



**Aplicação de “Ground Penetrating Radar” (GPR)
na prospeção de pegmatitos – casos de estudo de
Malpartida (Almeida) e Vilar de Mouros (Caminha).**

Carla Filipa Correia da Silva

UMinho | 2021



Universidade do Minho
Escola de Ciências

Carla Filipa Correia da Silva

**Aplicação de “Ground Penetrating Radar”
(GPR) na prospeção de pegmatitos – casos
de estudo de Malpartida (Almeida) e Vilar
de Mouros (Caminha).**

dezembro de 2021



Universidade do Minho

Escola de Ciências

Carla Filipa Correia da Silva

**Aplicação de “*Ground Penetrating Radar*”
(GPR) na prospeção de pegmatitos – casos
de estudo de Malpartida (Almeida) e Vilar
de Mouros (Caminha).**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Geociências
Ramo de Valorização de Recursos Geológicos

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Carlos Augusto Alves Leal Gomes

e do
Professor Doutor Luís Miguel Barros Gonçalves

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



Atribuição

CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

“A terra tem música para quem a ouve.” – George Santayana

Não há palavras para descrever o quão grata estou pelas pessoas que me ajudaram, de forma direta e indireta, a realizar esta dissertação. Àquelas que estiveram sempre comigo nos momentos bons e maus, àquelas que nunca me julgaram e sempre tiveram uma palavra amiga mesmo no momento mais baixo que passei neste último ano, àquelas que sempre estavam disponíveis para me ajudar presencialmente durante as idas a campo, àqueles que entraram recentemente na minha vida e que me ajudaram a tornar uma pessoa melhor, um sincero OBRIGADA a todos vocês.

Deixo um especial obrigada aos meus orientadores, professor Leal Gomes e professor Luís, pela transmissão de conhecimento, pelas conversas e por me “aceitarem”, pois sem eles esta dissertação não estaria concluída.

Um outro especial obrigada aos meus pais, Jorge e Paula, e ao meu irmão, John Peter.

Obrigada a vocês pela vossa paciência durante este tempo todo e pela ajuda, mais uma vez: Francisco (homem escala); Bruno Carvalho; Carlos; Bruno Cibrão; Gustavo; Marcelo; Martim; Mariana Costa; Rosas do Deserto; Trupe⁶ – que na verdade são sete; Paula Correia; Patrícia Correia.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho acadêmico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração. Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

STATEMENT OF INTEGRITY

I hereby declare having conducted this academic work with integrity. I confirm that I have not used plagiarism or any form of undue use of information or falsification of results along the process leading to its elaboration. I further declare that I have fully acknowledged the Code of Ethical Conduct of the University of Minho.

RESUMO

Aplicação de “Ground Penetrating Radar” (GPR) na prospeção de pegmatitos – casos de estudo de Malpartida (Almeida) e Vilar de Mouros (Caminha).

Recentemente, os métodos geofísicos têm sido cada vez mais usados em geologia, apresentando eficácia prospectiva em áreas como na geologia ambiental, geotecnia, pedologia, geomorfologia e valorização de recursos geológicos. Em formas gerais, os métodos geofísicos permitem detetar estruturas e anomalias a grandes profundidades sem precisar de haver invasão do terreno. Por exemplo o caso da Mina de Neves Corvo (Castro Verde, Beja) os primeiros indícios da jazida foram obtidos pelo método gravimétrico de prospeção (Carvalho, 1981).

Apesar da maior parte dos métodos geofísicos, como por exemplo, os eletromagnéticos, gravimétricos e elétricos serem persuasivos a médias e grandes profundidades, o *Ground Penetrating Radar* (GPR) tem dado melhores resultados no que toca na deteção de estruturas e anomalias a baixas profundidades com maior resolução, pelo que é possível usá-lo em locais de áreas mais reduzidas (Grangeia & Matias, 2004; Barraca *et al.*, 2019), sugeridos por outros métodos geofísicos ou pela pesquisa geológica e eventualmente exploração mineira.

Encontram-se exemplos desta funcionalidade em estudos realizados nos Estados Unidos da América (San Diego Co., Califórnia) (Patterson, 2003; Patterson & Cook, 2002) e no Brasil (Teófilo Otoni, Minas Gerais) (Aranha *et al.*, 2018; Horn *et al.*, 2018). Estes trabalhos foram dedicados a estruturas de cavitações em pegmatitos aplíticos, situações muito similares àquelas que são abordadas neste estudo. Pode, pois, postular-se que o GPR é indicado para pôr em evidência, em formações pegmatíticas miarolíticas ou outros que possuem concentrações de minerais de interesse económico.

Esta dissertação irá incidir em dois casos de estudos que irão testar a funcionalidade, a eficácia e a eficiência do método GPR aplicado à deteção de vãos ocluídos, ou não, em corpos pegmatíticos ou formações que os comportam. Os casos de estudo serão realizados em Vilar de Mouros (Caminha, Viana do Castelo) junto a um talude e em Malpartida (Almeida, Guarda) numa pedreira, onde os resultados foram bastante favoráveis.

Palavras-chave: cavidades miarolíticas, GPR, Malpartida, Vilar de Mouros

ABSTRACT

Application of "Ground Penetrating Radar" (GPR) in the prospecting of pegmatites - case studies of Malpartida (Almeida) and Vilar de Mouros (Caminha).

Recently, geophysical methods have been increasingly used in geology, presenting prospective effectiveness in areas such as environmental geology, geotechnics, pedology, geomorphology and valorisation of geological resources. In general, geophysical methods allow the detection of structures and anomalies at great depths without the need for land invasion. For example, in the case of Neves Corvo Mine (Castro Verde, Beja) the first evidence of the deposit was obtained by gravimetric prospecting (Carvalho, 1981).

Although most geophysical methods, such as electromagnetic, gravimetric and electric methods are persuasive at medium and great depths, Ground Penetrating Radar (GPR) has given better results when it comes to detecting structures and anomalies at shallower depths with higher resolution, so it is possible to use it in sites of smaller areas (Grangeia & Matias, 2004; Barraca *et al.*, 2019), suggested by other geophysical methods or by geological research and eventually mining.

Examples of this functionality are found in studies conducted in the United States of America (San Diego Co., California) (Patterson, 2003; Patterson & Cook, 2002) and in Brazil (Teófilo Otoni, Minas Gerais) (Aranha *et al.*, 2018; Horn *et al.*, 2018). These works were devoted to cavitation structures in aplitic pegmatites, situations very similar to those addressed in this study. It can therefore be postulated that GPR is indicated to put in evidence, in pegmatite formations miarolitic or others that have concentrations of minerals of economic interest.

This dissertation will focus on two case studies that will test the functionality, the effectiveness, and the efficiency of the GPR method applied to the detection of spans occluded, or not, in pegmatite bodies or formations that hold them. The case studies will be carried out in Vilar de Mouros (Caminha, Viana do Castelo) near a slope and in Malpartida (Almeida, Guarda) in a quarry, where the results were quite favorable.

Keywords: GPR, Malpartida, miarolytic cavities, Vilar de Mouros

Índice

Índice de figuras	ix
Índice de tabelas	xix
Capítulo I.....	1
1. Introdução.....	2
1.1 Considerações iniciais.....	2
1.1.1 Objetivos do trabalho	3
1.2 Noções teóricas: Pegmatitos	3
1.2.1 Classificação e nomenclatura dos pegmatitos.....	3
1.2.2 Composição mineralógica, estruturas e zonamentos.....	6
1.2.3 Génese do pegmatito	8
1.2.4 Campos Pegmatíticos em Portugal	9
1.2.5 Geração de cavidades miarolíticas.....	9
1.2.5.1 Tipologia de cavidades pegmatíticas.....	10
1.3 Noções teóricas: <i>Ground Penetrating Radar</i>	11
1.3.1 Estado da arte: uso do Georadar em Portugal e na geologia.....	11
1.3.2 Fundamentos teóricos.....	12
1.3.3 Funcionamento e equipamento	18
1.4 Estado da arte na aplicação do GPR em pegmatitos	20
1.4.1 San Diego Co., Califórnia, EUA	21
1.4.2 Teófilo Otoni, Minas Gerais, Brasil	21
Capítulo II.....	23
2. Casos de estudo.....	24
2.1 Vilar de Mouros, Caminha, Viana do Castelo	24
2.1.1 Reconhecimento da área de estudo.....	25
2.2 Malpartida, Almeida, Guarda.....	28
2.2.1 Reconhecimento da área de estudo.....	30
Capítulo III.....	33
3. Processo de aquisição e visualização, processamento e tratamento de dados.....	34
3.1 Equipamento e <i>software</i>	34
3.2 Aquisição de dados.....	35
3.2.1 Vilar de Mouros, Caminha, Viana do Castelo.....	35
3.2.1.1 Resultados.....	38

3.2.2	Malpartida, Almeida, Guarda	39
3.2.2.1	Resultados	41
3.3	Visualização, processamento e tratamento de dados	41
Capítulo IV	43
4.	Discussão e interpretação dos dados	44
4.1	Vilar de Mouros, Caminha, Viana do Castelo	44
4.1.1	Área A.....	44
4.1.2	Área B	46
4.2	Malpartida, Almeida, Guarda.....	48
4.2.1	Área A.....	48
4.2.2	Área C	51
Capítulo V	59
5.	Considerações finais.....	60
5.1	Trabalhos e futuras recomendações.....	63
Bibliografia	65
Anexos	lxxiv

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulos

- Figura 1.1** – A resolução vertical de interfaces encontra-se dependente da frequência da energia emitida e da distância entre as duas superfícies planares (Δd). Para frequências mais elevadas, a energia gerada possui comprimento de onda suficientemente baixo para poder identificar as duas superfícies. Para frequências médias, o comprimento de onda quase não consegue resolver as duas interfaces e, para frequências baixas, o elevado comprimento de onda resolverá as duas interfaces como sendo apenas uma (adaptado de Conyers, 2004)..... 17
- Figura 1.2** – Dispersão cónica da energia de Radar no solo. A área de incidência da radiação eletromagnética no solo pode ser estimada a partir da frequência da antena e da permitividade relativa média do solo percolado (adaptado de Conyers, 2004)..... 18
- Figura 1.3** – Descrição dos componentes e modo de operação de um sistema de GPR moderno (adaptado Assunção, 2016). 19
- Figura 2.1** – A: Imagem satélite da área envolvente do local de estudo; B: Excerto da Minuta (revisão) da Folha 1-C da Carta Geológica de Portugal, na escala 1:50 000, e a sua respetiva legenda..... 24
- Figura 2.2** – Fotografias dos pegmatitos preenchidos por pedras de forma a prevenir os escorregamentos dos sedimentos clásticos (setembro, 2021). 26
- Figura 2.3** – Fotografia do talude onde se observa o fenómeno estrutural *kink-bands* mencionado por Lobarinhas, Dias & Leal Gomes (2014) e os pegmatitos preenchidos por pedras à esquerda da foto (novembro, 2021). 26
- Figura 2.4** – Esquema dos trajetos a percorrer com o equipamento GPR nos caminhos de acesso no talude em Vilar de Mouros. O trajeto marcado pela linha verde é o trajeto a percorrer e o trajeto marcado com a linha rosa está sob análise, pois só será realizado se for possível passar com o equipamento devido à vegetação. 27
- Figura 2.5** – Fotografia de uma cavidade no talude em Vilar de Mouros (Caminha, Viana do Castelo) (outubro, 2021)..... 28
- Figura 2.6** – Levantamento fotográfico de uma das frentes de desmonte da pedreira de Malpartida onde é possível observar um veio pegmatítico apresentando cavidades miarolíticas (julho, 2021). 28
- Figura 2.7** – Levantamento fotográfico das cavidades encontradas na pedreira de Malpartida (Almeida, Guarda) (julho, 2021)..... 29
- Figura 2.8** – Imagem aérea, retirada do GoogleEarth, da pedreira de Malpartida (Almeida, Guarda)..... 30
- Figura 2.9** – Mapa esquemático da pedreira de Malpartida (Almeida, Guarda) com as futuras áreas de passagem do equipamento de GPR. Nos Anexos, da Figura f a i, está apresentado algumas imagens com informações recolhidas em campo durante o reconhecimento das áreas de estudo, principalmente da área A, B e C. 31
- Figura 2.10** – Levantamento fotográfico da litologia presente na pedreira de Malpartida (Almeida, Guarda). A: observação de um granito afanítico junto com um granito mais porfiroide

com megacristais, na área A2; B: pormenor dos cristais no granito porfiroide mencionado na fotografia A; C: contacto de dois granitos de diferentes granularidades (área A2); D: possível observação da diferenciação granítica em volta das cavidades (área C); E: granito de grão fino na área C. Imagens com maior resolução nos Anexos, Figura j. 32

Figura 3.1 – Exemplos de uso do equipamento GPR em dois tipos de aparato com antenas diferentes, 200 MHz em A e de 400 MHz em B. Nesta dissertação o aparato usado foi o da situação A por ser mais simples e fácil..... 34

Figura 3.2 – Fotografia satélite com as coordenadas (aproximadas) dos pontos iniciais e finais de cada trajeto das áreas A e B. 36

Figura 3.3 – Perfis topográficos das áreas A e B. No perfil da área A foi realizado 5 secções de acordo com a topografia. No perfil da área B foi realizado apenas uma só secção..... 36

Figura 3.4 – Levantamento fotográfico de evidências do pegmatito clástico no talude do acesso (estrada de terra batida) (dezembro, 2021). 37

Figura 3.5 – Levantamento fotográfico da passagem do equipamento de GPR na secção 3 e 4 da área A (A e B) e da área B (C) pelas setas verdes (dezembro, 2021). 37

Figura 3.6 – Fotografia área, Google Earth, dos trajetos realizados em Vilar de Mouros (Caminha, Viana do castelo). 38

Figura 3.7 – Esquemas representativos da passagem do equipamento de GPR com a antena de 400 MHz na área A (A1, A2 e A3). Esquema mais pormenorizado nos Anexos, Figura k. 39

Figura 3.8 – Esquema representativo (sem escala nos esquemas) da passagem do GPR com as antenas de 200 MHz e 400 MHz na área C (C1 e C2). Esquema mais pormenorizado nos Anexos, Figuras l e m. 40

Figura 3.9 – Esquema (sem escala) da passagem da antena de 400 MHz na frente de desmante da área C (Figura 2.6 – Capítulo II). 41

Figura 4.1 – Radargramas correspondentes à secção 4 da área A do talude de Vilar de Mouros, com a antena de 200 MHz (*File___305* e *File___306*), com uma distância máxima de 61,54 m e 60,94 m, respetivamente, e uma profundidade máxima de 13,75 m. Para o tratamento dos perfis foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), exceto o “*fk migration*”, o filtro “*XFlipProfile*” foi somente usado no perfil B. 45

Figura 4.2 – Radargramas correspondentes à secção 5 da área A do talude de Vilar de Mouros, com a antena de 200 MHz (*File___307* e *File___308*), com uma distância máxima de 50,94 m e 49,78 m, respetivamente, e uma profundidade máxima de 13,75 m. Para o tratamento dos perfis foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), exceto o “*fk migration*”, o filtro “*XFlipProfile*” foi somente usado no perfil B. 46

Figura 4.3 – Levantamento fotográfico das zonas de interesse do talude do acesso (dezembro, 2021). 46

Figura 4.4 – Radargrama correspondente à área B (*File___309*) do talude de Vilar de Mouros com a antena de 200 MHz, com uma distância máxima de 67,13 m e uma profundidade máxima de 17,90 m. Para o tratamento dos perfis foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), exceto o “*fk migration*” e o “*XFlipProfile*”. 47

Figura 4.5 – Levantamento fotográfico do talude oposto da passagem do GPR (outubro, 2021).....	47
Figura 4.6 – Radargrama correspondente à secção A1 (<i>File___411</i>) de direção E-W com uma distância máxima de 20.30 m e uma profundidade máxima de 6.30 m. Para o tratamento do perfil foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “ <i>FlipXprofile</i> ”, o “ <i>fk migration</i> ” foi somente aplicado no perfil B.....	48
Figura 4.7 – Radargrama correspondente à secção A2 (<i>File___406</i>) de direção N-S com uma distância máxima de 11,00 m e uma profundidade máxima de 8,54 m. Para o tratamento do perfil foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), exceto o “ <i>fk migration</i> ” que foi somente aplicado no perfil B.	50
Figura 4.8 – Radargrama correspondente à secção A3 (<i>File___410</i>) de direção N-S com uma distância máxima de 50,00 m e uma profundidade máxima de 5,80 m. Para o tratamento do perfil foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), exceto “ <i>XFlipProfile</i> ”, o “ <i>fk migration</i> ” foi somente aplicado no perfil B.....	51
Figura 4.9 – Radargramas correspondentes à secção C1 (<i>File___389 – 400 MHz; File___414 – 200 MHz</i>) de direção S-N com uma distância máxima de 18,40 (43) m e uma profundidade máxima de 6,50 m e 12,90 m, respetivamente. Para o tratamento do perfil foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), exceto “ <i>XFlipProfile</i> ” e o “ <i>fk migration</i> ”.....	52
Figura 4.10 – Radargramas correspondentes à secção C2 (<i>File___383 – 400 MHz; File___415 – 200 MHz</i>) de direção S-N com uma distância máxima de 6,60 m e uma profundidade máxima de 5,80 m e 12,40 m, respetivamente. Para o tratamento do perfil foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), exceto “ <i>XFlipProfile</i> ” e o “ <i>fk migration</i> ”.....	54
Figura 4.11 – Radargramas correspondentes à secção C2 (<i>File___373 – 400 MHz; File___416 – 200 MHz</i>) de direção W-E com uma distância máxima de 8,00 m e 10,10 m, e uma profundidade máxima de 5,35 m e 12,85 m, respetivamente. Para o tratamento do perfil foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), exceto “ <i>XFlipProfile</i> ”, que foi usado apenas no perfil B, e o “ <i>fk migration</i> ”.....	55
Figura 4.12 – Radargramas correspondentes à secção C5 (<i>File___396 e File___399</i>) de direção S-N e W-E com uma distância máxima de 5,70 m, e uma profundidade máxima de 6,30 m. Para o tratamento dos perfis foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), exceto “ <i>XFlipProfile</i> ”, e o “ <i>fk migration</i> ” só foi usado no perfil C e D.....	56
Figura 4.13 – Levantamento fotográfico do bloco solto com a indicação da passagem do GPR nos hasteais a N e W (julho, 2021). A: Hasteal W (N-S); B: Hasteal N (W-E).	57
Figura 5.1 – Reconstituição dos fulcros de anomalias extraídos das diversas orientações conjugadas de varrimento GPR, com a antena de 400 MHz.	61
Figura 5.2 – Continuação da Figura 5.1.	62
Figura 5.3 – Reconstituição dos fulcros de anomalias extraídos das diversas orientações conjugadas de varrimento GPR, com a antena de 400 MHz (primeiro nível) e com a antena de 200 MHz (segundo nível).	62

Anexos

- Figura a** – Imagens que exemplificam termos da tipologia das cavidades pegmatíticas em Portugal continental. Os respetivos pegmatitos encontram-se descritos em Leal Gomes e Azevedo (2003) e Ferreira *et al.* (2014). lxxv
- Figura b** – Continuação da figura anterior (Figura a). lxxvi
- Figura c** – Estado da vegetação encontrada em Vilar de Mouros, onde não era possível a passagem do GPR (outubro, 2021). lxxvii
- Figura d** – Fotografias de cristais de helvite ($\text{Be}_3\text{Mn}^{2+}_4(\text{SiO}_4)_3\text{S}$) (A e B) e de cristais de espessartine ($\text{Mn}^{2+}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$) sobre microclina pertite \pm caolinite \pm mica (C e D). Espécimes com valor museológico obtidos do revestimento de algumas cavidades miarolíticas vazias de Malpartida. lxxvii
- Figura e** – Levantamento fotográfico dos minerais encontrados nas cavidades pegmatíticas em Malpartida (Almeida, Guarda). A: Espessartine, uma variedade de granada; B: Schorolite, uma variedade de turmalina; C: Feldspato e moscovite no tecto de uma das cavidades. lxxviii
- Figura f** – Dados recolhidos durante o reconhecimento da área A (julho, 2021). lxxviii
- Figura g** – Dados recolhidos durante o reconhecimento da área B (julho, 2021). lxxix
- Figura h** – Dados recolhidos durante o reconhecimento da área C (julho, 2021). lxxix
- Figura i** – Continuação da Figura h. lxxx
- Figura j** – Imagens do levantamento fotográfico da litologia de pedreira de Malpartida (Almeida, Guardar) com maior resolução (Figura 2.4 – Capítulo II) lxxxi
- Figura k** – Esquema pormenorizado da Figura 3.7 – Capítulo III. lxxxii
- Figura l** – Esquema pormenorizado da Figura 3.8 – Capítulo III. lxxxii
- Figura m** – Continuação da Figura l. lxxxiii
- Figura n** – Recorte do menu “*geometry and processing*” do *software* usado para o processamento, tratamento e visualização de dados de GPR, Reflex2DQuick. lxxxiv
- Figura o** – Radargramas da secção 1 (*File__299* e *File__300*) da área A de Vilar de Mouros (Caminha, Viana do Castelo), com comprimento máximo de 33,38 m e 28,18 m, respetivamente, e profundidade máxima de 17,90 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 200 MHz. lxxxv
- Figura p** – Radargramas da secção 2 (*File__301* e *File__302*) da área A de Vilar de Mouros (Caminha, Viana do Castelo), com comprimento máximo de 37,42 m e profundidade máxima de 17,90 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 200 MHz. lxxxvi
- Figura q** – Radargramas da secção 3 (*File__303* e *File__304*) da área A de Vilar de Mouros (Caminha, Viana do Castelo), com comprimento máximo de 28,06 m e 28,86 m, respetivamente, e profundidade máxima de 12,30 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 200 MHz. lxxxvii

Figura r – Radargramas da secção 4 (*File__305* e *File__306*) da área A de Vilar de Mouros (Caminha, Viana do Castelo), com comprimento máximo de 61,54 m e 60,94 m, respetivamente, e profundidade máxima de 13,75 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 200 MHz. lxxxviii

Figura s – Radargramas da secção 5 (*File__307* e *File__308*) da área A de Vilar de Mouros (Caminha, Viana do Castelo), com comprimento máximo de 50,94 m e 49,78 m, respetivamente, e profundidade máxima de 13,75 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 200 MHz. lxxxix

Figura t – Radargrama da única secção (*File__309*) da área B de Vilar de Mouros (Caminha, Viana do Castelo), com comprimento máximo de 67,13 m e profundidade máxima de 17,90 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz. xc

Figura u – Levantamento fotográfico das secções da área A em Malpartida (Almeida, Guarda) (outubro, 2021).....xci

Figura v – Levantamento fotográfico das secções da área C em Malpartida (Almeida, Guarda), principalmente do bloco solto de como ele se encontrava em relação aos hasteais da área C1 e C3 (outubro, 2021).....xci

Figura w – Radargrama da secção A1 (*File__411*) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção S-N, com comprimento máximo de 12,22 m e profundidade máxima de 5,40 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.xcii

Figura x – Radargrama da secção A1 (*File__412*) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção E-W, com comprimento máximo de 20,30 m e profundidade máxima de 6,30 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.xciii

Figura y – Radargrama da secção A2 (*File__403*) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção N-S, com comprimento máximo de 10,60 m e profundidade máxima de 4,05 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.xciv

Figura z – Radargrama da secção A2 (*File__404*) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção N-S, com comprimento máximo de 10,80 m e profundidade máxima de 5,80 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz.xcv

Figura aa – Radargrama da secção A2 (*File__405*) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção N-S, com comprimento máximo de 10,90 m e profundidade máxima de 5,80 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.xcvi

Figura bb – Radargrama da secção A2 (*File__406*) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção N-S, com comprimento máximo de 11,00 m e profundidade máxima de 5,82 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz.xcvii

Figura cc – Radargrama da secção A2 (*File__407*) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção N-S, com comprimento máximo de 11,00 m e profundidade máxima de 5,82 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. xcviii

Figura dd – Radargrama da secção A2 (*File__408*) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção N-S, com comprimento máximo de 11,26 m e profundidade máxima de 5,82 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz. xcix

Figura ee - Radargrama da secção A2 (*File__409*) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção N-S, com comprimento máximo de 11,76 m e profundidade máxima de 5,80 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. c

Figura ff - Radargrama da secção A3 (*File__410*) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção N-S, com comprimento máximo de 48,95 m e profundidade máxima de 5,80 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. ci

Figura gg – Radargrama da secção C1 (*File__414*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção S-N, com comprimento máximo de 18,39 m e profundidade máxima de 12,91 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 200 MHz. cii

Figura hh – Radargrama da secção C2 (*File__416*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção W-E, com comprimento máximo de 10,10 m e profundidade máxima de 12,84 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 200 MHz. cii

Figura ii – Radargrama da secção C2 (*File__415*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção S-N, com comprimento máximo de 6,62 m e profundidade máxima de 12,38 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 200 MHz. ciii

Figura jj – Radargrama da secção C2 (*File__413*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção W-E, com comprimento máximo de 8,70 m e profundidade máxima de 12,91 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 200 MHz. ciiv

Figura kk – Radargrama da secção C1 (*File__387*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção S-N, com comprimento máximo de 19,60 m e profundidade máxima de 5,83 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. civ

Figura ll – Radargrama da secção C1 (*File__388*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção S-N, com comprimento máximo de 19,20 m e profundidade máxima de 6,47 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. cv

Figura mm – Radargrama da secção C1 (*File__389*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção S-N, com comprimento máximo de 18,43 m e profundidade máxima de 6,50

m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. cvi

Figura nn – Radargrama da secção C1 (File___390) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção S-N, com comprimento máximo de 17,60 m e profundidade máxima de 6,60 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.cvii

Figura oo – Radargrama da secção C1 (File___391) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção S-N, com comprimento máximo de 7,00 m e profundidade máxima de 6,60 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.cviii

Figura pp – Radargrama da secção C2 (File___367) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção W-E, com comprimento máximo de 9,06 m e profundidade máxima de 5,77 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.cix

Figura qq – Radargrama da secção C2 (File___368) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção W-E, com comprimento máximo de 9,43 m e profundidade máxima de 5,77 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz.cix

Figura rr – Radargrama da secção C2 (File___369) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção W-E, com comprimento máximo de 9,30 m e profundidade máxima de 5,70 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. cx

Figura ss – Radargrama da secção C2 (File___370) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção W-E, com comprimento máximo de 9,50 m e profundidade máxima de 5,37 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz. cx

Figura tt – Radargrama da secção C2 (File___371) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção W-E, com comprimento máximo de 9,40 m e profundidade máxima de 5,40 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.cxi

Figura uu – Radargrama da secção C2 (File___372) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção W-E, com comprimento máximo de 9,62 m e profundidade máxima de 5,40 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz.cxi

Figura vv – Radargrama da secção C2 (File___373) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção W-E, com comprimento máximo de 8,02 m e profundidade máxima de 5,35 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.cxii

Figura ww – Radargrama da secção C2 (File___374) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção W-E, com comprimento máximo de 7,31 m e profundidade máxima de 4,32 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz.cxii

Figura xx – Radargrama da secção C2 (*File__375*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção W-E, com comprimento máximo de 7,35 m e profundidade máxima de 5,27 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. cxiii

Figura yy – Radargrama da secção C2 (*File__376*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção W-E, com comprimento máximo de 7,50 m e profundidade máxima de 5,31 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz. cxiii

Figura zz – Radargrama da secção C2 (*File__377*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção W-E, com comprimento máximo de 8,31 m e profundidade máxima de 5,25 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. cxiv

Figura aaa – Radargrama da secção C2 (*File__378*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção S-N, com comprimento máximo de 6,82 m e profundidade máxima de 5,37 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. cxiv

Figura bbb – Radargrama da secção C2 (*File__379*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção S-N, com comprimento máximo de 6,75 m e profundidade máxima de 5,83 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz. cxv

Figura ccc – Radargrama da secção C2 (*File__380*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção S-N, com comprimento máximo de 6,94 m e profundidade máxima de 5,73 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. cxv

Figura ddd – Radargrama da secção C2 (*File__381*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção S-N, com comprimento máximo de 6,58 m e profundidade máxima de 4,02 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz. cxvi

Figura eee – Radargrama da secção C2 (*File__382*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção S-N, com comprimento máximo de 6,62 m e profundidade máxima de 5,82 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. cxvi

Figura fff – Radargrama da secção C2 (*File__383*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção S-N, com comprimento máximo de 6,60 m e profundidade máxima de 5,75 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz. cxvii

Figura ggg – Radargrama da secção C2 (*File__384*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção S-N, com comprimento máximo de 7,20 m e profundidade máxima de 5,52 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. cxvii

Figura hhh – Radargrama da secção C2 (*File__385*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção S-N, com comprimento máximo de 5,10 m e profundidade máxima de 5,30

m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz. cxviii

Figura iii – Radargrama da secção C2 (*File___386*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção S-N, com comprimento máximo de 4,71 m e profundidade máxima de 4,80 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. cxviii

Figura jjj – Esquema de uma das frentes de desmorte da pedra de Malpartida (Almeida, Guarda), correspondente à secção C5 da área C (sem escala). 1: Figura kkk; 2: Figura lll; 3: Figura mmm; 4: Figura nnn; 5: Figura ooo; 6: Figura ppp; 7: Figura rrr; 8: Figura qqq. cxix

Figura kkk – Radargrama da secção C5 (*File___394*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda), corresponde ao número 1 da Figura jjj, com comprimento máximo de 16,71 m e profundidade máxima de 6,20 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. cxix

Figura lll – Radargrama da secção C5 (*File___395*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda), corresponde ao número 2 da Figura jjj, com comprimento máximo de 4,51 m e profundidade máxima de 6,15 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. cxix

Figura mmm – Radargrama da secção C5 (*File___396*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda), corresponde ao número 3 da Figura jjj, com comprimento máximo de 5,70 m e profundidade máxima de 6,20 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. cxix

Figura nnn – Radargrama da secção C5 (*File___398*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda), corresponde ao número 4 da Figura jjj, com comprimento máximo de 2,02 m e profundidade máxima de 6,10 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. cxix

Figura ooo – Radargrama da secção C5 (*File___399*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda), corresponde ao número 5 da Figura jjj, com comprimento máximo de 5,71 m e profundidade máxima de 6,26 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. cxix

Figura ppp – Radargrama da secção C5 (*File___400*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda), corresponde ao número 6 da Figura jjj, com comprimento máximo de 5,80 m e profundidade máxima de 6,30 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. cxix

Figura qqq – Radargrama da secção C5 (*File___402*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda), corresponde ao número 8 da Figura jjj, com comprimento máximo de 5,98 m e profundidade máxima de 6,21 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. cxix

Figura rrr – Radargrama da secção C5 (*File___401*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda), corresponde ao número 7 da Figura jjj, com comprimento máximo de 14,30 m e profundidade máxima de 6,20 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz. cxxiv

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulos

- Tabela 1.1** – Tipos de pegmatíticos graníticos após a modificação de Ginsburg *et al.* (1979, 1984) por Cerný (1990) (adaptado de Marques de Souza, 1999). 5
- Tabela 1.2** – Associações mineralógicas encontradas nas zonas pegmatíticas segundo Cameron *et al.* (1949). É de realçar que a sequencia descrita na tabela não se encontra representada integralmente num único pegmatito (adaptado de Marques de Souza, 1999). 7
- Tabela 1.3** – Exemplos paradigmáticos dos modelos conceptuais para os tipos diferentes de cavidades pegmatíticas em Portugal. Na Figura a e b (Anexos) encontram-se figuras referentes aos exemplos. Adaptado de Leal Gomes & Azevedo (2003) e Ferreira, *et al.*, 2014. 11
- Tabela 1.4** – Características dieléctricas de materiais comuns. Adaptado de Gonçalves, 2013. 15
- Tabela 1.5** – Comprimento de onda (metros) das ondas de radar de acordo com a permitividade elétrica relativa (ϵ_r) do meio e a frequência central da antena. Adaptado de Conyers, 2004 (*in* Gonçalves, 2013). 16
- Tabela 2.1** – Dados adquiridos em campo do filão pegmatítico, das cavidades e das diáclases visíveis nas áreas C e D. * corresponde à cavidade presente na Figura 2.7 (A). 31
- Tabela 3.1** – Altitudes dos pontos dos perfis topográficos da Figura 3.3. 38
- Tabela 3.2** – Sequência de processamentos usados nos ficheiros *File___368* e *File___369*, referentes à secção C2 da área C de Malpartida, Almeida, e o *File___303* referente à secção 3 área A de Vilar de Mouros. Os valores a azul são valores já pré-definidos pelo software quando o radargrama foi processado, os valores a vermelho estão relacionados com a velocidade, determinada através do método das hipérbolas, e o parâmetro associado só era ativado quando era necessária uma melhor interpretação. A correção topográfica foi somente usada nos dados de Vilar de Mouros devido ao terreno apresentar diferentes altitudes. 42

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Os pegmatitos são diques de grão grosseiro ou segregações de uma composição, geralmente, granítica (Frost & Frost, 2014; Thorpe & Brown, 1985), os pegmatitos de composição gabroica ou diorítica são mais raros.

