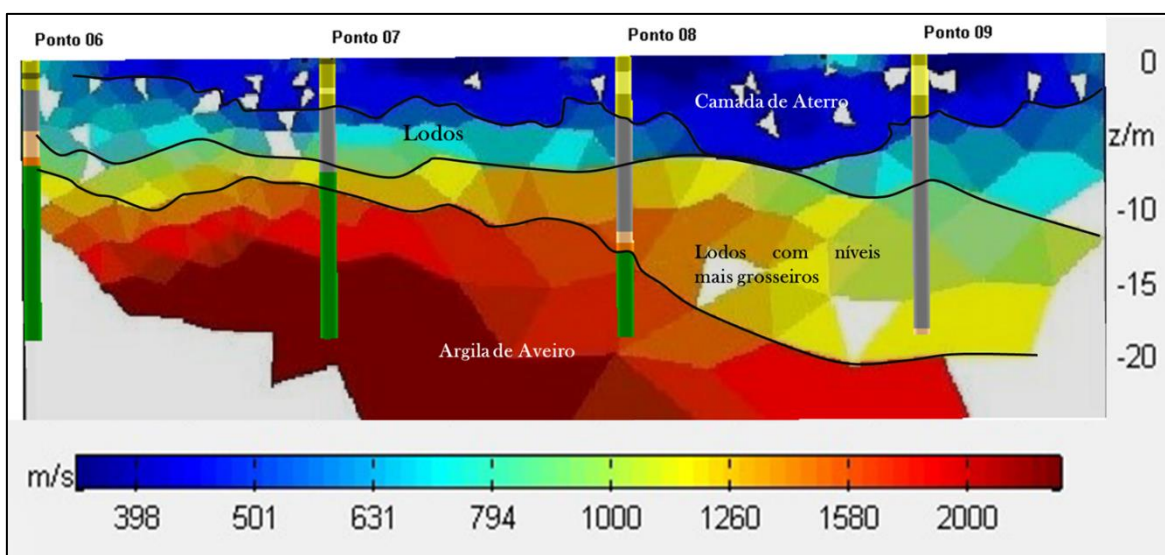


Figura 86: Correlação entre os resultados obtidos pelo DPSH e pela sísmica de refração do perfil 2.

Em relação aos dados obtidos pelo georadar, trata-se claramente de uma ferramenta que além contribuir para a caracterização das estruturas geológicas com alta resolução, permite distinguir o contacto dos lodos. Devido às propriedades de propagação das ondas eletromagnéticas em meios argilosos e saturadas em água, é possível distinguir o contacto entre a camada de aterro com os lodos. As secções obtidas pela antena de 100 MHz permitem identificar claramente este contacto (Figuras 87 a 89). Este contacto é marcado por um refletor forte quase horizontal; abaixo deste refletor começa haver atenuação forte do sinal. Esta atenuação do sinal possivelmente está associada à presença de lodos e ao

teor de água. Ao propagar-se num meio rico em argila e água, as ondas eletromagnéticas sofrem efeitos de atenuação e de dispersão. Acima do contato dos lodos evidenciam-se refletores quase horizontais mais perto da superfície, que correspondem às camadas de aterro.

Através da correlação dos dados DPSH com a antena de georadar de 500 MHz é possível observar com melhor resolução as camadas de aterro (Figuras 90 a 92).

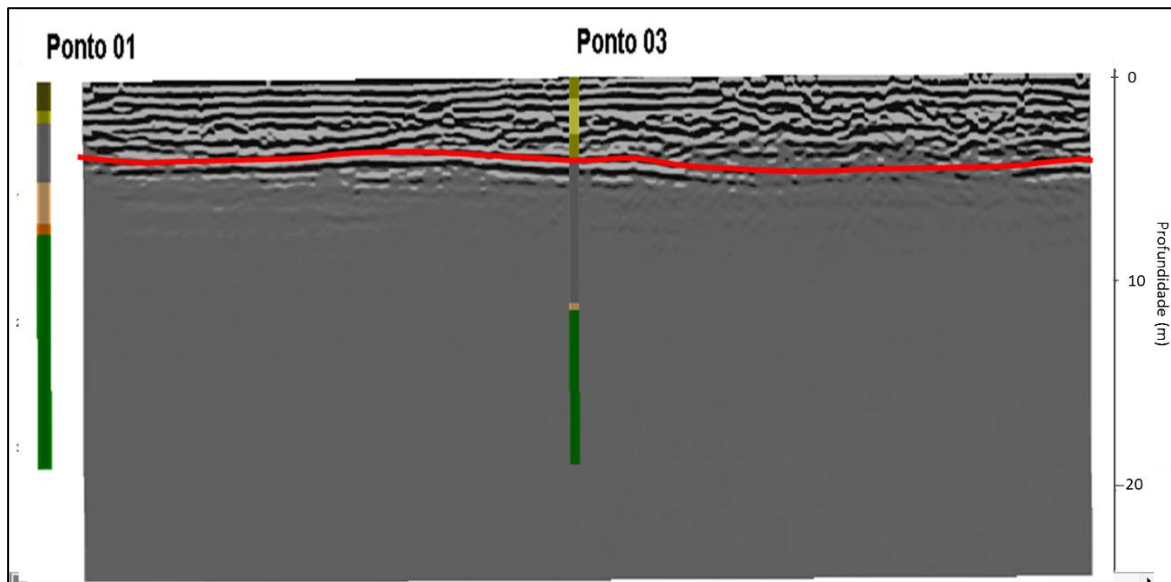


Figura 87:Correlação entre os resultados obtidos pelo DPSH e os dados obtidos pelo georadar com a antena de 100MHz. Identificação do contacto dos Lodos (linha vermelha).

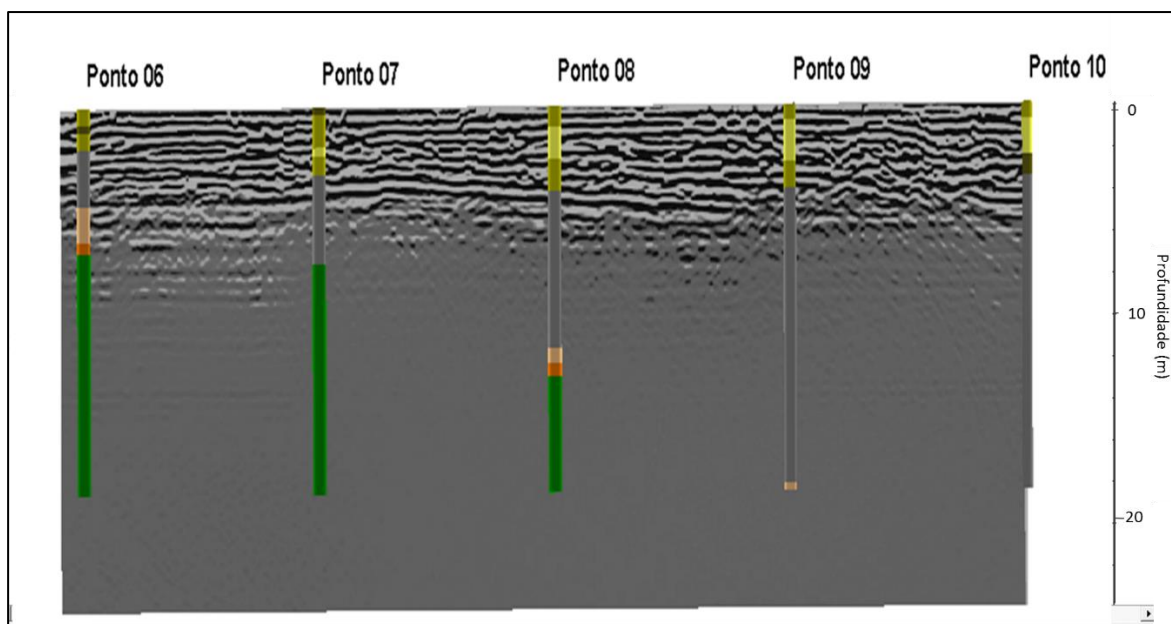


Figura 88:Correlação entre os resultados obtidos pelo DPSH e georadar com antena de 100MHz.

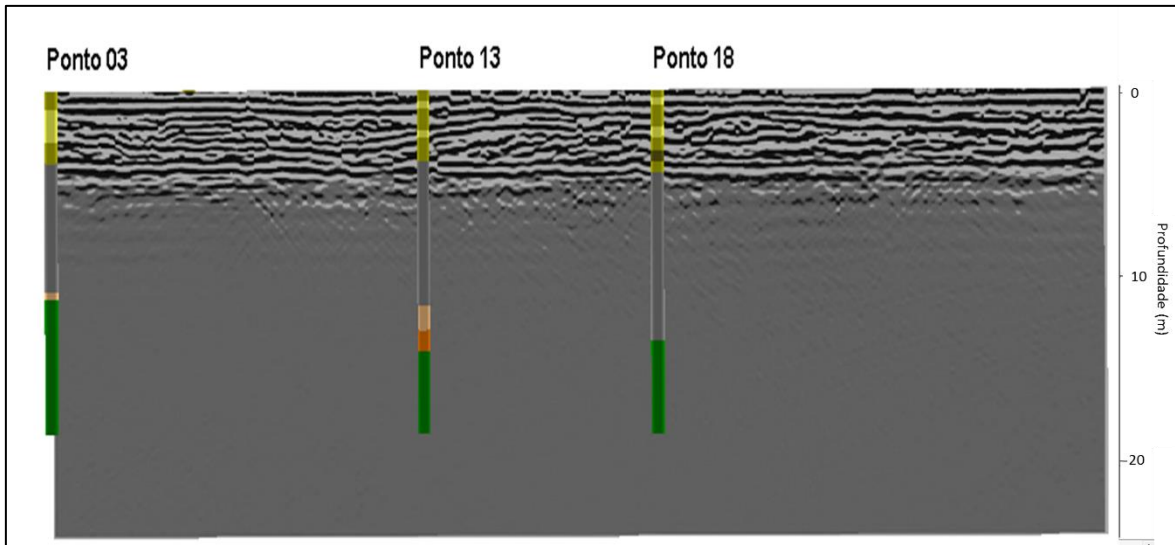


Figura 89: Correlação entre os resultados obtidos pelo DPSH e pelos dados obtidos pelo georadar com a antena de 100MHz.

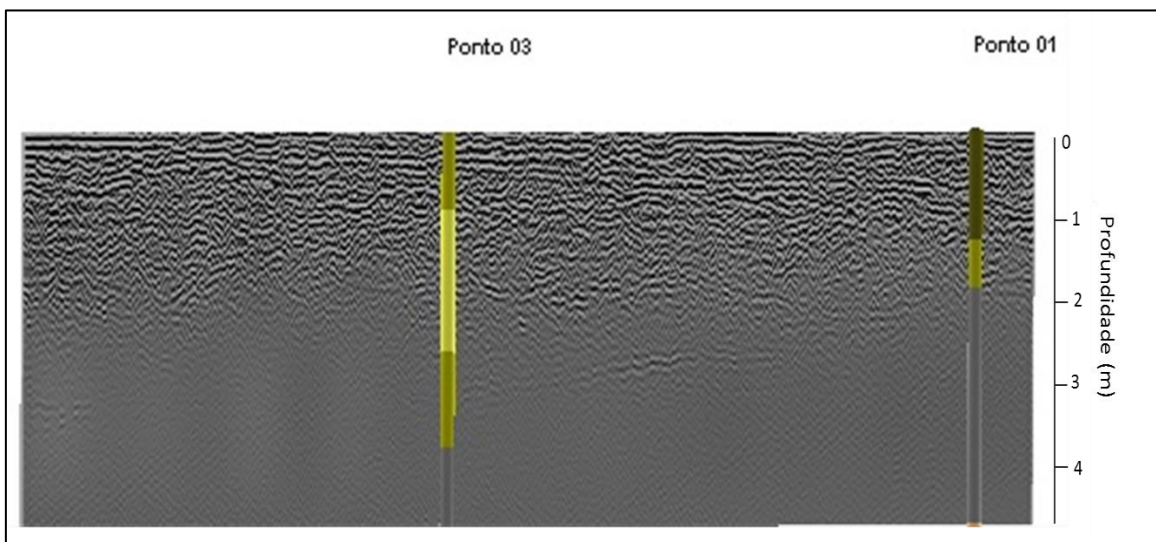


Figura 90: Correlação entre os resultados obtidos pelo DPSH e pelos dados obtidos pelo georadar com a antena de 500MHz.

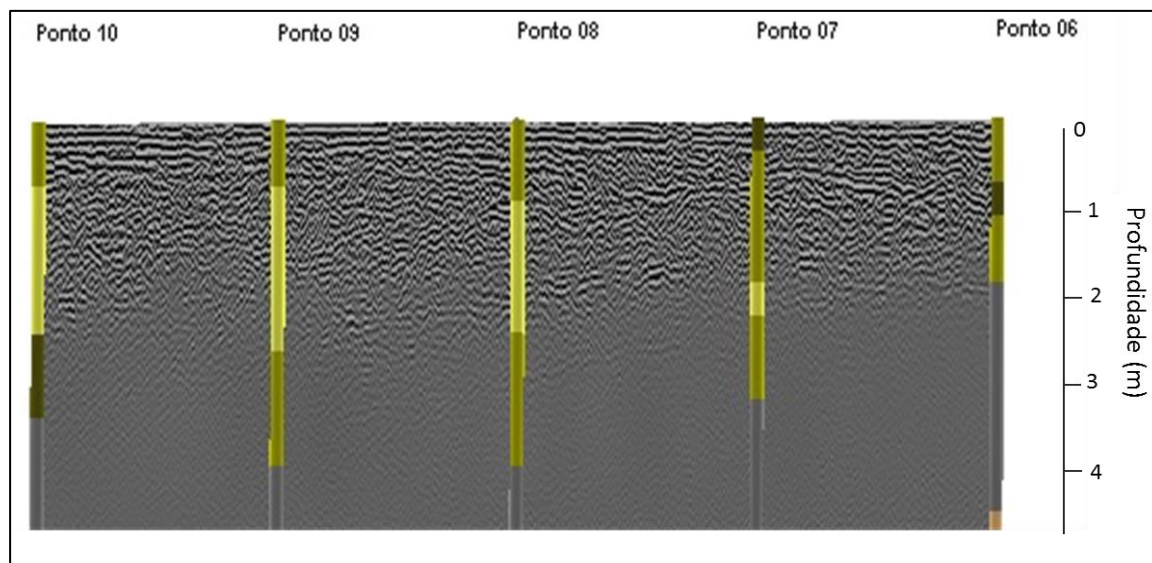


Figura 91: Correlação entre os resultados obtidos pelo DPSH e pelos dados obtidos pelo georadar com a antena de 500MHz.

6. Discussão e Conclusões

Este trabalho procura contribuir para um melhor conhecimento sobre a correlação entre os métodos geofísicos e geotécnicos na caracterização dos solos de sub-superfície, particularmente em áreas de aterros mais ou menos complexos, e saber como estes métodos se podem complementar calibrando os resultados geofísicos obtidos com os dados geotécnicos de forma a obter uma caracterização mais profunda da geologia de sub-superfície. A imagem da distribuição espacial e correlação lateral oferecida pelos métodos geofísicos permite uma correta interpolação entre os dados de DPSH, que têm um caráter essencialmente pontual. O estudo da presente dissertação permitiu assim obter uma visão global sobre o modo de funcionamento e a aplicabilidade da combinação de métodos geofísicos (georadar e refração sísmica) e geotécnico (DPSH) na caracterização geológica em sub-superfície.

A investigação pelo método geofísico e geotécnico contribui para o estudo da geologia de sub-superfície no que diz respeito a caracterização dos solos em relação ao tipo de litologia e o comportamento das estruturas geológicas relativamente às suas propriedades físicas e mecânicas. Foi possível obter resultados satisfatórios em relação aos métodos utilizados para a caracterização da geologia da sub-superfície. A interpretação conjunta de ambos os métodos permitiu a identificação das estruturas geológicas presentes abaixo da camada de aterro, a identificação das interfaces várias das camadas e conhecer o comportamento das estruturas geológicas em profundidade.

Os ensaios de DPSH permitiram verificar que a geologia superficial da área de estudo é caracterizada maioritariamente por aterros, lodos e as chamadas “Argilas de Aveiro”, também podendo ainda encontrarem-se em proporções menores areia lodosa e cascalhenta. A espessura da camada dos lodos aumenta para SW.

Recorrendo aos perfis da refração sísmica foi possível identificar as várias estruturas geológicas da sub-superfície, as suas espessuras e as respetivas velocidades de propagação das ondas sísmicas P.

Os resultados obtidos pelo georadar, permitiram também a identificação das camadas com elevada resolução, nomeadamente a camada de aterro e a profundidade do contato dos lodos. No entanto, o georadar apresenta limitações relativamente à profundidade de penetração. As ondas eletromagnéticas na presença de lodos e argilas (sempre mais condutivas que as areias e siltes) limita a penetração do sinal.

No entanto, apesar dos resultados que se consideram muito positivos, nem sempre é fácil correlacionar as imagens (refletores em tempo no caso do GPR) ou as propriedades (V_p no caso da sísmica) com as propriedades mecânicas inferidas por ensaios geotécnicos (neste caso o DPSH).

No caso do DPSH os resultados e as suas correlações baseiam-se em fórmulas empíricas e existem algumas exceções de aplicação (se por exemplo o DPSH encontrar um clasto no seio de argilas haverá a percepção falsa de que se encontrou uma intercalação rígida – neste caso a sísmica e o georadar poderão eventualmente em alguns casos ajudar a esclarecer essa situação). Também, tal como referido acima, os DPSHs e outros ensaios geotécnicos são geralmente de cariz pontual ao passo que nos ensaios geofísicos se torna possível observar a continuidade espacial, pelo que estes métodos quando usados em conjunto permitem uma caracterização muito satisfatória das áreas de estudo.

A interpretação conjunta depende contudo muito da experiência prática do utilizador e do princípio de que os limites que cada método estabelece são em função dos contrastes de propriedades físicas e mecânicas a que cada um deles é sensível. Nem sempre as camadas que se detetam na sísmica serão as mesmas ou às mesmas profundidades que as detetadas pelo GPR pelo DPSH.

Trabalho Futuro

De todo o trabalho realizado na área de estudo (Campo de Teste de métodos geofísicos) ressalta a necessidade de realizar outros ensaios geofísicos e geotécnicos futuros que permitam uma interpretação mais profunda e precisa em relação aos dados que se obteve, como por exemplo a realização de sondagens geotécnicas que permitam a recolha de amostras para se ter com precisão a classificação litológica da área.

Em relação aos métodos já realizados neste trabalho, ressalta a necessidade de dar a continuidade à aquisição de dados com os ensaios de DPSH e de refração sísmica, de forma a completar a malha inicialmente proposta, o que não foi possível neste trabalho dada a sua duração limitada.

Igualmente seria importante utilizar piezómetros para determinar o nível freático e adquirir perfis com outros métodos geofísicos, nomeadamente método de resistividade (na configuração de Wenner e Dipolo-Dipolo) para a correlação com outros métodos já realizados.

7. Bibliografia

- Alves, A., (2002). Avaliação da Capacidade de Suporte e Controle Tecnológico de Execução da Camada Final de Terraplanagem Utilizando o Penetrómetro Dinâmico de Cone. Dissertação de Pós-Graduação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Alves Filho, C. E. S. (2010). Correlações para obtenção de parâmetros geotécnicos de argilas compressíveis com utilização do penetrómetro dinâmico leve.
- Annan, A. P. (1996). Transmission dispersion and GPR. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 1(B), 125-136.
- Anomohanran, O. (2013). Seismic refraction method: A technique for determining the thickness of stratified substratum. *American Journal of Applied Sciences*, 10(8), 857-862.
- Aranha, P. R. A., & Horn, A. H. (2000). Investigações estruturais de um dique máfico caulizado na Serra do Espinhaço Meridional, utilizando o GPR. *Revista Geonomos*, 8(1).
- Azwin, I. N., Saad, R., & Nordiana, M. (2013). Applying the Seismic Refraction Tomography for Site Characterization. *APCBEE Procedia*, 5, 227-231.
- Barraca, N. R. S. (2013). Aplicação da técnica Georadar à reabilitação de património edificado.
- Bessa, C. S. R. B. (2009). Caracterização Mecânica dos maciços através de ensaios in situ Faculdade de Engenharia (Tese de Douramento, Universidade da Beira Interior).
- Chiossi, N. (2015). Geologia de engenharia. Oficina de Textos.
- Daniels, J. J. (2000). Ground penetrating radar fundamentals. Prepared as an appendix to a Report to the US EPA, Region V, 1-21.
- Davis, J. L., Annan, A. P., & Vaughan, C. (1987). Placer exploration using radar and seismic methods. *CIM bulletin*, 80 (898), 67-72.
- de Azevedo, P. A., & Rocha, M. P. Estudo do método geofísico de sísmica de refração com aplicação no futuro trecho norte do metrô de Brasília.
- DECO Geophysical, 2013. RadExPro Plus User Manual version 2013.1. DECO Geophysical – Software Company.
- Dias, F. A. S. (2013). Escavações profundas em meios urbanos (Tese de Douramento, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa).
- Doolittle, J. A., & Collins, M. E. (1995). Use of soil information to determine application of ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 33(1), 101-108.

Dourado, J. C., Kiang, C. H., Malagutti Filho, W., & Braga, A. C. O. (2003). Utilização de radar de penetração no solo na detecção de estruturas artificiais rasas no solo. *Geociências*, 22, 75-81.

Duarte, I. M. R., Ladeira, F. L., & Gomes, C. F. Características Geológico-Geotécnicas do solo residual do Granito de Marvão (Portalegre) Geological and Geotechnical Characteristics of residual soil of the Marvão Granite (Portalegre).

Fassarella, L. (2007). Lei de Snell generalizada. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29 (2), 215-224.

Gandolfo, O. C., Souza, L. A., Tessler, M. G., & Rodrigues, M. (2001). Estratigrafia rasa da Ilha Comprida (SP): Um exemplo de aplicação do GPR. *Brazilian Journal of Geophysics*, 19(3), 217-250.

Gonçalves, L. M. B. (2013). Estudo geoarqueológico com Georadar: aplicação aos contextos arqueológicos da Pré-História recente à Proto-História do NW de Portugal.

Gonçalves, V., Dias, P., Almeida, F., Batista, J., & Santos, B. S. (2009). Dados geotécnicos e geofísicos: exploração de novas formas de visualização. *Actas do 17.º Encontro Português da Computação Gráfica*.

Günther, T. (2005). An algorithm for refraction tomography. Retrieved from: <http://www.resistivity.net/index.php?id=ra2dtomo>.

Howe, A. P. (2000). Ground Penetrating Radar for the parameterisation of subsurface hydrological properties (Doctoral dissertation, University of London).

Jarentchuk Junior, O. (2013). Aplicação do georradar (GPR) na prospeção eletromagnética de solos: potencialidade e limitações. (Tese de mestrado, universidade federal do paraná, Curitiba).

Kearey, P., Brooks, M., & HILL, I. (2009). *Geofísica de exploração: Tradução Maria Cristina Moreira Coelho*.

Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2013). *An introduction to geophysical exploration*. John Wiley & Sons.

Khan, M. Y. (2013). Engineering geophysical study of unconsolidated top soil using shallow seismic refraction and electrical resistivity techniques. *Journal of Environment and Earth Science*, 3 (8), 120-127.

Khodaparast, M., Rajabi, A. M., & Mohammadi, M. (2015). The new empirical formula based on dynamic probing test results in fine cohesive soils. *International Journal of Civil Engineering*, 13(2 B), 105-113.

Loureiro, F.O. (2013). Análise da Geometria e Correção Estática no Processamento Sísmico 3D, (Universidade Federal Fluminense).

Lukic, I., Barac, D., & Zovko, D. (2013, July). Seismic Refraction Method. International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering.

Litoral, P. (2012). Polis Litoral da Ria de Aveiro.

Miranda, J. M., Luís, J. F., Costa, P. T., & Santos, F. (2010). Fundamentos de geofísica.

Narwold, C. F., & Owen, W. P. (2002, April). Seismic refraction analysis of landslides. In Proceedings of the Geophysics 2002 Conference, Los Angeles, California.

Neto, P. X., & de Medeiros, W. E. (2006). A practical approach to correct attenuation effects in GPR data. *Journal of Applied Geophysics*, 59(2), 140-151.

Neves, S., Borges, J., & Caldeira, B. (2014). Comparação de fontes sísmicas através de ensaios de refração sísmica e multichannel analysis of surface waves (MASW).

Neves, S., Borges, J. F., Casação, J., Caldeira, B., & Bezzeghoud, M. (2014). Estimativa de modelos de velocidade obtidos através de ensaios de refração sísmica e MASW, na localidade dos Flamengos (Ilha do Faial, Açores).

Olhoeft, G. R., & Selig, E. T. (2002, April). Ground-penetrating radar evaluation of railway track substructure conditions. In Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR2002) (pp. 48-53). International Society for Optics and Photonics.

Perreira, T.C. (2010), Uma contribuição para determinação de propriedades físicas e mecânicas de materiais granulares compactos, com recurso a penetrometro dinâmico ligeiro, (Relatório de Projeto de Mestrado), Universidade do Porto, Portugal.

Pereira, T. C. (2012). Uma contribuição para a determinação de propriedades físicas e mecânicas de materiais granulares compactos, com recurso a penetrometro dinâmico ligeiro

Porsani, J. L., Mendonça, C. A., Bettencourt, J. S., Hiodo, F. Y., Vian, J. A. J., & Silva, J. E. D. (2004). Investigações GPR nos distritos mineiros de Santa Bárbara e Bom Futuro: Província estanífera de Rondônia. *Revista Brasileira de Geofísica*, 22(1), 57-68.

Rocha F.J.F.T. (1993) – “Argilas aplicadas a estudos Litoestratigráficos e Paleoambientais na Bacia sedimentar de Aveiro”. (Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro).

Redpath, Bruce B., 1973, Seismic refraction exploration for engineering site investigations, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Explosive Excavation Research Laboratory, Technical Report E-73-4, Livermore, California, 51 p.

Ribeiro, J. M. C. (2011). Avaliação e correlação de parâmetros físicos e mecânicos de um solo residual granítico (Tese de Doutorado, Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto).

RockWare Inc (2008) RockWorks 15 manual

Sandmeier, K. (2000). Reflexw Version 6.0, Windows 9x/2000/NT. Program for the processing of seismic, acoustic or eletromagnetic reflection, refraction and transmission data. Germany.

Salgado, R., & Yoon, S. (2003). Dynamic cone penetration test (DCPT) for subgrade assessment. Joint Transportation Research Program, 73.

Sara electronic instruments (2012) User's Manual.

Spagnoli, G. (2007). An empirical correlation between different dynamic penetrometers. Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE), 12.

Saarenketo, T. (1998). Electrical properties of water in clay and silty soils. Journal of Applied Geophysics, 40(1), 73-88.

Saarenketo, T. (2006). Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys (No. 471). (PhD Thesis, Faculty of Science, Department of Geosciences, University of Oulu, Finland).

Souza, L. A. P & Gandolfo, OCB (2013). Métodos geofísicos em geotécnica e geologia ambiental. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. ABGE, 2, 9-27.

Waschkowski, E. (1983). Le pénétrömètre dynamique. Bull. Lab. Ponts et Chaussées, 125, 95-103.

Xavier Neto, P. (2006). Processamento e interpretação de dados 2D e 3D de GPR: aplicações no imageamento de feições kársticas e estruturas de dissolução no campo de petróleo de Fazenda Belém-CE.

Veiga, A. Q. N. (2012). Caracterização geotécnica dos terrenos do vale tifónico Parceiros-Leiria.

Normas:

ISO, E. 22476-2 2005: Geotechnical Investigation and Testing—Field Testing—Part 2: Dynamic probing. CEN, Brussels.

Páginas de Web consultadas:

Métodos Sísmicos - Sísmica de refração. Disponível em: <http://geo.web.ua.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=165%3Ametodos-sismicos&catid=36%3Ametodos-geofisicos&Itemid=60&limitstart=1>. Acesso em: 4 abril, 2016.

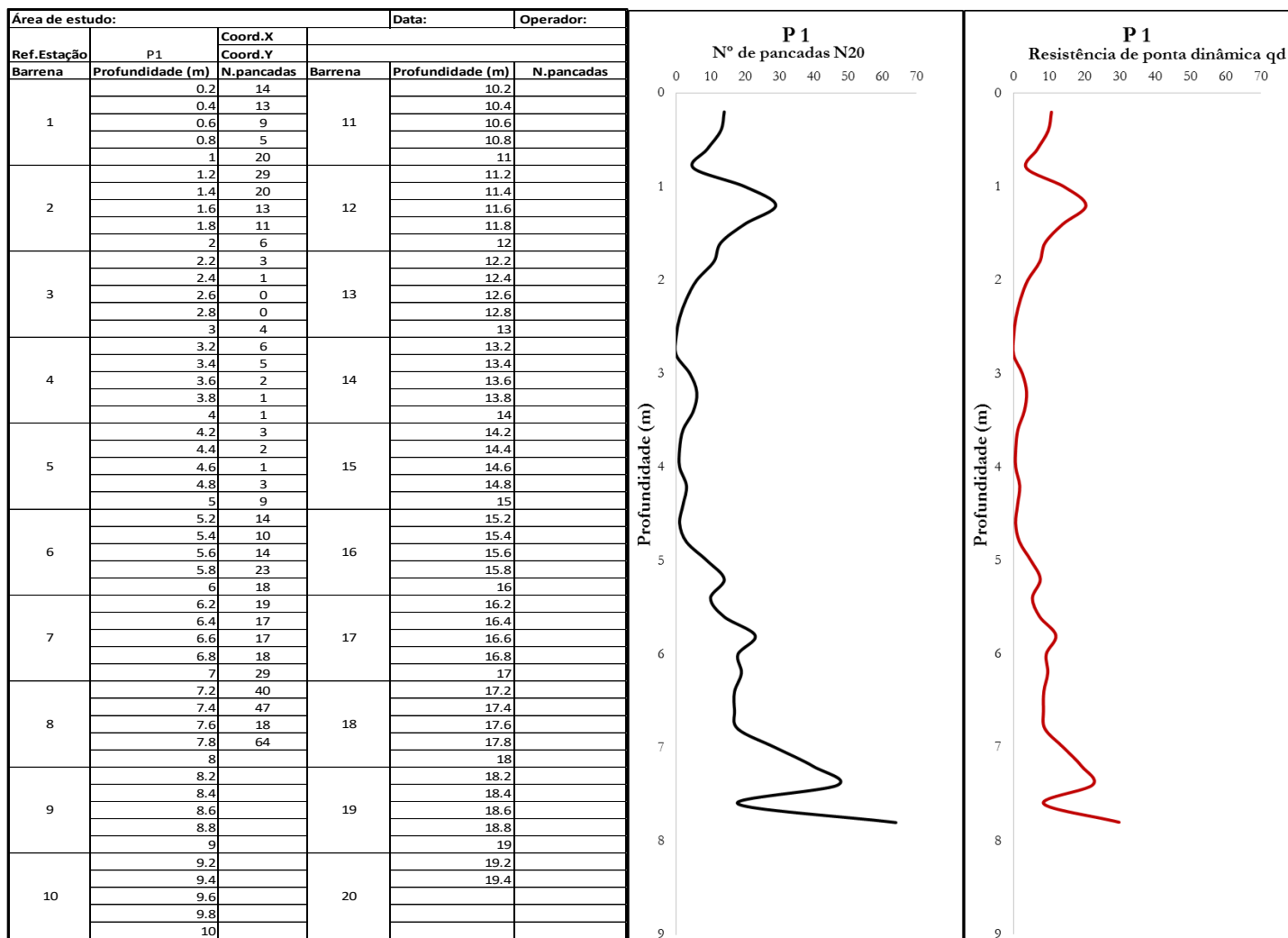
TG 63-150 | Richter Mérnöki Iroda és Szolgáltató Kft. - HU. Disponível em: <<https://richterkt.hu/kereskedelmi-szolgalatasok/talajszondak/tg-63-150/>>. Acesso em: 10 de maio, 2016.

PENETROMETER PAGANI TG 73-200 IN STATIC OR STATIC-DYNAMIC VERSION. Disponível em: <<http://trends.directindustry.com/pagani-geotechnical-equipment/project-124137-127913.html>>. Acesso em: 10 maio, 2016.

Seismic refraction. Disponível em: <<http://tpgeo.com.vn/seismic-refraction/>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

Anexos

Anexo 1- Folha de Registo do Ensaio DPSH



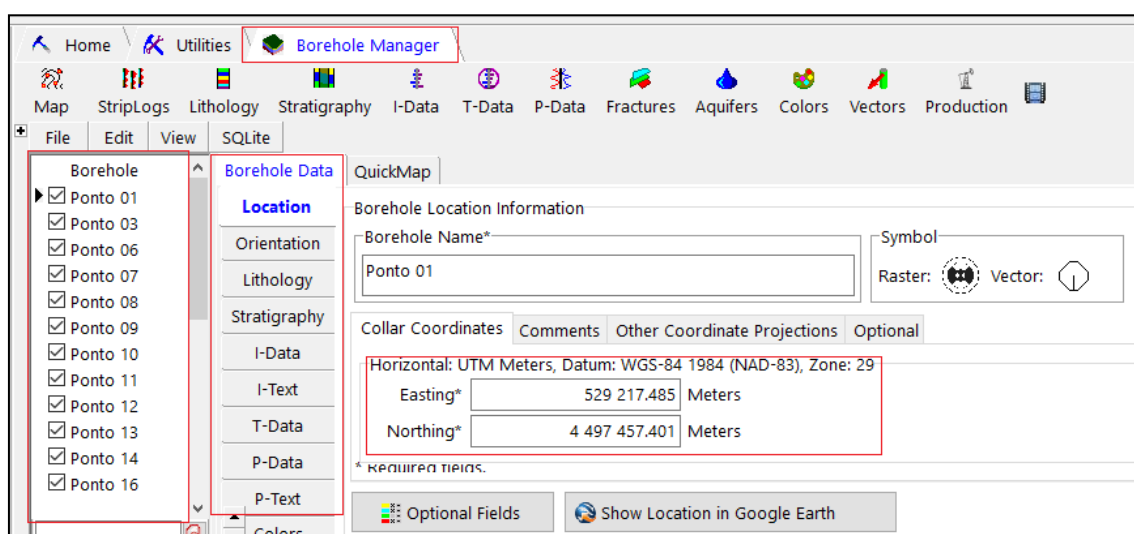
Anexo 1 A: Folha de registo dos dados de campo e os gráficos de N_d e q_d do ponto P1.

Anexo 2- Procedimento no Software Rockworks17

Familiarização e procedimentos realizados no software *RockWorks* para correlação litológica

O *RockWorks* é um pacote de *software* integrado para a gestão, análise, correlação espacial e visualização de dados geológicos. Este programa permite a visualização de dados de sub-superfície através da projeção de diagrfias, seções transversais, diagramas de “cerca”, modelos sólidos, mapas estruturais e isopácos em 2D e 3D.

Dentro do *RockWorks* é possível encontrar as seguintes ferramentas: ***Borehole data Manager***, que facilita a entrada de dados (geofísicos, geoquímicos, geotécnicos, litológicos, estratigráficos, níveis de água, fraturas e dados de poços); ***RockWorks Utilities***, constituído por linhas e colunas e um conjunto de barras de ferramentas, que permite criar gráficos, diagramas, mapas, modelagem sólida, análise 2D e 3D, cálculos estatísticos e muito mais (Anexo 2A).