A maioria dos corpos pegmatíticos tem origem em magmas graníticos ricos em fluidos enriquecidos em elementos incompatíveis, voláteis, terras raras e metais raros.

Uma pequena percentagem de pegmatitos apresenta minerais incomuns acessórios, tais como berilo, turmalina, topázio, espodumena e granada, uma variedade que são típicas destas rochas e corpos que a incluem. As cavidades são muito comuns podendo estar preenchidas por minerais comuns ou incomuns (acessórios), por argila ou até mesmo por água.

Os depósitos pegmatíticos são muito importantes, pois constituem a fonte principal e por vezes única de minerais industriais e metais raros por vezes considerados do ponto de vista económico e tecnológico, com estratégicos ou críticos (Thomas & Davidson, 2007; Best, 2003; Thorpe & Brown, 1985; Winter, 2013).

Recentemente, os métodos geofísicos têm sido cada vez mais usados em geologia, apresentado eficácia perspetiva em áreas como na geologia ambiental, geotecnia, pedologia, geomorfologia e valorização de recursos geológicos. Em formas gerais, os métodos geofísicos permitem detetar estruturas e anomalias a grandes profundidades sem precisar de haver invasão do terreno. Por exemplo o caso da Mina de Neves Corvo (Castro Verde, Beja) os primeiros indícios da jazida foram obtidos pelo método gravimétrico de prospeção (Carvalho, 1981).

Apesar da maior parte dos métodos geofísicos, como por exemplo, os eletromagnéticos, gravimétricos e elétricos serem persuasivos a médias e grandes profundidades, o *Ground Penetrating Radar* (GPR) tem dado melhores resultados no que toca na deteção de estruturas e anomalias a baixas profundidades com maior resolução, pelo que é possível usá-lo em locais de áreas mais reduzidas (Grangeia & Matias, 2004; Barraca *et al.*, 2019), sugeridos por outros métodos geofísicos ou pela pesquisa geológica e eventualmente exploração mineira.

Encontram-se exemplos desta funcionalidade em estudos realizados nos Estados Unidos da América (San Diego Co., Califórnia) (Patterson, 2003; Patterson & Cook, 2002) e no Brasil (Teófilo Otoni, Minas Gerais) (Aranha *et al.*, 2018; Horn *et al.*, 2018). Estes trabalhos foram dedicados a estruturas de cavitações em pegmatitos aplíticos, situações muito similares àquelas que são abordadas neste estudo. Pode, pois, postular-se que o GPR é indicado para pôr em evidência, em formações pegmatíticas miarolíticas ou outros que possuem concentrações de minerais de interesse económico.

1.1.1 Objetivos do trabalho

Numa abordagem metodológica similar dos autores referidos, procurou-se aqui tentar a funcionalidade, a eficácia e eficiência do método GPR aplicado à deteção de vãos ocluídos ou não em corpos pegmatíticos ou formações que os comportam. Vão-se considerar duas situações limite com aplicação em dois âmbitos experimentais distintos:

1. Deteção de anomalias relativas à remoção de enchimento pegmatítico argilizado no seio de formação metasedimentar; com a filiação do estudo geotécnico da estabilidade de taludes e infraestruturas rodoviárias de 1^a ordem.

2. Deteção de anomalias relativas a cavidades miarolíticas não ocluídas, em diferenciação pegmatítica Intra granítica em Malpartida, Almeida, Guarda; com aplicação à prospeção e deteção de espécimes de minerais raros em pedreiras graníticas.

1.2 Noções teóricas: Pegmatitos

1.2.1 Classificação e nomenclatura dos pegmatitos

O termo, pegmatítico, tem caris estrutural e textural e é usado para classificar as rochas de grão muito grosseiro e variável, em que os cristais individuais apresentam vários tamanhos, de centímetros a metros (Best, 2003; Winter, 2013). Substitui assim o termo fanerítico. Tal como o granito é classificado como uma rocha leucocrática (pegmatito ácido). Os pegmatitos ultramáficos são raros (Best, 2003).

Os pegmatitos podem ser classificados como pegmatitos simples (homogéneos) e pegmatitos complexos (heterogéneos) (Cameron *et al.*, 1949; Fersman, 1951; Best, 2003). Os **pegmatitos simples (homogéneos)** são aqueles que na sua constituição apresentam albite, quartzo, pertite, e uma pequena percentagem de moscovite, turmalina e granadas de Fe-Mn,

apresentando assim uma composição semelhante ao granito. Os **pegmatitos complexos (heterogêneos)** são constituídos pelos mesmos minerais, porém apresentam uma maior concentração de elementos incompatíveis, como o P, Cl, F e B, metais litófilos, terras raras e outros elementos, que originam minerais exóticos, tais como o topázio (F), espodumena, lepidolite e ambligonite (Li), berilo (Be), columbite-tantalite e pirocloro (Nb, Ta, Ce e Y), cassiterite (Sn), pollucite (Cs), monazite (Ce, La), zircônio (Zr) e uraninite (U).

Estes corpos são muito valorizados na indústria mineira, pois incluem minerais economicamente valiosos. Os pegmatitos complexos são, em geral, mais valiosos pelos seus minerais exóticos, porém os simples também são explorados para a indústria cerâmica e de vidro (Best, 2003).

Dado ao facto de que um corpo pegmatítico apresenta uma estrutura interna e uma composição mineralógica complicada, foram criadas outro tipo de classificações de forma a entender a estruturação do corpo. Uma revisão das classificações atualmente aceites, encontram-se em Černý (2005).

De acordo com os tipos ambientes crustais de formação dos pegmatitos graníticos portadores de elementos raros, Ginsburg *et al.* (1979, 1984) *in* Marques de Souza (1999) dividiu as formações pegmatíticas em quatro classes baseadas na petrogénese e na geoquímica: os **pegmatitos abissais**; os **pegmatitos moscovíticos**; os **pegmatitos portadores de elementos raros**; e os **pegmatitos miarolíticos**.

Mais tarde, Černý (1982a, 1982b) *in* Marques de Souza (1999) modificou a classificação para uma versão mais atual, acrescentando uma subdivisão aos pegmatitos portadores de elementos raros em três famílias (**LCT, NYC e mistos**), com a finalização de reforçar as diferentes litoquímicas. Novamente, Černý (1990) tornou a rever os conceitos dos pegmatitos de elementos raros definindo cinco novos tipos de pegmatitos de acordo com a sua abundância entre o feldspato-K, plagioclase, albite, biotite, moscovite e lepidolite, e em dez subtipos de acordo com a sua assinatura geoquímica.

Na Tabela 1.1 está um resumo da classificação de acordo com a petrogénese e a geoquímica dos pegmatitos graníticos ricos em elementos raros, reunindo os vários fatores que influenciam a formação.

Tabela 1.1 – Tipos de pegmatíticos graníticos após a modificação de Ginsburg *et al.* (1979, 1984) por Cerný (1990) (adaptado de Marques de Souza, 1999).

Classes	Mineração			Ambiente metamórfico			Relação com granitos		Formas estruturais	
	Elementos menores	Concentrações	Minerais	Fáceis	Pressão (kbar)	Temperatura (°C)	Tipo	Características	Encaixante	Ambiente tectónico
Abissal	U, Th, Zr, Nb, Ti, Y, ETR, mo	Pobre a moderada		Anfibolito de alta pressão a granulito de baixa a alta pressão	~ 4 a 9	~ 700 a 800	Nenhuma relação	Pegmatitos de segregação, leucossomas por anatexia	Veios concordantes a discordantes em gnaisses, migmatitos, granulitos e charnoquitos	Faixas colisionais
Moscovíticos	Li, Be, Y, ETR, Ti, U, TH, Nb > Ta	Pobre ou moderada	Micas e minerais cerâmicos	Tipo barrowiano: anfibolito de alta pressão, (sillimanita - cianita)	~ 5 a 8	~ 580 a 650	Nenhuma relação	Corpos por anatexia	Quase concordantes a discordantes em gnaisses, migmatitos, xistos e quartzitos	Faixas colisionais
El. raros/ Mosc.	MISTO (entre os tipos moscovite e elementos raros)		Mineralizações também mistas	Tipo barrowiano: anfibolito de média pressão (cianita. sillimanita)	~ 4 a 6	~ 550 a 650	Externos a marginais	Corpos residuais	Quase concordantes a discordantes em xistos e quartzitos	Faixas colisionais
Elementos raros	Família LTC: Li, Rb, Cs, Be, Ga, Sn, Hf, B, P, F, Nb > Ta	Pobre a abundante	Gemíferos minerais de Li, Be etc	Tipo abukuma: anfibolito de baixa pressão (andaluzita-sillimanita)	~ 2 a 4	~ 500 a 650	Externo, internos a marginais	Granitos tipo-S principalmente	Quase concordantes a discordantes em xistos e quartzitos	Faixas colisionais
	Família NYF: Y, ETR, Ti, U, Th, Zr, F, Nb > Ta	Pobre a abundante	Minerais cerâmicos	Variável	Variável	Variável	Internos a marginais	Granitos tipo-A principalmente	Pods internos em corpos marginais, discordantes ou concordantes em rochas diversas	Ambientes extensionais, incluindo rifts abortados
Miarolíticos	Família NYF: Be, Y, F, ETR, Ti, U, Th, Zr, Nb > Ta	Por vezes abundante em gemas		Superficial a subvulcânicos	~ 2 a 4		Internos (intra) a marginais		Bolsas/ vesículas interiores e diques transversais	

1.2.2 Composição mineralógica, estruturas e zonamentos

As classes mineralógicas predominantes nos pegmatitos são os silicatos, os fosfatos e os óxidos.

Apesar de um corpo pegmatítico resultar de um magma granitóide e apresentar os mesmos minerais típicos (minerais essenciais), a paragênese fracionada do pegmatito possui minerais mais complexos do ponto de vista composicional. A diversidade dos minerais é resultado da diferenciação de fases enriquecidas em componentes voláteis (B_2O_3 , F_2 , H_2O) de grande mobilidade, de metais alcalinos (Li, Rb, Cs) e de uma ampla variedade de minerais acessórios que são portadores de elementos traço e de litófilos.

Os pegmatitos apresentam os seguintes conjuntos de minerais: os minerais essenciais; e os minerais acessórios. Os **minerais essenciais** são, no fundo, os minerais que estão presentes na constituição de um granito, desde o quartzo, os feldspatos (ortoclase e microclina), plagióclases, moscovite e biotite, sendo esta última surgir muito raramente, e outras micas de cor clara. Enquanto, que os **minerais acessórios** são aqueles que surgem a partir dos elementos raros existentes no magma, como é o caso de minerais de lítio, de berilo, de cézio, de boro, de fosforo, de nióbio e tantalato, de estanho, de zircônio, de sulfeto, de urânio e de terras raras.

De forma a entender a cristalização e a associação mineralógica dos vários pegmatitos, foi criado uma sequência que estabelece esses conceitos. A sequência define as zonas mais concêntricas dos corpos pegmatíticos diferenciando-as pela textura e mineralogia, desde o núcleo ao exterior do corpo rochoso. Na Tabela 1.2 está descrito as associações mineralógicas mais comuns segundo Cameron *et al.* (1949) *in* Marques de Souza (1999).

Tabela 1.2 – Associações mineralógicas encontradas nas zonas pegmatíticas segundo Cameron *et al.* (1949). É de realçar que a sequencia descrita na tabela não se encontra representada integralmente num único pegmatito (adaptado de Marques de Souza, 1999).

Zonas	Associações mineralógicas
1	Plagióclase + quartzo + moscovite
2	Plagióclase + quartzo
3	Quartzo + pertite + plagióclase (± moscovite; ± biotite)
4	Pertite + quartzo
5	Pertite + quartzo + plagioclásio + ambligonite + espoduménio
6	Albite + quartzo + espoduménio
7	Quartzo + espoduménio
8	Lepidolite + albite + quartzo
9	Lepidolite + albite + quartzo
10	Microclina + albite + quartzo + micas litíferas
11	Núcleo de quartzo

Dado à complexidade dos corpos pegmatíticos, vários investigadores estabeleceram conceitos fundamentais de zonamento interno de acordo com as suas fases mineralógicas encontradas no interior e das diferentes características texturais. Assim, baseado neste conceito criou-se a classificação de pegmatitos **não zonados** e pegmatitos **zonados**. Estes últimos são considerados os mais valiosos em termos económicos pela sua complexidade mineralógica.

A estrutura interna dos pegmatitos zonados foi dividida em três partes principais: zona de cristalização primária; corpos de substituição; e preenchimento de fraturas.

As **zonas de cristalização primária** são formadas por sucessivas camadas concêntricas em relação ao núcleo, diferenciando-se pela composição mineralógica e/ou textural. Essas zonas são denominadas de **marginal** ou externa, **mural** ou média, **intermediária** ou interna e **núcleo**. Os contactos destas zonas são geralmente graduais, embora em alguns casos seja um contacto abrupto, e como é raro, só em casos especiais, é possível mapear as quatro zonas num corpo pegmatito.

O **preenchimento de fraturas**, como o nome indica, é o preenchimento de minerais das fraturas em unidades pré-existentes em forma, geralmente, tabular.

O **corpo de substituição** é formado pelas substituições mineralógicas de unidades pré-existentes (metassomatismo). Estes corpos são formados por albite lamelar (cleavelandite), mica muitas vezes microcristalina, lepidolite, espodumena, petalite, polucita, pedras preciosas e semipreciosas (turmalina, topázio, etc.).

1.2.3 Gênese do pegmatito

Anteriormente foi referido que os pegmatitos são originados a partir da última fase magmática. Estes corpos são interpretados como um produto de fracionamento ígneo de fusão granítica, porém, segundo Černý (1982a) *in* Marques de Souza (1999), estes corpos podem ter uma origem também anatexia-metamórfica, ou seja, o material provém de uma fusão parcial.

A **origem por anatexia** explica a formação dos pegmatitos por remobilização crustal a grandes profundidades – fáceis metamórfica granulítica. O seu aparecimento está relacionado com os processos geradores de leucossomas em terrenos migmatíticos. Nesta teoria o material pegmatítico, de composição granítica alcalina (supersaturados SiO_2), é um dos primeiros a serem formados durante o processo de remobilização crustal por anatexia. Nos corpos pegmatíticos são reconhecidos altos teores de cálcio, bário e estrôncio e fracionamento de metais alcalinos, explicando assim a origem de alguns pegmatitos simples.

A **origem por fusão magmática residual** explica a solidificação do magma residual ao ocorrer o processo de cristalização fracionada, com eventos de transformação parcial por meio dos fluídos mineralizados. Para que ocorra esta hipótese é necessário que a fusão do magma residual seja rica em elementos voláteis e elementos raros.

Embora haja muitos métodos relacionados com a origem da fusão magmática, em todos os modelos criados por Fersman (1951), Jans (1955) *in* Mason (1971) e Ginburg (1971) (*in* Marques de Souza, 1999), existe dois estágios fundamentais na formação do pegmatito: o **estágio magmático**; e o **estágio hidrotermal**. No primeiro estágio as soluções pegmatíticas seriam alojadas e cristalizadas em um sistema fechado, e o segundo estágio, em sistema aberto, as soluções reagiriam em conjunto. Os dois sistemas são, à partida, formados através da fusão parcial de material crustal, ou em um líquido final produzido durante o resfriamento de um batólito, no qual o líquido silicatado granítico coexistiria com um fluído aquoso salino de baixa densidade.

Atualmente, é dado o reconhecimento ao processo metassomático nas rochas silicatadas, sem no qual era impossível a formação de pegmatitos de valor económico.

1.2.4 Campos Pegmatíticos em Portugal

Em Portugal, em particular na Zona Centro Ibérica (ZCI), ocorre uma diversidade de pegmatitos que se deve à instalação dos granitos *sin e tardi a pós-tectónicos* na orogenia Varisca, obedecendo assim à zonografia paleogeográfica e tectónica.

Esses granitos são o resultado da especialização metalogénica dos granitos parentais, do fracionamento dos magmas e das condições metamórficas e deformacionais dos ambientes de instalação dos respetivos diferenciados (Leal Gomes & Lopes Nunes, 2003), correspondendo assim à Cintura Pegmatítica Centro-Ibérica (Leal Gomes & Lopes Nunes, 2003; Guimarães, 2012).

“As peculiaridades evidenciadas pelos granitos pós-tectónicos, nomeadamente a sub-alcalinidade e a peraluminosidade, e o facto de estes serem granitos pós-colisionais, indiciam que estes resultaram da fusão parcial de materiais infracrustais ou originários do manto superior, com posterior hibridização do magma resultante (magma mantélico). A presença de encraves microgranulares de natureza tonalítica e granodiorítica, que propõem uma fonte mantélica ou basicrustal, fundamenta este pressuposto de origem mista crusta-manto. De notar que, os encraves microgranulares máficos estão, normalmente, relacionados com os granitoides subalcalinos, e são admitidos como o resultado de complexos mecanismos de hibridização que ocorrem entre magmas félsicos e máficos simultâneos (Martins, 1998; Mendes, 2001). Deste modo, associam-se ao modelo concetual *mixing-mingling*.” – Ferreira, 2015.

Associado ao termo *mixing-mingling* encontra-se a troca de constituintes hidromagmáfilos do magma mais básicos para os magmas mais ácidos (Zorpi *et al.*, 1989 *in* Guimarães, 2015), no qual favorece o enriquecimento em voláteis e aumentando a sua eficácia para formar pegmatitos (Leal Gomes & Lopes Nunes, 2003).

1.2.5 Geração de cavidades miarolíticas

O magma ácido em relação ao magma básico apresenta maior viscosidade e menor temperatura *liquidus* e *solidus* (Ferreira, 2015). Devido às diferenças, aquando à ascensão formam-se bolhas de fase fluída que ao soltarem-se, desenvolvem-se e dão origem a cavidades abertas, denominadas por cavidades miarolíticas (Peretyazhko, 2009, 2010 *in* Guimarães, 2012).

Desta forma, os pegmatitos formados a partir de magmas ácidos, geralmente, possuem estas cavidades e são designados por pegmatitos miarolíticos.

Quando à instalação superficial dos magmas graníticos hídricos pode ocorrer o aparecimento de cavidades miarolíticas. A formação dessas cavidades provém da exsolução da fase fluida que resulta da imiscibilidade ($P_r > P_m$) do fluido, no qual é um processo fundamental. Independentemente de os voláteis escaparem ou ficarem aprisionados com a fundição do magma é uma funcionalidade conjunta entre a temperatura e a pressão. O aprisionamento é mais provável ocorrer quando o calor dissipa para um arrefecimento rápido, assim as cavidades são mais comuns nas rochas de grão fino. Os voláteis menos densos ascendem para as zonas apicais das camaras magmáticas quando o grau de cristalização do magma está baixo.

Černý (1990) (Tabela 1.1) considera que os pegmatitos miarolíticos pertencem à filiação NYF. Mas no caso dos campos filonianos de Ilha de Elba, na Itália, e do condado de San Diego, nos Estados Unidos da América, encontram-se as cavidades de maior interesse económico em pegmatitos do tipo LCT.

1.2.5.1 Tipologia de cavidades pegmatíticas

As cavidades presentes nos pegmatitos surgem através de vários processos geológicos que, por sua vez, originam diferentes tipos de cavidades, desde o tamanho, génese e formato. Os processos geológicos podem estar associados a fatores de deformação cisalhante transpressiva e transtensiva, à dissolução total ou seletiva (corrosão), à polarização gerada por fracionamento do magma ou por colapso gravítico. Associado a estes fatores está o tipo de preenchimento que as cavidades podem possuir, pois cada fator proporciona a qualidade da cavidade, sendo preenchida por minerais raros, argilas, por águas ou até mesmo se encontrarem vazias.

Em Portugal há vários exemplos de modelos de cavidades, que vão desde tamanhos milimétricos a vários metros, como é o caso de Cerdal, Valença, onde as cavidades são de centímetros, e de Nossa Senhora de Assunção, onde o pegmatito apresenta vários metros (Figura a e b – Anexos) (Leal Gomes & Azevedo, 2003; Ferreira, *et al.*, 2014). De forma a definir as cavidades encontradas em Portugal criou-se modelos conceptuais de modo a distinguir a sua génese. Na Tabela 1.3 está um resumo desses modelos com um exemplo paradigmático encontrados no país. Este resumo apenas menciona os casos em Portugal, pois a diversidade de cavidades pegmatíticas é muito maior do que as sugeridas.

Tabela 1.3 – Exemplos paradigmáticos dos modelos conceptuais para os tipos diferentes de cavidades pegmatíticas em Portugal. Na Figura a e b (Anexos) encontram-se figuras referentes aos exemplos. Adaptado de Leal Gomes & Azevedo (2003) e Ferreira, *et al.*, 2014.

Definição	Génese	Exemplos
DT	Cavidade de dissolução total	Pegmatitos de Terras de Bouro
CC	Cavidade de dissolução seletiva ou cavidades de corrosão, com ou sem “ <i>box-work</i> ”	Pegmatito sul do grupo Senhora da Assunção
MV	Cavidades miarolíticas verdadeiras	Felgueiras - Cerdal, Valença; Pegmatitos da Senhora da Lapa; Malpartida, Almeida
MFP	Cavidades miarolíticas polares geradas por fracionamento	Malpartida, Almeida
MCG	Cavidades miarolíticas polares relacionadas com colapso gravítico	Pegmatito sul do grupo Senhora da Assunção; Corvaceira, Viseu
MT	Cavidades miarolíticas relacionadas com deformação cisalhante transpressiva e transtensiva	Pegmatitos de Vilar de Mouros; Pegmatito de Terras de Bouro

1.3 Noções teóricas: *Ground Penetrating Radar*

1.3.1 Estado da arte: uso do Georadar em Portugal e na geologia

O Georadar ou GPR (*Ground Penetrating Radar*) consiste numa metodologia de prospeção geofísica baseada na propagação de radiação eletromagnética por um meio dielétrico (sedimentos, solos, rochas, betão, água, etc.). Essa radiação é comumente designada por ondas eletromagnéticas ou por ondas de rádio. De facto, o GPR além de ser expedito, não invasivo e não destrutivo, como outros métodos de prospeção geofísica, proporciona imagens bidimensionais e tridimensionais do terreno a prospectar com uma resolução muito superior à dos outros métodos (Grangeia & Matias, 2004).

Na comunidade académica o termo GPR é o mais utilizado, tornando-se assim universalmente aceite. Em Portugal, pela Comunidade Científica de Língua Portuguesa, é usado o termo Georadar, porém nesta dissertação, por motivos práticos, iremos usar o termo GPR.

Este método geofísico, nas últimas décadas, evoluiu de forma impulsionada e condicionada a responder às necessidades práticas dos utilizadores desta metodologia em diversas áreas de pesquisa, desde a área da geologia, da engenharia, passando pela arqueologia, entre outras.

Em Portugal, o uso deste método deu os seus primeiros passos na década de 1990, quando a nível mundial já era uma tecnologia bem consolidada. Os primeiros estudos publicados foram

efetuados pelo LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) que remontam os anos 1991 por Rodrigues. Associado a esta mesma empresa existiram mais trabalhos na aplicação de GPR no contexto rodoviário pela Doutora Marília Oliveira.

Também na mesma década, a Universidade de Aveiro foi a grande pioneira no uso deste equipamento no meio académico, aplicando o método à arqueologia, às questões ambientais e às questões a nível dos recursos geológicos e hidrológicos.

A partir da década de 2000 a utilização do GPR começa a diversificar para o restante meio académico, estando assim presente, atualmente, em diversas instituições académicas nacionais, realizando investigações nas várias áreas das geociências, da engenharia civil e nas ciências forenses.

Já a nível empresarial, no final da década de 1990, a utilização do GPR começou a surgir como um grande aliado na prestação de serviços de prospeção em diferentes áreas de aplicação. Atualmente existem mais de uma dezena de empresas ligadas à geologia que usam este método como principal serviço em alguns dos seus trabalhos relacionados com a prospeção geofísica, geológica e hidrológica, na arqueologia, na investigação forense, na geotecnia, na engenharia, em questões ambientais, etc., tendo sido a grande pioneira nesses serviços a Geosurveys (Gonçalves, 2013; Assunção, 2016).

1.3.2 Fundamentos teóricos

A base teórica do método GPR está assente na teoria eletromagnética (EM), cuja história estende-se há mais de dois séculos, sendo tema de várias publicações científicas (Annan, 2003, 2009).

Na teoria eletromagnética estão inseridas as equações de Maxwell que descrevem, matematicamente, a física dos campos eletromagnéticos. Estas equações não fornecem qualquer tipo de informação sobre as propriedades elétricas dos materiais, ou seja, para obter essa informação é necessário introduzir as relações constitutivas do meio. Segundo Annan (2003, 2009), a combinação das duas ideias fornece as bases para descrever quantitativamente os sinais de GPR. A sua compreensão é de extrema importância tanto para uma correta utilização do equipamento como para uma correta interpretação dos dados (Assunção, 2016).

O uso do método de GPR torna-se possível devido às propriedades eletromagnéticas, ou propriedades dielétricas, dos materiais que caracterizam um grande número de materiais, quer

sejam naturais ou artificiais, e que permitem a propagação das ondas eletromagnéticas. As propriedades eletromagnéticas de um meio material incluem a **condutividade elétrica (σ)**, a **permitividade elétrica (ϵ)** e a **permeabilidade magnética (μ)**. O conjunto destas propriedades compõem os parâmetros fundamentais e podem influenciar a forma como as ondas de rádio se propagam, refletem e atenuam ao atravessarem diferentes materiais. Na Tabela 1.4 estão apresentadas algumas características dielétricas de alguns materiais.

A **condutividade elétrica (σ)** descreve a capacidade de um dado material em conduzir uma corrente elétrica sob a influência de um campo elétrico externo, estando assim, essencialmente dependente da composição dos materiais, da condutividade dos fluídos presentes nos poros e da porosidade do meio. Um dos fatores que mais afeta a profundidade de penetração das ondas de rádio no solo é a atenuação e dispersão destas, ou seja, este fenómeno só ocorre devido à grande maioria dos solos apresentar um certo grau de condutividade elétrica. A grande maioria dos minerais constituintes das rochas e dos materiais presentes no subsolo são considerados isolantes, excetuando quando há presença de água, de argilas e de minerais metálicos (e.g.: ferro, cobre, zinco, etc.) – estes minerais eletricamente condutivos impedem uma propagação adequada e dissipam rapidamente a energia de radar no solo, comprometendo a utilização do GPR.

A **permitividade elétrica (ϵ)** é uma propriedade elétrica que descreve a capacidade de um dado material em armazenar e libertar energia eletromagnética sob a forma de cargas elétricas, e relaciona-se com a capacidade de armazenamento dos condensadores. Apesar dos materiais dielétricos serem maus condutores elétricos, estes são eficientes na condução de campos eletrostáticos. A permitividade elétrica (ϵ) é usualmente apresentada sob forma da permitividade elétrica relativa (ϵ_r), designada também de permitividade dielétrica relativa (RDP – Relative Dielectric Permittivity), onde:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Em que ϵ representa a permitividade de um dado material, e ϵ_0 representa a permitividade do espaço livre ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m).

O valor permitividade elétrica relativa possibilita também medir a capacidade de transmissão das ondas de rádio em profundidade, permitindo assim calcular a velocidade de propagação da energia no solo assim como a sua intensidade.

A **permeabilidade magnética** (μ) resulta da rotação, do movimento em orbitas atômicas dos elétrons e da conseqüente perda e armazenamento de energia que estes movimentos provocam. Em ambientes geológicos os efeitos magnéticos têm influência reduzida (quase desprezável) sobre a propagação das ondas de rádio, porém estes efeitos magnéticos podem ser importantes quando, no solo, existem minerais ferromagnéticos (p.e.: ferro, cobalto, níquel, óxidos associados e sulfuretos) em percentagens superiores a 5% do seu volume, no caso de serem inferiores não são contabilizados, pois em zonas subsuperficiais é tipicamente inferior a 2%.

Conseqüentemente, o valor da permeabilidade magnética (μ) da maioria dos materiais subsuperficiais é simplificada para o valor de espaço livre $\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6}$ H/m (Cassidy, 2009). Alternativamente, dado os baixos valores, é utilizada a permeabilidade magnética relativa (μ_r), que pode ser determinada da seguinte forma:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Onde $\mu_r \approx 1$ para a maioria dos materiais não magnéticos.

A **profundidade de penetração** das ondas eletromagnéticas, tal como as propriedades dielétricas do material, é um dos fatores mais importantes na detecção e identificação dos alvos pretendidos, pois com este fator é possível descrever o sucesso ou o insucesso de uma campanha prospectiva (Assunção, 2016).

A profundidade está dependente da escolha da **frequência de antena** e do comprimento de onda do sinal, do objetivo do estudo, das características do local, das **características dielétricas dos materiais**, da profundidade a alcançar e da **resolução** pretendida, como também o **grau de atenuação** do sinal.