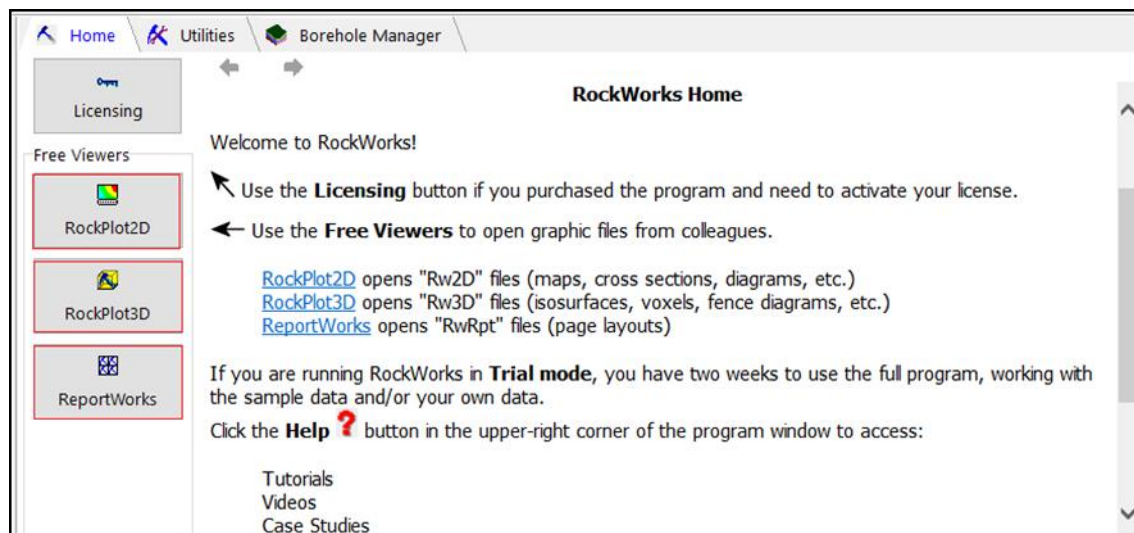


Anexo 2 A: *Borehole Manager*, *RockWorks Utilities*.

Existem três janelas de exibição gráfica no *RockWorks* (Anexo 2B):

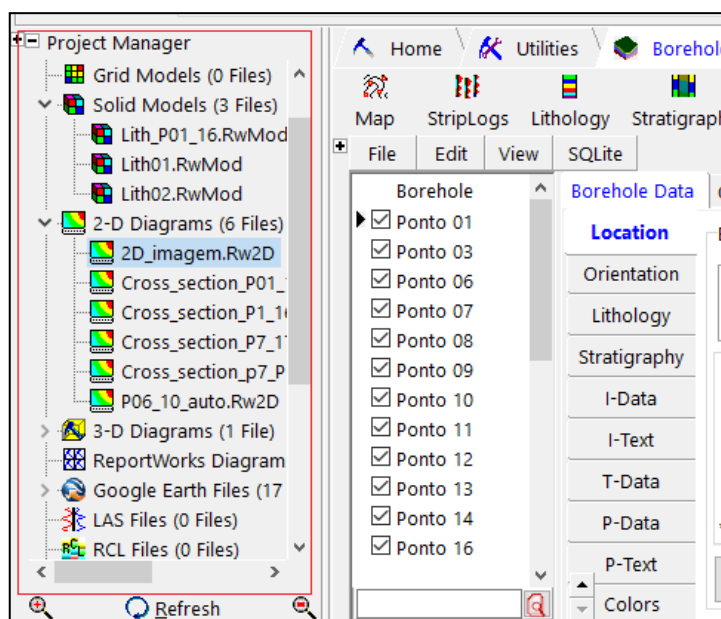
- ***RockPlot2D***: permite fazer o *display* dimensional, imagens "planas", tais como mapas de contorno, diagrfias e seções transversais. Também permite guardar e exportar os dados.

- **RockPlot3D:** é uma janela de exibição gráfica com fácil visualização de imagens 3D, como diagrfias, diagramas de cerca, modelos sólidos e superfícies 3D. Também permite fazer a rotação interativa, panorâmica e *zoom* assim como ajustar a iluminação e ajustar cores.
- **ReportWorks:** usado para o *layout* das páginas para visualização e impressão.



Anexo 2 B: RockWorks Home.

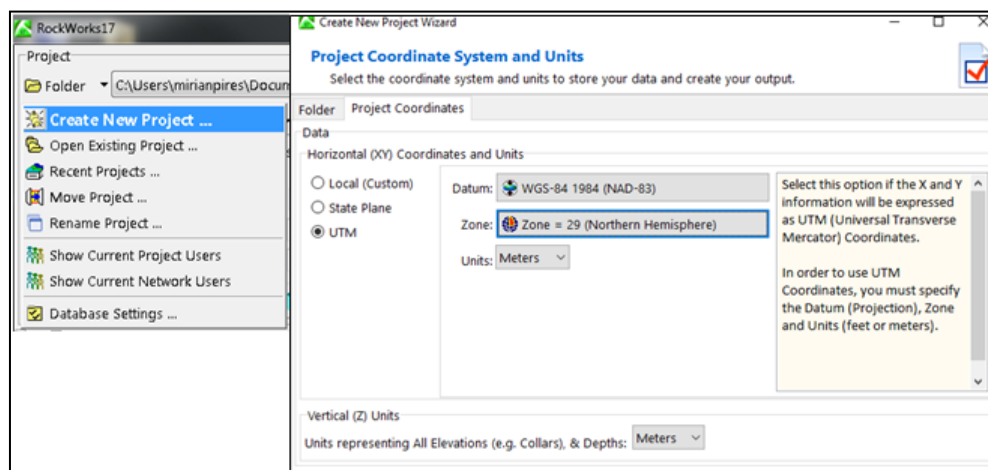
Project Manager: é um painel que pode ser exibido no lado esquerdo da janela do programa. Exibe todos os arquivos criados na pasta do projeto atual (Anexo 2C).



Anexo 2 C: Project Manager.

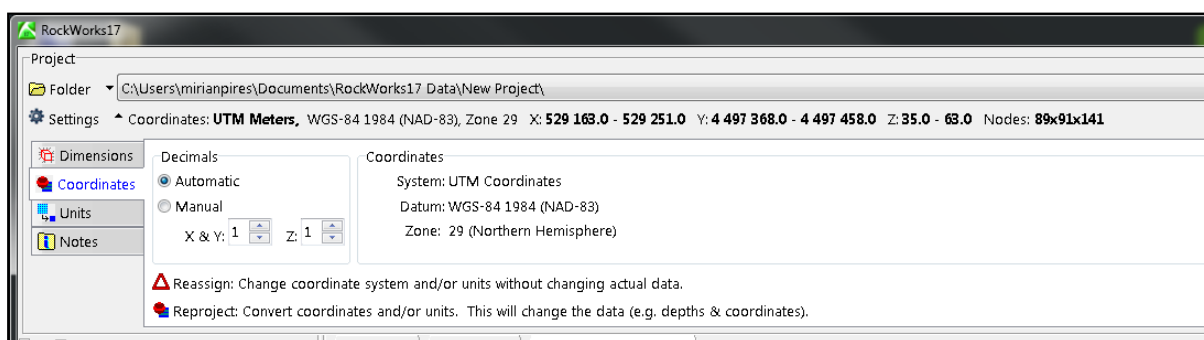
Procedimento para criar um novo projeto

O primeiro passo é criar um novo projeto, ao qual é atribuído um nome. Para isso, começa-se por clicar na opção **FOLDER** no canto superior esquerdo (Anexo 2D). Ao criar um projeto é solicitado o tipo de projeção de coordenadas e a unidade a utilizar que, neste estudo, foi UTM, Zone 29N WGS 84/WGS-84, unidade em metros.



Anexo 2 D: Criação de novo projeto.

Deve ter-se em atenção o sistema de coordenadas no *RockWorks*. A definição do sistema de coordenadas é fundamental para a projeção dos dados. Caso não seja definido desde de início o sistema de coordenadas, é possível mudar ou converter o sistema de coordenadas para um outro sistema desejado, tal como ilustra a imagem (Anexo 2E).

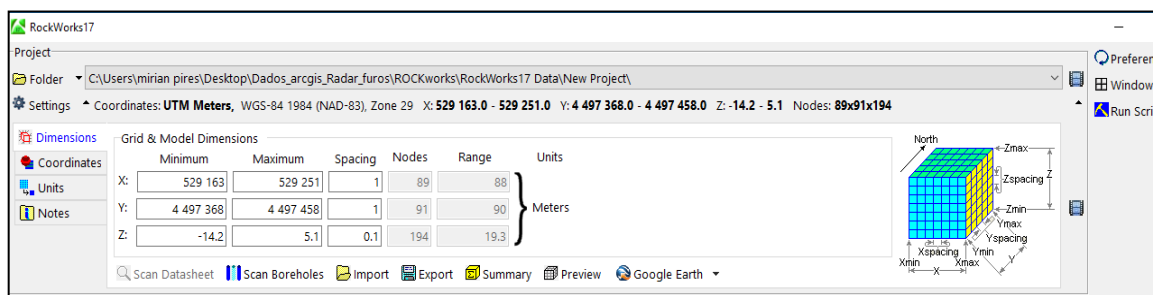


Anexo 2 E: Conversão do Sistema de coordenadas.

O passo seguinte consiste em inserir os dados. Os dados podem ser introduzidos manualmente através da importação dos dados a partir de uma folha de *Excel* ou através de outros formatos que podem ser lidos pelo *RockWork17*. Neste estudo, os dados foram

inseridos manualmente. Foi necessário introduzir a localização dos dados, as coordenadas de cada ponto do ensaio de DPSH realizado no campo, a orientação dos pontos (azimute e inclinação) e a litologia.

Depois da inserção dos dados, teve que se definir as dimensões do projeto (*Project Dimensions*), o que permitiu representar adequadamente os dados e estabelecer o limite do projeto (Anexo 2F).

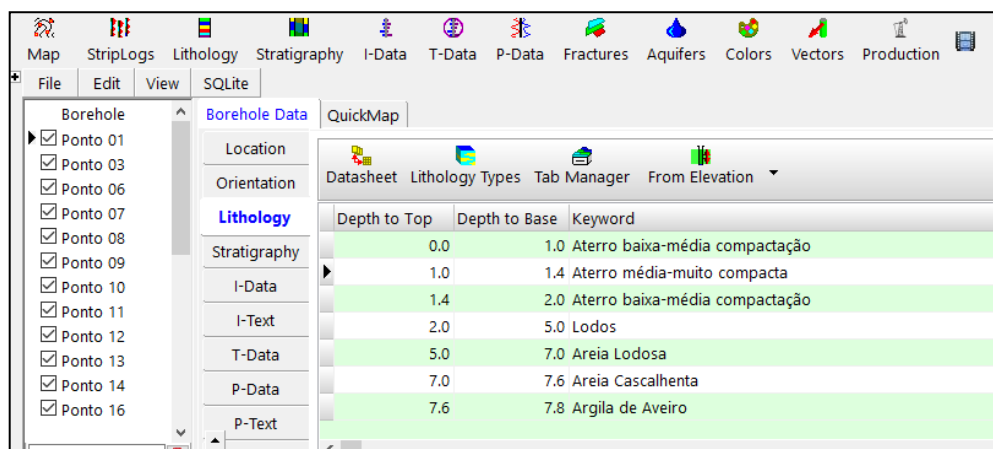


Anexo 2 F: Atribuição da dimensão do projeto.

Na barra de ferramentas *Borehole Manager: Borehole Data*, seleccionar o campo no qual se pretende introduzir os dados (localização, orientação e litologias).

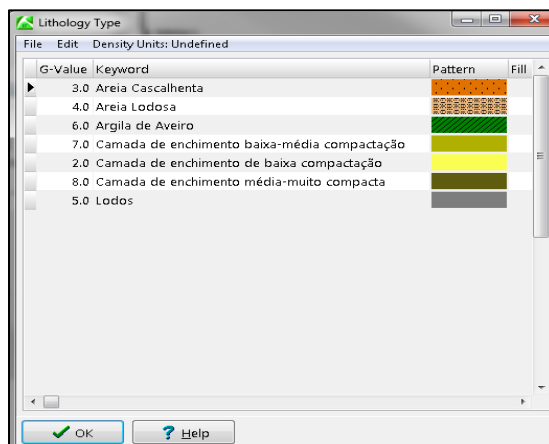
Campo de **Lithology** (Anexo 2G):

- ✓ **Depth to Top:** deve-se inserir a profundidade do topo das camadas geológica. Os valores de profundidade devem ser positivos.
- ✓ **Depth to Base:** deve-se introduzir a profundidade da base das camadas geológicas.
- ✓ **Keyword:** permite escolher o tipo de litologia.



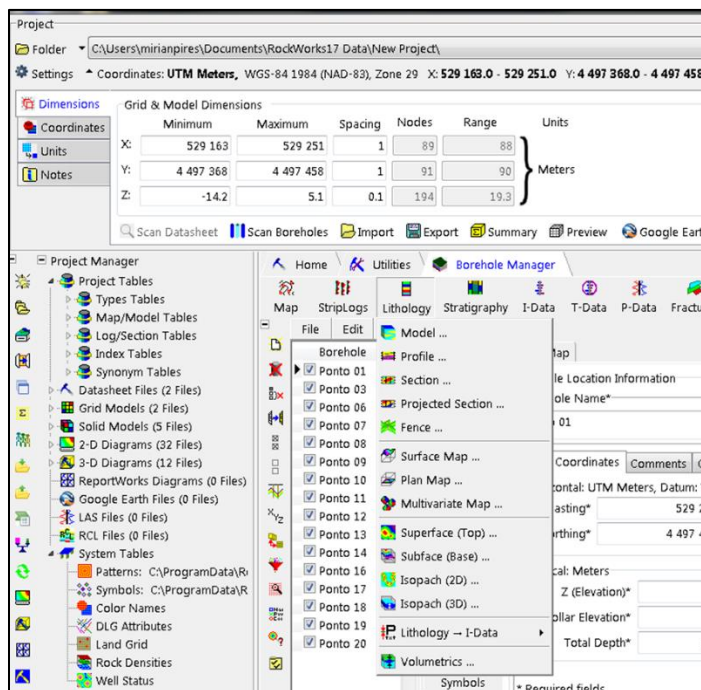
Anexo 2 G: Introdução dos dados litológicos.

Ao inserir os dados deve-se escolher o tipo do material (*keywords*) proposto para as respetivas profundidades. Se o tipo de material não estiver listado, será necessário adicioná-lo à tabela de tipos de litologia (Anexo 2H).



Anexo 2 H: Tabela de tipos de litologia.

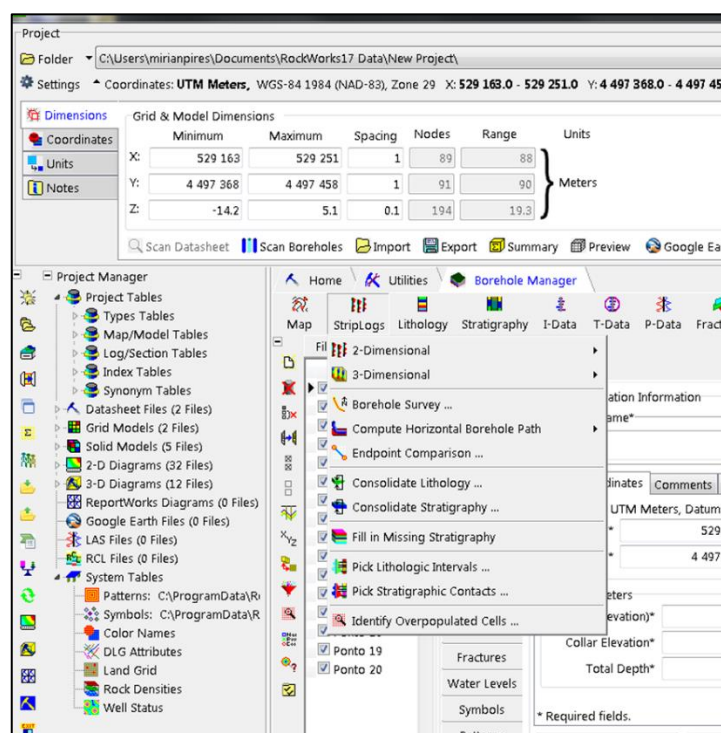
As ferramentas do menu *Lithology* do *Borehole Manager* permitem interpolar os dados de litologia num modelo sólido e visualizar o modelo interpolado utilizando uma variedade de tipos de diagramas. Depois de inserir os dados, deve fazer-se a interpolação dos dados através de algoritmos. As opções disponíveis no campo de ferramenta **Lithology: Model, Profile, Section, Fence**, etc. (Anexo 2I), podem utilizar o mesmo algoritmo para fazer a interpolação.



Anexo 2 I: campo de ferramenta de litologias.

O menu **Striplogs** (Anexo 2 J) do Borehole Manager permite criar registos bidimensionais ou tridimensionais de furos individuais ou múltiplos.

- ✓ Ferramenta **Striplogs / Multi-Log 3D** – permite a observação dos dados inseridos para todos os furos.
- ✓ **Striplogs / Multi-Log Section** – permite a observação dos dados em secção transversal do furo.
- ✓ **Striplogs / Multi-Log Profile** – permite a observação dos dados numa secção projetada.



Anexo 2 J: Ferramenta Striplogs.

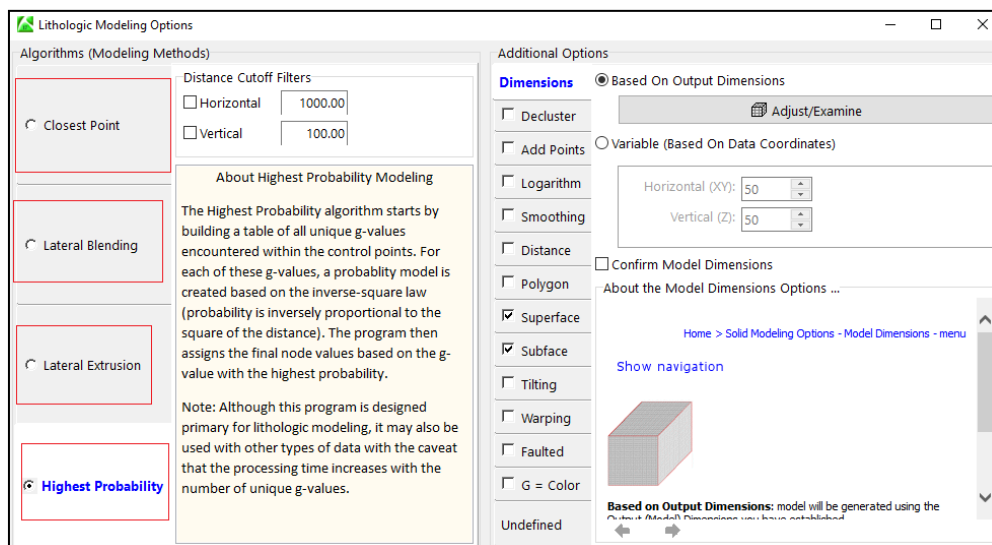
O *RockWorks* dispõe de quatro algoritmos (Anexo 2K). Neste caso de estudo foram utilizado dois tipos de algoritmos, sendo que cada um apresenta vantagens e desvantagens.