A escolha da **frequência de antena** resulta sempre da união entre a profundidade de investigação e da resolução pretendida, sendo que o sinal de frequência que é emitido é inversamente proporcional à profundidade que este pode penetrar no solo. Logo, a utilização de uma antena com frequência mais baixas permite aumentar a profundidade de penetração do sinal no solo, tendo em si a desvantagem de diminuir a resolução do sinal, enquanto com uma antena com frequência maior proporciona um aumento de resolução do sinal, mas com baixas profundidades.

Tabela 1.4 – Características dielétricas de materiais comuns. Adaptado de Gonçalves, 2013.

Material	Permeabilidade dielétrica (ϵ_r)	Condutividade elétrica (σ) (mS/m)	Velocidade de propagação (V) (cm/ns)
Ar	1	0	30
Água destilada	80	0.01	3.3
Água doce	81	0.5	3.3
Água salgada	81	3×10^4	1
Gelo	3 – 4	0.01	16
Areias secas	3 – 5	0.01	15
Areias saturadas	20 – 30	0.1 – 1.0	6
Granito	4 – 6	0.1 – 1	12 – 15
Calcário	4 – 8	0.5 – 2	12
Xistos argilosos	5 – 8	0.01 – 1	13
Argilas	5 – 40	2 – 1000	5 – 13
Solos arenosos secos	4 – 6	0.1 - 100	12 – 15
Solos arenosos saturados	15 – 30	10 – 100	5 – 8
Solos limosos secos	4 – 6	0.1 – 1	7 – 9
Solos limosos saturados	10 – 20	10 – 100	5 – 8
Solos argilosos secos	4 – 6	0.1 – 10	12 – 15
Solos argilosos saturados	10 – 15	10 – 1000	8 – 9
Betão	5 – 8	0.01 – 2	15

Como já foi referido anteriormente, as propriedades dielétricas dos materiais influenciam na atenuação no sinal de radar (ondas de rádio) quando este penetra sob o solo, fazendo com que haja um aumento exponencial com a profundidade. A condutividade elétrica é a propriedade dielétrica que mais influência na atenuação do sinal, realçando que os materiais mais condutivos contribuem para a dispersão e atenuação da componente elétrica da onda eletromagnética.

O único fator que condiciona a profundidade de penetração das ondas de radar são as características físicas dos materiais a prospectar, pois, na generalidade dos materiais, a energia do sinal também sofre atenuação por perdas relacionadas com a dispersão das ondas, associadas à

heterogeneidade do meio, das variações granulométricas, assim como da geometria das interfaces ou de outros refletores (Gonçalves, 2013; Assunção, 2016).

Quando se trata em localizar um alvo (ou estrutura) no subsolo com alguma precisão, desde os seus atributos geométricos, temos em conta a **resolução da antena** (Annan, 2009). Tal como a profundidade de penetração, a resolução do método também depende das propriedades eletromagnéticas do meio atravessado. A resolução depende do comprimento da onda eletromagnética que se propaga no terreno e a profundidade de penetração pode variar desde menos de um metro, em terrenos muito argilosos, até quilómetros no gelo polar (Grangeia & Matias, 2004).

A resolução do sinal de GPR consiste em duas componentes: uma longitudinal; e uma lateral.

A **resolução longitudinal** (ou vertical) consiste na medida da capacidade de diferenciação entre dois sinais adjacentes entre si no tempo, ou seja, é dependente da frequência. Também está dependente do comprimento de onda, pois para que um objeto seja detetável este terá que possuir uma dimensão superior a $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda da radiação incidente.

Quando o sinal atravessa o solo a energia de radar irá diminuir a frequência e subsequentemente verifica-se o aumento do comprimento de onda (Jol & Bristol, 2003). Associado a este fenómeno, há que ter em consideração que as características dielétricas dos materiais atravessados pelas ondas de radar vão também provocar modificações na velocidade das ondas e no comprimento de onda, que irá influenciar na resolução do sinal (Gonçalves, 2013). Na Tabela 1.5 está representado dois exemplos da influência da permitividade elétrica relativa (ϵ_r) do meio e da frequência central da antena com duas antenas diferentes (200 e 400 MHz).

Tabela 1.5 – Comprimento de onda (metros) das ondas de radar de acordo com a permitividade elétrica relativa (ϵ_r) do meio e a frequência central da antena. Adaptado de Conyers, 2004 (*in* Gonçalves, 2013).

Frequência	Permitividade elétrica relativa (ϵ_r)						
	1	5	10	15	20	50	80
200 MHz	1.499	0.670	0.474	0.387	0.335	0.212	0.168
400 MHz	0.750	0.335	0.237	0.194	0.168	0.106	0.084

Uma outra vantagem da resolução vertical é a capacidade de distinguir superfícies horizontais ou sub-horizontais paralelas. Para que se consiga localizar o teto e o muro das estruturas é necessário que a distância entre os dois pontos seja superior ao comprimento de onda da energia de radar que se propaga (Davis & Annan, 1989 *in* Gonçalves, 2013). Na Figura 1.1 podemos observar que se as duas reflexões geradas não se encontrarem separadas por uma certa distância, as ondas refletidas serão dispersas por interferências destrutivas e construtivas, logo, se o comprimento de onda for superior ao referido espaçamento as duas estruturas poderão ser visualizadas como sendo apenas uma (Gonçalves, 2013).

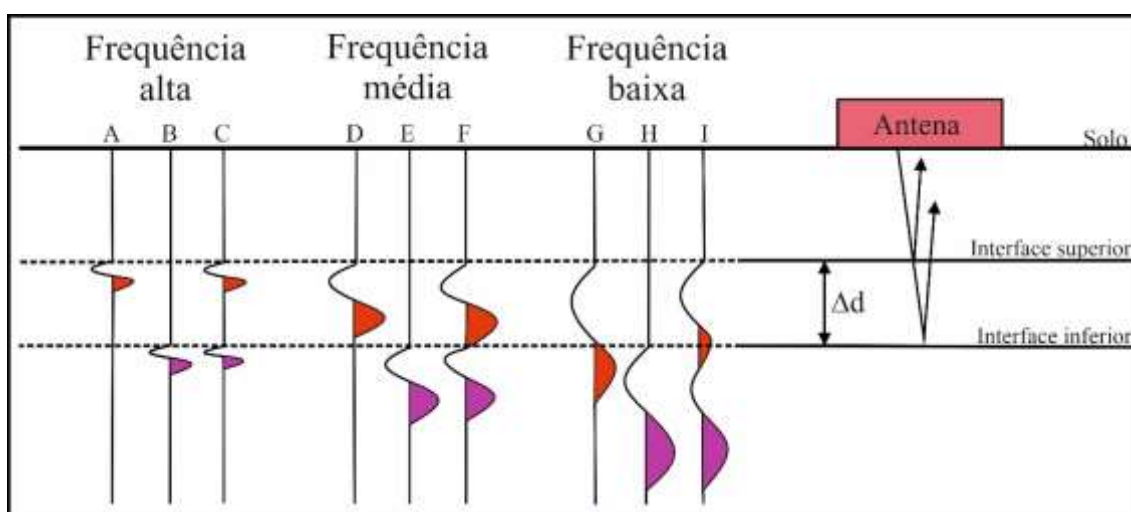


Figura 1.1 – A resolução vertical de interfaces encontra-se dependente da frequência da energia emitida e da distância entre as duas superfícies planares (Δd). Para frequências mais elevadas, a energia gerada possui comprimento de onda suficientemente baixo para poder identificar as duas superfícies. Para frequências médias, o comprimento de onda quase não consegue resolver as duas interfaces e, para frequências baixas, o elevado comprimento de onda resolverá as duas interfaces como sendo apenas uma (adaptado de Conyers, 2004).

Já a **resolução lateral** (horizontal) descreve a capacidade de detetar e distinguir as variações laterais dos refletores, tais como as causadas pelas mudanças de fáceis, assim como distinguir dois objetos localizados a profundidades idênticas (Leucci, 2012 *in* Gonçalves, 2013). De acordo com Daniels (2004), esta resolução é inversamente proporcional a $\sqrt{\alpha}$, onde α representa o coeficiente de atenuação, que pode ser determinado pelo fenómeno de difração observado durante a reflexão do sinal. Em consequência, a resolução horizontal dependerá da profundidade do refletor, do comprimento de onda durante o percurso percorrido, da frequência central e da abertura da antena.

A determinação da área de incidência da onda de radar (*radar wave footprint*) sobre um dado objeto é também importante para uma boa resolução horizontal, e está estreitamente relacionada com o conceito da zona de Fresnel (Annan, 2003, 2009), onde a energia de radar é

dispersa sob forma cônica pelo solo (Figura 1.2). Assim sendo, um alvo para ser detetado deverá ter uma área igual ou ligeiramente inferior à área de incidência da energia de radar (Gonçalves, 2013).

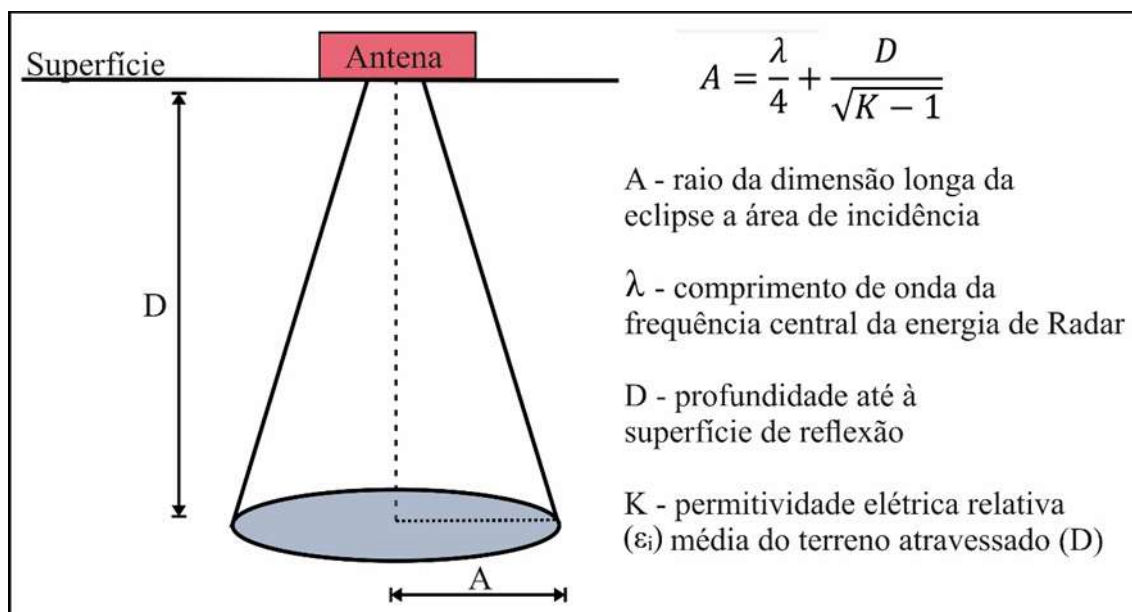


Figura 1.2 – Dispersão cônica da energia de Radar no solo. A área de incidência da radiação eletromagnética no solo pode ser estimada a partir da frequência da antena e da permitividade relativa média do solo percolado (adaptado de Conyers, 2004).

1.3.3 Funcionamento e equipamento

O sucesso e a eficácia demonstrados por esta técnica devem essencialmente à rapidez da aquisição dos dados, aos relativos baixos custos de operação, quando comparado com outras técnicas e ao facto de permitir trabalhar em diferentes áreas de investigação (Cruz, *et al.*, 2006; Assunção, 2016).

O sistema GPR usado em tomografia e prospeção pouco penetrantes é constituído fundamentalmente por quatro componentes: **unidade de controlo** – composto por um microprocessador e memória de armazenamento da configuração e definições de cálculo; **antenas** – emissora (Tx) e recetora (Rx); **unidade de visualização**; e **unidade de armazenamento de dados**.

As antenas são os equipamentos eletrónicos mais complexos do sistema e o elemento mais importante, pois são projetadas especificamente para otimizar a interação com o terreno (Costa, 2009). Este aparelho emite radiação eletromagnética, além disso também regista as reflexões e transformam-nas em informação digital, que é armazenada em dispositivos próprios para posterior

processamento (Fernandes, *et al.*, 2010; Assunção, 2016). A sua utilização está dependente da frequência central, onde se situa num intervalo de frequências entre os 10 e os 2000 MHz (Fernandes & Lourenço, 2007). A escolha de uma determinada frequência está dependente do meio, do tipo de aplicação, da profundidade e dos alvos do estudo.

Em relação ao funcionamento do GPR, este tem como básico a emissão de impulsos eletromagnéticos através de uma antena emissora, que na propagação através do meio, vai encontrar estruturas ou interfaces entre materiais/ objetos com propriedades dielétricas diferentes (Figura 1.3). Como todas as ondas, estas também sofrem fenómenos de refração, difração e reflexão (Fernandes, 2006; Banks & Johnson, 2011), no qual estas últimas são detetadas e registadas pela antena recetora.

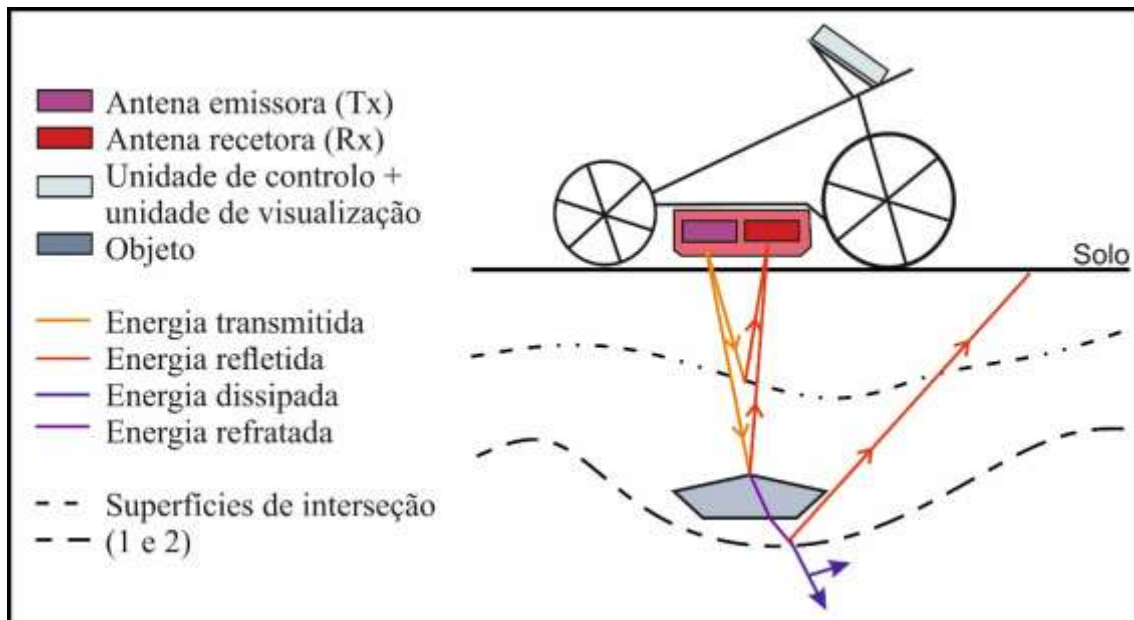


Figura 1.3 – Descrição dos componentes e modo de operação de um sistema de GPR moderno (adaptado Assunção, 2016).

Durante a aquisição dos dados os resultados podem ser exibidos na unidade de visualização e surgem sob forma de radargrama – imagens gráficas bidimensionais de tempo *versus* distância (Cruz, *et al.*, 2006). Porém, para que haja uma boa interpretação dos dados, convém efetuar um tratamento e processamento dos radargramas com a utilização de *softwares* específicos para eliminar o mais possível o ruído e evidenciando as reflexões mais interessantes (Aguar, 2005).

1.4 Estado da arte na aplicação do GPR em pegmatitos

Dados publicados sobre este tipo de prospeção em pegmatitos e cavidades mirolíticas que servem como base ou exemplo para a realização deste trabalho (ou estudo) são encontrados poucos. Tendo como base apenas dois exemplos que serão descritos a seguir, EUA e Brasil, tentou-se seguir a mesma metodologia na realização desta dissertação tentando, desta forma, obter resultados assimilares aos descritos nos trabalhos já realizados.

Dois estudos realizados nos EUA (San Diego Co., Califórnia) (Patterson, 2003; Patterson & Cook, 2002)¹ e no Brasil (Teófilo Otoni, Minas Gerais) (Aranha, *et al.*, 2018; Horn, *et al.*, 2018) tiveram como principal objetivo usar o *Ground Penetrating Radar* na detecção de anomalias em zonas de mineração que pudessem indicar a formação de cavidades ocultas, portadoras de gemas, no meio da rocha pegmatítica. No uso deste método obtiveram ótimos resultados dando um fator positivo na utilização deste procedimento na mineração e em futuros trabalhos.

Apesar de obterem resultados favoráveis em ambos os casos, as geologias dos locais são de origens distintas. Embora ambos estejam localizados em campos pegmatíticos, em San Diego Co. os diques pegmatíticos estão introduzidos em rochas ígneas, enquanto em Teófilo Otoni os diques são introduzidos em rochas metassedimentares.

Em San Diego Co., Patterson (2002, 2003) realizou vários trabalhos relacionados com uso do *Ground Penetrating Radar* na detecção de cavidades em pegmatitos em várias minas. Nesta dissertação vamos mencionar dois dos seus trabalhos, um deles realizado na **mina Himalaya** em Mesa Grande (Patterson & Cook., 2002) e um outro na **mina Cryo-Genie** em Warner Springs (Patterson, 2003).

Em Minas Gerais, vamos apenas relatar um dos estudos realizados por Aranha, *et al.* (2018) numa das minas do Campo Pegmatítico de Santa Rosa (CPSR) localizado entre as cidades de Franciscópolis e Itambacuri (Aranha *et al.*, 2018). Este estudo teve também como base os trabalhos realizados por Patterson.

¹ Todos os valores que estavam nas medidas em milhas e pes foram convertidas a partir deste site: convertworld.com/pt/.

1.4.1 San Diego Co., Califórnia, EUA

A **mina Himalaya** fica localizada no Sul da Califórnia na localidade de Mesa Grande (San Diego Co.). A mina foi uma das maiores produtoras de turmalina albaíte e de outros minerais raros no último século nos Estados Unidos da América.

Os diques pegmatíticos nesta zona estão introduzidos no batólito Peninsular de Ranges, gabros e granodioritos do Cretáceo superior (120 Ma – 150 Ma). Estes diques apresentam uma orientação N a NW e inclinação entre os 20° e os 40° para WSW e W.

A **mina de Cryo-Genie** fica localizada a 3,22 km (NNE) da vila de Warner Springs. Neste local os diques pegmatíticos (graníticos) estão inseridos em rochas híbridas. Desta mina é extraído minerais de boa qualidade como é o caso dos cristais de turmalina, que apresentam duas tonalidades típicas: cores mais escuras no centro (preto) para cores mais claras nas bordas (transparente ou verde relva).

Os diques pegmatíticos, de origem LCT, apresentam uma orientação para N e uma inclinação 30°E, a sua possança é de 3,05 m e um comprimento aproximadamente de 60,96 m.

1.4.2 Teófilo Otoni, Minas Gerais, Brasil

O local de estudo fica localizado a 40 km (SW) de Teófilo Otoni no Campo Pegmatítico de Santa Rosa (SRPF), na Província Pegmatítica Oriental do Brasil (EBPP). O Campo Pegmatítico de Santa Rosa é situado entre as cidades de Franciscópolis e de Itambacuri, inserido na Orogenia Araçuaí do Neoproterozoico, onde ocorre o granito de Santa Rosa (pós-colisional).

Este granito está introduzido em xistos biotíticos e gnaisses da Formação de São Tomé e da Formação de Tumiritinga, respetivamente, e em unidades de depósitos metassedimentares marinhos em bacias associadas a arcos.

O pegmatito estudado apresenta um comprimento de 8 metros, introduzido num xisto biotítico (Formação de São Tomé) concordante à sua foliação. O dique apresenta zonas com grandes cristais de feldspato e pequenas descontinuidades de quartzo no núcleo. A característica mais frequente dos cristais de turmalina é o seu crescimento a partir da margem para o centro do pegmatito.

As turmalinas, de qualidade de gema, encontradas nestes pegmatitos são de cor verde ou azul e ocorrem em cavidades miarolíticas, essas cavidades que são formadas, como já referido anteriormente, pela última formação do magma por componentes de exsolução.

CAPÍTULO II

2. CASOS DE ESTUDO

Com o objetivo de detetar cavidades em ambientes pegmatíticos em Portugal, foram selecionados dois locais, em Vilar de Mouros (Caminha, Viana do Castelo) e em Malpartida (Almeida, Guarda). Durante a leitura deste capítulo irão ser abordados os locais escolhidos, referindo a sua geologia, localização e os aspetos relevantes encontrados em campo.

2.1 Vilar de Mouros, Caminha, Viana do Castelo

O local de estudo localiza-se sobre um talude junto ao primeiro nó de saída da autoestrada A28 (Figura 2.1 – A) em Argela, a cerca de 2,00 km de Vilar de Mouros, conselho de Caminha, onde apresenta um talude com filões de natureza aplito-pegmatíticos clásticos que foram expostos durante a construção do acesso à autoestrada (antiga via rápida IC1 construída em 1985).

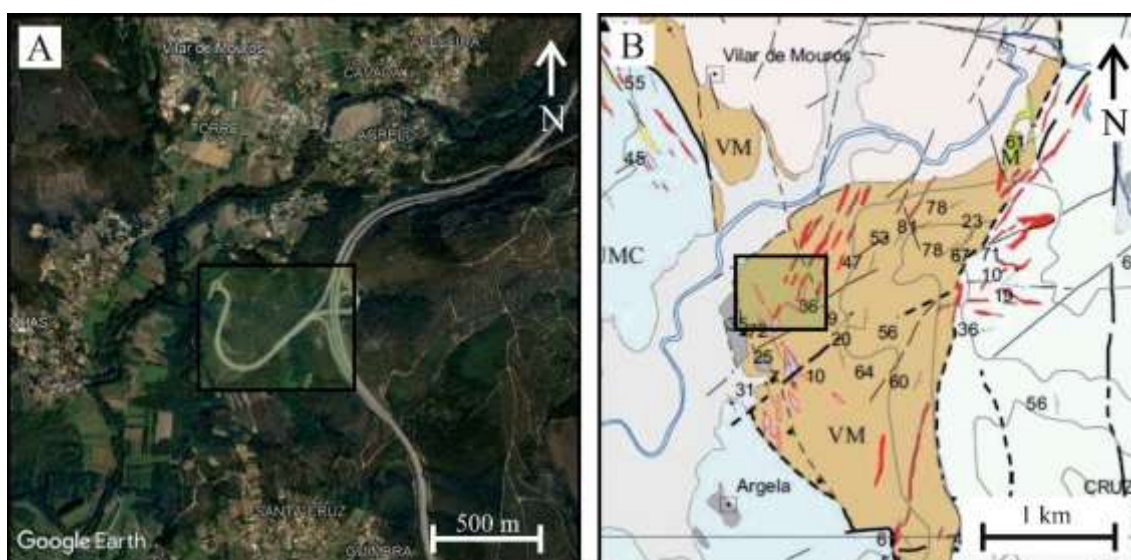


Imagem satélite da área geral a estudar (Google Earth).

Excerto da Minuta (revisão) da Folha 1-C da Carta Geológica de Portugal, na escala 1:50 000, da área geral a estudar.

Área de estudo

UNIDADES POLIGÊNICAS PARAUTÓCTONES E ALÓCTONES

(*) Formação de Sobrado - Silúrico Superior (Ludloviano)

VM Vilar de Mouros - metagrauwaques impuros, formações psamopelíticas escuras e níveis greso-quartzíticos cinzentos turmalínicos e/ou carbonosos.

CORPOS INTRUSIVOS FILONIANOS

aplıto-pegmatitos e pegmatitos graníticos por vezes com especialização em metais raros

Figura 2.1 – A: Imagem satélite da área envolvente do local de estudo; B: Excerto da Minuta (revisão) da Folha 1-C da Carta Geológica de Portugal, na escala 1:50 000, e a sua respetiva legenda.

A rocha encaixante, segundo a minuta de revisão da Folha 1-C da Carta Geológica de Portugal, na escala de 1:50 000 (Leal Gomes, C. (coord.), 2008), são os grauvaques com imbricação de filitos turmalínicos de grau metamórfico baixo (Lobarinhas & Leal Gomes, 2014) litologia que corresponde à Formação de Vilar de Mouros (Silúrico Superior), de direção NW-SE e inclinação SW ou NE (Teixeira & Assunção, 1961). Os aplitos-pegmatíticos presentes são de origem compressiva, associados a um carreamento com sentido de transporte para N e NE pela D2 Varisca (Lobarinhas & Leal Gomes, 2014) (Figura 2.1 – B).

2.1.1 Reconhecimento da área de estudo

Realizou-se uma primeira visita ao local a prospectar de forma a reconhecer os acessos, observar os afloramentos e avaliar as condições do terreno e sua adequabilidade à prospeção geofísica.

Em relação aos acessos, estes encontram-se minimamente limpos e de fácil passagem, existindo acessos alcatroados e outros de terra batida. Já em relação às condições do terreno, verificou-se que em algumas das zonas é impossível a passagem do equipamento GPR devido à altura e densidade da vegetação (Figura c – Anexos).

Relativamente aos afloramentos de aplitos-pegmáticos que estão expostos no talude do acesso à autoestrada, alguns dos filões encontram-se cobertos por pedras (paralelos) de forma a prevenir a erosão superficial e escorrências de sedimentos clásticos (Figura 2.2). Também é expresso no local o carreamento associado pelo D2 Varisco pela presença de *kink-bands*, referido por Lobarinhas & Leal Gomes (2014) (Figura 2.3).



Figura 2.2 – Fotografias dos pegmatitos preenchidos por pedras de forma a prevenir os escorregamentos dos sedimentos clásticos (setembro, 2021).



Figura 2.3 – Fotografia do talude onde se observa o fenómeno estrutural *kink-bands* mencionado por Lobarinhas, Dias & Leal Gomes (2014) e os pegmatitos preenchidos por pedras à esquerda da foto (novembro, 2021).

Após a análise de toda a área envolvente, determinou-se as áreas de passagem do equipamento de GPR. Na Figura 2.4 está representado um esquema das áreas/ trajetos sugeridos para a passagem do equipamento.

O varrimento com o equipamento GPR será realizado o mais próximo do talude de forma a compreender a propagação dos aplitos-pegmatíticos em profundidade, quer a nível litológico quer a nível estrutural.

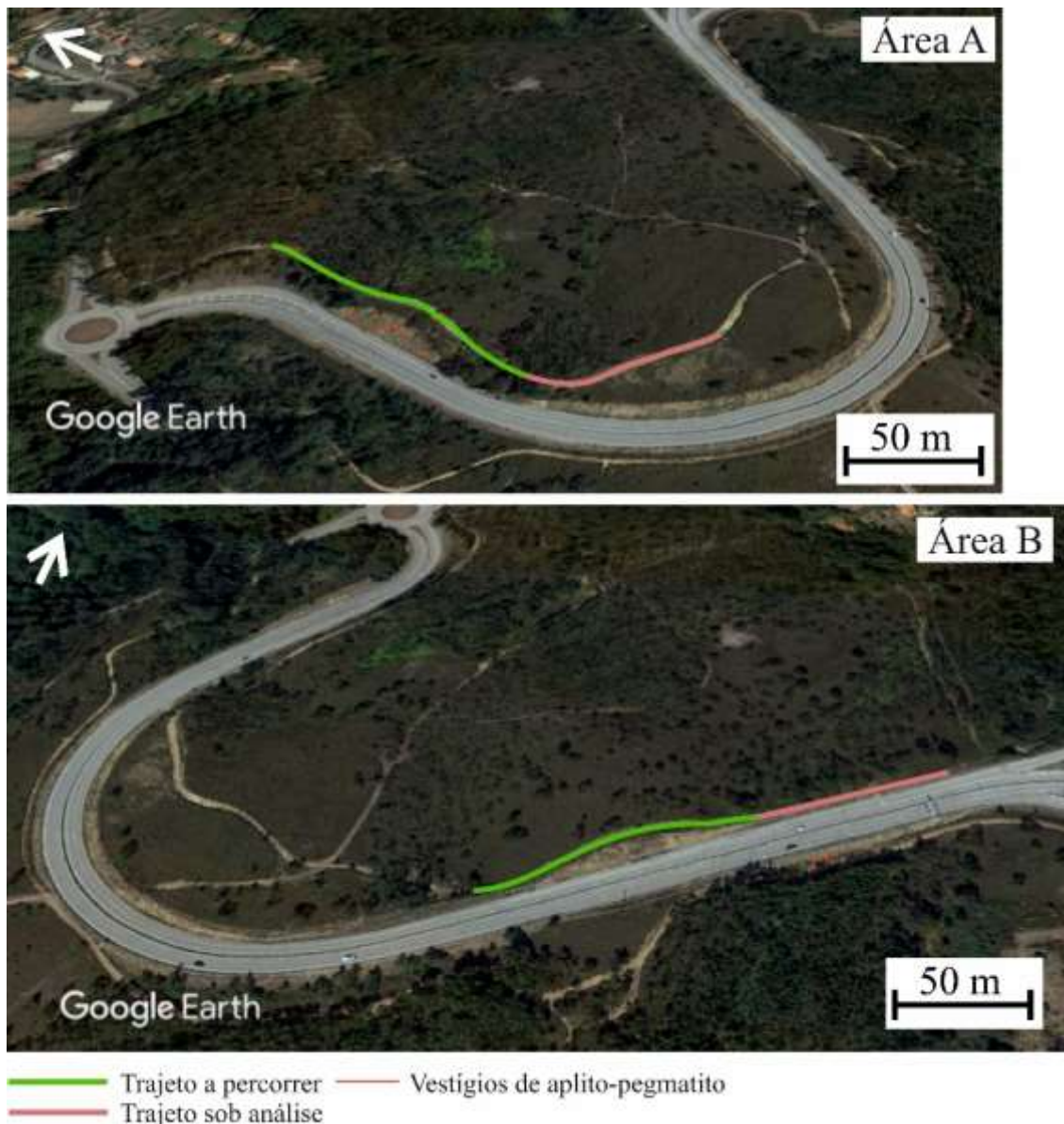


Figura 2.4 – Esquema dos trajetos a percorrer com o equipamento GPR nos caminhos de acesso no talude em Vilar de Mouros. O trajeto marcado pela linha verde é o trajeto a percorrer e o trajeto marcado com a linha rosa está sob análise, pois só será realizado se for possível passar com o equipamento devido à vegetação.

Em relação à tipologia das cavidades presentes neste local de estudo, segundo a Tabela 1.3 do Capítulo I dos modelos conceptuais para os tipos diferentes de cavidades, podemos qualificar estas cavidades como cavidades mirolíticas relacionadas com deformações cisalhante transpressiva (MT) (Figura 2.3) e, devido ao tipo de preenchimento presente, como cavidades por dissolução total (DT) (Figura 2.2 e 2.5).