- **Lateral blending**

Lateral Blending é um tipo de algoritmo que cria dados com extrusão horizontal, cria correlações aleatórias dentro da zona intermédia. Vantagens: produz (“ziguezague”) correlações transgressivas/regressivas. Desvantagens: por criar de forma aleatória a zona intermédia, o que significa que cada vez que os modelos são produzidos um novo modelo diferente é gerado.

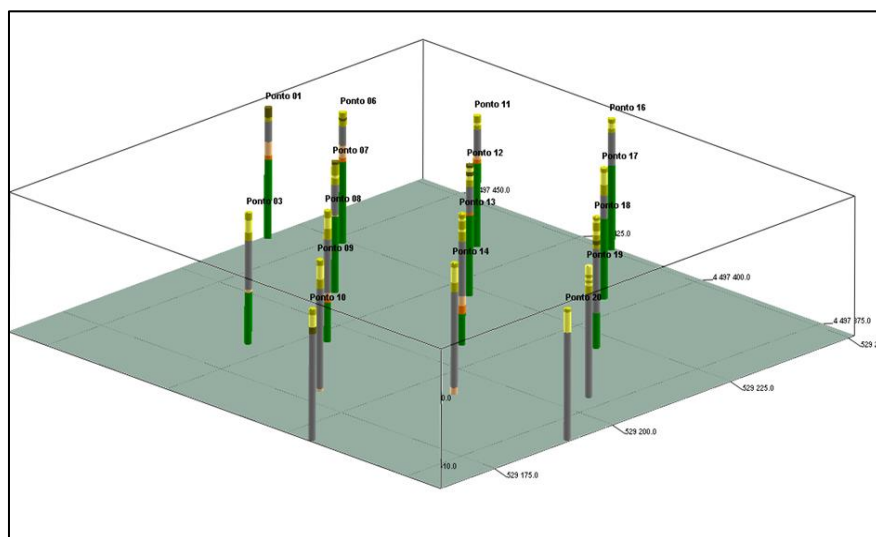
- **Highest probability**

Highest probability começa pela construção de uma tabela de todos os valores G únicos encontrados nos pontos de controlo. Para cada um destes valores de G, um modelo de probabilidade é criado com base na lei do inverso do quadrado (probabilidade é inversamente proporcional ao quadrado da distância). Em seguida, o programa atribui os valores baseado no valor G, com a maior probabilidade.



Anexo 2 K: Modelos de algoritmos litológicos.

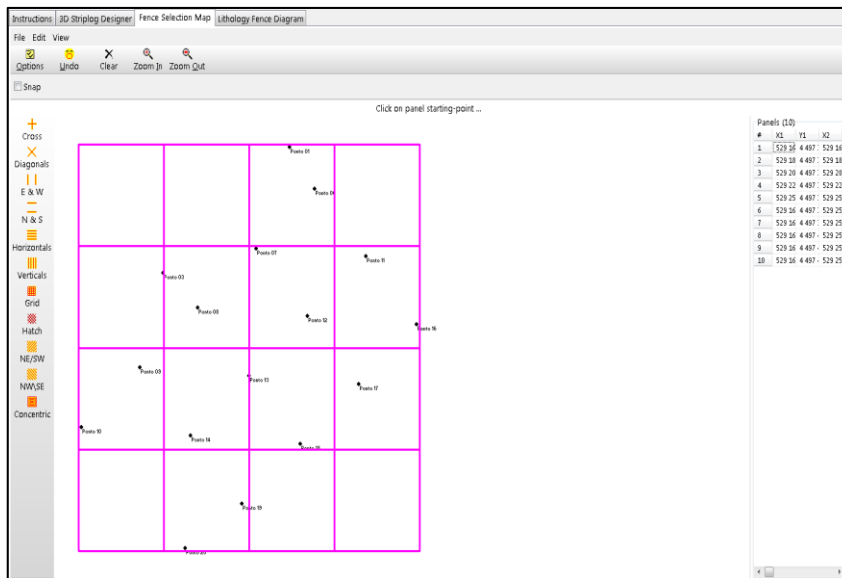
Foi possível a visualização 3D da disposição dos vários furos realizados no campo (Anexo 2L). Utilizando o *Google Earth*, que pode ser acedido pelo *RockWorks*, é possível visualizar os furos projetados sobre uma imagem da área de estudo.



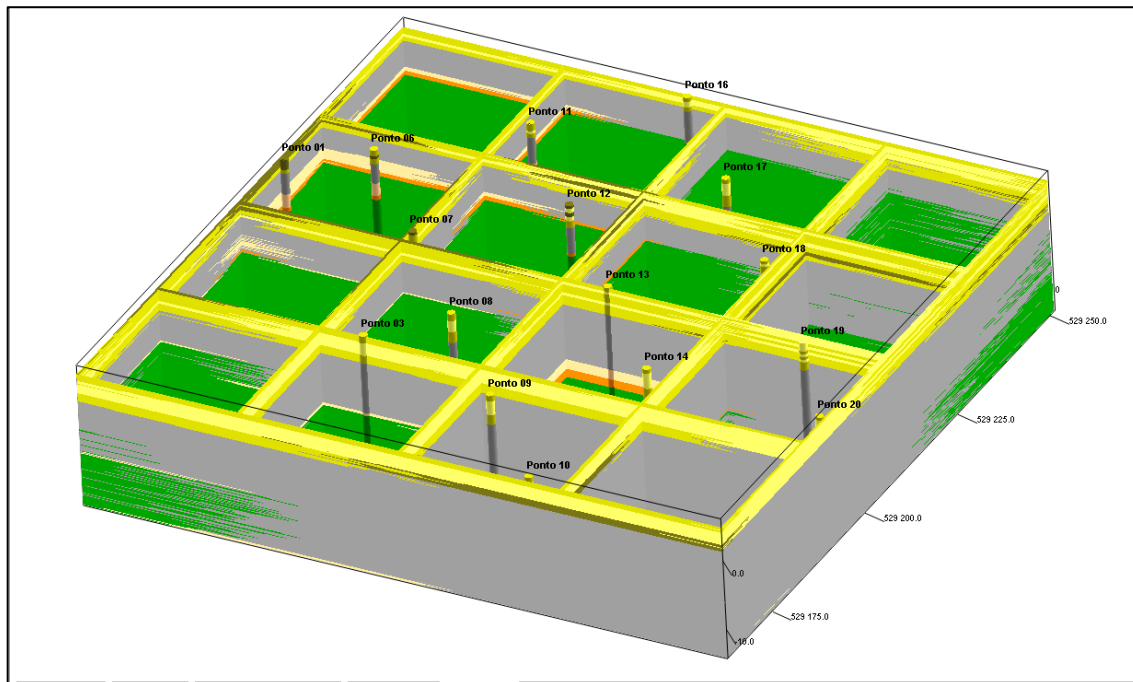
Anexo 2 L: Visualização dos furos em 3D.

Diagrama de Cerca (Fence Diagram)

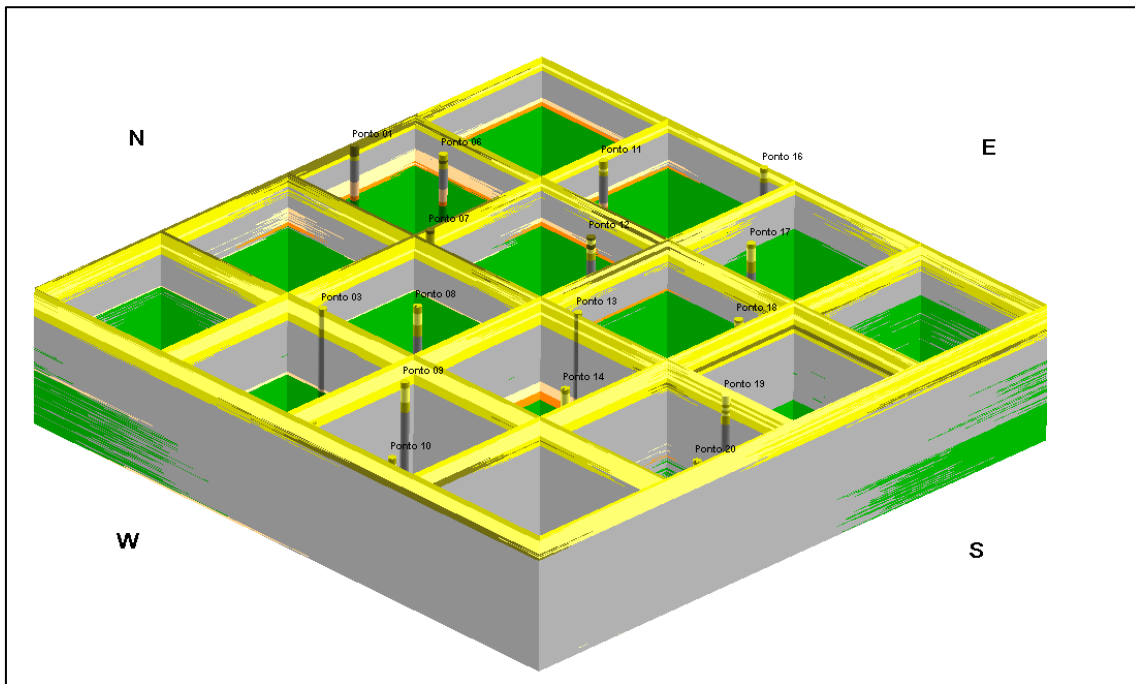
Para execução de diagramas de cerca (*Fence Diagram*) foi necessário selecionar no **Fence Location Map** uma grelha (Anexo 2M), que pela qual se vai definir área e a disposição das imagens. Este diagrama cria um modelo sólido tridimensional com a interpolação das litologias (Anexo 2N a 2P).



Anexo 2 M: Atribuição de uma grelha para visualização dos dados interpolados (*fence diagram*).



Anexo 2 N: Visualização do diagrama de cerca.

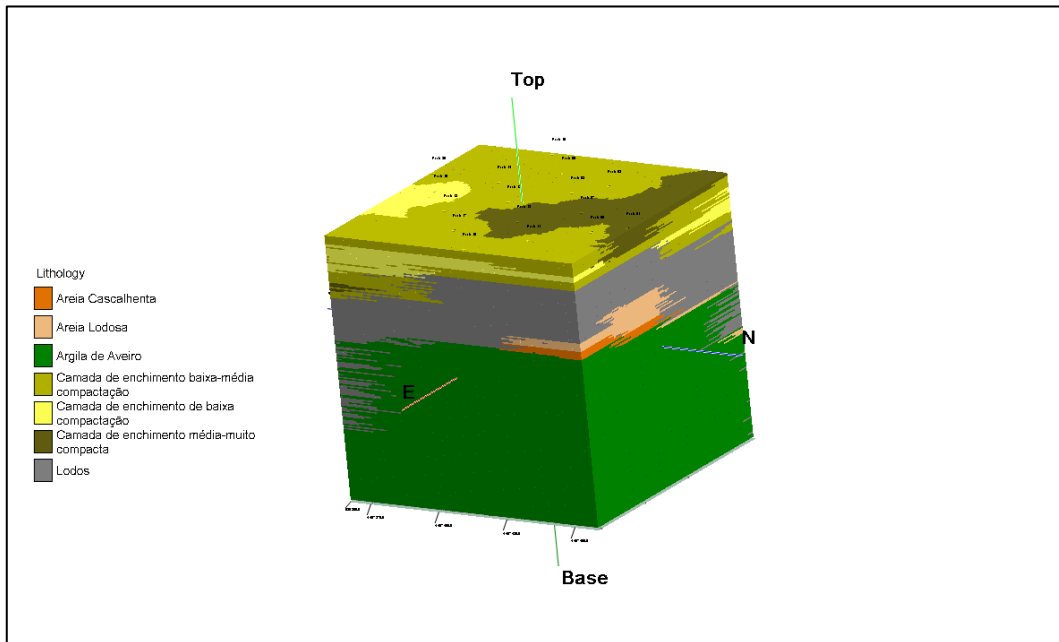


Anexo 2 O: Visualização do diagrama de cerca.

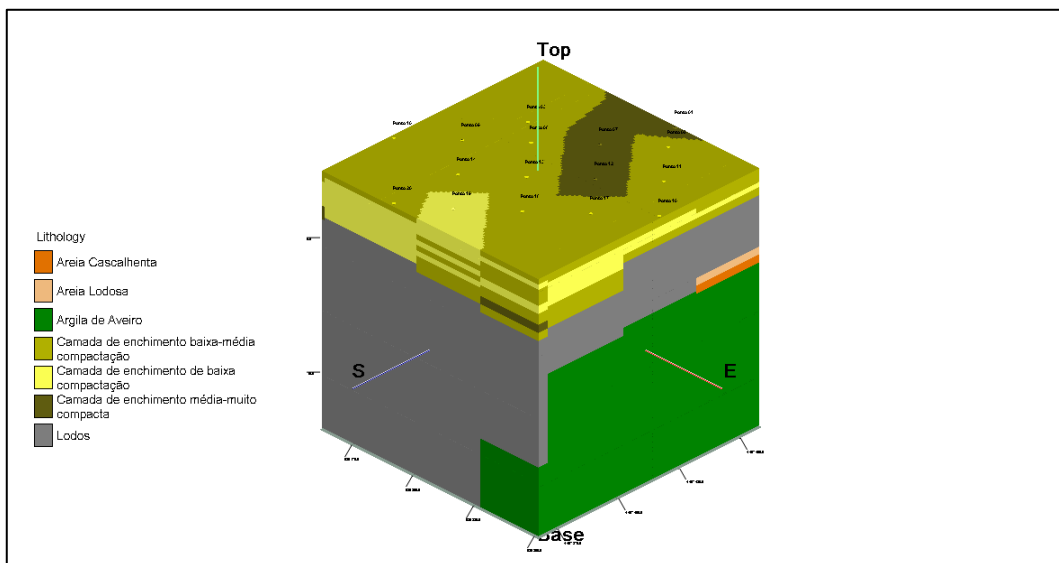


Anexo 2 P: Visualização do diagrama de cerca sobre a imagem da área de estudo.

Visualização 3D dos Dados



Anexo 2 Q: Visualização em 3D do modelo litológico da área de estudo através do algoritmo *Highest*.



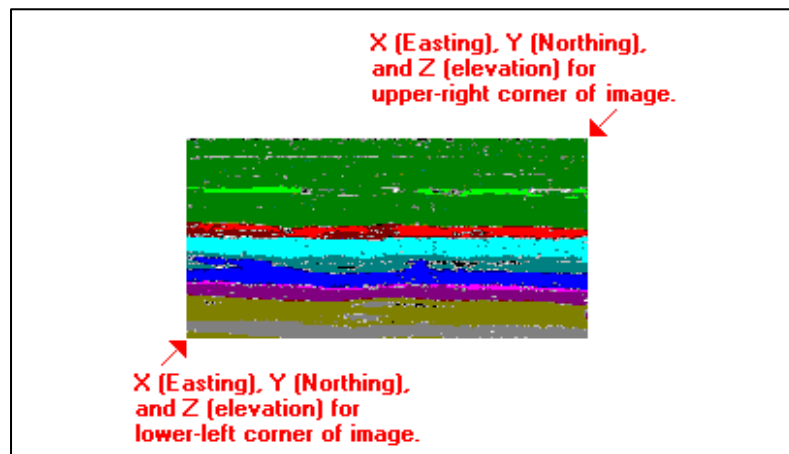
Anexo 2 R: Visualização em 3D do modelo litológico da área de estudo através do algoritmo *Highest*.

Exibição de imagens *bitmap* como painéis verticais

O *RockWorks 17*, a partir da ferramenta *Utilities*, pode exibir imagens *bitmaps* que podem ser, por exemplo, imagens digitalizadas de seções sísmicas 2D ou imagens de GPR (Anexo 2S a 2U).

No RockWorks Utilities:

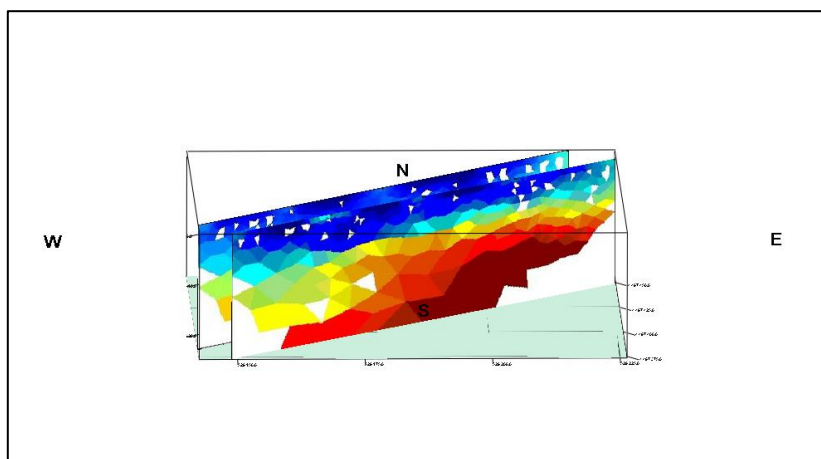
- Começa-se por inserir as coordenadas do canto inferior esquerdo da imagem e superior direito (Anexo 2 S) .
- De seguida, selecciona-se a opção *imagery*: Vertical (Imagens -> 3D Panels).



Anexo 2 S: Posição das coordenadas.