Figura 2.5 – Fotografia de uma cavidade no talude em Vilar de Mouros (Caminha, Viana do Castelo) (outubro, 2021).

2.2 Malpartida, Almeida, Guarda

O local escolhido foi uma antiga pedreira abandonada localizada em Malpartida, concelho de Almeida (Distrito da Guarda). A pedreira foi explorada, para extracção de rocha ornamental, por um grupo espanhol, Levantina e As. de Minerales (Granitos Iberolusos)², que abandonou a exploração em 2006 devido ao maciço apresentar pegmatitos em profundidade ricos em cavidades (Figura 2.6).



Figura 2.6 – Levantamento fotográfico de uma das frentes de desmonte da pedreira de Malpartida onde é possível observar um veio pegmatítico apresentando cavidades miarolíticas (julho, 2021).

² Granitos Iberolusos: Pedreira I, Malpartida, Almeida, Portugal: <https://www.mtiblog.com/2010/01/granitos-iberolusos-pedreira-i.html>

Em relação à litologia local e regional, a região de Malpartida está incluída na Folha 15-D da Carta Geológica de Portugal, na escala 1:50 000, que foi publicada em 1960. Recorrendo às cartas geológicas espanholas, na escala 1:50 000, para uma correlação litológica mais atual, Folha 500 (Hoja 500) do Mapa Geológico de Espanha, na escala 1:50 000, publicada em 1990, na região adjacente ao concelho de Almeida a litologia mais predominante é o granito biotítico de granularidade variável com cordierite e com algumas manchas de leucogranitos cupuliformes.

Em relação à tectónica, a rocha hospedeira, pertencente à Zona Centro Ibérica, é um granitoide (intrusivo) associado a cisalhamentos dúcteis das orogenias tardi e pós-tectónicas relativamente a F3 (Laboratório Nacional de Energias e Geologia (LNEG) – Geoportal, s.d.)

Segundo o Mindat.org, esta pedreira tem ocorrências de minerais exóticos que foram descobertos nas cavidades miarolíticas, tais como berilos de variedade água-marinha, helvite, opalas e espessartite (grupo das granadas). Em estudos foi também possível a assinalar a presença abundante de turmalina variedade schorlíte. Na Figura d (Anexos), há quatro fotografias de exemplos de espécimes de interesse museológico, com valor patrimonial e/ou gemológico, colhidos nas cavidades miarolíticas de Malpartida nos primeiros anos do século XX.



Figura 2.7 – Levantamento fotográfico das cavidades encontradas na pedreira de Malpartida (Almeida, Guarda) (julho, 2021).

2.2.1 Reconhecimento da área de estudo

Foi realizado um reconhecimento do local de forma a observar a pedreira, avaliar os acessos e as melhores áreas para a realização da prospeção com GPR. Após essa primeira avaliação verificou-se que, apesar da pedreira ter sido abandonada em 2006, esta encontrava-se minimamente limpa e com pouca vegetação envolvente, talvez devido ao tipo de clima sentido na região.



Figura 2.8 – Imagem aérea, retirada do GoogleEarth, da pedreira de Malpartida (Almeida, Guarda).

Foram observadas algumas cavidades miarolíticas e a maneira como elas se distribuíam nas frentes de desmonte, excelentes na evidência de estruturas dado terem sido talhadas com fio diamantado. Houve um levantamento fotográfico dos minerais visíveis de algumas cavidades, que se encontravam praticamente vazias (Figura e – Anexos).

Determinou-se a direção do filão pegmatítico, das cavidades miarolíticas possíveis e de algumas diáclases visíveis no topo das frentes de desmonte, principalmente nas áreas C e D, representadas na Figura 2.9 (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Dados adquiridos em campo do filão pegmatítico, das cavidades e das diáclases visíveis nas áreas C e D.
 * corresponde à cavidade presente na Figura 2.7 (A).

	Direção		Possança	Extensão
Filão pegmatítico	N20°		Variável	
Cavidades	N15°/20°W*		De cm a 70 cm	De cm a 200 cm
Diáclases	Área C	N104° N106°		
	Área D	N110° N112° N120° N126°		

Após o levantamento fotográfico, num terceiro momento, definiram-se as áreas para futura prospeção do GPR. Ficaram assim definidas quatro áreas principais: A, B, C e D (Figura 2.9) e as suas respetivas secções. Nos Anexos, da Figura f a i, está apresentado algumas imagens com informações recolhidas em campo durante o reconhecimento das áreas de estudo, principalmente da área A, B e C.

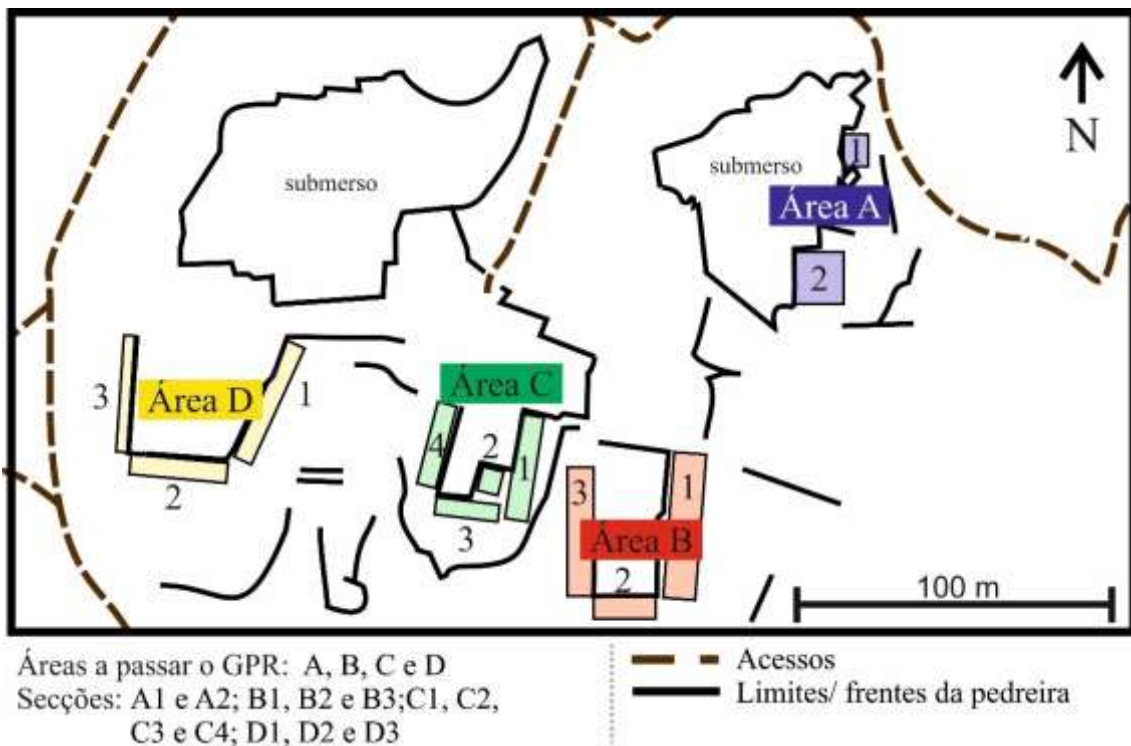


Figura 2.9 – Mapa esquemático da pedreira de Malpartida (Almeida, Guarda) com as futuras áreas de passagem do equipamento de GPR. Nos Anexos, da Figura f a i, está apresentado algumas imagens com informações recolhidas em campo durante o reconhecimento das áreas de estudo, principalmente da área A, B e C.

A observação e caracterização da litologia da pedreira permitiu verificar que o granito apresenta variação de grão, indo de um mais fino, quase afanítico, para um médio de textura mais porfiroide, principalmente na área A (Figura 2.10 – A, B e C). Nas zonas onde ocorrem as cavidades, o filão pegmatítico apresenta uma textura mais granítica, de grão fino, associado a uma diferenciação do magma granítico *in situ* (Figura 2.10 – D e E). Os pegmatitos que ocorrem na zona são classificados, de acordo com Černý (1990), de pegmatitos miarolíticos de filiação NYF, embora, segundo a explicação do Doutor Professor Carlos Leal Gomes, não seja abundante nas fases Y, tal como a xenótima, ou em F, tal como a fluorite e topázio, porém está presente a F-apatite.



Figura 2.10 – Levantamento fotográfico da litologia presente na pedreira de Malpartida (Almeida, Guarda). A: observação de um granito afanítico junto com um granito mais porfiroide com megacristais, na área A2; B: pormenor dos cristais no granito porfiroide mencionado na fotografia A; C: contacto de dois granitos de diferentes granularidades (área A2); D: possível observação da diferenciação granítica em volta das cavidades (área C); E: granito de grão fino na área C. Imagens com maior resolução nos Anexos, Figura j.

Segundo o modelo conceptuais da tipologia das cavidades (Tabela 1.3 do Capítulo I), as cavidades presentes nesta área de estudo podemos qualificar como cavidades miarolíticas verdadeiras (MV), por estas serem preenchidas por minerais, como cavidades miarolíticas polares geradas por fracinação (MFP).

CAPÍTULO III

3. PROCESSO DE AQUISIÇÃO E VISUALIZAÇÃO,

PROCESSAMENTO E TRATAMENTO DE DADOS

3.1 Equipamento e *software*

O sistema de GPR utilizado para a elaboração desta dissertação foi o SIR-3000, produzido pela Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI), equipado com duas antenas blindadas de 400 MHz e de 200 MHz de frequência central. As referidas antenas, ambas utilizadas neste trabalho, permitem atingir profundidades máximas de 4 m e a de 10 m, respectivamente, considerando $\epsilon=5$.



Figura 3.1 – Exemplos de uso do equipamento GPR em dois tipos de aparato com antenas diferentes, 200 MHz em A e de 400 MHz em B. Nesta dissertação o aparato usado foi o da situação A por ser mais simples e fácil.

O *software* utilizado para a visualização e processamento de dados foi o programa Reflex2DQuick. Este programa, desenvolvido por Sandmeier geophysical research, amplamente utilizado, é de simples utilização, mas bastante poderoso permitindo uma rápida importação, processamento e visualização dos perfis de radar. O programa permite realizar um conjunto de processamentos de dados e possibilita também a determinação da velocidade das ondas de radar no solo, através do método do ajuste da hipérbola (Annan, 2009; Utsi, 2017c). No pós-processamento, dispõe um conjunto de opções de visualização e exportação dos dados. Basicamente, este *software*, apesar de pequeno e leve, é de uma enorme utilidade para uma primeira visualização dos radargramas e ótima opção para o tratamento e visualização dos mesmos de forma mais simples e eficaz, quer para nível académico quer a nível empresarial (Gonçalves, 2013; Assunção, 2016).

Uma descrição pormenorizada do equipamento utilizado e dos principais parâmetros de processamento de dados, principalmente sobre o uso filtros de melhoramento da visualização dos radargramas, pode ser encontrada em Assunção (2016), Banks & Johnson (2011), Butalia, Tuttle, & White (2012), Cassidy (2009b), Gonçalves (2013), Neal (2004), Nováková *et al.*, (2013), entre outros.

3.2 Aquisição de dados

3.2.1 Vilar de Mouros, Caminha, Viana do Castelo

A colheita de dados em Vilar de Mouros deu-se num dia chuvoso. Após avaliação das condições do terreno, e considerando a profundidade a que poderão ocorrer os filões optamos por realizar o estudo prospectivo apenas com a antena de 200 MHz por dois motivos: primeiro porque o sinal da antena de 200 MHz propaga mais em profundidade; segundo porque o terreno se encontrava húmido e a saturação em água do solo iria atenuar muito mais o sinal da antena de 400 MHz.

O varrimento com equipamento fez-se de ao longo da linha verde evidenciada na Figura 2.4 (Capítulo II). A área a prospectar foi dividida em secções, particularmente na área A. O motivo pelo qual o trabalho se realizou desta forma foi pelo facto de o terreno apresentar altitudes diferentes e assim ser mais fácil realizar a correção topográfica (Figuras 3.2 e 3.3), bem como para limitar a dimensão dos perfis, o que facilita o trabalho de processamento e interpretação dos dados. A área A foi dividida em cinco secções e na área B apenas uma secção. Estas secções acompanham o caminho que passa sobre o talude, por aí ser o único local possível efectuar a prospeção. Em cada secção foram adquiridos dois perfis, um mais próximo do talude da autoestrada, o outro, paralelo ao anterior, 2,00 m ao lado no outro lado do caminho. Em cada secção, registaram-se as coordenadas e valor de altitude do ponto de início e de fim de cada um dos perfis (I a XII) adquiridos com o equipamento GPR.



Figura 3.2 – Fotografia satélite com as coordenadas (aproximadas) dos pontos iniciais e finais de cada trajeto das áreas A e B.

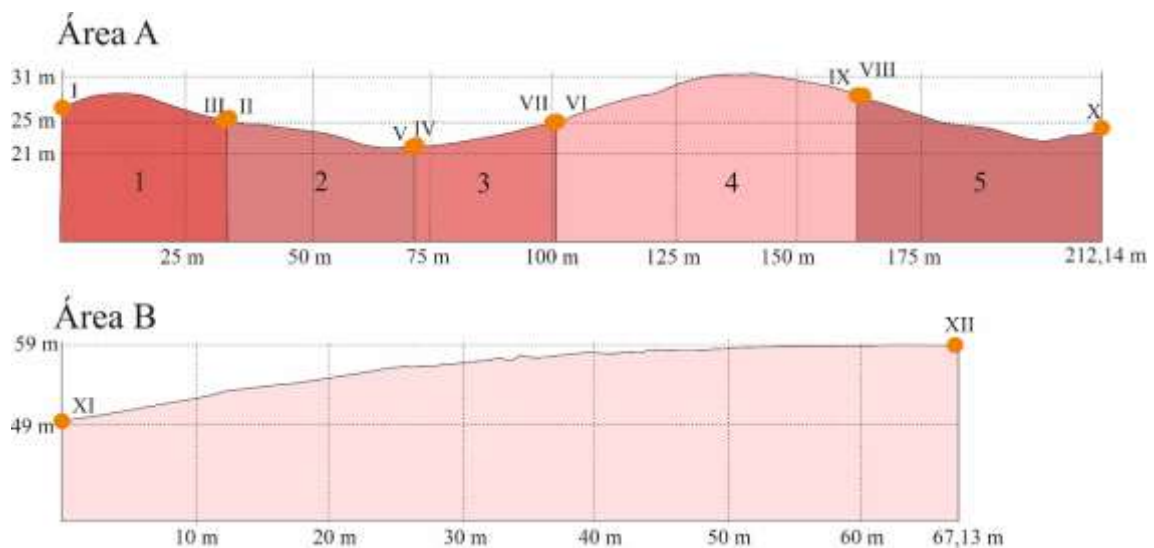


Figura 3.3 – Perfis topográficos das áreas A e B. No perfil da área A foi realizado 5 secções de acordo com a topografia. No perfil da área B foi realizado apenas uma só secção.

O objectivo da prospeção com GPR nesta zona foi o de compreender como o pegmatito se comporta e se propaga em profundidade. Como já foi referido, os perfis foram adquiridos junto ao talude do acesso à autoestrada por saber que naquela zona há evidência de pegmatito, quer nesse talude, quer nos pequenos taludes que se observam nos acessos (Figura 3.4).

Na área A em cada secção foram realizados dois perfis, um no sentido N-S e um outro no sentido S-N, com separação de 2,00 m, correspondendo, aproximadamente, a largura do acesso,

sendo um adquirido junto ao talude da estrada de acesso e um outro mais próximo do talude da estrada principal. Na área B foi realizado somente um perfil de direção SW-NE.



Figura 3.4 – Levantamento fotográfico de evidências do pegmatito clástico no talude do acesso (estrada de terra batida) (dezembro, 2021).

Após a recolha de dados fez-se o processamento e a interpretação dos mesmos através de um *software* específico.



Figura 3.5 – Levantamento fotográfico da passagem do equipamento de GPR na secção 3 e 4 da área A (A e B) e da área B (C) pelas setas verdes (dezembro, 2021).

3.2.1.1 Resultados

Como já foi referido anteriormente, a prospeção foi realizada em duas áreas, A e B. Na área A os perfis foram adquiridos ao longo do caminho, em secções paralelas a este, devido à topografia e à vegetação, o que impedia a utilização do GPR fora do referido caminho (Figura 3.6). Em cada secção foram adquiridos dois perfis, um no sentido N-S e um outro no sentido inverso, S-N, correspondendo assim aos ficheiros ímpares e pares: *File__299* a *File__308*. Enquanto na área B só se realizou um só perfil (*File__309*).

Tabela 3.1 – Altitudes dos pontos dos perfis topográficos da Figura 3.3.

		Área A										
		Secção 1		Secção 2		Secção 3		Secção 4		Secção 5		
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
Altitude (m)		27.00	25.00	25.00	22.00	22.00	28.00	28.00	22.00	22.00	24.00	
		Área B										
		Secção 1										
		XI	XII									
Altitude (m)		49.00	59.00									

Os dados adquiridos foram favoráveis, apesar do solo se encontrar húmido, pois a água é um dos fatores principais de atenuação do sinal (Fernandes & Lourenço, 2007; Utsi, 2017b).

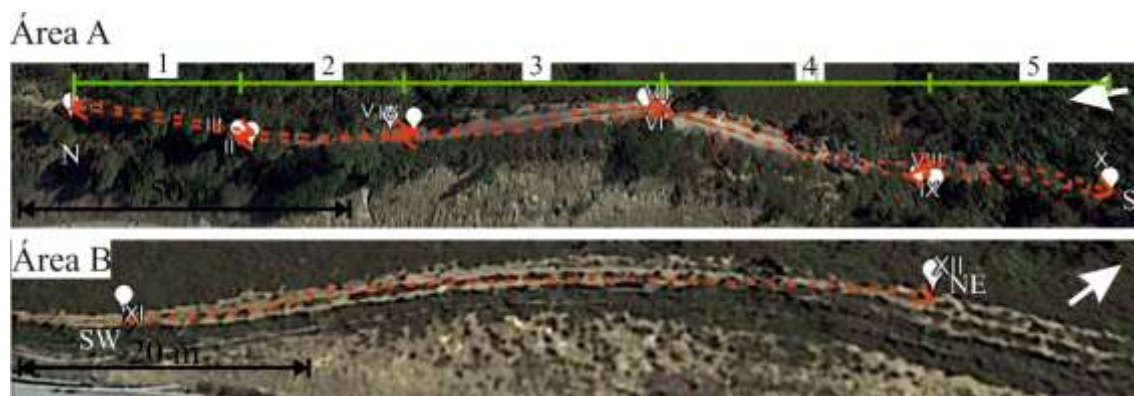


Figura 3.6 – Fotografia área, Google Earth, dos trajetos realizados em Vilar de Mouros (Caminha, Viana do Castelo).

3.2.2 Malpartida, Almeida, Guarda

Após uma pequena observação das áreas da pedreira para avaliar as condições de aquisição dos dados, chegou-se à conclusão de que somente as áreas A e C iriam ser estudadas por apresentarem maior potencial e pelo facto de não ser possível, num dia prospectar todas as áreas assinaladas.

Na área A foi realizado a passagem do equipamento GPR com a antena de 400 MHz na secção A1 e A2, sendo posteriormente criado uma nova secção, A3, de uma única passagem que liga as duas secções anteriores (Figura 3.6 – Esquema 1). A secção A1 foi sujeita a dois varrimentos com o equipamento, um de direção W-E e um outro de direção S-N (Figura 3.6 – Esquema 2), enquanto a secção A2, por apresentar um granito distinto e aflorar um pegmatito granítico, foi realizado passagens sucessivas com uma equidistância 0,50 m de direção N-S e S-N (Figura 3.6 – Esquema 3). Já o varrimento da secção A3 foi realizada a partir da secção A2 até à secção A1 de passagem única de equidistância 0,50 m em relação ao último varrimento da A2, como mostra na Figura 3.6, no Esquema 1 e 2, pela seta de cor rosa.

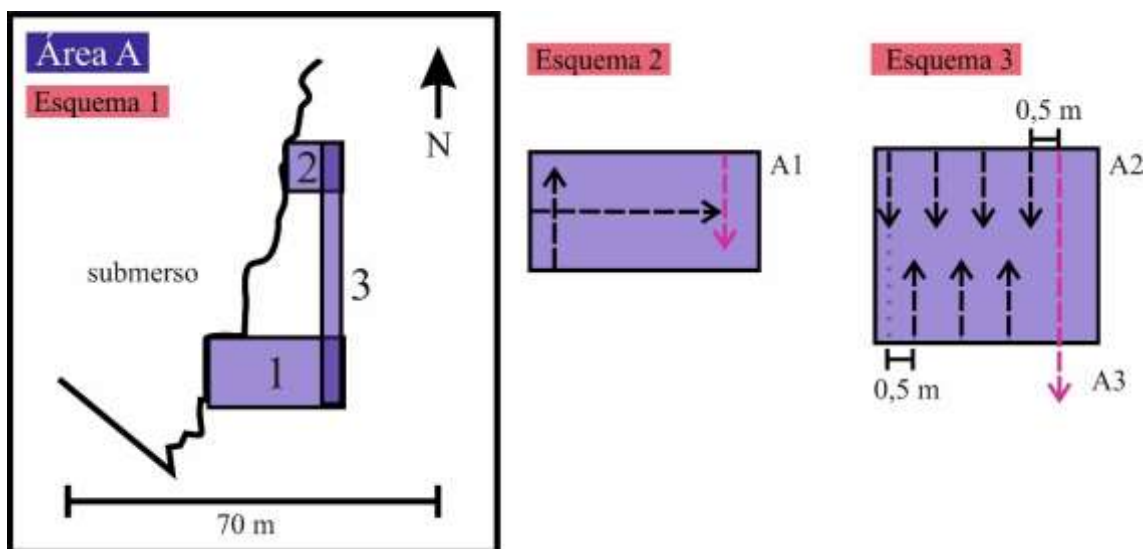


Figura 3.7 – Esquemas representativos da passagem do equipamento de GPR com a antena de 400 MHz na área A (A1, A2 e A3). Esquema mais pormenorizado nos Anexos, Figura k.

Na área C foram realizadas passagens com o equipamento de GPR com as antenas de 200 MHz e de 400 MHz nas secções C1 e na C2. Também foi realizado um varrimento com a antena de 400 MHz ao longo do filão pegmatítico na frente de desmonte desta área, nomeando assim esta secção de C5. A secção C1 foi realizado um varrimento com a antena de 400 MHz ao longo do seu comprimento, de direção N-S e S-N, com uma equidistância de 0,50 m entre percursos à exceção do último varrimento que foi realizado aproximadamente a 1,00 m do penúltimo (Figura

3.7 – Esquema 2), já com a antena de 200 MHz, dado ao facto de esta antena obter maior alcance em profundidade realizou-se uma única passagem no sentido S-N. No bloco solto, designado por secção C2, realizou-se várias passagens com a antena de 400 MHz nas direções W-E/ E-W e S-N/ N-S, com uma equidistância de 0,50 m (Figura 3.7 – Esquema 3), com a antena de 200 MHz, pelos mesmos motivos, realizou-se somente três passagens neste bloco de direções W-E, E-W e S-N (Figura 3.7- Esquema 3 e 4). É de realçar que o varrimento do bloco solto foi realizado, aproximadamente, a 0,50 m do talude a N e W, devido à segurança pessoal e à propagação do sinal da antena.

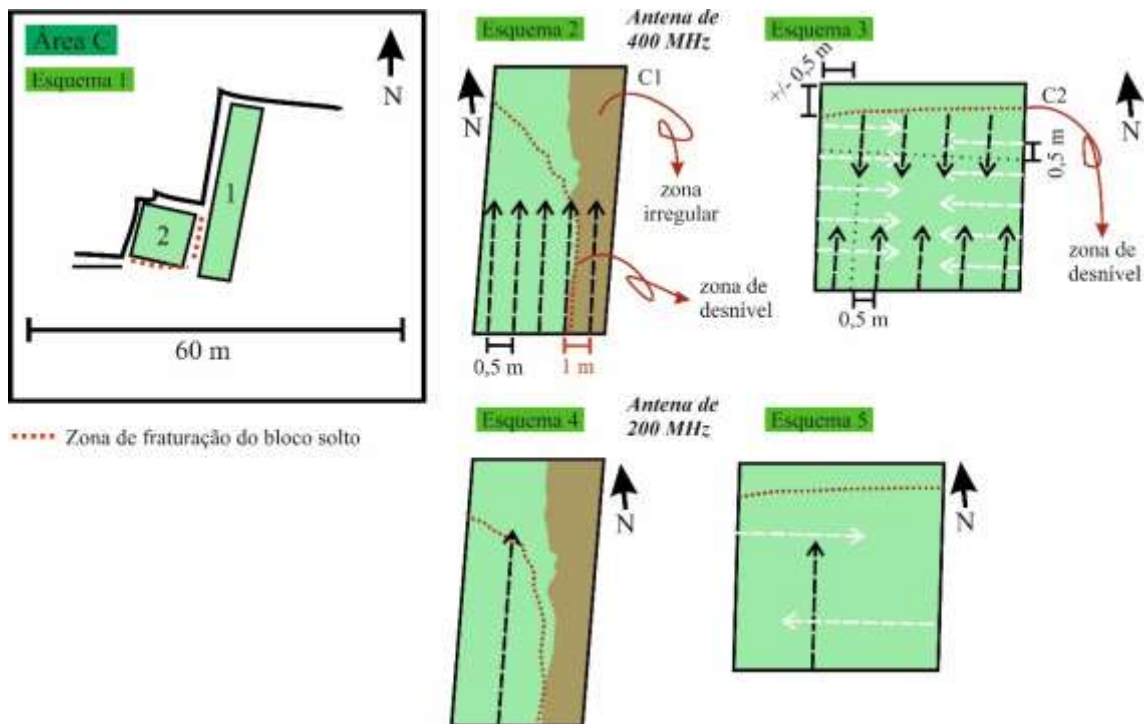


Figura 3.8 – Esquema representativo (sem escala nos esquemas) da passagem do GPR com as antenas de 200 MHz e 400 MHz na área C (C1 e C2). Esquema mais pormenorizado nos Anexos, Figuras l e m.

Em relação à secção C5, foi realizada a passagem da antena de 400 MHz ao longo do filão pegmatítico nas zonas onde se conseguia alcançar. Na Figura 3.8 no Esquema 6 está representado (não à escala) a passagem do GPR pelo talude com o início do varrimento da direita para a esquerda como indica a seta.

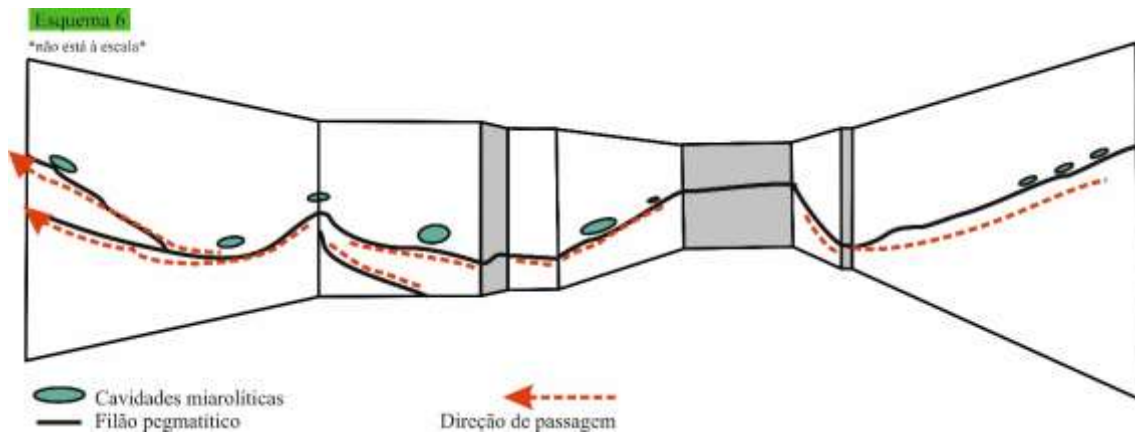


Figura 3.9 – Esquema (sem escala) da passagem da antena de 400 MHz na frente de desmonte da área C (Figura 2.6 – Capítulo II).

Posteriormente, todos os dados recolhidos das áreas A (A1, A2 e A3) e C (C1, C2 e C5) foram processados, através de um *software* específico, de modo a gerarem imagens (radargramas) passíveis de serem analisados e interpretados.

3.2.2.1 Resultados

Durante a aquisição de dados, quando eram visualizados os perfis na unidade de controlo, era possível observar algumas reflexões de interesse em certas áreas.

Na área A foram realizados dez perfis: dois na secção A1 (*File__411* e *File__412*); nove na secção A2 (*File__403* a *File__409*); e um na secção A3 (*File__410*).

Na área C foram realizados quarenta e um perfis: seis na secção C1 (*File__414* – 200 MHz, *File__387* a *File__391* – 400 MHz); vinte e quatro na secção C2 (*File__413* a *File__416* – 200 MHz, *File__366* a *File__386* – 400 MHz); e onze perfis na secção C5 (*File__392* a *File__402*).

3.3 Visualização, processamento e tratamento de dados

Após a aquisição dos dados de GPR, estes foram visualizados e processados no *software* Reflex2DQuick. O processamento de dados adquiridos durante uma campanha de prospeção geofísica é um processo fundamental para a realização de uma adequada interpretação das reflexões registadas (Assunção, 2016).

O tratamento de dados adquiridos é um processo que serve para eliminar as perturbações presentes nos perfis, tal como o ruído, reverberações, reflexões fantasmas ou interferências, e assim melhorar a visualização dos dados de GPR.

Depois de visualizados os radargramas, estes foram sujeitos a um tratamento através dos parâmetros disponíveis no menu “*geometry and processing*” (Figura n - Anexos). Todos os perfis foram processados individualmente, na Tabela 3.2 estão expressos os parâmetros adotados durante o tratamento de dados de dois ficheiros exemplos secção C2 (área C) de Malpartida, Almeida e um ficheiro exemplo da secção 3 (área A) de Vilar de Mouros, Caminha.

Tabela 3.2 – Sequência de processamentos usados nos ficheiros *File___368* e *File___369*, referentes à secção C2 da área C de Malpartida, Almeida, e o *File___303* referente à secção 3 área A de Vilar de Mouros. Os valores a azul são valores já pré-definidos pelo software quando o radargrama foi processado, os valores a vermelho estão relacionados com a velocidade, determinada através do método das hipérbolas, e o parâmetro associado só era ativado quando era necessária uma melhor interpretação. A correção topográfica foi somente usada nos dados de Vilar de Mouros devido ao terreno apresentar diferentes altitudes.