Row#	Image Name	Layer Name	X left	Y Left lower	Z	X right up	Y Right up	Z	9	10	11	12	13	14
			UTM Meters	UTM Meters	Meters	UTM Meters	UTM Meters	Meters						
1	0543.jpg	0543	529154.38	4497401.23	-25	529214.10	4497456.85	0						
2	0544.jpg	0544	529163.71	4497395.71	-25	529226.40	4497448.79	0						
3	0546.jpg	0546	529170.37	4497373.15	-25	529237.54	4497433.16	0						
4	0553.jpg	0553	529217.51	4497457.91	-25	529277.07	4497384.10	0						
5	0557.jpg	0557	529185.57	4497429.57	-25	529247.38	4497364.34	0						
6	0548.jpg	0548	529189.77	4497366.53	-25	529250.91	4497418.36	0						
7	0555.jpg	0555	529202.32	4497444.35	-25	529263.96	4497370.93	0						
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														

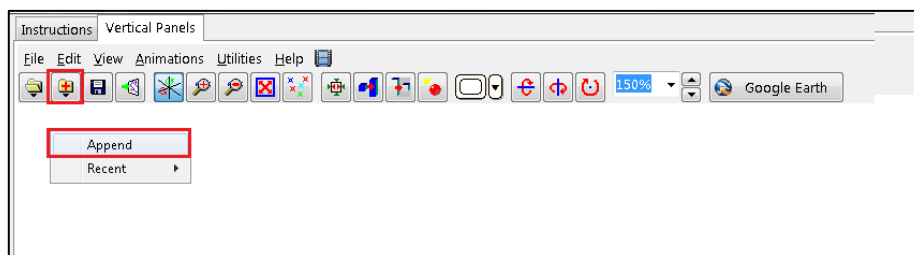
Anexo 2 T: Introdução das coordenadas.



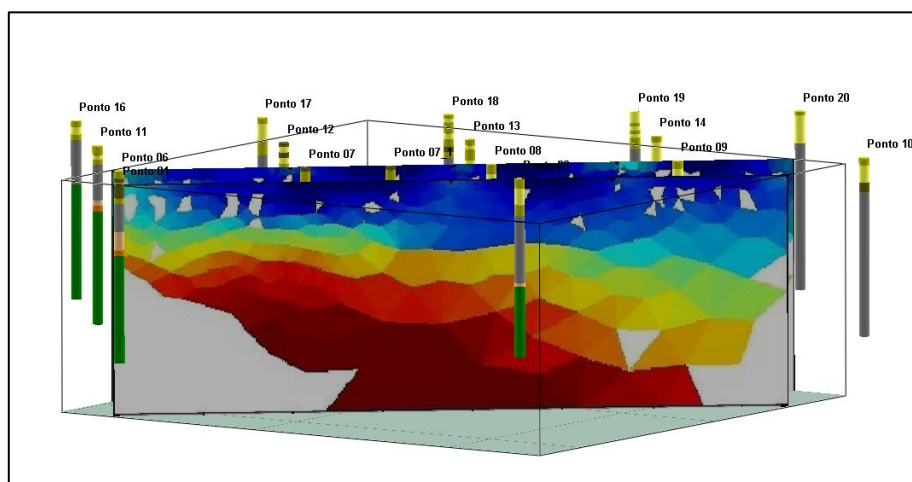
Anexo 2 U: Exibição de imagens de refração sísmica em 3D.

Adicionar os furos à uma imagem de refração sísmica

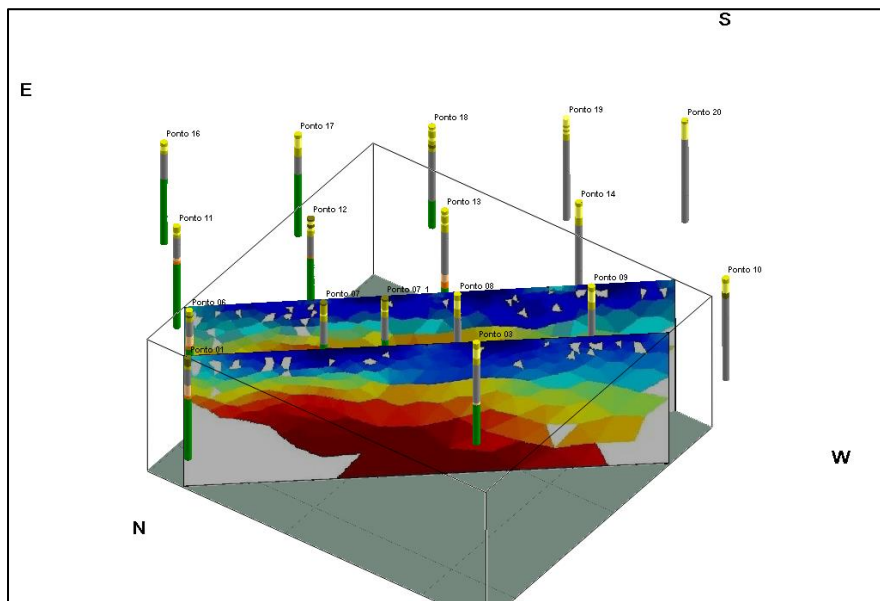
Certificou-se que a imagem a ser importada e o arquivo Rw3D existente estavam (neste caso os furos do ensaio DPSH) presentes na pasta atual do projeto. O programa anexa outro arquivo a imagem (Anexo 2V a 2X).



Anexo 2 V: Adição dos furos à imagem de refração sísmica.

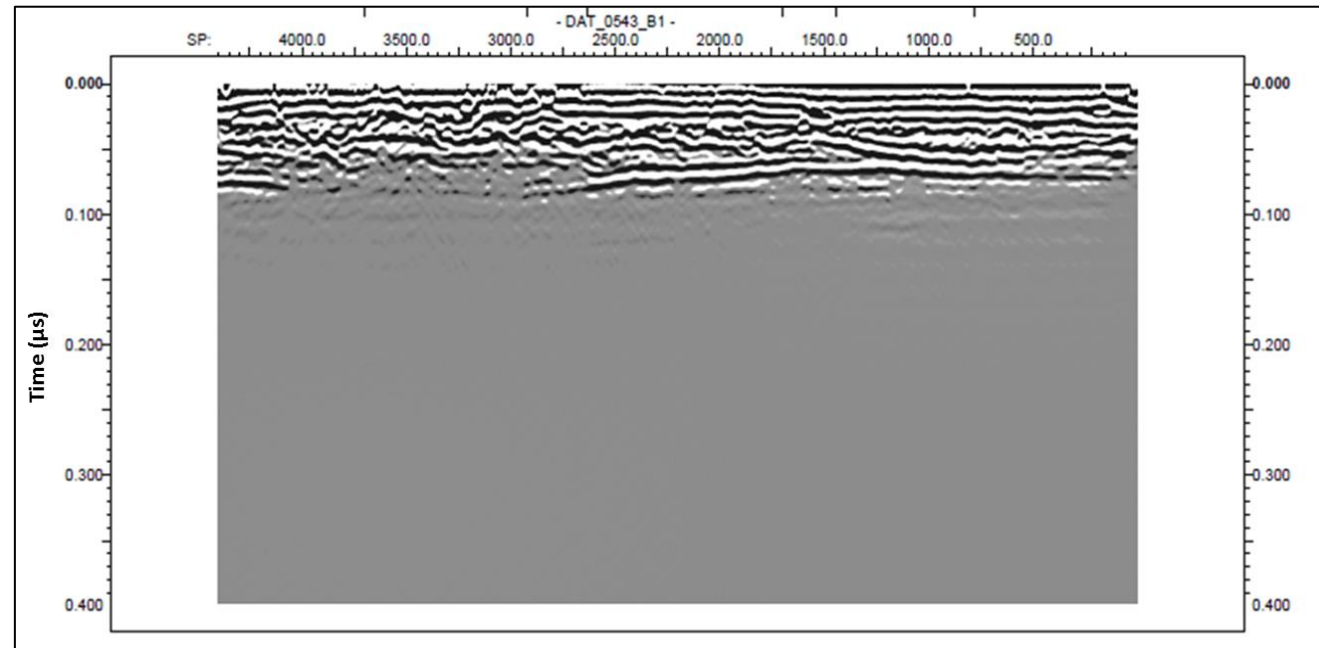


Anexo 2 W: Exibição conjunta dos dados dos poços com a refração sísmica.

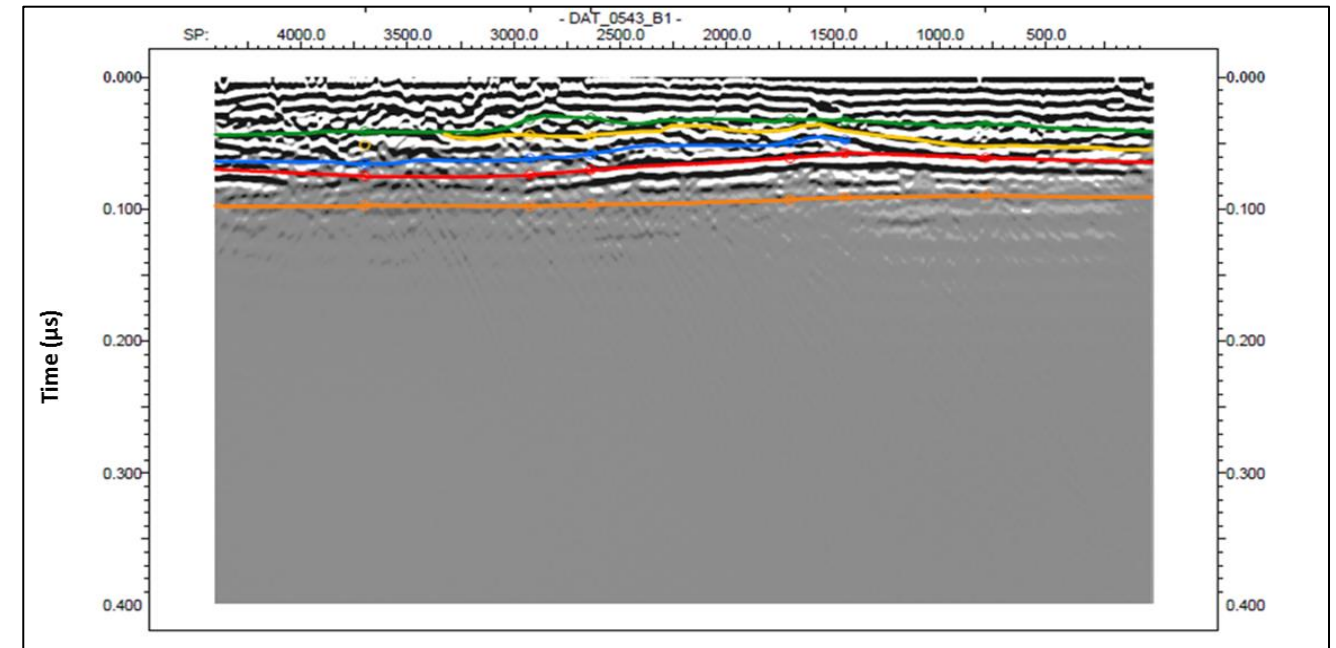


Anexo 2 X: Exibição conjunta dos dados dos poços com a refração sísmica.

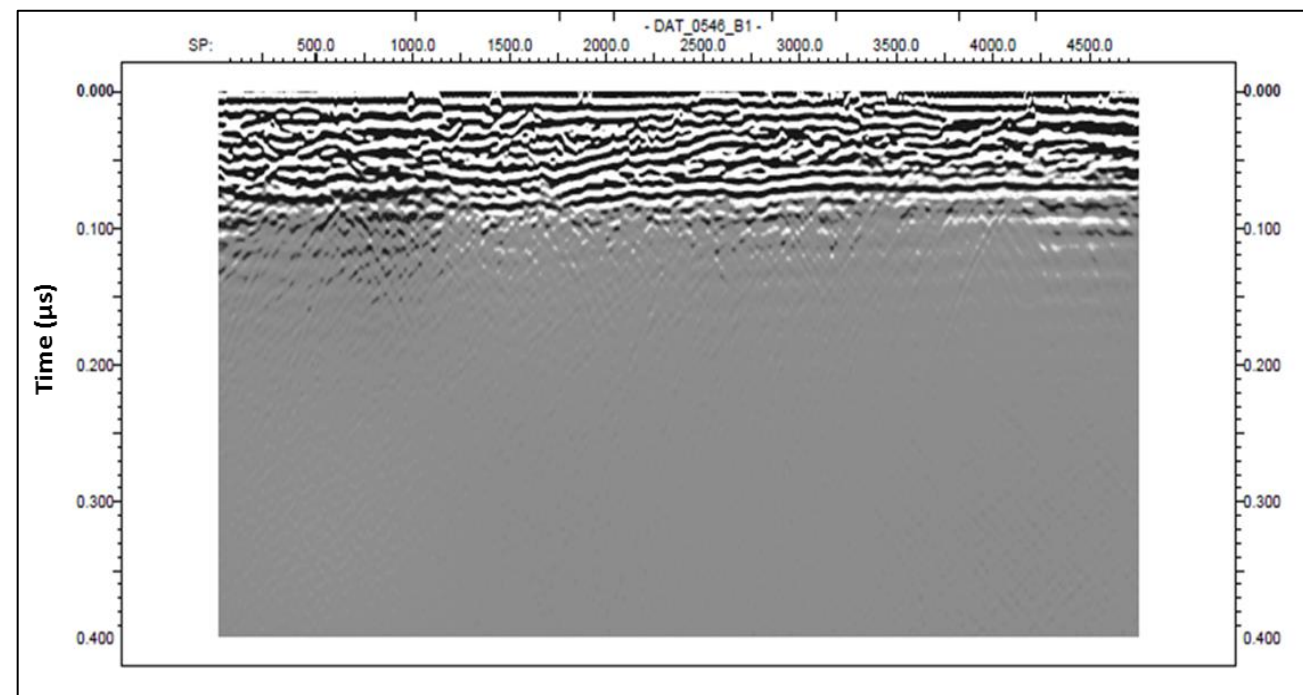
Anexo 3 – Perfis de georadar obtidos pela antena de 100MHz e 500MHz



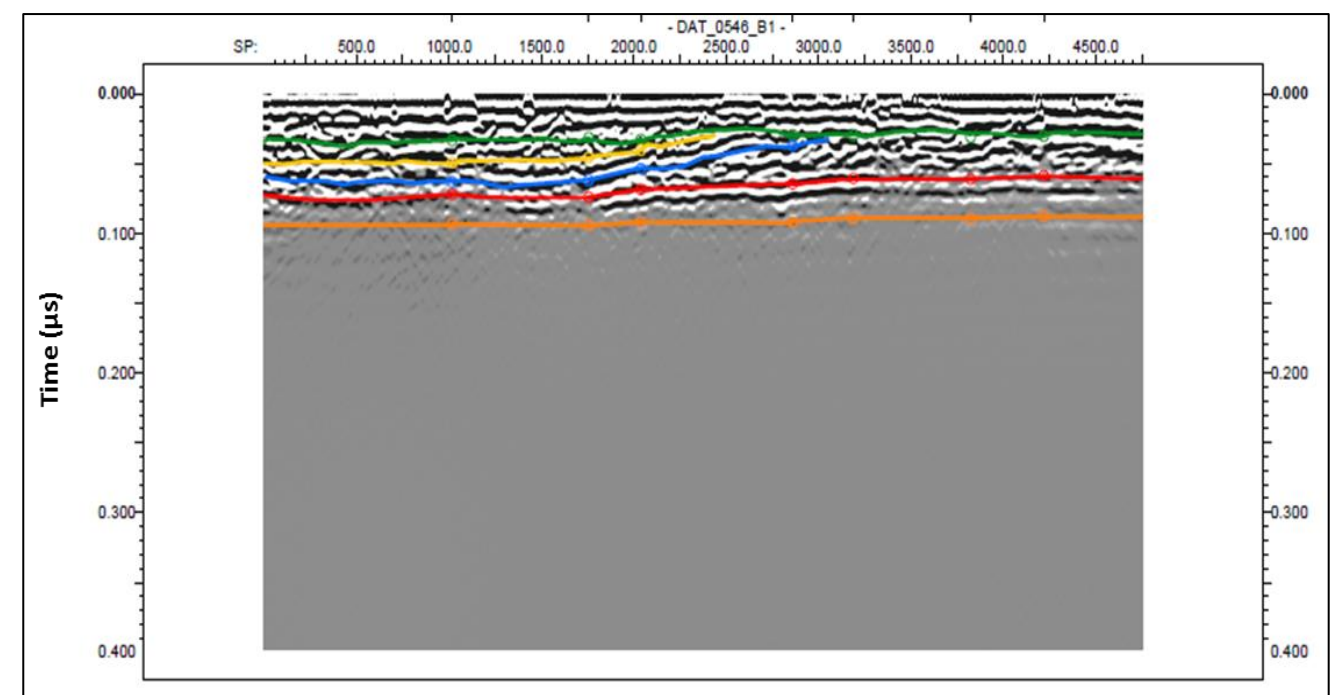
Anexo 3 A: Radargrama do Perfil 0543 adquirido pela antena de 100MHz (*shot x time*).



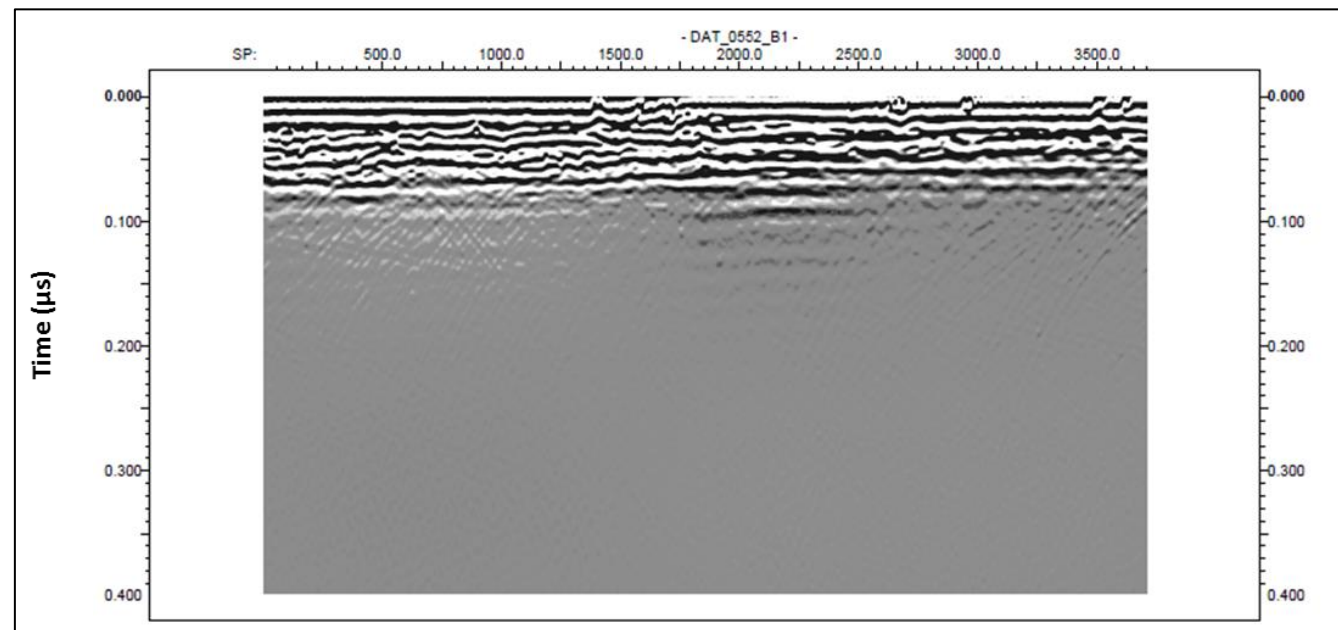
Anexo 3 C: Radargrama do Perfil 0543 com a interpretação dos horizontes (*shot point x time*).