Parâmetros	Antena 400 MHz		Antena de 200 MHz
	<i>File___368</i>	<i>File___369</i>	<i>File___303</i>
<i>Subtract-DC-shift</i>	100 ns	100 ns	300 ns
<i>Static correction</i>	-11 ns	-12 ns	-24 ns
<i>Subtract-mean (dewow)</i>	4.612828 ns	4.488682 ns	7.009057 ns
<i>Background removal</i>	x	x	x
<i>Fk migration (Stolt)</i>	0.13 m/ns	0.13 m/ns	0.09 m/ns
<i>XFlipProfile</i>	x		
<i>Correct topography</i>			x

De um modo geral, todos os perfis apresentavam dados de boa qualidade, com ruído muito reduzido. O processamento aplicado possibilitou a obtenção de imagens passíveis de serem interpretadas. Para a discussão e interpretação dos resultados foram escolhidos os radargramas mais representativos de cada área e/ou secção. É de realçar que para que houvesse uma interpretação mais clara na deteção das cavidades recorremos ao uso do parâmetro “*fk migration*”, este filtro tem como objetivo reconstruir a distribuição de refletividade das ondas de radar no solo (Annan, *Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar*, 2009), que neste caso evidência as zonas de maior reflexão. O parâmetro “*xFlipProfile*” só era ativado quando era necessário manter uma direção igual em todos os radargramas, como o exemplo descrito da Tabela 3.2 pelos ficheiros, *File___368* e *File___369*, ambos têm direções diferentes, E-W e W-E, respetivamente, na qual optou-se por predominar a direção W-E para que a interpretação de dados fosse a mais adequada. O parâmetro “*correct topography*” foi somente utilizado nos dados adquiridos em Vilar de Mouros por apresentar oscilações de terreno.

CAPÍTULO IV

4. DISCUSSÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

A correta interpretação dos dados depende da identificação de padrões de reflexão nos radargramas, e de conseguir determinar a geometria dos refletores que os geraram. Para realizarmos esta interpretação recorreremos a diferentes trabalhos sobre a utilização do GPR, para além dos atrás mencionados, com especial destaque para trabalhos sobre a utilização do GPR em geotecnia e em prospeção mineira, tais como os trabalhos de: Porsani *et al.*, (2005), Hugenschmidt (2010), Banks & Johnson (2011), Butalia *et al.*, (2012), Nováková *et al.*, (2013), entre outros.

4.1 Vilar de Mouros, Caminha, Viana do Castelo

Durante o processamento e o tratamento de dados foi realizada a correção topográfica devido ao terreno apresentar variações de altitude e para que os perfis apresentem os refletores com a geometria correta (Figura o a t – Anexos).

Visto que foram adquiridos dois perfis em cada secção da área A, iremos usar para interpretação quatro perfis: dois da secção 4 (*File___305* e *File___306*); e outros dois perfis da secção 5 (*File___307* e *File___308*). Estes perfis apresentam algum interesse como também existe refletores associados nos taludes.

Em relação à área B iremos analisar o único radargrama realizado.

4.1.1 Área A

Na área A é possível observar em todos os radargramas uma sequência de reflexões lineares contínuas, paralelas entre si. Estas reflexões estão associadas à estratificação com uma inclinação aparente para N. Na Figura 4.1 e 4.2, através das linhas castanhas, é possível observar essas reflexões.

Após uma análise profunda dos perfis, observamos que em algumas áreas dos radargramas é possível observar uma atenuação do sinal assinalando, possivelmente, presença de argilas (pegmatito). Na Figura 4.1, que representa a secção 4, em ambos os perfis (A e B) é de notar a estratificação em algumas zonas apresenta-se mais dúctil. Contudo entre o 1,00 m e os 4,00 m de profundidade, principalmente no perfil A, observa-se uma série de estruturas dúcteis que leva a suspeitar um caso de transporte tangencial colmatada por argilas, num espaço entre os 14,00

m e os 32,50 m. É de salientar que estes dois perfis foram realizados acima de onde se observa a “*kink-band*” no talude principal (Figura 2.3 – Capítulo II).

Na zona assinalada por 1, na Figura 4.1, foi reportado um refletor no talude do acesso (Figura 4.3 – A) de uma zona mais frágil e argilosa (preenchimento pegmatítico). Depois de observar os perfis é detetado uma certa atenuação do sinal, assinalado pela cor vermelha, na zona onde ocorreu a recolha fotográfica que, deste modo, leva a suspeitar que o pegmatito ocorre em profundidade.

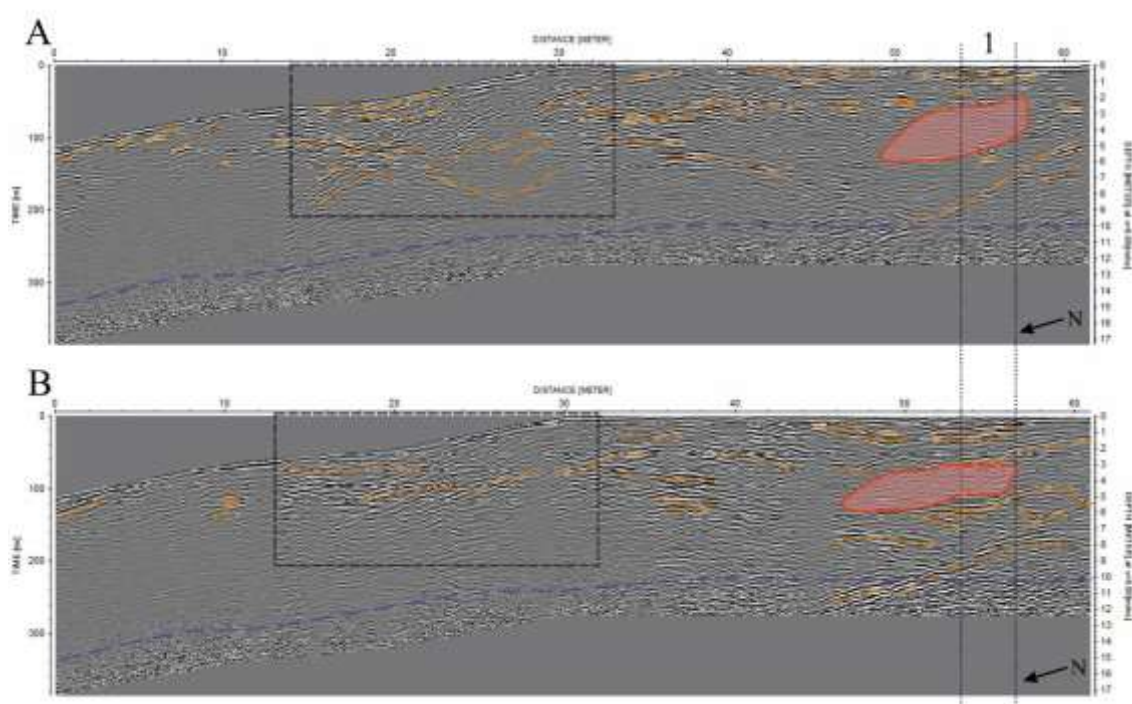


Figura 4.1 – Radargramas correspondentes à secção 4 da área A do talude de Vilar de Mouros, com a antena de 200 MHz (*File__305* e *File__306*), com uma distância máxima de 61,54 m e 60,94 m, respetivamente, e uma profundidade máxima de 13,75 m. Para o tratamento dos perfis foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), exceto o “*fk migration*”, o filtro “*XFlipProfile*” foi somente usado no perfil B.

Tal como no último ponto interpretado nos perfis da secção 4, realizou-se o mesmo processo na secção 5. Na Figura 4.2, para os pontos assinalados pelos números 1 e 2, foi reportado uma zona frágil e argilosa que cortavam a rocha encaixante (Figura 4.3 – B e C), onde nos perfis da Figura 4.2 são observadas zonas com o sinal atenuado e com as reflexões associadas à estratificação (linhas castanhas). Nestes perfis é de realçar que a estratificação encontra-se mais dúctil em relação aos restantes perfis (Figura o a t – Anexos), realçando um possível cavalgamento verticalizado com aplito-pegmatitos argilizados e decompostos, principalmente entre os 2,00 m e os 16,00 m até à profundidade dos 9,00 m.

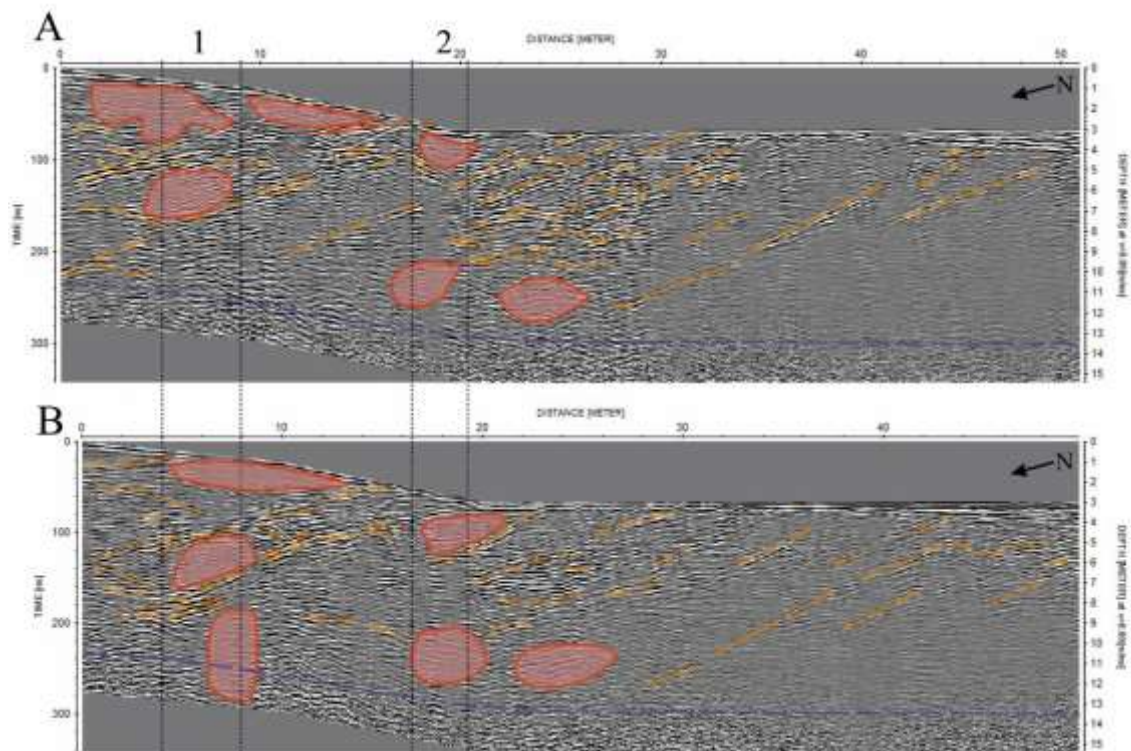


Figura 4.2 – Radargramas correspondentes à secção 5 da área A do talude de Vilar de Mouros, com a antena de 200 MHz (*File__307* e *File__308*), com uma distância máxima de 50,94 m e 49,78 m, respetivamente, e uma profundidade máxima de 13,75 m. Para o tratamento dos perfis foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), exceto o “*fk migration*”, o filtro “*XFlipProfile*” foi somente usado no perfil B.



Figura 4.3 – Levantamento fotográfico das zonas de interesse do talude do acesso (dezembro, 2021).

4.1.2 Área B

Na área B, no único perfil realizado (Figura 4.4) é de notar uma atenuação de sinal ao longo do perfil, que varia entre o 1.00 m e os 7.00 m de profundidade (linha vermelha). É possível observar a estratificação semelhante à identificada na área A, porém, abaixo da linha vermelha,

apresenta um regime mais dúctil que “contorna” a zona de atenuação. No talude oposto a esta área, do outro lado da estrada principal, ocorre afloramentos de filões aplito pegmatíticos com a mesma orientação que a estratificação assinalada (Figura 4.5).

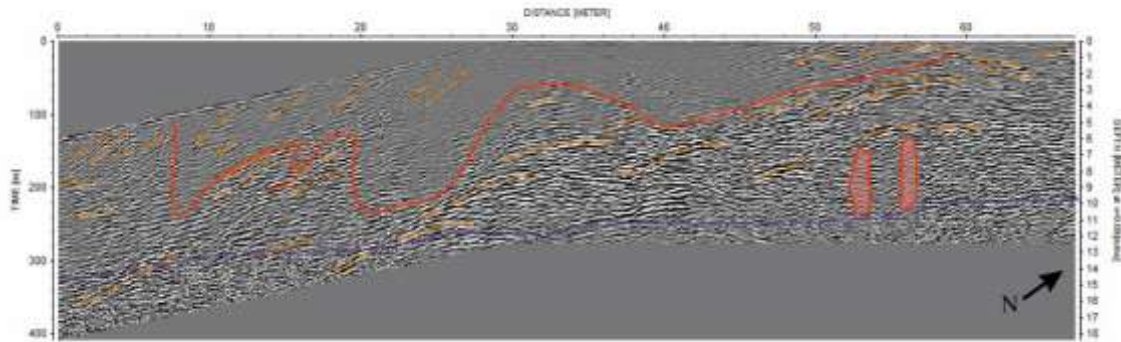


Figura 4.4 – Radargrama correspondente à área B (*File___309*) do talude de Vilar de Mouros com a antena de 200 MHz, com uma distância máxima de 67,13 m e uma profundidade máxima de 17,90 m. Para o tratamento dos perfis foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), exceto o “*fk migration*” e o “*XFlipProfile*”.



Figura 4.5 – Levantamento fotográfico do talude oposto da passagem do GPR (outubro, 2021).

Dado a oclusão da porosidade e a argilização generalizada é difícil haver uma interpretação mais pormenorizada dos radargramas realizados em Vilar de Mouros.

4.2 Malpartida, Almeida, Guarda

Após a visualização, tratamento e processamento de todos os dados foram selecionados os perfis exemplos, que continham a informação mais relevante e que respondia aos objetivos desta dissertação, com o auxílio de um programa de desenho procedeu-se à interpretação.

4.2.1 Área A

Na secção A1, usado como exemplo o ficheiro *File___411* de direção E-W (Figura 4.6), ocorre uma reflexão contínua de alta amplitude que corresponderá a uma fratura com uma inclinação de, aproximadamente, 10%, pois em 2,00 m desce 0,10 m. Associado a esta fratura observam-se também umas fortes hipérbolas (e). Junto à superfície observam-se pequenas cavidades, de poucos centímetros (a), (b), (c), (d), (f) e (g). A partir, mais ou menos, dos 4,00 m de profundidade já é considerado ruído (linha azul). A hipérbole assinalada pelos traços de cor verde é considerada uma onda aérea, pois encontra-se próximo do hasteal.

No perfil B, da Figura 4.6, foi aplicado o filtro “*fk migration*” e é de realçar que as hipérbolas associadas à fratura são de facto espaços vazios que podem estar relacionados com o deslocamento da fratura, ou uma cavidade que fora afetada pela fracturação.

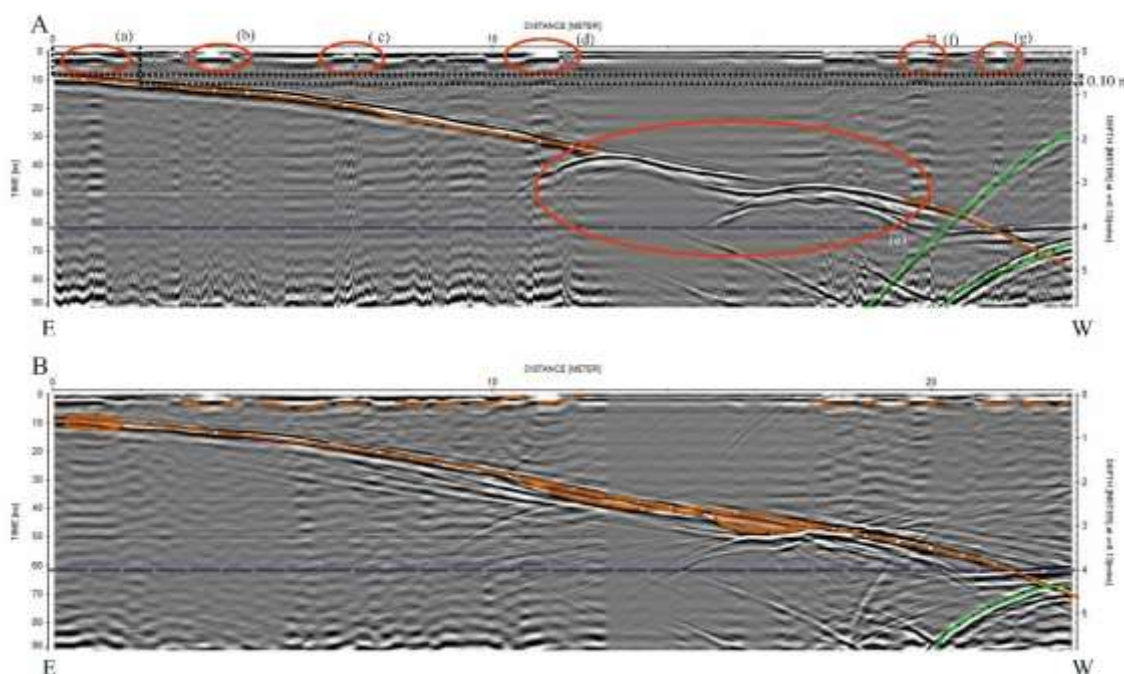


Figura 4.6 – Radargrama correspondente à secção A1 (*File___411*) de direção E-W com uma distância máxima de 20.30 m e uma profundidade máxima de 6.30 m. Para o tratamento do perfil foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*FlipXprofile*”, o “*fk migration*” foi somente aplicado no perfil B.

Usando o perfil *File___406* (Figura 4.7), de direção N-S, como exemplo da secção A2, pois apresenta os aspetos mais relevantes para a interpretação, é possível observar as fraturas predominantes entre os 3,90 m e os 4,20 m (linha castanha-clara), que surge em todos os radargramas desta secção e da secção A1 (*File___412*). Ocorre uma outra diáclase mais superficial que surge a partir dos 0,50 m até à profundidade 1,60 m. À mesma profundidade, há umas hipérbolés bem acentuadas (d), (e) e (f) que nos indicam a existência de espaços vazios. As hipérbolés mais superficiais (0 a 0,30 m), assinaladas pelas letras (a) e (c), indicam também serem pequenas cavidades. As hipérbolés assinaladas pela letra (b), a partir da janela das amplitudes, dá a entender que se trata de um espaço vazio maior.

No perfil B, da mesma figura, foi aplicado o filtro "*fk migration*" e, após a observação geral dos perfis desta secção com este mesmo filtro aplicado, fez com que realçasse as potenciais cavidades, onde mais uma vez, nos faz considerar que os espaços vazios estão associados à fracturação.

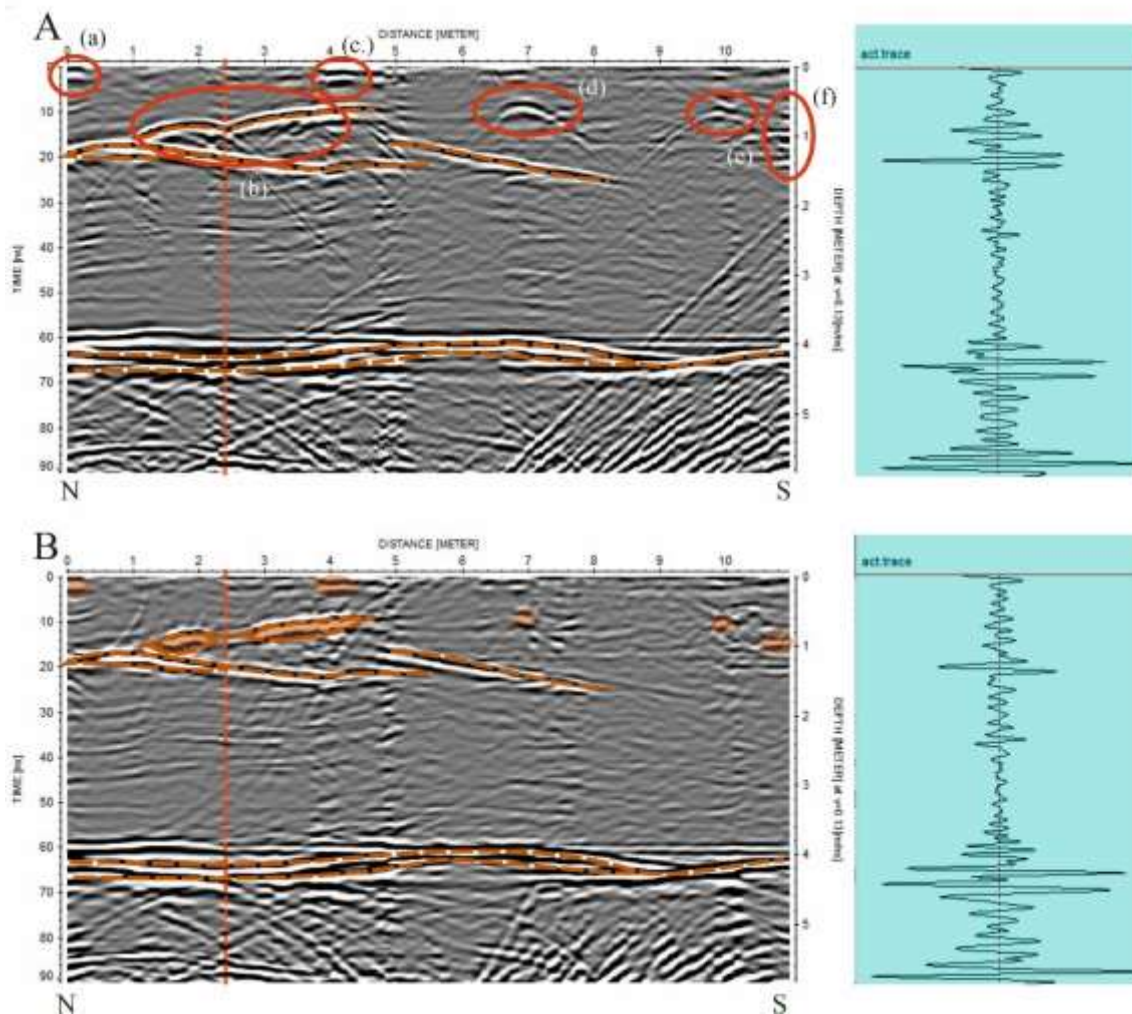


Figura 4.7 – Radargrama correspondente à secção A2 (*File___406*) de direção N-S com uma distância máxima de 11,00 m e uma profundidade máxima de 8,54 m. Para o tratamento do perfil foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), exceto o “*fk migration*” que foi somente aplicado no perfil B.

Na Figura 4.8 observamos o único perfil realizado na secção A3 (*File___410*) que faz uma ligação das duas secções anteriores com direção N-S. No perfil A podemos observar que até aos 18,00 m a fratura predominante que surge em profundidade em todos os radargramas da secção A2, no intervalo dos 2,20 m aos 3,20 m, e o espaço vazio associado a esta fratura (a). Também podemos observar a fratura mais superficial que surge desde os 0,00 m aos 2,50 m numa profundidade baixa (0,20 m aos 0,40 m). Dos 10,15 m aos 10,45 m ocorre umas hipérbolas bem evidentes, (b) e (c), que estão associadas, possivelmente, à fratura assinalada pela linha castanha-clara (perfil B). A partir dos 26,00 m começamos a entrar na secção A1, onde é possível observar uma fratura sub-horizontal à profundidade 0,40 – 0,50 m, que é visível no perfil da Figura 4.6 da secção A1. As cavidades assinaladas pelas letras (d), (e), (f) e (g), no perfil A, tratam de pequenos buracos à superfície. Aos 4,00 m de profundidade em diante, iremos considerar ruído apesar à

profundidade, entre os 4,40 m e ao máximo de profundidade que tem o perfil, surgir umas fraturas bem evidentes, nos intervalos de 0,00 m a 0,40 m e 10,70 m aos 20,70 m.

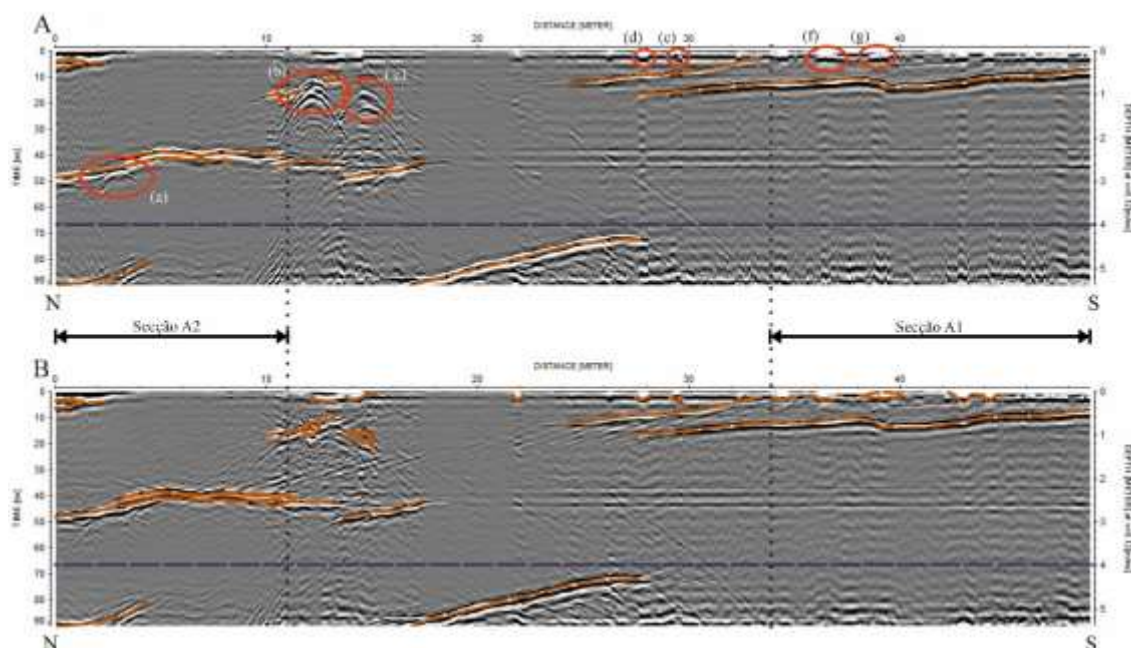


Figura 4.8 – Radargrama correspondente à secção A3 (*File__410*) de direção N-S com uma distância máxima de 50,00 m e uma profundidade máxima de 5,80 m. Para o tratamento do perfil foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), exceto “*XFlipProfile*”, o “*fk migration*” foi somente aplicado no perfil B.

Resumindo, na área A existe grandes fraturas em profundidade, que vão desde poucos centímetros aos quase 20,00 m de comprimento. Associadas a estas fraturas estão alguns deslocamentos (cavidades) criando, assim, diferentes amplitudes no sinal. Apesar de à superfície surgir um pegmatito de textura diferente e com granularidade mais porfiroide, não é possível distingui-lo através dos perfis de radargrama. Em anexo segue os perfis sem qualquer sinalização.

4.2.2 Área C

Num modo geral, a área C foi aquela que se obteve melhores resultados, correspondendo assim aos objetivos desta dissertação. Como já foi referido, nesta área foram usadas as duas antenas (200 MHz e 400 MHz), na secção C1 e C2, e na secção C5 somente a antena de 400 MHz.

Na secção C1, usando como exemplo os ficheiros *File__389* (400 MHz) e o *File__414* (200 MHz) para fins comparativos em relação às duas antenas. Na Figura 4.9, no perfil A (400 MHz) o nível de resolução é muito maior do que o perfil B (200 MHz), deixando a imagem muito mais pormenorizada e com maior detalhe. Num desses aspetos podemos observar as

reverberações localizadas no perfil A, dos 0,00 m aos 11,00 m, até à máxima profundidade do perfil (6,50 m), onde no perfil B, nessa mesma zona, observamos apenas algumas reflexões, ou seja, para a antena de 200 MHz esta só deteta cavidades maiores do que o seu comprimento de onda, em contrapartida, a antena de 400 MHz apresenta um comprimento de onda mais baixo e deteta zonas com cavidades menores, como já foi referido no Capítulo I sobre o funcionamento teórico do GPR.

Fazendo uma correspondência entre os perfis das diferentes antenas (diferentes frequências), é possível correlacionar as hipérbolas referidas anteriormente. Podemos afirmar que as reflexões assinaladas pelas hipérbolas (a) correspondem às indicadas por (k), as (c) às (l) e as (d) às (n), como também podemos observar esse efeito nas diferentes amplitudes (coloração entre a cor preta e a cor branca) junto à superfície, onde com a antena de 400 MHz detetou uma série de pequenas cavidades, de (e) a (j), enquanto que com a antena de 200 MHz só foram detetadas duas cavidades, assinaladas pelas letras (m) e (p), correspondendo às letras (f) e (j) do perfil de 200 MHz, respetivamente. Em ambos os perfis, é possível ver as mesmas fraturas e diáclases, assinaladas pelas linhas castanhas-claras. As reflexões assinaladas pelas linhas de cor verde são consideradas ondas aéreas, pois encontra-se junto ao hasteal. A partir 7,60 m de profundidade do perfil B já consideramos ruído, apesar de ainda se observar alguma informação através da coloração, suspeitando ser só fraturas (o).

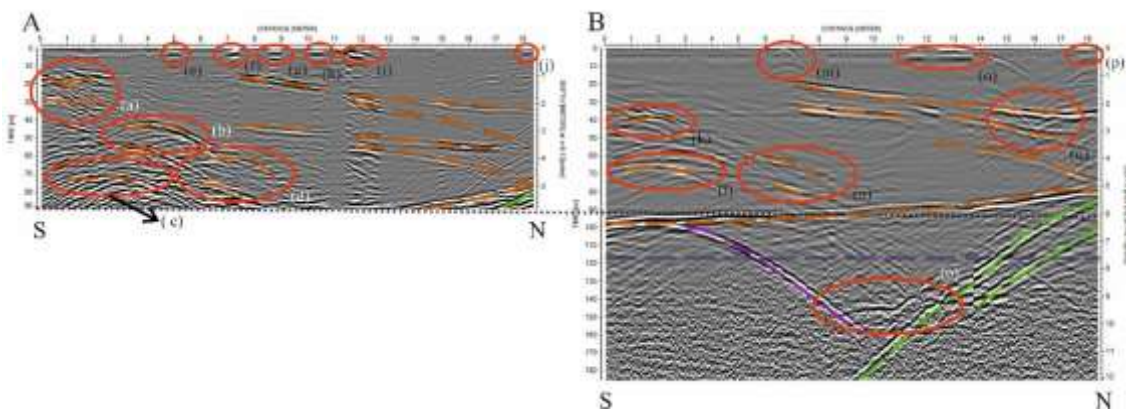


Figura 4.9 – Radargramas correspondentes à secção C1 (*File___389* – 400 MHz; *File___414* – 200 MHz) de direção S-N com uma distância máxima de 18,40 (43) m e uma profundidade máxima de 6,50 m e 12,90 m, respetivamente. Para o tratamento do perfil foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), exceto “*XFlipProfile*” e o “*fk migration*”.

Assim como observado nas Figuras 4.10 e 4.11, também é possível fazer uma comparação entre antenas na secção C2, de direção S-N e W-E. Os perfis assinalados pela letra A correspondem à antena de 400 MHz (*File___383* e *File___373*), e os perfis assinalados pela letra B corresponde

à antena de 200 MHz (*File*___415 e *File*___416). A secção C2 trata-se, como já foi referido, por um bloco solto, de forma quase cúbica.

Na Figura 4.10, podemos observar que há reflexões comuns aos dois perfis, desde reflexões contínuas de alta amplitude, que correspondem a diáclases e/ou fraturas, passando a hipérbolos e reflectores de alta amplitude que estarão associadas a cavidades. No perfil A é possível observar uma série de fraturas sub-horizontais, no intervalo de profundidade entre os 0,40 m aos 2,90 m, onde possivelmente existirá uma cavidade (a), porém este espaço vazio poderá associado à fracturação. Entre as distâncias 1,60 m e os 2,00 m, as antenas passaram sobre um dos furos de arrebentação, porém à profundidade 2,80 m – 3,20 m, é detetado um reflector de maior amplitude (c) podendo ser algum tipo de cavidade miarolítica. Entre os 3,60 m e os 4,60m, quer no perfil A, quer no perfil B, é de realçar a existência de uma hipérbole à mesma profundidade, perto dos 0,80m, que assinala a existência de um espaço vazio. Na zona assinalada por (g), entre a distância dos 3,20 m e os 4,40 m, no perfil B, é evidente uma hipérbole bem acentuada que estará associada a uma cavidade de maiores dimensões à profundidade dos 4,00 m, correspondendo, deste modo, à hipérbole (d) no perfil A, indicando assim um espaço vazio entre os 4,40 m e os 5,00 m de profundidade. Aos 6,20 m, no perfil B, de profundidade é detetado uma fratura sub-horizontal intensa, porém esta fratura trata-se da base do bloco e que, a partir desta profundidade, já se considera ruído. Contudo, à mesma distância da reflexão (g), entre 9,60 m e os 10,40 m de profundidade, ocorre uma reflexão (h) bem acentuada que, talvez, nos indique a existência de uma cavidade de dimensões semelhantes à superior. As hipérbolos assinaladas pela linha cor verde é considerado ondas aéreas.

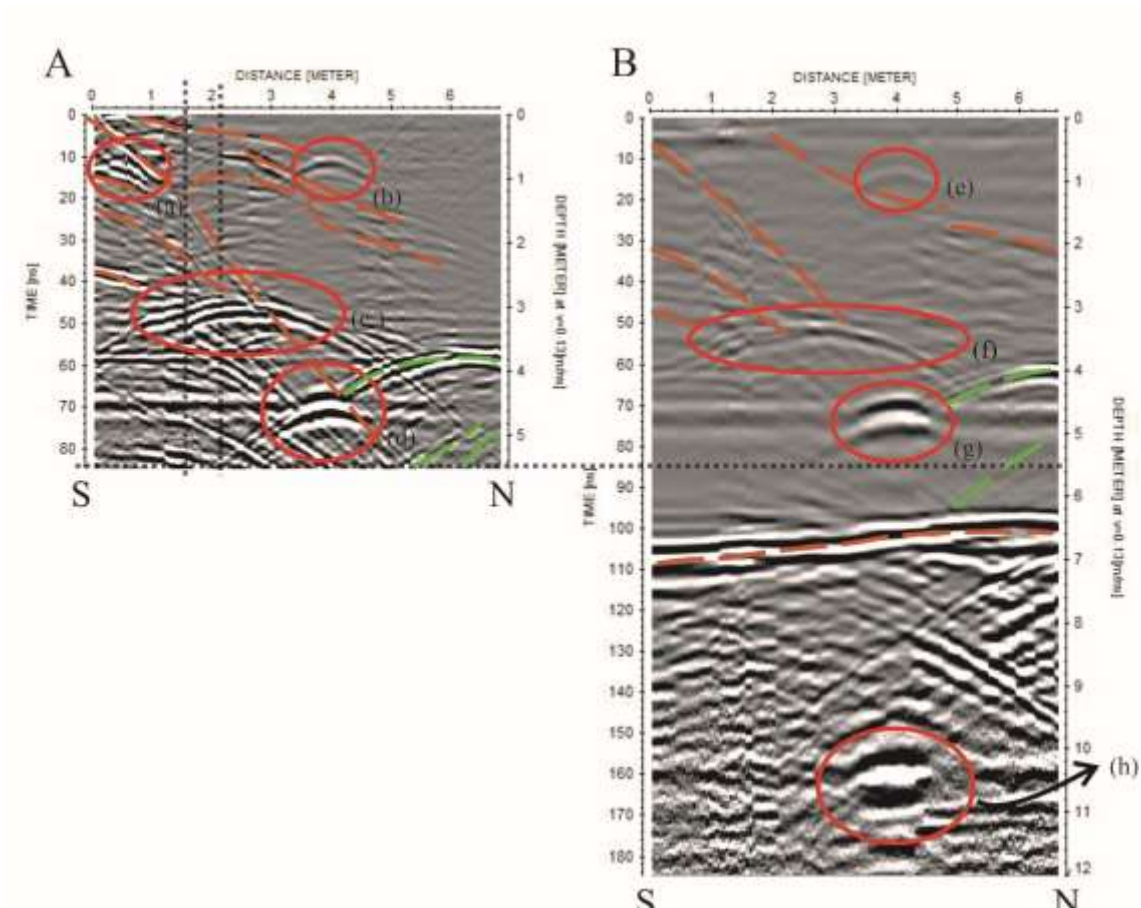


Figura 4.10 – Radargramas correspondentes à secção C2 (*File___383* – 400 MHz; *File___415* – 200 MHz) de direção S-N com uma distância máxima de 6,60 m e uma profundidade máxima de 5,80 m e 12,40 m, respetivamente. Para o tratamento do perfil foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), exceto “*XFlipProfile*” e o “*fk migration*”.

Em uma direção diferente em relação à Figura anterior, na Figura 4.11 conseguimos observar os mesmos aspetos relevantes, tais como as fraturas e as hipérbolas à mesma profundidade. Constatamos que as reflexões assinaladas pelas letras (b) – perfil A, (g) e (i) – perfil B, são as mesmas que foram detetadas na Figura 4.10, pelas reflexões (c) – perfil A, (e) e (f) – perfil B, pois encontram-se à mesma profundidade. A hipérbole assinalada pela letra (a), no perfil A, localiza-se à mesma distância que a hipérbole (b), correspondendo, assim, no perfil B à hipérbole (f). Na zona (e), no perfil A, ao longo de todos os perfis com a direção W-E é possível detetar algumas hipérbolas associadas a cavidades, que tanto podem ser cavidades miarolíticas ou apenas buracos relacionados com a fracturação. As reflexões assinaladas pelas letras (c) e (d) correspondem aos furos de perfuração.

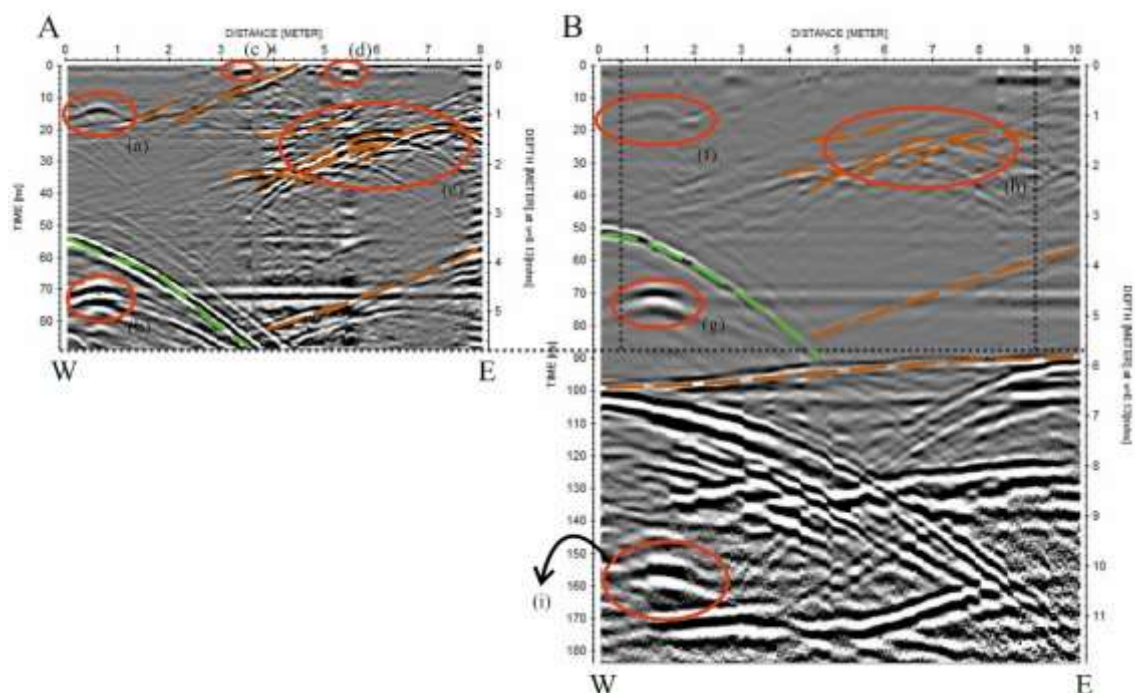


Figura 4.11 – Radargramas correspondentes à secção C2 (File___373 – 400 MHz; File___416 – 200 MHz) de direção W-E com uma distância máxima de 8,00 m e 10,10 m, e uma profundidade máxima de 5,35 m e 12,85 m, respetivamente. Para o tratamento do perfil foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), exceto “*XFlipProfile*”, que foi usado apenas no perfil B, e o “*fk migration*”.

Em relação à secção C5, visto que os perfis realizados na secção C2 apresentaram boa qualidade, utilizamos os perfis realizados no hasteal correspondente à secção para a interpretação. Na Figura 4.12 estão quatro perfis, sendo o perfil A do hasteal a W (S-N) e o perfil do hasteal a N (W-E), os perfis C e D correspondem aos anteriores com o parâmetro “*fk migration*” ativado. No perfil A foram detectadas hipérbolas, (a), (b) e (c), numa profundidade entre os 0,40 m e o 1,20 m, que nos indicam a existência de cavidades, através da ativação do filtro “*fk migration*” (perfil C) é possível analisar que as ondas propagam dentro do espaço vazio durante, aproximadamente, por 1,80 m, que leva a suspeitar a existência de uma série de cavidades contínuas. No perfil B é detetado uma série de reverberações, (d) e (e), que com a aplicação do parâmetro “*fk migration*”, perfil D, é de realçar a existência de cavidades aos 2,00 m de profundidade. Estas cavidades correspondem às que são observadas no perfil A e C. A partir dos 3,80 m, em ambos os perfis, é considerado ruído por existir muita reverberação, apesar de se suspeitar existir algum tipo de cavidade, porém não é possível concluir isso devido ao bloco apresentar fratura com a frente de desmonte em relação à secção C1 e C3 (Figura v – Anexos).

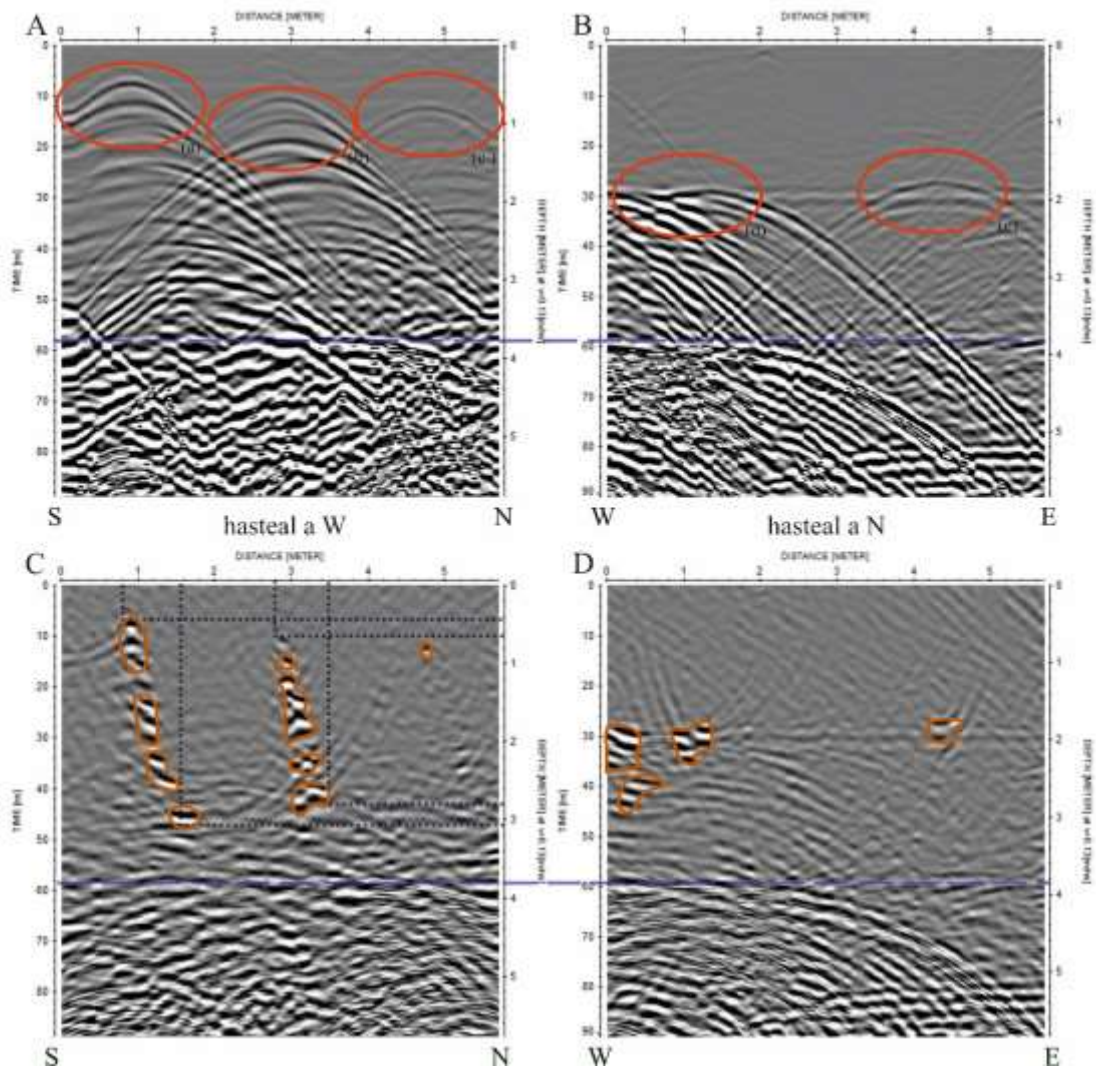


Figura 4.12 – Radargramas correspondentes à secção C5 (*File__396* e *File__399*) de direção S-N e W-E com uma distância máxima de 5,70 m, e uma profundidade máxima de 6,30 m. Para o tratamento dos perfis foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), exceto “*XFlipProfile*”, e o “*fk migration*” só foi usado no perfil C e D.



Figura 4.13 – Levantamento fotográfico do bloco solto com a indicação da passagem do GPR nos hasteais a N e W (julho, 2021). A: Hasteal W (N-S); B: Hasteal N (W-E).

Resumindo, os perfis realizados na área C apresentaram elevada qualidade do sinal sendo possível detetar cavidades nas duas secções horizontais, C1 e C2, e na secção vertical, C5. Num modo geral, podemos afirmar que o filão pegmatítico miarolítico é predominante nesta área.

CAPÍTULO V

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O GPR é uma técnica não destrutiva que possuiu uma vasta gama de aplicações em engenharia, geofísica e arqueologia. No entanto, apesar de ser uma técnica muito utilizada no estrangeiro, ainda se encontra pouco divulgada em Portugal (Fernandes & Lourenço, 2007; Assunção, 2016), principalmente na área da valorização de recursos geológicos.

O desenvolvimento dos trabalhos decorrentes desta dissertação teve alguns contratemplos, particularmente os relacionados com a situação pandémica vivida desde 2020. Apesar de todos esses contratemplos, que atrasaram ou limitaram a realização dos trabalhos, concluímos que foi possível obter resultados satisfatórios. Consideramos que, concluídos os trabalhos, os principais objetivos da dissertação foram alcançados.

Concluímos que, considerando os objetivos iniciais, foi possível utilizar com sucesso o GPR na identificação de estruturas associadas a filões ou massas pegmatíticas.

Em Vilar de Mouros (Caminha, Viana do Castelo), apesar das condições meteorológicas adversas aquando da aquisição de dados, a prospeção foi bem-sucedida. Os dados permitiram concluir que aquela zona fora afetada por movimentos tectónicos, como sugere a bibliografia, através das reflexões lineares presente nos radargrama, que permitiu definir a estratigrafia local e pelas zonas atenuadas irregulares, discordantes relativamente à estratificação, que levam a suspeitar à presença de filões pegmatíticos, argilizados. A diferente geometria dos refletores e o contraste reológico entre o pegmatito alterado e os metassedimentos, possibilitou a geração dos refletores interpretados. É de salientar que algumas das reflexões presentes nos radargramas são correlacionáveis com as estruturas pegmatíticas e metassedimentares observadas no talude principal do acesso autoestrada e no talude que ladeia o caminho onde se realizou a prospeção.

Em Malpartida (Almeida, Guarda), os resultados obtidos mostraram-se bastante interessantes. A interpretação dos resultados, permite afirmar que os dados adquiridos na área C, na secção C2 e na secção C5, correspondentes aos hasteais da secção C2, são os mais favoráveis. Os refletores assinalados nos radargrama permitiram assinalar a existência de cavidades de diferentes dimensões (possivelmente cavidades miarolíticas) desde cavidades com poucos centímetros até cavidades com 2,00 m de comprimento (Figura 2.10 – Capítulo II; Figura 4.13 – Capítulo IV). Estas conclusões são reforçadas pela correlação entre os dados dos perfis de 400

MHz e de 200 MHz, e pela correlação dos perfis verticais, realizados no topo do bloco, e os perfis horizontais realizados nos hasteais.

Na Figura 5.1 (continuação na Figura 5.2) é apresentado um croquis com a projeção 3D da interpretação realizada a partir dos radargrama. Observa-se, em profundidade, a presença de possíveis cavidades, prevendo-se assim, que naquele bloco existam cavidades miarolíticas preenchidas por minerais de qualidade gema, de acordo com aquelas encontradas nos hasteais, num primeiro nível aplito pegmatítico, que foi determinado através das antenas de 400 MHz. Contudo, através dos dados adquiridos a partir da antena de 200 MHz é possível supor a existência de um segundo nível aplito pegmatítico com cavidades miarolíticas (Figura 5.3).

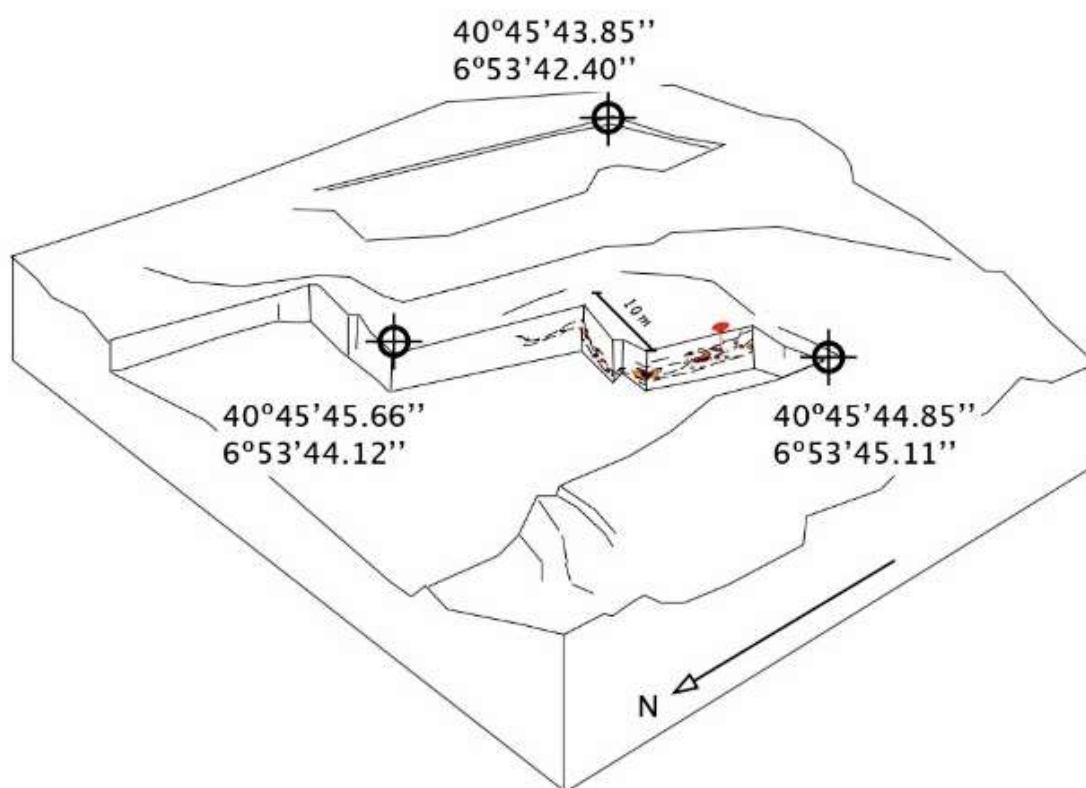


Figura 5.1 – Reconstituição dos fulcros de anomalias extraídos das diversas orientações conjugadas de varrimento GPR, com a antena de 400 MHz.

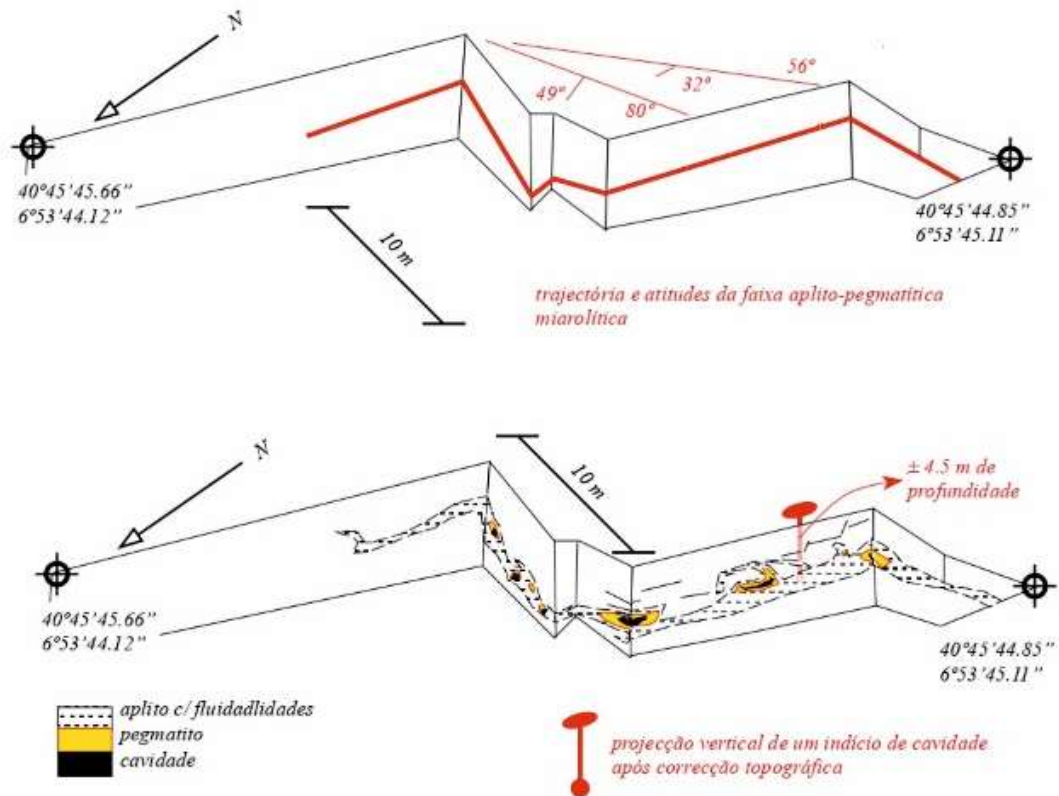


Figura 5.2 – Continuação da Figura 5.1.

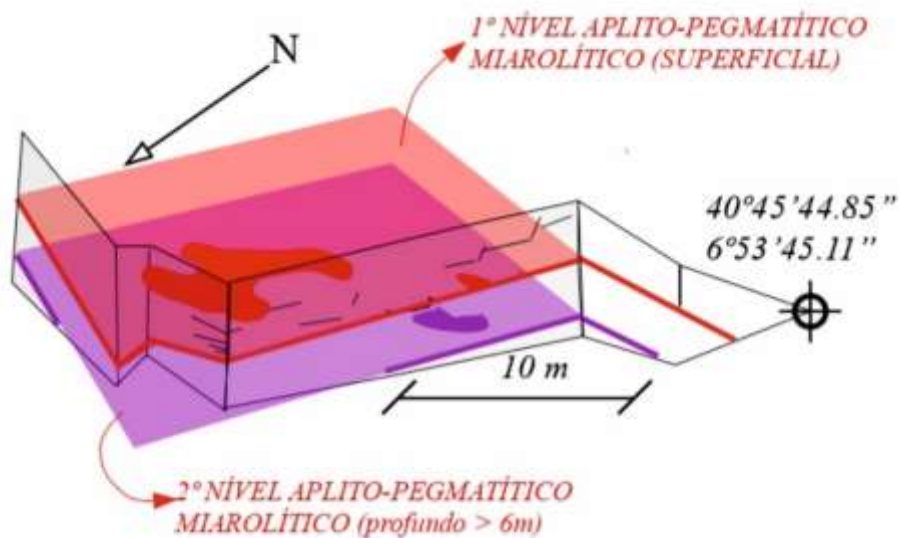


Figura 5.3 – Reconstituição dos fulcros de anomalias extraídos das diversas orientações conjugadas de varrimento GPR, com a antena de 400 MHz (primeiro nível) e com a antena de 200 MHz (segundo nível).

Concluindo que, com os dados adquiridos na área C, respondem ao objetivo da deteção de anomalias, em profundidade, relativas a cavidades miarolíticas nas diferenciações pegmatíticas intragraníticas, o uso do GPR foi favorável, pois trouxe a finalização desse objetivo. Afirmamos,

deste modo, que o uso do GPR é favorável na prospeção e deteção de espécimes de minerais raros em pedreiras.

Salientamos, que os dados adquiridos na área A são igualmente favoráveis no que toca a respostas a nível da geotecnia em função da gestão de uma pedreira. Pois permite definir o volume, a área de corte do bloco e podendo também rejeitar zonas com presenças de anomalias (cavidades) e com fraturação, dependendo da finalidade da pedreira.

5.1 Trabalhos e futuras recomendações

Visto que, principalmente em Vilar de Mouros, não se obteve os melhores resultados devido à perda de energia do sinal devido ao solo se apresentar húmido, que não respondeu, de forma direta, à deteção de anomalias relativas à remoção de enchimento pegmatíticos argilizados no meio de formações metassedimentares, recomenda-se que num futuro trabalho, com mais organização e melhores equipamentos, especialmente a nível de GPS, se faça uma nova aquisição de dados com equipamento GPR neste mesmo local, ou em um outro semelhante, para obter resultados melhores e tirar uma conclusão mais assertiva em relação ao uso de GPR na deteção das anomalias descritas. Será também interessante a utilização de outros métodos de prospeção, nomeadamente a resistividade elétrica.

Embora, em Malpartida, os resultados tenham sido bastante positivos e responderam claramente ao objetivo desta dissertação, recomendava-se o uso do GPR em todas as áreas sugeridas de forma a tentar responder a questões como: qual o comportamento da massa pegmatítica, isto é, como se distribui lateralmente e verticalmente e; se ocorre mais do que dois níveis de diferenciação granítica. Talvez um aumento da prospeção nas áreas sugeridas e o uso de várias antenas, para responder de forma clara o uso do GPR na gestão de uma pedreira e da prospeção de espécimes de minerais raros.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- Aguiar, J. C. (2005). *Radar de Penetração no Solo (GPR): Aspectos Geofísicos e Geodésicos, Processamento e Análise em Pavimento Flexível*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia e Cartografia, Centro de Tecnologia e Geociências.
- Almeida, Â., Bobos, I., Ramos, J. F., Lima, A., Martinez-Catalán, J., Martins, T., Noronha, F., Pessqueira, A., Robles, E. R., Ramos, R., Ribeiro, M. A., & Vieira, R. (6th-12th de May de 2007). Field Trip Guidebook. Em A. Lima, & E. R. Robles (Edits.), *Granitic Pegmatites: The State of the Art*. Departamento de Geologia, Univesidade do Porto - Faculdade de Ciências, Porto, Portugal: Memórias n.º 9.
- Annan, P. A. (2003). *Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications*. Inc., Sensors and Software.
- Annan, P. A. (2009). Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar. Em H. M. Jol (Ed.), *Ground penetrating radar theory and applications*. Elsevier.
- Aranha, P. R., Horn, A. H., & Joncew, H. C. (2018). Use of GPR in Pegmatites Mining: Example of a Sheetlike Body from Northern Minas Gerais, Brazil. *Rom. J. Mineral Deposits*, 91(1-2), pp. 7-12.
- Assunção, T. W. (2016). *Aplicação do Método Geofísico de Georadar em Contexto de Exploração Mineira - Caso Prático do Eluvião da Bejanca*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Departamento Ciências da Terra, Escola de Ciências, Braga.
- Balen, D., & Broska, I. (2011). Tourmaline nodules: products of devolatilization within the final evolutionary stage of granitic melt? Em A. N. Sial, J. S. Bettencourt, & C. P. De Campos (Edits.), *Granite-Related Ore Deposits* (pp. 53-68). London, Special Publications, 350: The Geological Society.
- Banks, W. S., & Johnson, C. D. (2011). *Collection, Processing, and Interpretation of Ground-Penetrating Radar Data to Determine Sediment Thickness at Selected Locations in Deep Creek Lake, Garrett County, Maryland, 2007*. U.S. Geological Survey Scientific Investigation Report 2011-5223.
- Barraca, N., Matias, M. S., & Almeida, F. (novembro de 2019). O método de radar de penetração no solo (GPR) na caracterização do Mosteiro da Batalha. *Conservar Património xx (xxxx)*, pp. 1-15. doi:10.14568/cp2018050
- Barroso, L. S. (2018). *Pesquisa Mineral de Pegmatitos na Região Leste de Minas Gerais em contexto de Mineração de Pequena Escala*. Escola de Ciências, Departamento Ciências da Terra. Braga: Universidade do Minho. Obtido de <http://hdl.handle.net/1822/64789>
- Benedetto, A., & Benedetto, F. (2014). Application Field-Specific Synthesizing of Sensing Technology: Civil Engineering Application of Ground-Penetrating Radar Sensing Technology. Em *Comprehensive Materials Processing* (Vol. 13, pp. 393-425). University of Roma Tre, Roma, Italy: Elsevier. doi:10.1016/B978-0-08-096532-1.01315-7
- Best, M. G. (2003). *Igneous and Metamorphic Petrology* (2ª ed.). Brigham Young University, Utah, Estados Unidos da América : Blackwell Publishing.