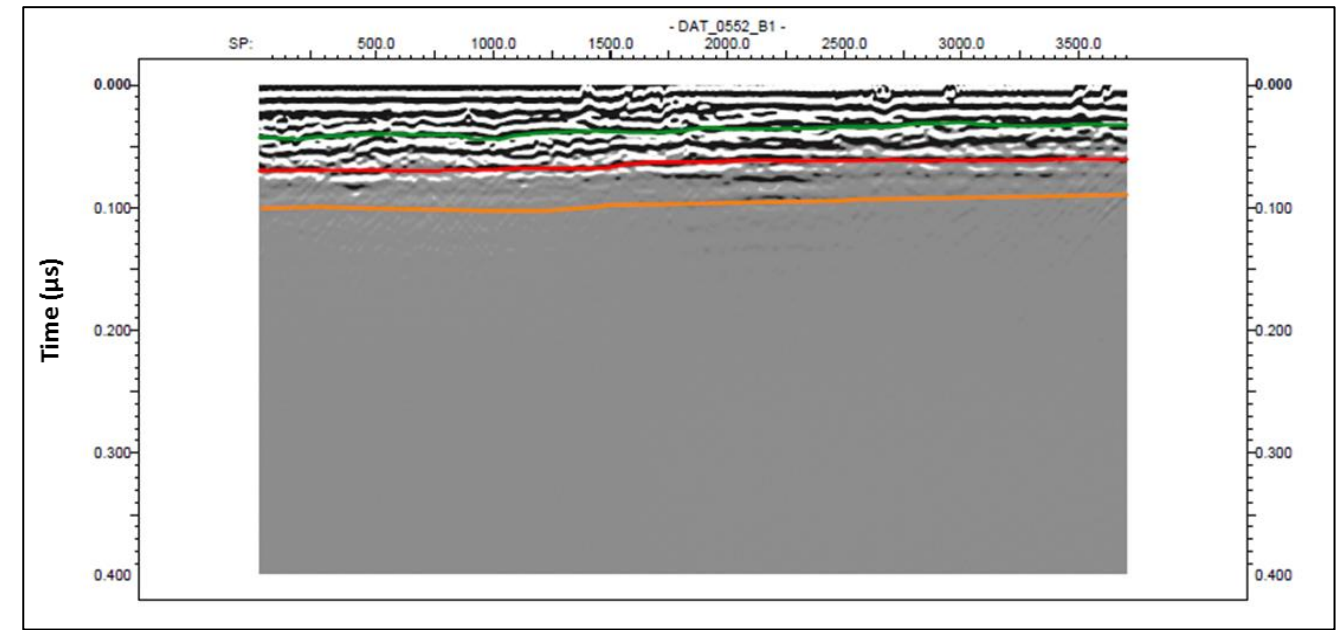
Anexo 3 B: Radargrama do Perfil 0546 adquirido pela antena de 100MHz (*shot point x time*).



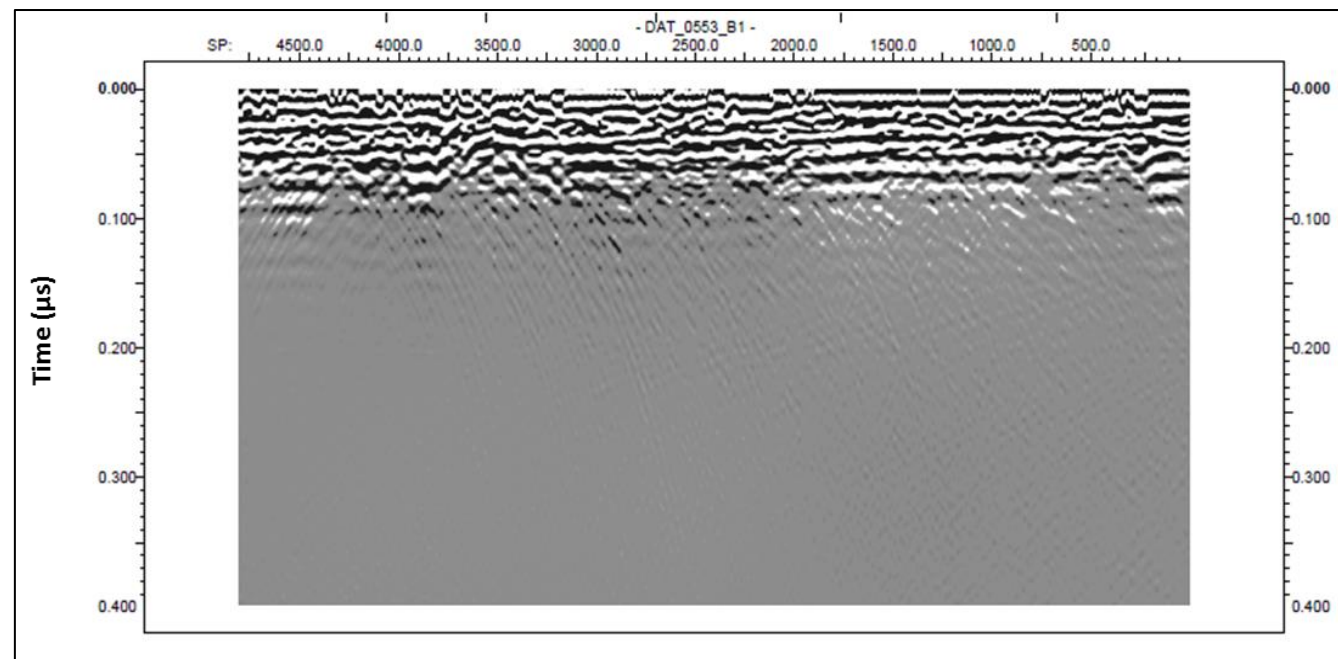
Anexo 3 D: Radargrama do Perfil 0546 com a interpretação dos horizontes (*shot point x time*).



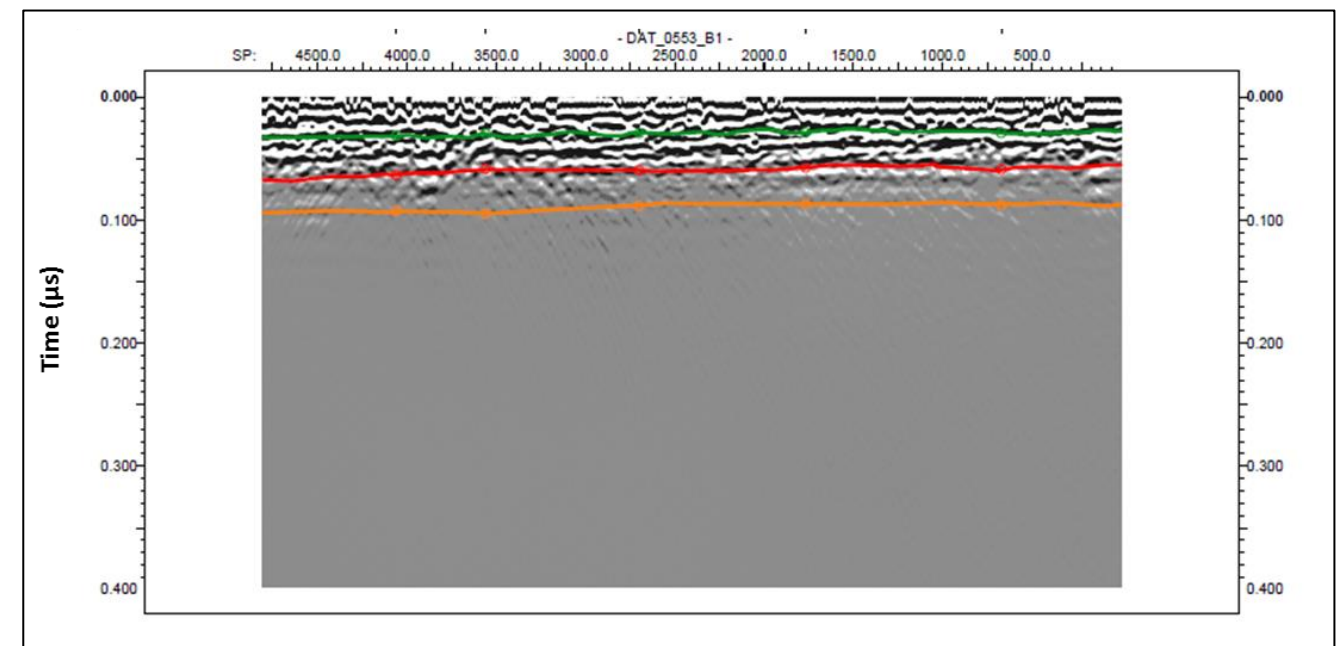
Anexo 3 E: Radargrama do Perfil 0552 adquirido pela antena de 100MHz (shot *point x time*)..



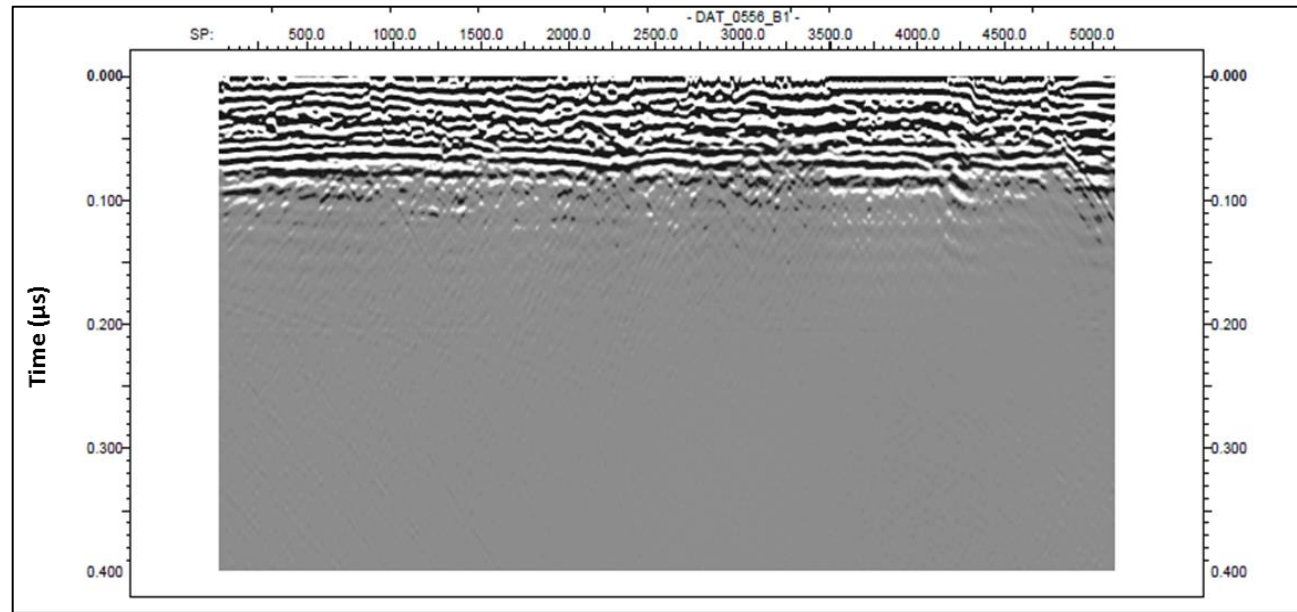
Anexo 3 G: Radargrama do Perfil 0552 com interpretação dos horizontes (shot *point x time*)..



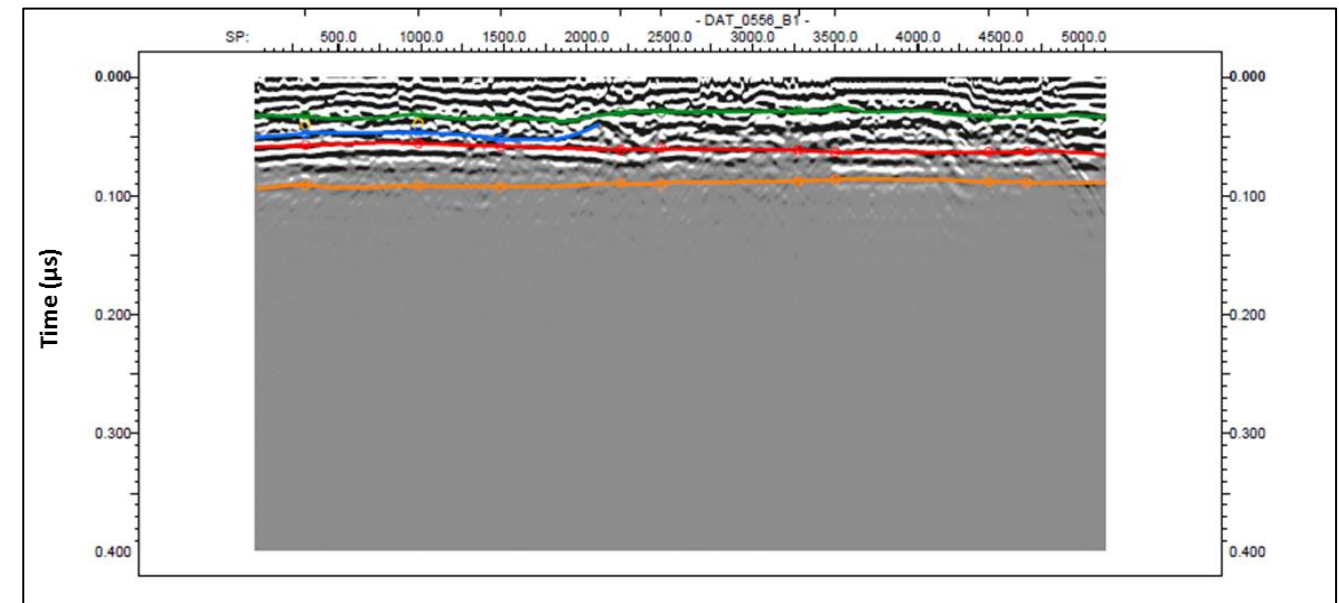
Anexo 3 F: Radargrama do Perfil 0553 adquirido pela antena de 100MHz (shot *point x time*).



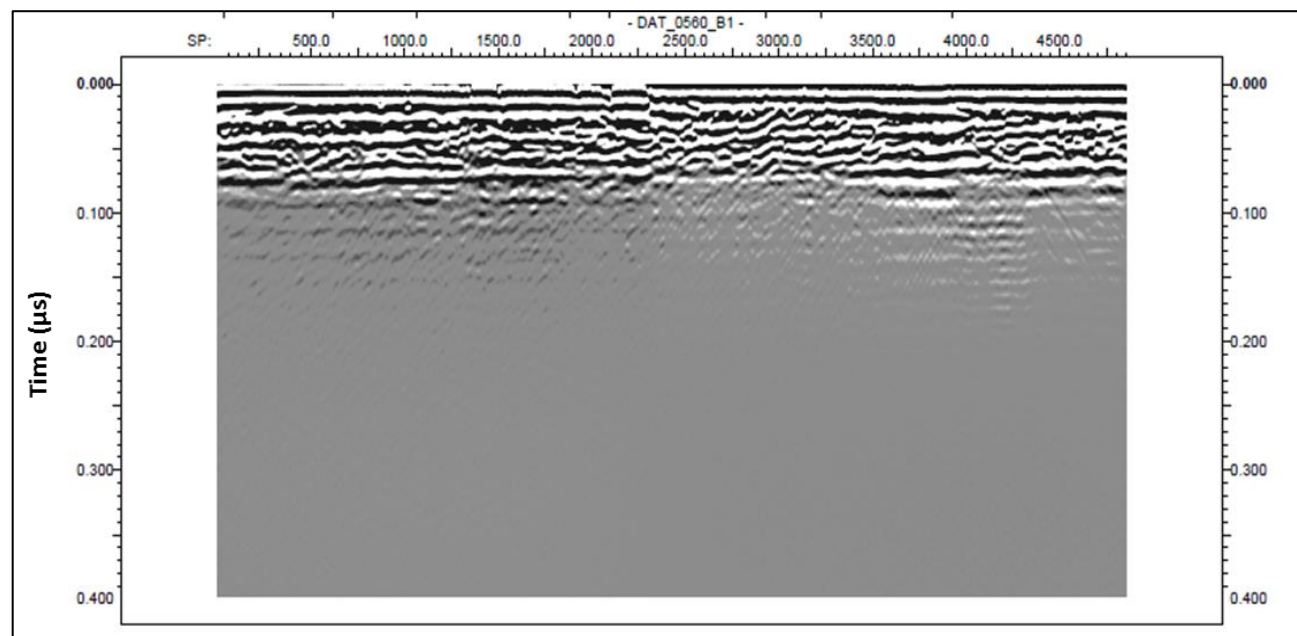
Anexo 3 H: Radargrama do Perfil 0553 adquirido pela antena de 100MHz (shot *point x time*).