- Butalia, R. S., Tuttle, J. W., & White, J. G. (2012). Estimating Depth to Bedrock using Ground Penetrating Radar in the Carolina Slate Belt. *Duke Energy Convention Center(Poster Number 1600)*. Exhibit Hall AB, Level 1, 2012.
- Cameron, E. N., Jahns, R. H., McNair, A. H., & Page, L. R. (1949). *Internal Structure of Granitic Pegmatites*. Urbana, Illinois: Society of Economic Geologists, Monograph 2. doi:10.5382/Mono.02
- Carvalho, D. (Out./ Dez. de 1981). Boletim de Minas. *Direcção-Geral de Geologia e Minas*, 18(4), pp. 261-269.
- Cassidy, N. J. (2009a). Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soils and Fluids. Em H. M. Jol, *Ground Penetrating Radar Theory and Applications* (pp. 41-72). Elsevier.
- Cassidy, N. J. (2009b). Ground Penetrating Radar Data Processing, Modelling and Analysis. Em H. M. Jol, *Ground Penetrating Radar Theory and Applications* (pp. 141-176). Elsevier.
- Černý, P. (1982a). Anatomy and classification of granitic pegmatites. Em *Granitic Pegmatites in Science and Industry* (Vol. 8, pp. 1-39). Winnipeg: MAC Short Course Handbook.
- Černý, P. (1982b). Petrogenesis of granitic pegmatites. Em *Granitic Pegmatite in Science and Industry* (Vol. 8, pp. 405-461). Winniped: MAC Short Course Handbook.
- Černý, P. (1990). Distribution affiliation and derivation of rare-element Granitic pegmatites in the Canadian Shield. Em *Geologische Rundschau* (Vol. 79, pp. 183-226).
- Conyers, L. B. (2004). *Ground Penetrating Radar for Archaeology*. Walnut Creek, CA: AltaMira Press.
- Conyers, L. B. (2016). *Ground-Penetrating Radar for Geoarchaeology*. West Sussex, UK: Wiley-Blackwell.
- Costa, A. J. (2009). *Utilização do Georadar na Caracterização de Pavimentos Rodoviários*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Coimbra.
- Cruz, P., Topczewski, L., Fernandes, F., & Lourenço, P. B. (13 a 16 de dezembro de 2006). Utilização do Radar de Prospecção Geotécnica na Localização das Bainhas de Pré-Esforço nas Pontes da Barra e de Lanheses. *4as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, p. 13.
- da Silva, A., Infante, A. d., Reis, A. d., Manzoni, C., & Guimarães, C. d. (06 a 08 de novembro de 2018). XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. *Aplicação de métodos da resistividade em estudos hidrogeológicos no distrito de Coqueiral, Nobres-MT*, p. 4.
- Daniels, D. J. (2004). *Ground Penetrating Radar* (2nd ed.). London, UK: The Institution of Electrical Engineers (IEE). doi:10.1049/PBRA015E
- Davis, J. L., & Annan, A. P. (1989). Ground-penetrating Radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysics*(37), pp. 531-551.
- Dias, C. H. (2015). *Mineralogia, Tipologia e causas de Cor de Espodumênio da Província Pegmatítica Oriental do Brasil e Química Mineral de NB-Tantalatos da Mina da Cachoeira (Minas Gerais)*. Instituto de Geociências. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais.

- Dias, C. H., Chaves, M. L., & Cardoso, D. K. (s.d.). *Tântalo*. Obtido em 6 de janeiro de 2021, de Recursos Minerais de Minas Gerais - RMMG: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/tantalo/>
- Dias, P. S. (2011). *Análise estrutural e paragenética de produtos litológicos e mineralizações de segregação metamórfica - Estudo de veios hiperaluminosos e protólitos poligénicos Silúricos da região da Serra de Arga (Minho)*. Tese de doutoramento, Universidade do Minho, Departamento Ciências da Terra, Braga.
- FC.Ulisboa. (2016). *Métodos elétricos e eletromagnéticos*. Aparentamentos didáticos, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Lisboa.
- Fernandes, F. (2006). *Evaluation of Two Novel NDT Techniques: Microdrilling of Clay Bricks and Ground Penetrating Radar in Masonry*. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Escola de Engenharia.
- Fernandes, F. M., & Lourenço, P. B. (17 a 19 de dezembro de 2007). Aplicações do Georadar na Reabilitação e Detecção de Anomalias. *Congresso Construção 2007*, p. 11.
- Fernandes, F. M., Lourenço, P. B., & Cruz, P. J. (2010, novembro e dezembro). Possibilidades do Radar de Prospecção Geotécnica em Estruturas e Aplicações em Portugal. *(120), série II*, 84-90.
- Fernández Ruíz, J., Monteserín, V., Rodríguez Fernández, L., Mediavilla, R., & Sanz, M. (1990). Hoja 500 (Villar del Ciervo) del Mapa Geológico de España, escala 1:50 000. Instituto Geológico y Minero de España.
- Ferreira, J. d. (2015). *Amazonites de Valença - Norte de Portugal*. Dissertação de Mestrado, Escola de Ciências, Universidade do Minho, Departamento Ciências da Terra, Braga.
- Ferreira, J., Araújo, P., Guimarães, F., Pereira, M., & Leal Gomes, C. (2014). Geoquímica do Ta e estrutura da sua distribuição no Grupo Pegmatítico Granítico de Senhora da Assunção, Sátão, Centro de Portugal. *Comunicações Geológicas 101*, pp. 781-785.
- Fersman, A. E. (1951). Les pegmatites, leur importance scientifique et pratique. Em *Acad. Sci. URSS, 1931* (J. Thoureau, & R. du Trien de Terdonck, Trads., Vol. 3, p. 675). Universidade de Louvain, Bélgica.
- Figueiredo, F., & Catarino, L. (02 e 03 de Março de 2017). Prospecção de recursos hídricos em meio cristalino por métodos geofísicos, caso de estudo da Senhora do Castelo (Mangualde). *11º Seminário sobre Águas Subterrâneas*, pp. 6-9.
- Frost, B. R., & Frost, C. D. (2014). *Essentials of Igneous and Metamorphic Petrology*. New York, USA: Cambridge University Press.
- Gibson, P., Casado, C., Pellicer, X., & Jiménez, D. M. (6th-10th de May de 2014). Mapping the internal structure of Bull Island, eastern Ireland with ground penetrating radar (GPR) and electrical resistivity tomography (ERT). *The 46th Conference of Irish Geography*.
- Ginsburg, A. I. (1971). *Feições Geoquímicas Típicas do Processo*. Porto Alegre: CAEG/UFRGS.
- Gonçalves, L. M. (2013). *Estudo Geoarqueológico com Georadar. Aplicação aos Contextos Arqueológicos da Pré-História Recente à Proto-História do NW de Portugal*. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Departamento Ciências da Terra, Escola de Ciências, Braga.

- Grangeia, C., & Matias, M. S. (2004). *Técnicas de georadar em prospecção arqueológica: Ançã e S. Martinho de Árvore*, 7(2), pp. 427-434.
- Grangeia, C., & Matias, M. S. (2004). *Técnicas de georadar em prospecção arqueológica: Ançã e S. Martinho de Árvore*, 7(2), pp. 427-434.
- Guimarães, D. M. (2012). *Cinemática da mobilidade pegmatítica em enxames epi a mesocorticais - Modelos conceptuais aplicados à prospecção*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Departamento Ciências da Terra, Escola de Ciências, Braga.
- Horn, A. H., Aranha, P. R., & Joncew, H. C. (2018). Combined Mineralochemical, Statistical and Geophysical (GPR) Data as Support for the Exploration of Pegmatite-Hosted Gemstones: Example from the Santa Rosa Mine, MG, Brazil. *Rom. J. Mineral Deposits*, 91(1-2), pp. 1-6.
- Hugenschmidt, J. (2010). Ground penetrating radar for the evaluation of reinforced concrete structures. *Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures - Non-Destructive Testing Methods*, 2(15), pp. 317-333. doi:10.1533/9781845699604.2.317
- Jahns, R. H. (1955). The study of pegmatites. Em *Economic Geology* (pp. 1025-1130). 50th Anniversary.
- Jol, H. M., & Bristol, C. S. (2003). GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. (H. M. Jol, & C. S. Bristow, Edits.) *Ground Penetrating Radar in Sediments*(211), pp. 9-27.
- Leal Gomes, C. (coord.). (2008). Minuta (singular) de Revisão da Folha 1C - Caminha da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000. *Submetido para publicação pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia*.
- Leal Gomes, C., & Azevedo, A. (2003). Caracterização difractivométrica e evolução paragenética de fosfatos em pegmatitos do grupo Senhora de Assunção, Viseu. *IV Congresso Ibérico de Geoquímica: XIII Semana de Geoquímica* (pp. 56-58). Coimbra: Universidade de Coimbra, Departamento Ciências da Terra.
- Leal Gomes, C., & Lopes Nunes, J. (2003). Análise paragenética e classificação dos pegmatitos graníticos da Cintura Hercínica Centro-Ibérica. *A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos, II*, pp. 85-109.
- Leal Gomes, C., & Neves, J. L. (1991). Estruturas e paragéneses de unidades pegmatíticas tardias (Exemplos do Minho). *Resumo do III Congresso Nacional de Geologia*.
- Leucci, G. (2012). Ground Penetrating Radar: A Useful Tool for Shallow Subsurface Stratigraphy. Em Dr. Ömer Elitok (Ed.), *Deposits, Stratigraphic Analysis of Layered* (pp. 61-86). InTech.
- Lobarinhas, D., Dias, P., & Leal Gomes, C. (2014). Contribuição para uma discriminação mineralógica e clástica de formações metassedimentares da região de Caminha, Norte de Portugal. Em *Comunicações Geológicas (2014)* (Especial I ed., Vol. 101, pp. 131-135). Porto: LNEG.
- Macieira, M. R. (2019). *Prospecção geofísica aplicada a fins arqueológicos e geotécnicos: caso pratico da Nossa Senhora do Castelo, Lourinhã*. Dissertação de mestrado, Escola de Ciências, Departamento Ciências da Terra, Universidade do Minho. Obtido de <http://hdl.handle.net/1822/65459>

- Marques de Souza, C. J. (1999). *Caracterização Mineralógica e Geoquímica dos Pegmatitos da Pederneira na Região de Santa Maria do Suaçuí, Minas Gerais*. Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. Obtido de <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/152>
- Martins, H. C. (1998). *Geoquímica e petrogénese de granitos biotíticos tarditectónicos e póstectónicos. Implicações metalogénicas*. Tese de Doutoramento, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.
- Mason, B. H. (1971). *Princípios de Geoquímica*. São Paulo: USP.
- Medeiros, A. C., Teixeira, C., & Lopes, J. T. (1975). *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal da Folha 5-B (Ponte da Barca), na escala 1/50 000*. Lisboa: Direção-Geral de Minas e Serviços Geológicos.
- Mendes, A. C. (2001). *Geocronologia e petrogénese do Maciço Granítico pós-tectónico de Peneda-Gerês (ZCI, Norte de Portugal e Galiza)*. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Departamento Ciências da Terra, Escola de Ciências, Braga.
- Mickus, K. (2021). Geophysical methods. Em *Pollution Assessment for Sustainable Practices in Applied Sciences and Engineering* (pp. 199-287). Missouri State University, Springfield, MO, United States. doi:10.1016/B978-0-12-809582-9.00005-0
- Moreira, C., & Braga, A. (Abril/ Junho de 2009). Aplicação de métodos geofísicos no monitoramento de área contaminada sob atenuação natural. *Eng Sanit Ambient*, 14(2), pp. 257-264.
- Nováková, E., Karous, M., Zajicek, A., & Karousová, M. (2013). Evaluation of Ground Penetrating Radar and Vertical Electrical Sounding Methods to Determine Soil Horizons and Bedrock at the Locality Dehtáře. *Soil & Water Res.*(3), pp. 105-112.
- Patterson, J. E. (2003). *Application of Ground Penetrating Radar (GPR) at the Cryo-Genie Gem Pegmatite Mine, San Diego County, California*. University of Calgary, Department of Geology and Geophysics, Calgary, Canada.
- Patterson, J., & Cook, F. (2002). *Successful Application of Ground Penetrating Radar in the Exploration of Gem Tourmaline Pegmatites of Southern California*. University of Calgary, Department of Geology and Geophysics, Calgary, Canada.
- Pedrosa-Soares, A. C., De Campos, C. P., Noce, C., Silva, L. C., Novo, T., Roncato, J; Medeiros, S., Castañeda, C., Queiroga, G., Dantas, E, Dussin, I., & Alkmim, F. (2011). Late Neoproterozoic - Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí orogen (Brazil), the Eastern Brazilian Pegmatite Province and related mineral resources. Em A. N. Sial, J. S. Bettencourt, & C. P. De Campos (Edits.), *Granite-Related Ore Deposits* (pp. 25-52). London, Special Publications, 350: The Geological Society.
- Pereira, M. D. (2015). *Paragéneses contrastantes no campo pegmatítico de Arga (NW de Portugal) – Diversidade e Equilíbrio*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Departamento Ciências da Terra, Braga.
- Pereryazhko, I. S. (2010). Genesis of mineralized cavities (miaroles) in granitic pegmatites and granites. *Petrology*, 18, pp. 183-208.
- Peretyazhko, I. S. (2009). Inclusions of Magmatic Fluids: P- V-T-X Properties of Aqueous Salt Solutions of Various Types and Petrological Implications. *Petrologiya*, 17(2), pp. 187-201.

- Reynolds, J. M. (1997). *An introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Robinson, M., Bristow, C., McKinley, J., & Ruffell, A. (2013). Ground Penetrating Radar. British Society for Geomorphology, Geomorphological Techniques.
- Sandmeier, K.-J. (2010). Non-destructive testing of concrete with electromagnetic and acoustic-elastic waves: data analysis. *Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures - Non-Destructive Testing Methods*, 2(7), pp. 125-143. doi:10.1533/9781845699604.2.125
- Sial, A. N., Bettencourt, J. S., De Campos, C. P., & Ferreira, V. P. (2011). Granite-related ore deposits: an introduction. Em A. N. Sial, J. S. Bettencourt, & C. P. De Campos (Edits.), *Granite-Related Ore Deposits* (pp. 1-6). London, Special Publications, 350: The Geological Society.
- Silva, C. F. (2019). *Prospecção Geofísica com Georadar. Aplicação de Diferentes Metodologias de Processamento e Visualização de Dados Aplicadas à Arqueologia*. Projeto Estágio de Licenciatura, Universidade do Minho, Departamento Ciências da Terra, Escola de Ciências, Braga.
- Solla, M., Lorenzo, H., Riveiro, B., & Rial, F. I. (2011). Non-destructive methodologies in the assessment of the masonry arch bridge of Traba, Spain. Em *Engineering Failure Analysis* (3 ed., Vol. 18, pp. 828-835). Department of Natural Resources and Environmental Engineering, University of Vigo, A Xunqueira, 36005 Pontevedra, Spain: Elsevier. doi:10.1016/j.engfailanal.2010.12.009
- Teixeira, C., & Assunção, C. T. (1961). *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Portugal da Folha 1-C (Caminha), na escala 1/50 000*. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.
- Teixeira, C., & Perdigão, J. C. (1962). *Carta Geológica de Portugal da Folha 1-C (Caminha), na escala 1/50 000*. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.
- Teixeira, C., Medeiros, A. C., & Teixeira, J. (1964). *Carta Geológica de Portugal da Folha 5-B (Ponte da Barca), na escala 1/50 000*. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal.
- Thomas, R., & Davidson, P. (12 de Maio de 2007). Granitic Pegmatites: The State of the Art – International Symposium. 06th. *The formation of granitic pegmatites from the viewpoint of melt and fluid inclusions and new experimental work*.
- Thorpe, R., & Brown, G. (1985). *The field description of igneous rocks*. Inglaterra: Geological Society of London Handbook.
- Tkachev, A. V. (2011). Evolution of metallogeny of granitic pegmatite associated with orogens throughout geological time. Em A. N. Sial, J. S. Bettencourt, & C. P. De Campos (Edits.), *Granite-Related Ore Deposits* (pp. 7-24). London, Special Publications, 350: The Geological Society.
- Utsi, E. C. (2017a). More Fundamentals of GPR Operation. Em *Ground Penetrating Radar - Theory and Practice* (pp. 27-38). United Kingdom: Elsevier. doi:10.1016/B978-0-08-102216-0.00003-5
- Utsi, E. C. (2017b). The Effect of Water and Air. Em *Ground Penetrating Radar - Theory and Practice* (pp. 39-50). United Kingdom: Elsevier. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102216-0.00004-7

- Utsi, E. C. (2017c). Data Processing. Em *Ground Penetrating Radar - Theory and Practice* (pp. 83-92). United Kingdom: Elsevier. doi:10.1016/B978-0-08-102216-0.00008-4
- Utsi, E. C. (2017d). Examples of Practical Problems. Em *Ground Penetrating Radar - Theory and Practice* (pp. 135-151). United Kingdom: Elsevier. doi:10.1016/B978-0-08-102216-0.00012-6
- Winter, J. D. (2013). *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology* (2^a ed.). Londres , Inglaterra: Pearson Education Limited.
- Yuan, C., & Cai, H. (2020). Spatial reasoning mechanism to enable automated adaptive trajectory planning in ground penetrating radar survey. Em *Automation in Construction* (Vol. 114). United States of America. doi:10.1016/j.autcon.2020.103157
- Zorpi, M. J., Coulon, C., Orsini, J. B., & Cocirta, C. (1989). Magma mingling, zoning and emplacement in calc-alkaline granitoid plutons. *Tectonophysics*, 157, pp. 315-329.

WEBGRAFIA

- Carvalho, P., & Ferreira, A. (9 de dezembro de 2018). Geologia de Neves-Corvo: Estado Atual do Conhecimento. Obtido em 6 de janeiro de 2021, de <https://geomuseu.ist.utl.pt/BIMineral/Bibliografia%20Mineral%20BI/Cobre/Geologia%20de%20Neves%20Corvo.pdf>
- Dias, C. H., Chaves, M. L., & Cardoso, D. K. (s.d.). *Tântalo*. Obtido em 6 de janeiro de 2021, de Recursos Minerais de Minas Gerais - RMMG: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/tantalo/>
- King, H. M. (s.d.). *Pegmatite - An extreme igneous rock with large crystals and rare minerals*. Obtido em 19 de outubro de 2020, de Geology.com: <https://geology.com/rocks/pegmatite.shtml>
- Laboratório Nacional de Energia e Geologia – *Geoportal: Energia e Geologia*. (s.d.). Obtido em 20 julho de 2021, de Geoportal – Mapa: <https://geoportal.ineg.pt/mapa/#>
- Malacate. (14 de janeiro de 2010). *Granitos Iberolusos: Pedreira I, Malpartida, Almeida, Portugal*. Obtido em 14 de setembro de 2021, de MTI Blog - Mineralogía Topográfica Ibérica: <https://www.mtiblog.com/2010/01/granitos-iberolusos-pedreira-i.html>
- Mindat.org. (s.d.). *Portugal No. 2 quarry, Malpartida e Vale de Coelha, Almeida, Guarda, Portugal*. Obtido em julho de 2021, de Mindat.org: <https://www.mindat.org/loc-106425.html>
- Oerad Teck. (14 de dezembro de 2018). *Understanding the GPR radargram*. Obtido em 27 de novembro de 2021, de Medium: <https://medium.com/see-whats-underneath/understanding-the-gpr-radargram-9281f093b21b>
- Oldenburg, D.; Jones, F.; Heagy, L.; Cockett, R.; Astic, T.; Devriese, S.; Capriotti, J. (2017). *Ground Penetrating Radar - Interpretation*. Obtido em 27 de novembro de 2021, de GPG: https://gpg.geosci.xyz/content/GPR/GPR_interpretation.html
- Simmons, S. (2018). *A Look at Pegmatite Classifications*. University of New Orleans, Department of Geology and Geophysics, EUA. Obtido em 4 de 11 de 2020, de Mineralogical Society of

America:

http://www.minsocam.org/msa/Special/Pig/PIG_articles/Elba%20Abstracts%2018%20Simmons.pdf

Winge, M. (s.d.). *Pegmatito*. Obtido em 3 de novembro de 2020, de Glossário Geológico: <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/pegmatito.htm>

ANEXOS

tipologia das cavidades pegmatíticas

- DT - cavidades de dissolução total
- CC - cavidades de dissolução selectiva em cavidades de corrosão, com ou sem "ion-wash"
- MV - cavidades microclivadas verticais
- MFP - cavidades microclivadas planas geradas por fraccionamento
- MCO - cavidades microclivadas planas relacionadas com colapso granítico
- MT - cavidades microclivadas relacionadas com deformação crustal compressiva e transmissiva

exemplos paradigmáticos das cavidades conceptuais para os tipos definidos

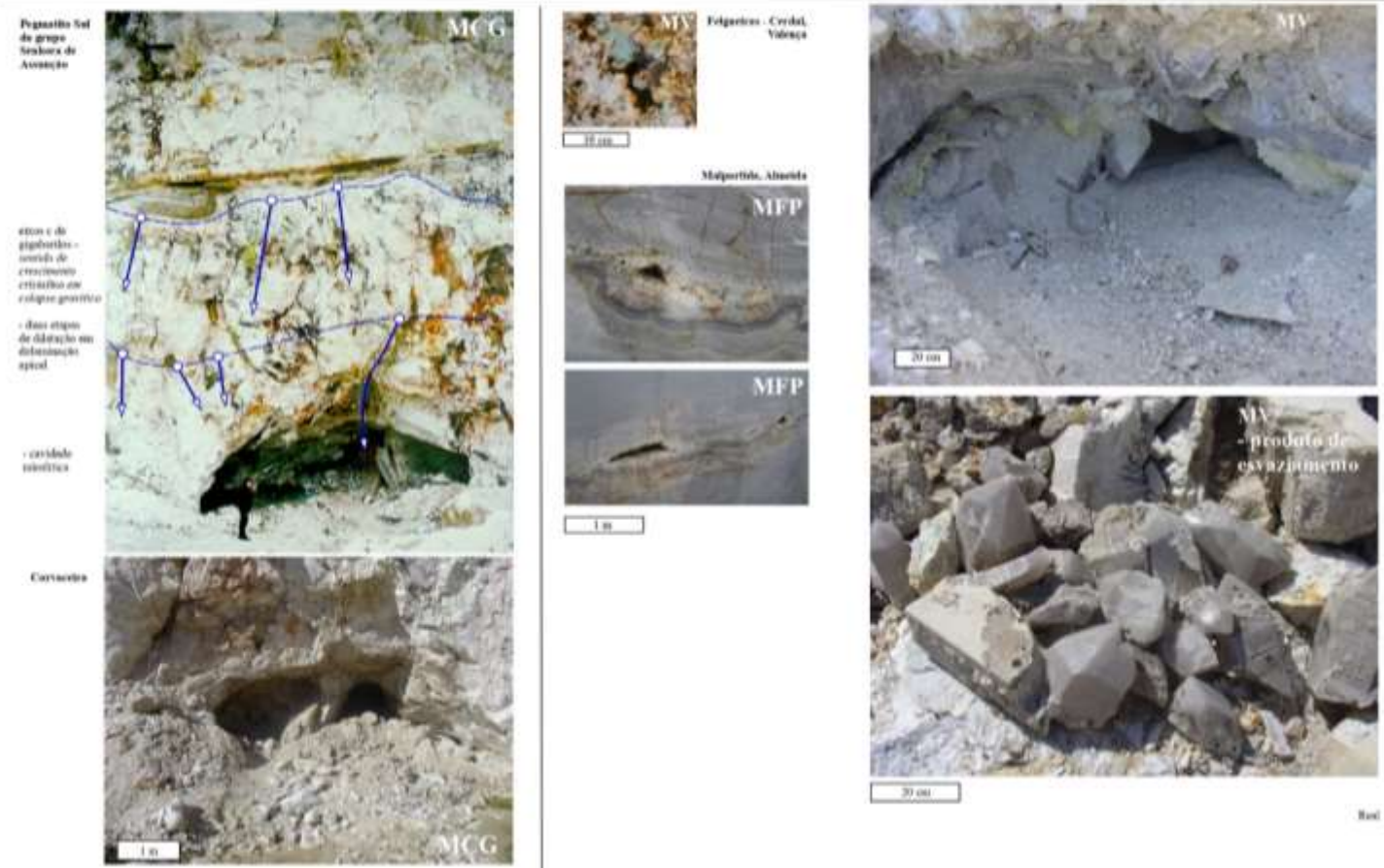


Figura a – Imagens que exemplificam termos da tipologia das cavidades pegmatíticas em Portugal continental. Os respetivos pegmatitos encontram-se descritos em Leal Gomes e Azevedo (2003) e Ferreira *et al.* (2014).



Figura b – Continuação da figura anterior (Figura a).

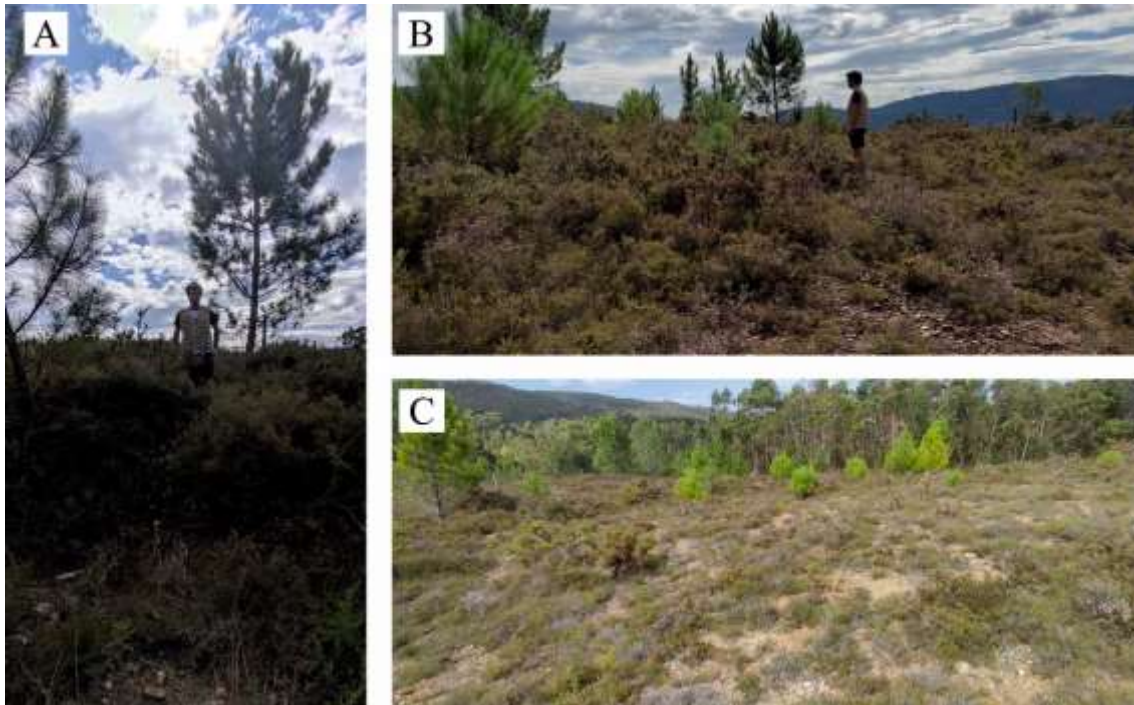


Figura c – Estado da vegetação encontrada em Vilar de Mouros, onde não era possível a passagem do GPR (outubro, 2021).

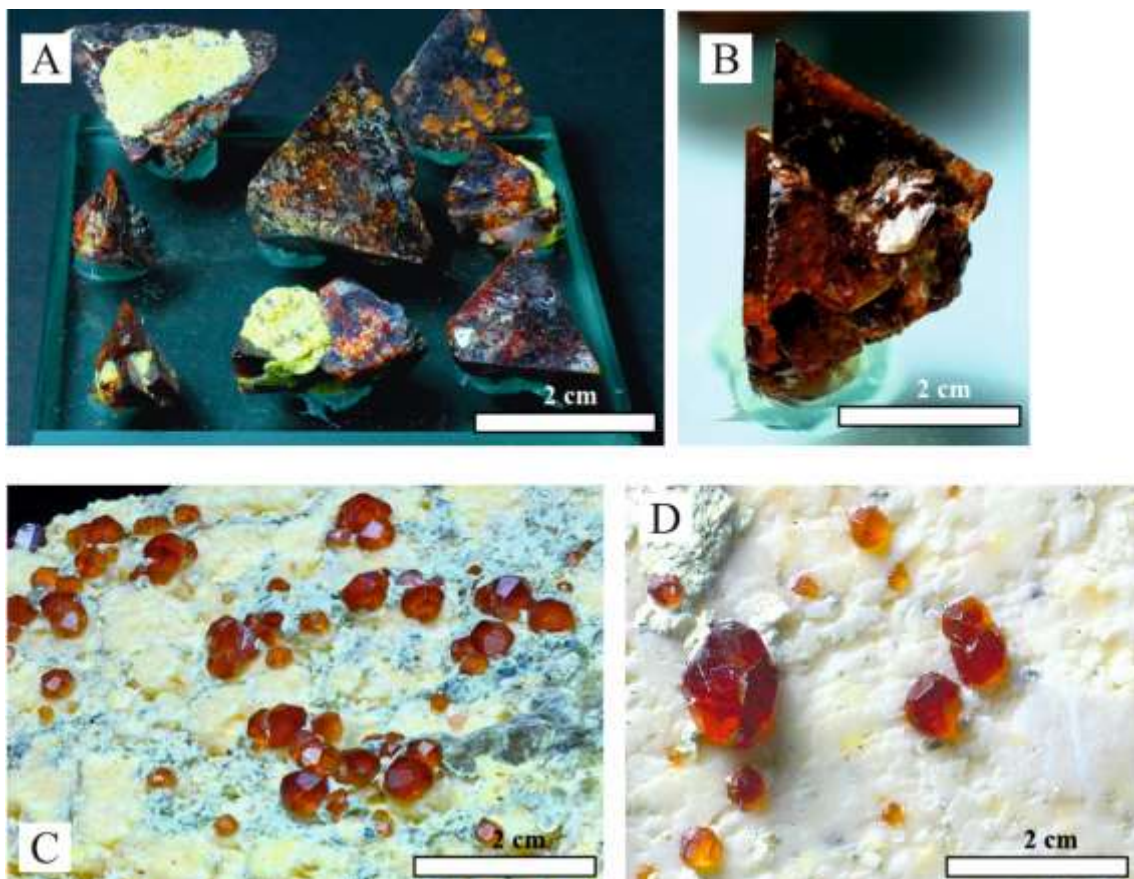


Figura d – Fotografias de cristais de helvite ($\text{Be,Mn}^{2+}_3(\text{SiO}_3)_3\text{S}$) (A e B) e de cristais de espessartine ($\text{Mn}^{2+},\text{Al}_3(\text{SiO}_3)_3$) sobre microclina perthite \pm caolinite \pm mica (C e D). Espécimes com valor museológico obtidos do revestimento de algumas cavidades miarolíticas vazias de Malpartida.