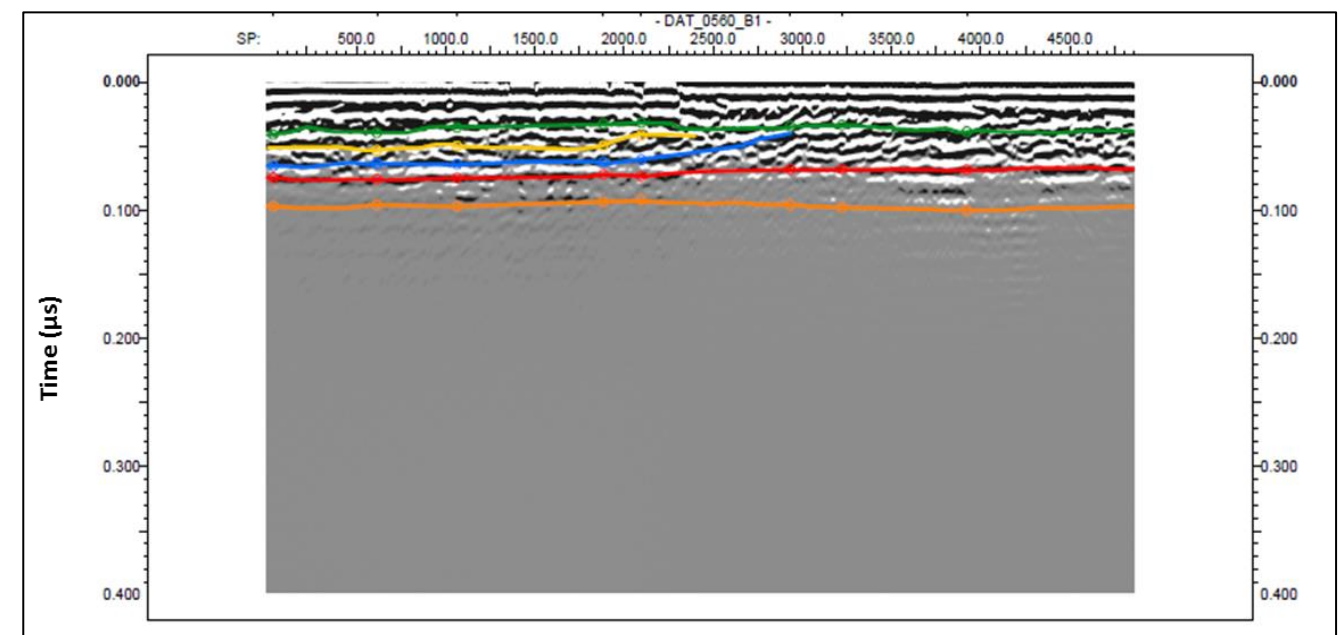
Anexo 3 I: Radargrama do Perfil 0556 adquirido pela antena de 100MHz (shot point x time).



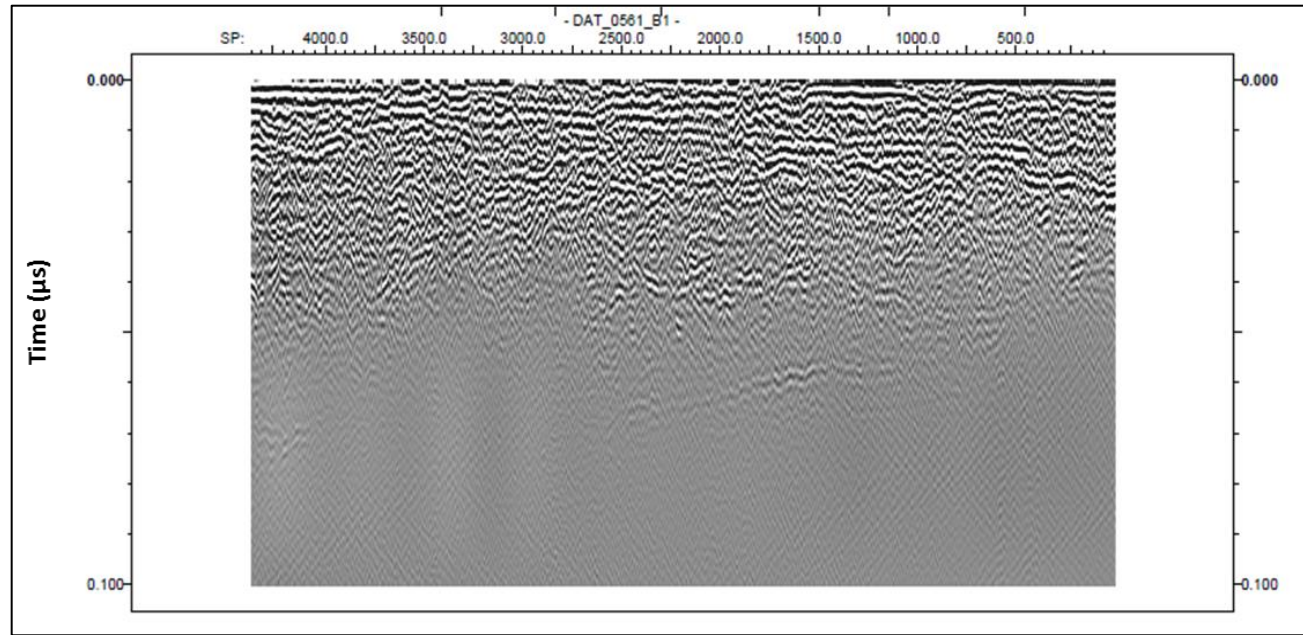
Anexo 3 K: Radargrama do Perfil 0556 com a interpretação dos horizontes (shot point x time).



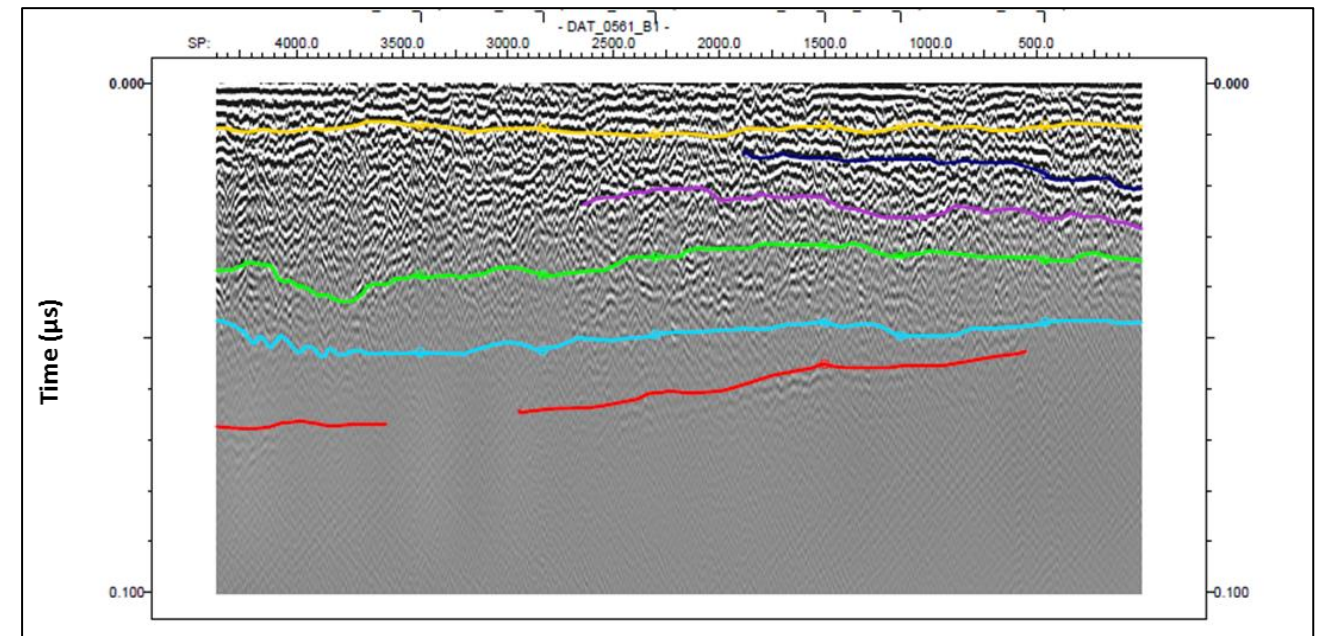
Anexo 3 J: Radargrama do Perfil 0560 adquirido pela antena de 100MHz (shot point x time).



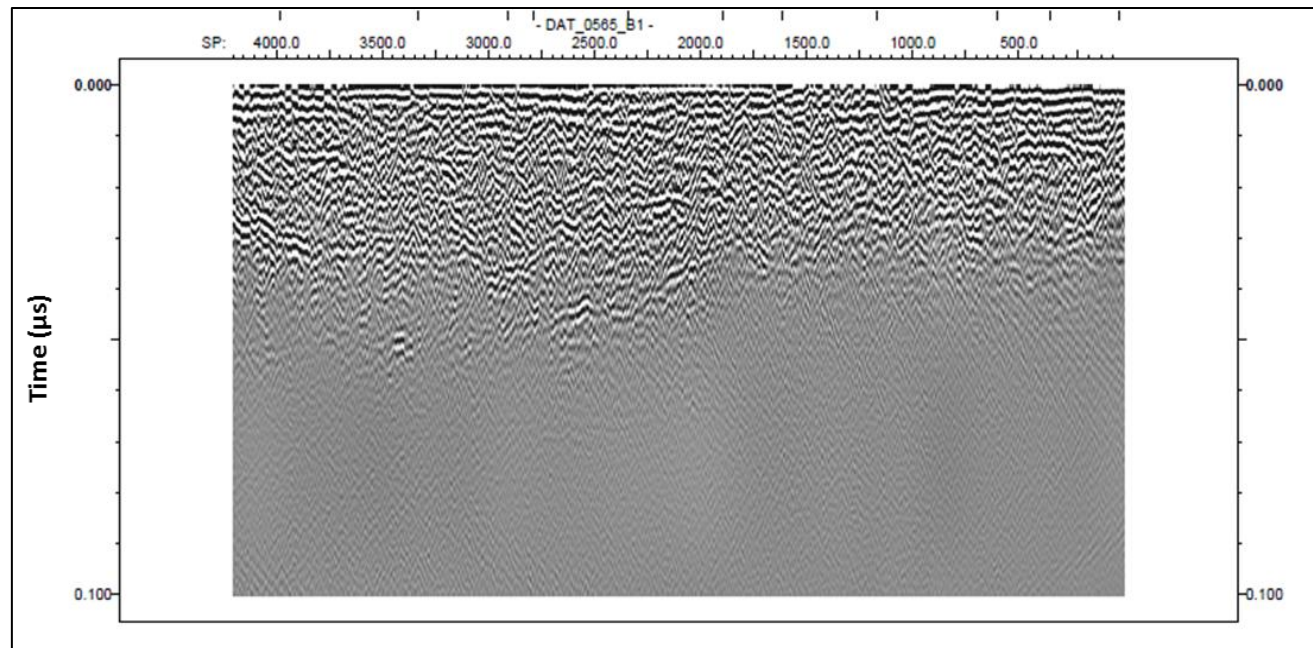
Anexo 3 L: Radargrama do Perfil 0560 com a interpretação dos horizontes (shot point x time).



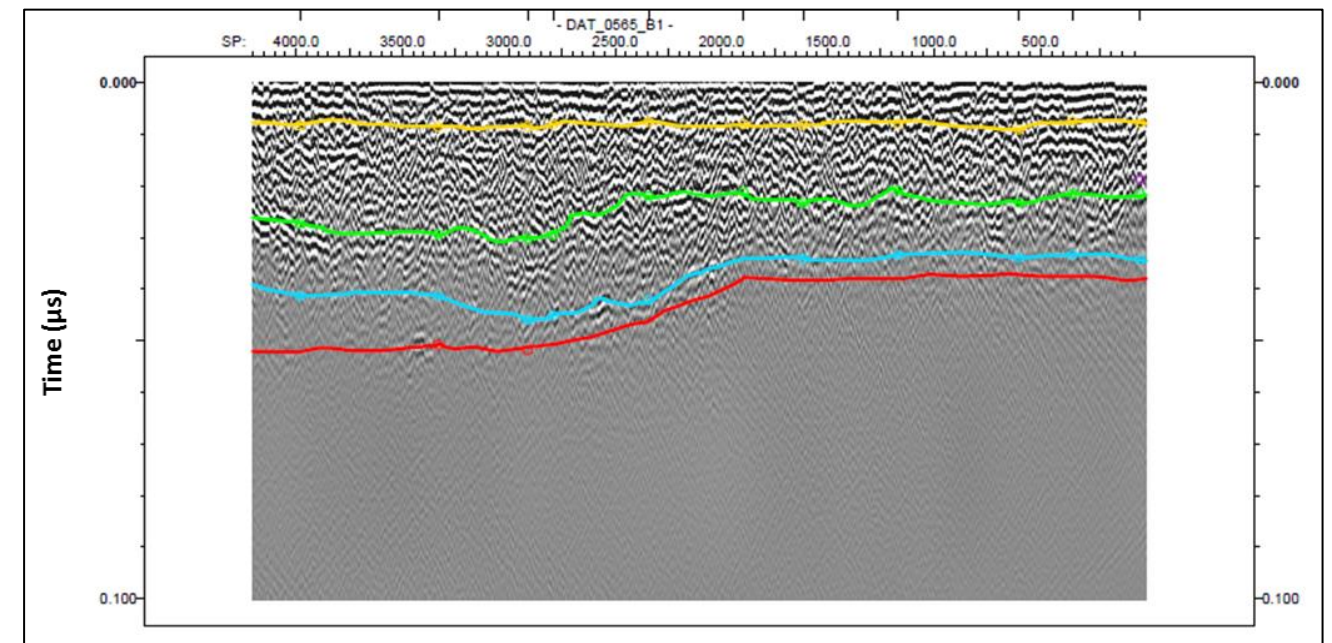
Anexo 3 M: Radargrama do Perfil 0561 adquirido pela antena de 500MHz (shot point x time).



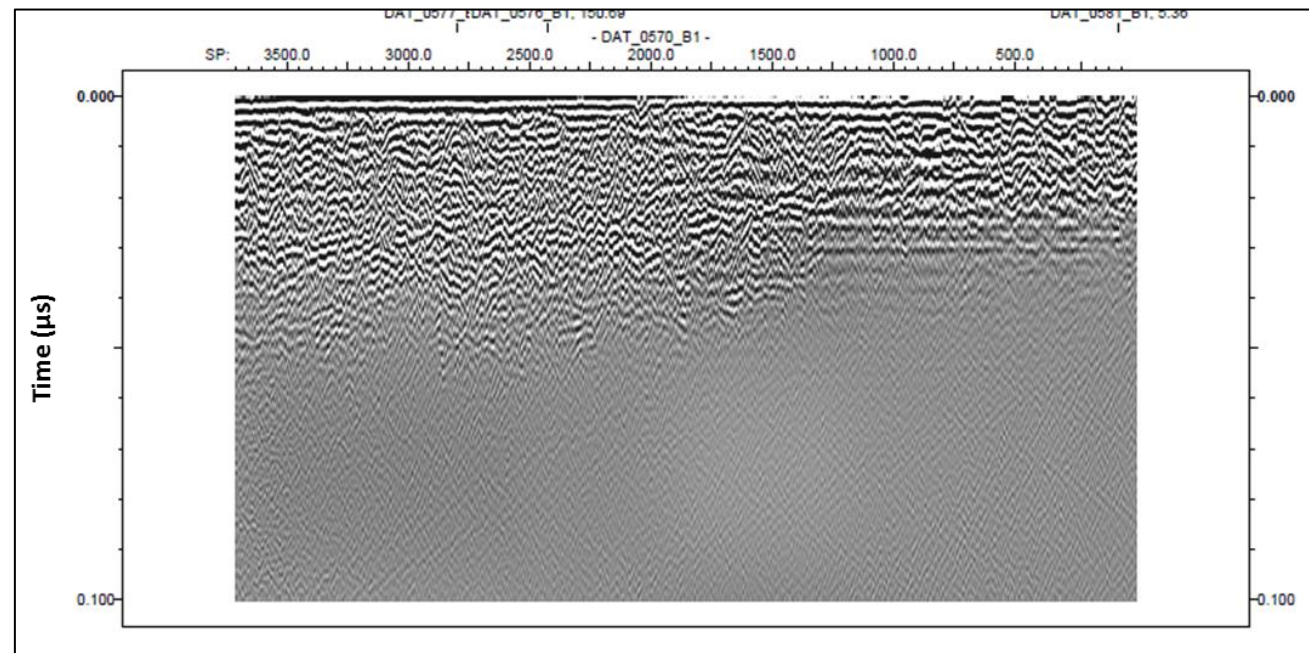
Anexo 3O: Radargrama do Perfil 0561 com a interpretação dos horizontes (shot point x time).



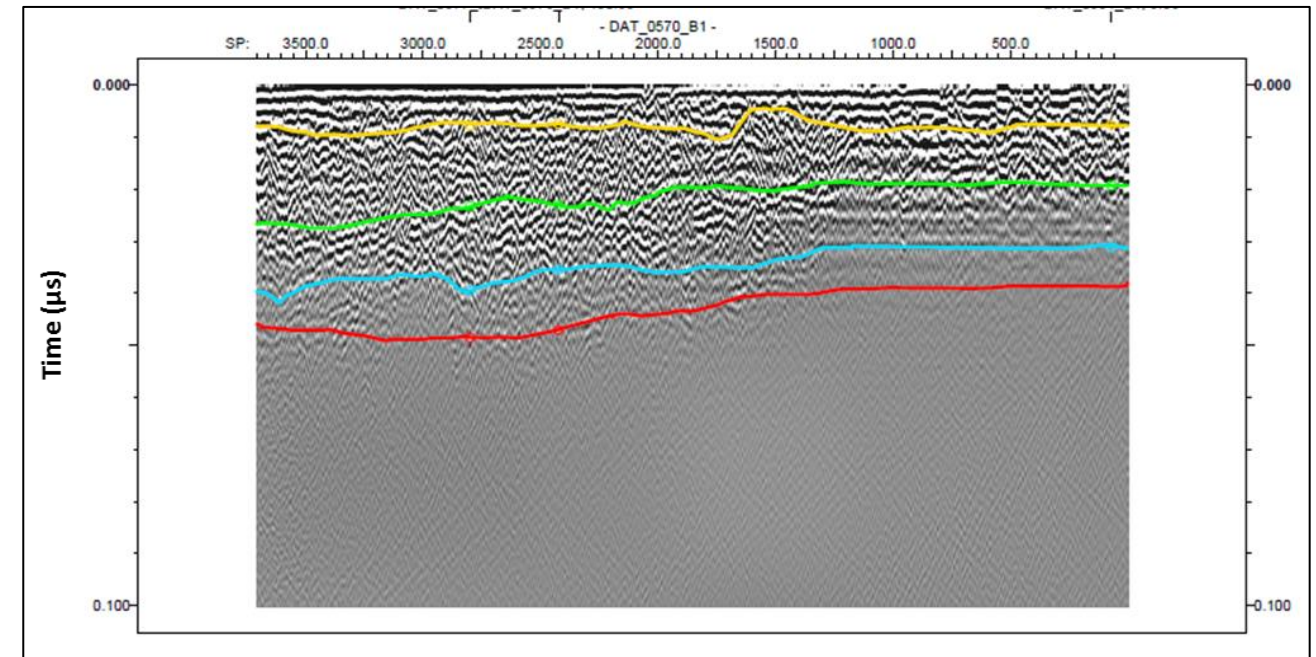
Anexo 3 N: Radargrama do Perfil 0565 adquirido pela antena de 500MHz (shot point x time).



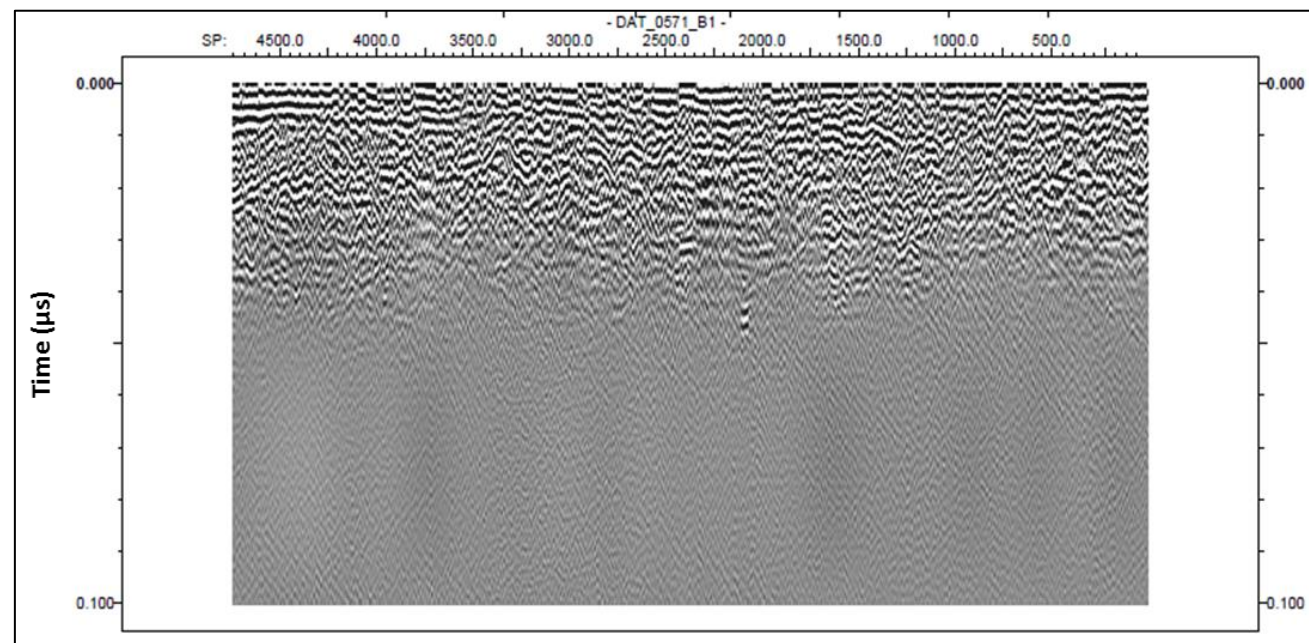
Anexo 3 P: Radargrama do Perfil 0565 com a interpretação dos horizontes (shot point x time).



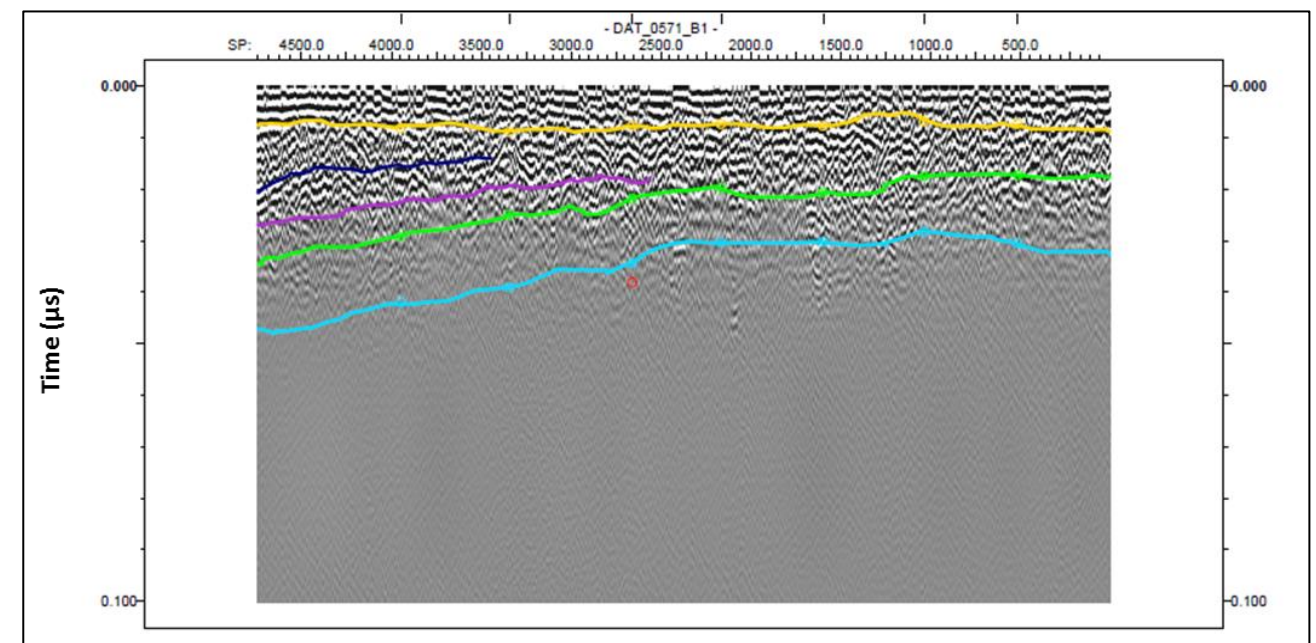
Anexo 3 Q: Radargrama do Perfil 0570 adquirido pela antena de 500MHz (shot point x time).



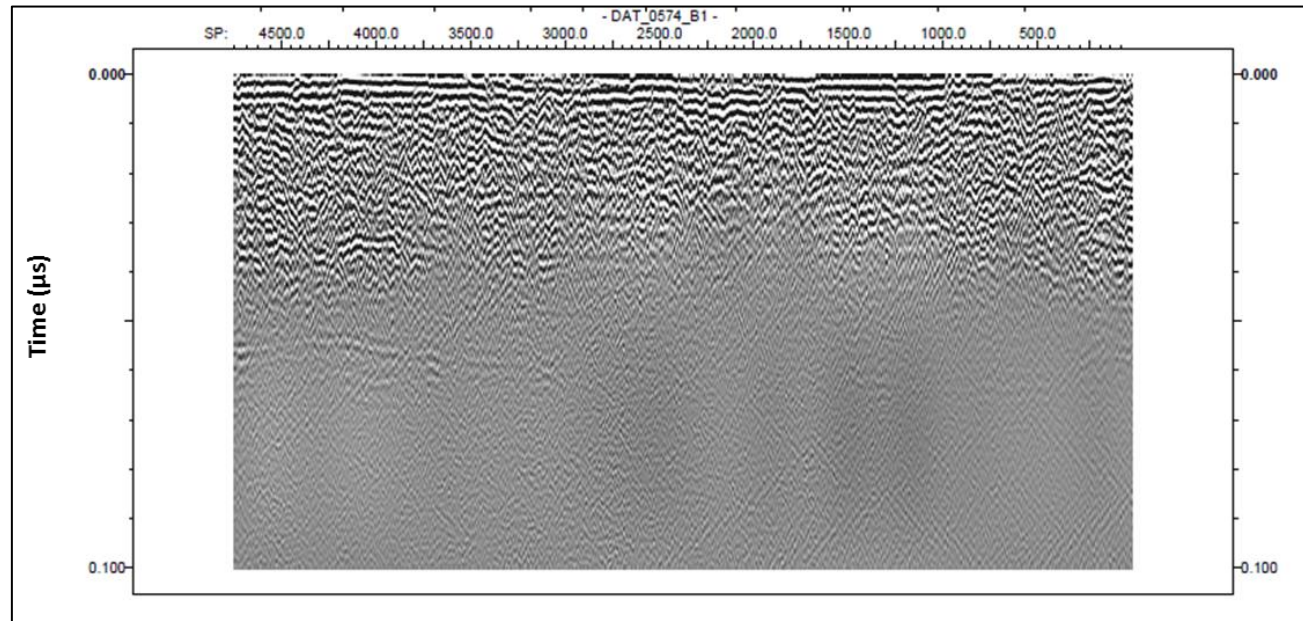
Anexo 3 S: Radargrama do Perfil 0570 com a interpretação dos horizontes.



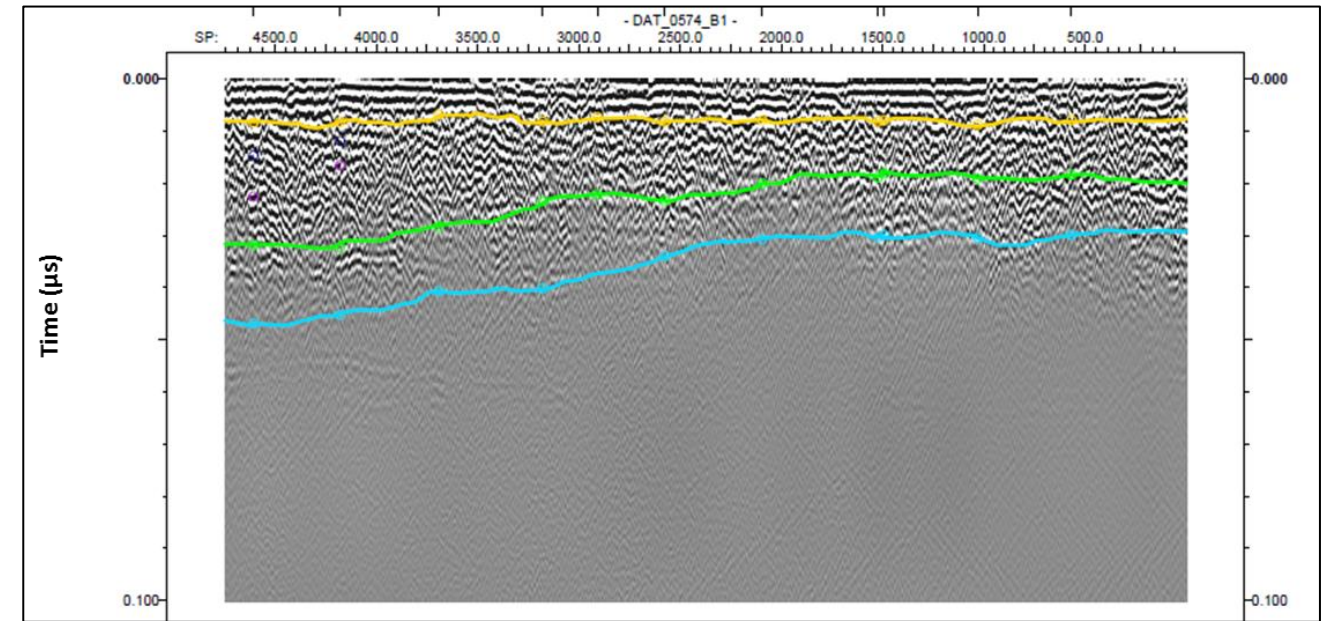
Anexo 3 R: Radargrama do Perfil 0571 adquirido pela antena de 500MHz (shot point x time).



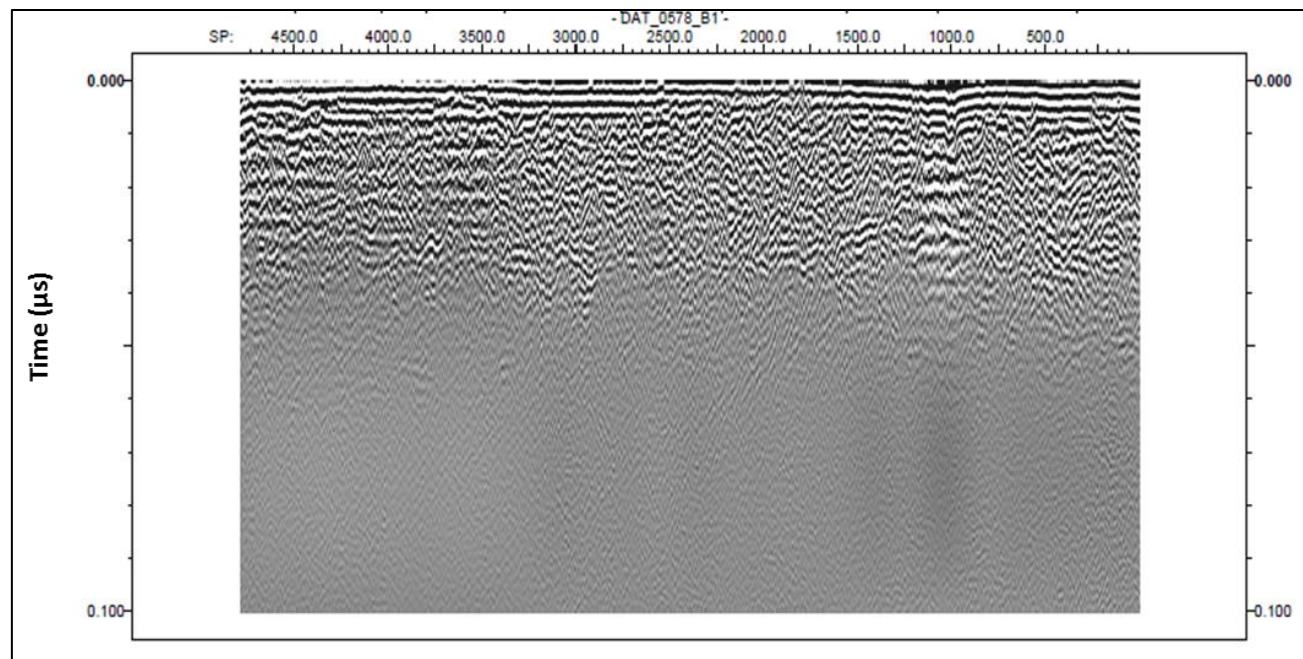
Anexo 3 T: Radargrama do Perfil 0571 com a interpretação dos horizontes (shot point x time)..



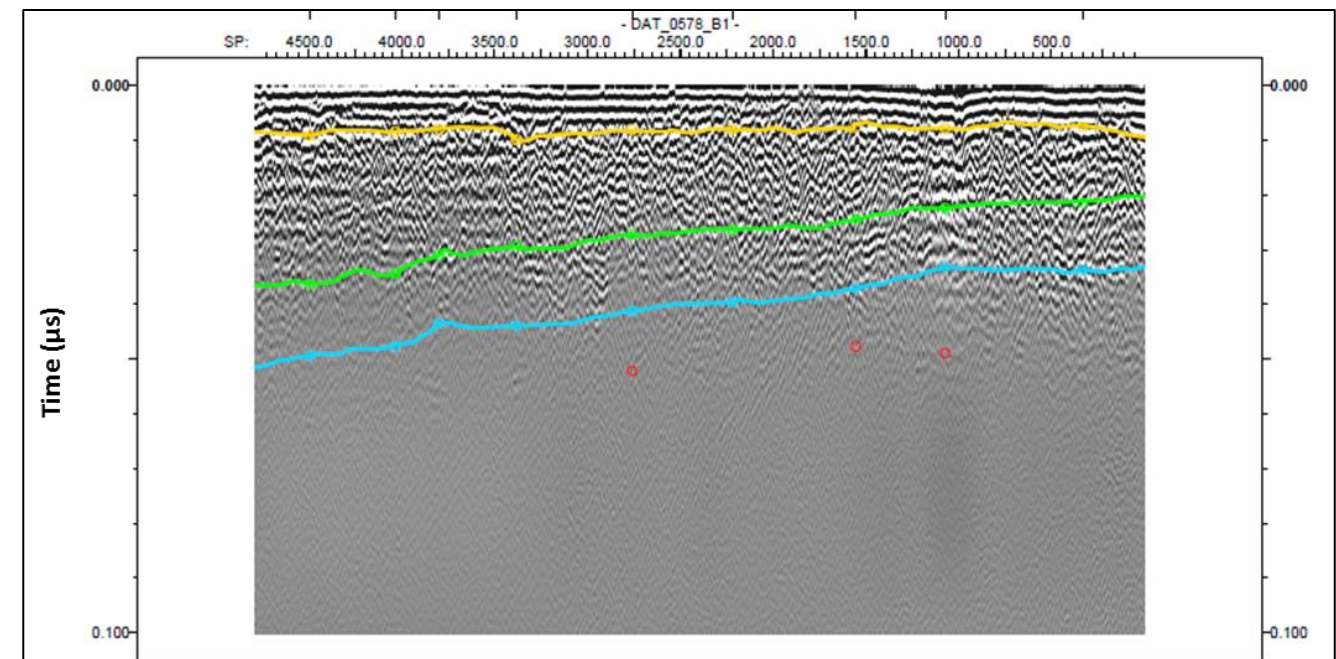
Anexo 3 U: Radargrama do Perfil 0574 adquirido pela antena de 500MHz (shot point x time).



Anexo 3 W: Radargrama Perfil 0574 com a interpretação dos horizontes (shot point x time).



Anexo 3 V: Radargrama do Perfil 0561 adquirido pela antena de 500MHz (shot point x time).



Anexo 3 X: Radargrama do Perfil 0561 com a interpretação dos horizontes (shot point x time).