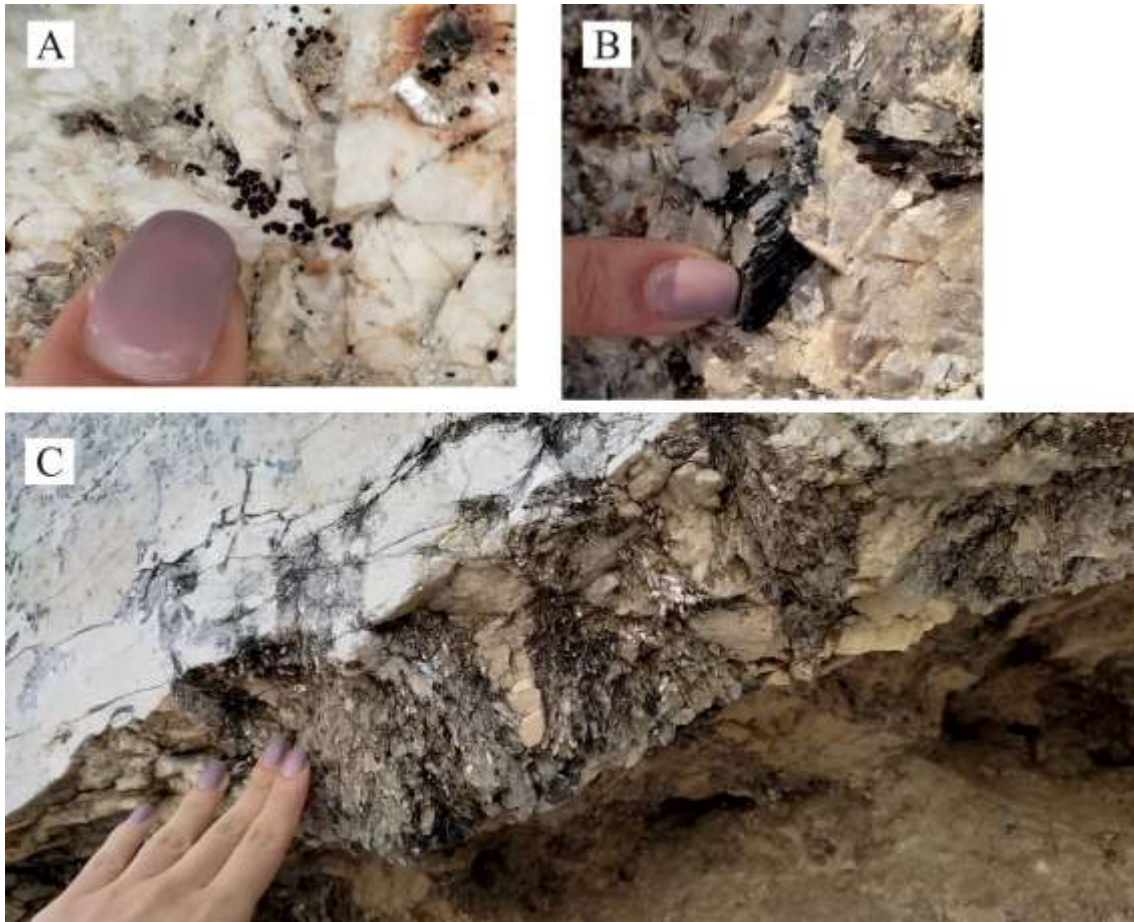
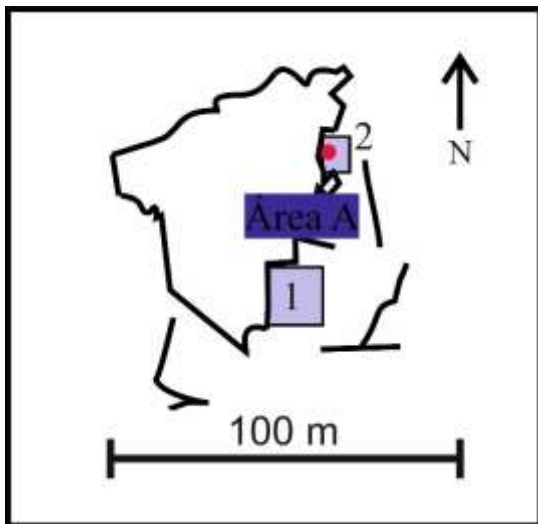


Figura e – Levantamento fotográfico dos minerais encontrados nas cavidades pegmatíticas em Malpartida (Almeida, Guarda). A: Espessartine, uma variedade de granada; B: Schorolite, uma variedade de turmalina; C: Feldspato e moscovite no tecto de uma das cavidades.



Área de interesse de passagem, observação do pegmatito à superfície (01 e 02 na área A1).

Fotografias área A



Figura f – Dados recolhidos durante o reconhecimento da área A (julho, 2021).



Figura g – Dados recolhidos durante o reconhecimento da área B (julho, 2021).

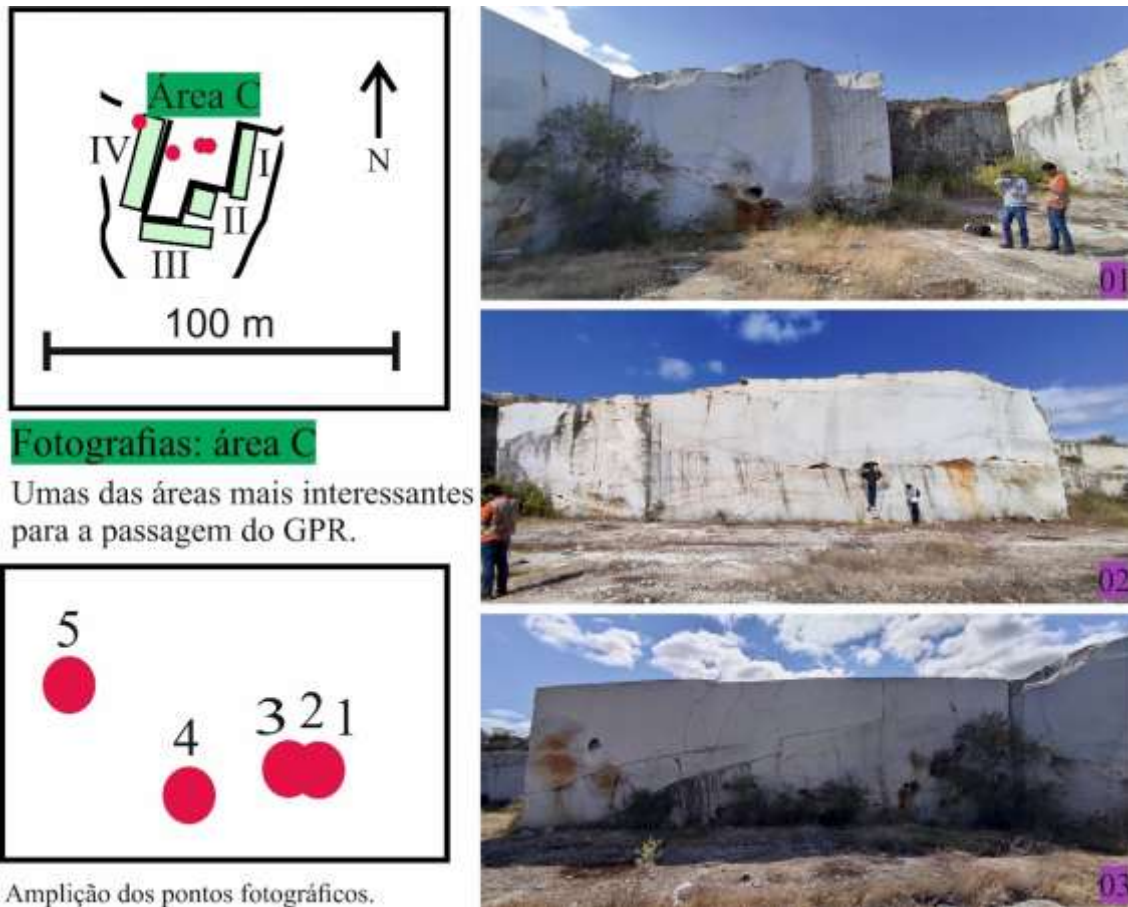


Figura h – Dados recolhidos durante o reconhecimento da área C (julho, 2021).

Fotografias: área C



Área de real interesse pela observação do pegmatito em profundidade com grandes bolsadas (cavidades miarolíticas).

A passagem do GPR será realizada nas áreas marcadas a verde no mapa.

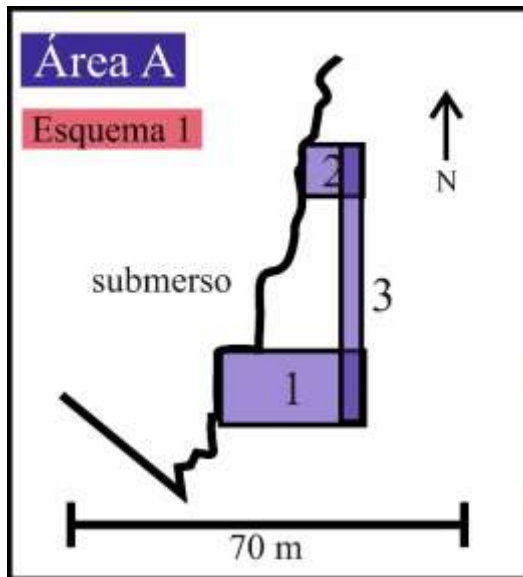


No bloco «solto» o interesse para a passagem do GPR é maior, pois apresenta grandes bolsadas (área CII).

Figura i – Continuação da Figura h.



Figura j – Imagens do levantamento fotográfico da litologia de pedra de Malpartida (Almeida, Guardar) com maior resolução (Figura 2.4 – Capítulo II)



Na área A foi usado somente a antena de **400 MHz**.

- Secção A1: uma passagem de direção S-N (412) e uma de direção W-E (411)
- Secção A2: várias passagens de direção S-N (par) e N-S (ímpar) (403 a 409) equidistância: 0,5 m
- Secção A3: uma passagem desde a secção A2 até à secção A1 de direção N-S de equidistância 0,5 m em relação ao radargrama 408 (410)

Secção A2 zona de contacto entre dois tipos de granito mais leucocrata e granito biotítico
Secção A1 sem qualquer indicio de bolsadas.

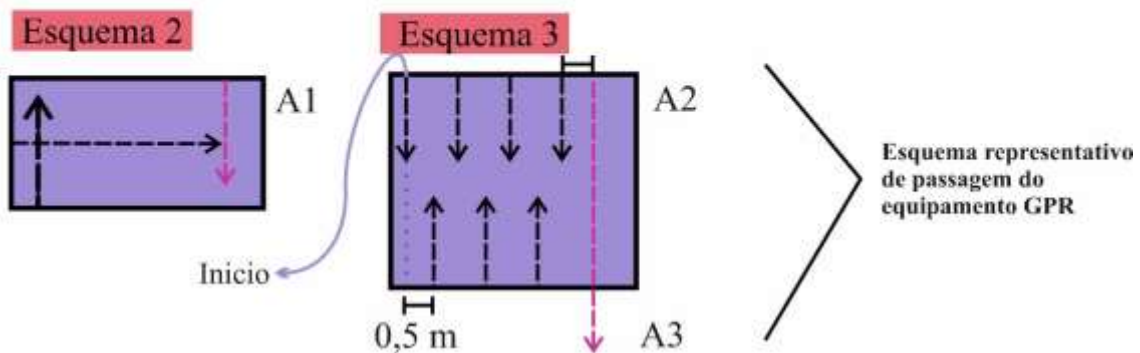
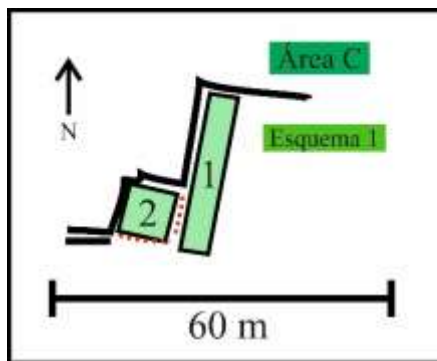


Figura k – Esquema pormenorizado da Figura 3.7 – Capítulo III.



Na área C foi usado as duas antenas: 200 e 400 Mhz
Passagem horizontal

- 400 MHz Teste/ensaio (SW-NE): 366**
- Secção C1: passagens de direção S-N (distância: +/- 20 m) (387 a 391)
- Secção C2: passagens de direção S-N (par), N-S (ímpar), W-E (ímpar) e E-W (par) (distância: 6,9 m) (378 a 386) S-N e N-S
- ATENÇÃO: deslocamento realizado a 50 cm da borda do lado W e N (367 a 377) W-E e E-W equidistância: 0,5 m

- 200MHz**
- Secção C1: uma passagens de direção S-N 414
- Secção C2: duas passagens W-E e E-W 413, 416
uma passagem S-N 415

200 MHz - Passagem Vertical
Teste/ensaio: 392 e 393

- Secção C5: Ao longo do filão pegmatítico observado na frente da área C (394 a 402) direção direita - esquerda
- Paredes (perfis): 1ª - 394 e 368;
3ª - 396; 4ª - 398; 5ª - 399 e 400; 6ª - 401 e 402

..... Zona de fraturação do bloco solto

Figura l – Esquema pormenorizado da Figura 3.8 – Capítulo III.

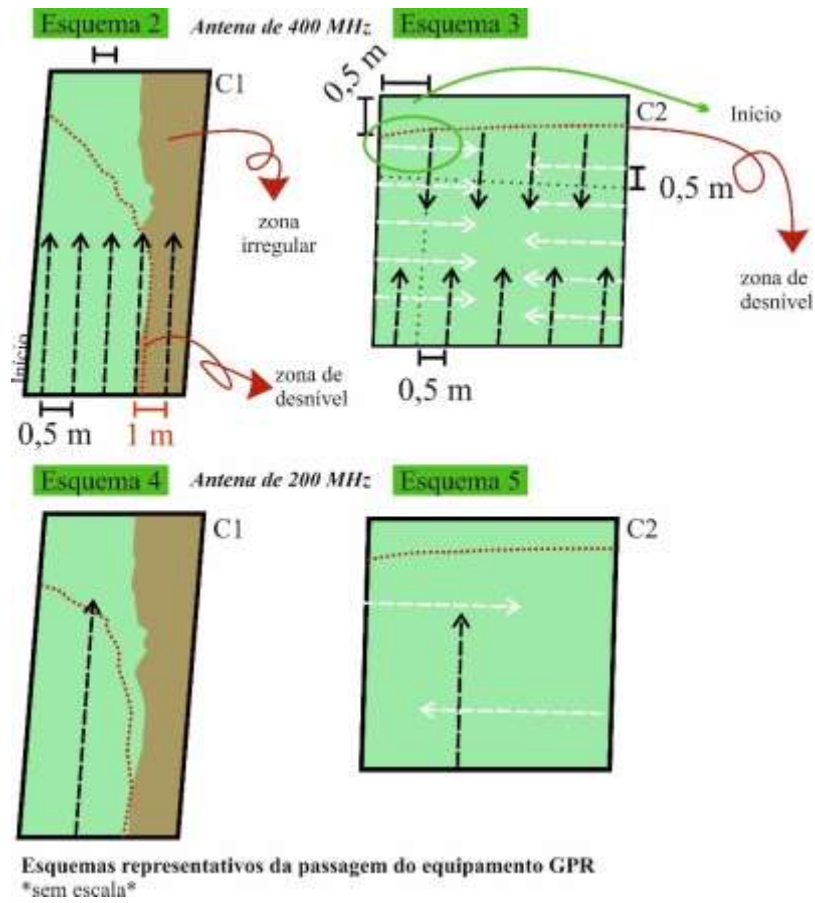


Figura m – Continuação da Figura l.

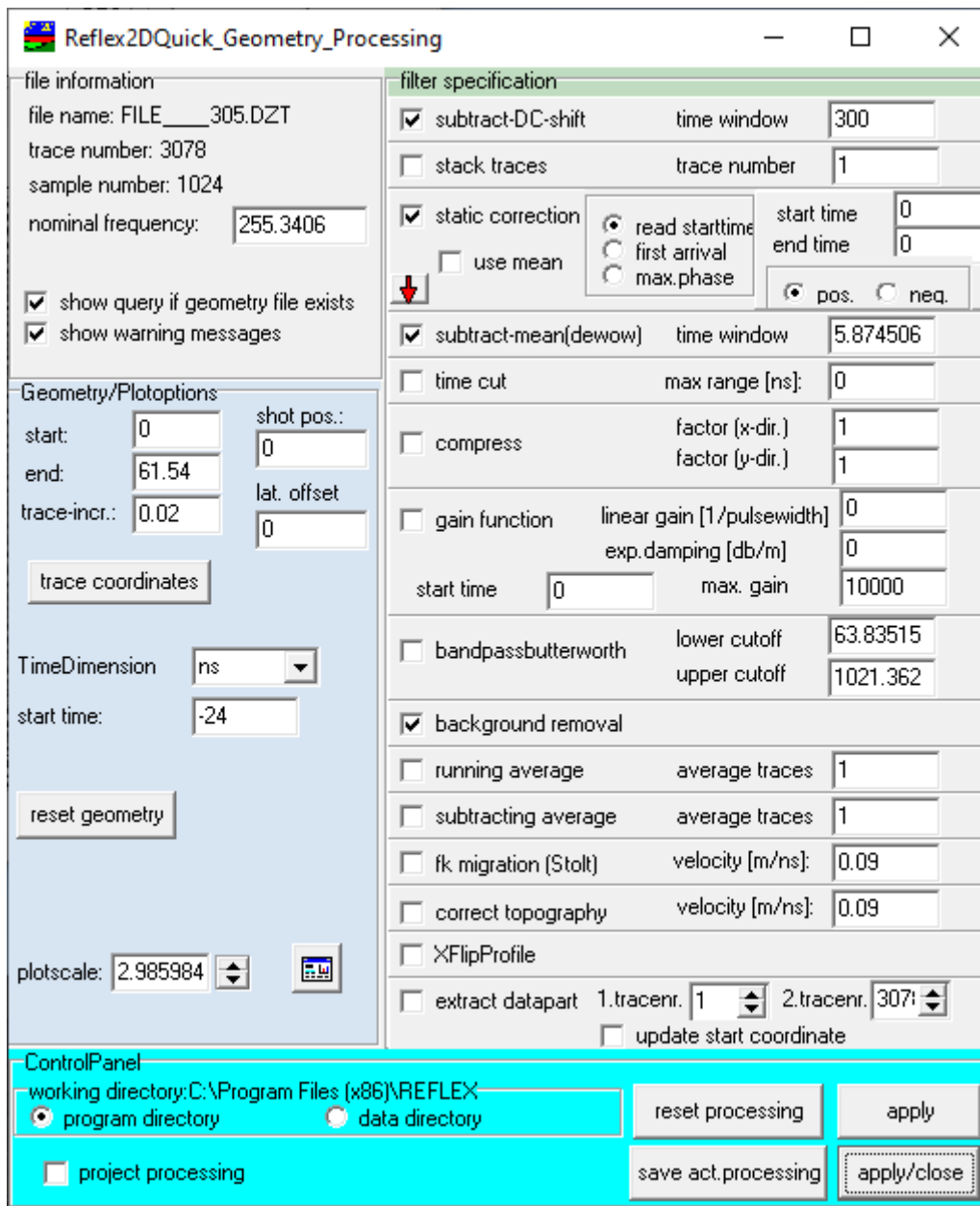


Figura n – Recorte do menu “*geometry and processing*” do *software* usado para o processamento, tratamento e visualização de dados de GPR, Reflex2DQuick.

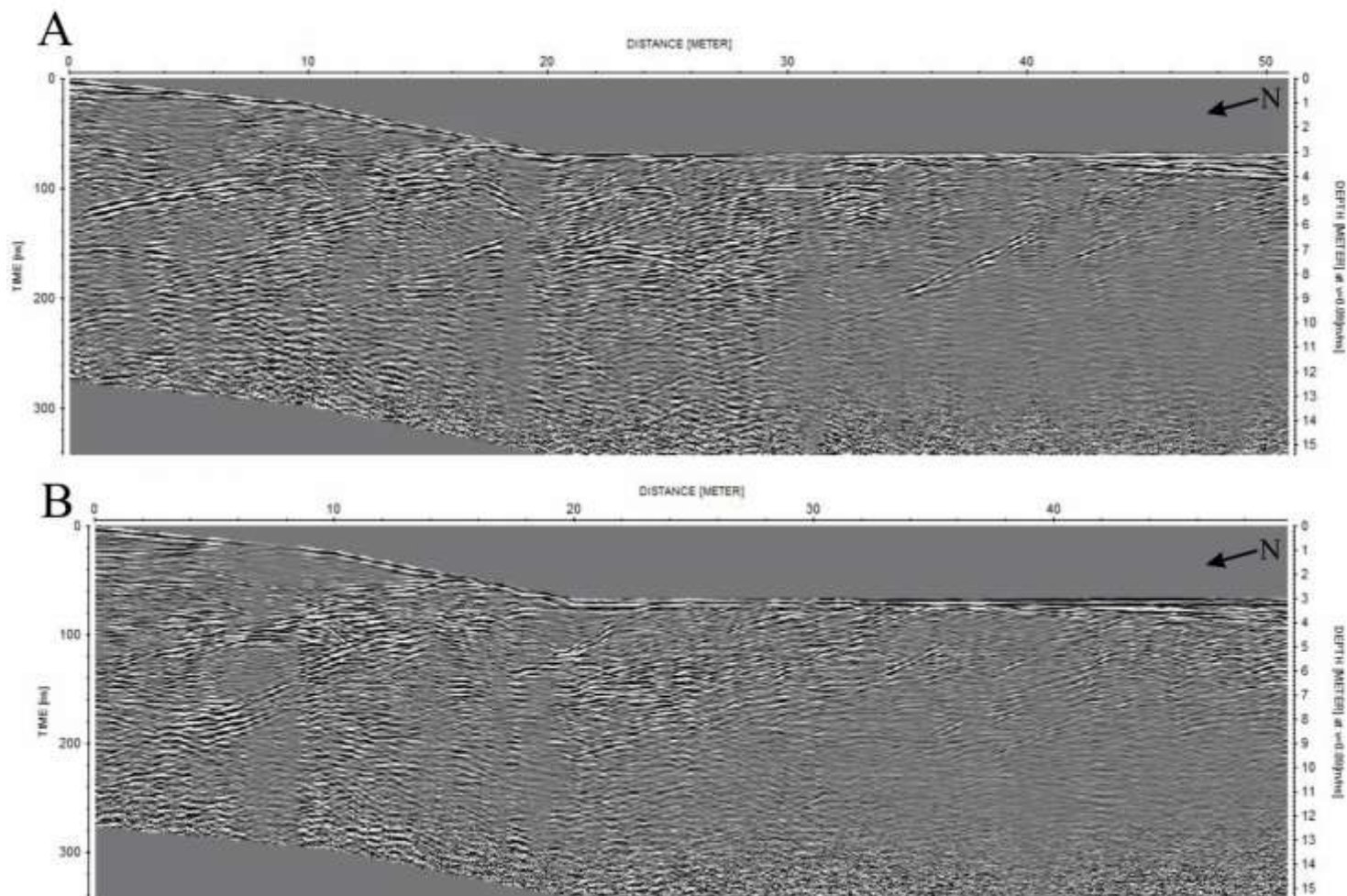


Figura o – Radargramas da secção 1 (*File___299* e *File___300*) da área A de Vilar de Mouros (Caminha, Viana do Castelo), com comprimento máximo de 33,38 m e 28,18 m, respetivamente, e profundidade máxima de 17,90 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 200 MHz.

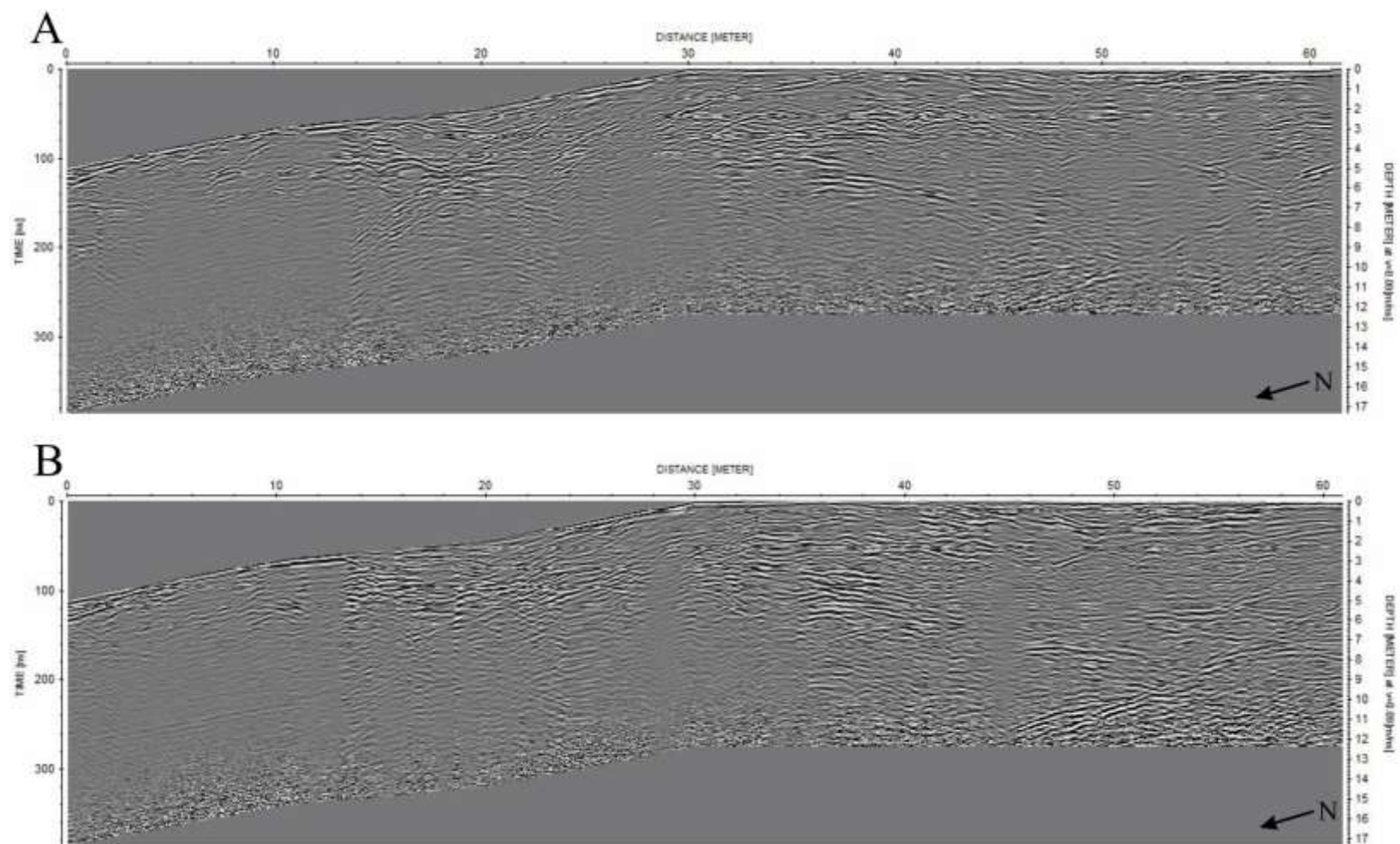


Figura p – Radargramas da secção 2 (*File___301* e *File___302*) da área A de Vilar de Mouros (Caminha, Viana do Castelo), com comprimento máximo de 37,42 m e profundidade máxima de 17,90 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 200 MHz.

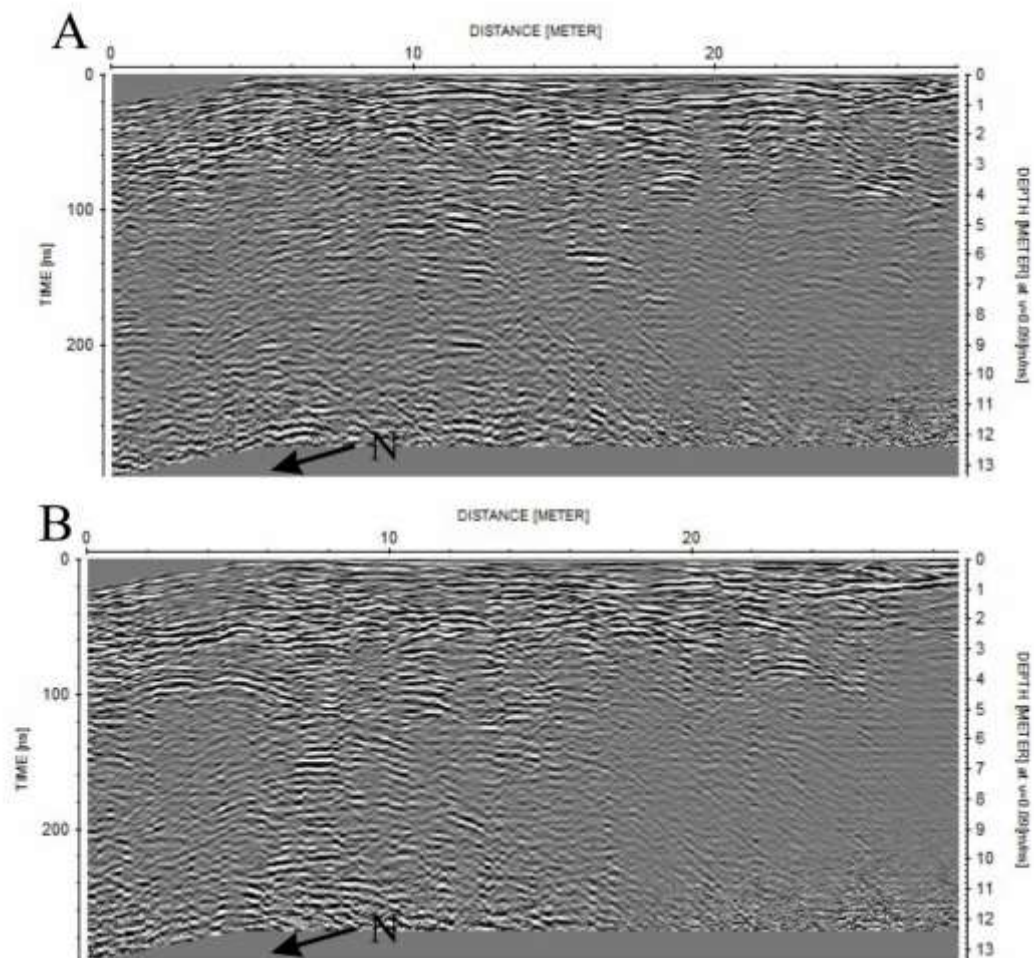


Figura q – Radargramas da secção 3 (*File___303* e *File___304*) da área A de Vilar de Mouros (Caminha, Viana do Castelo), com comprimento máximo de 28,06 m e 28,86 m, respetivamente, e profundidade máxima de 12,30 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 200 MHz.

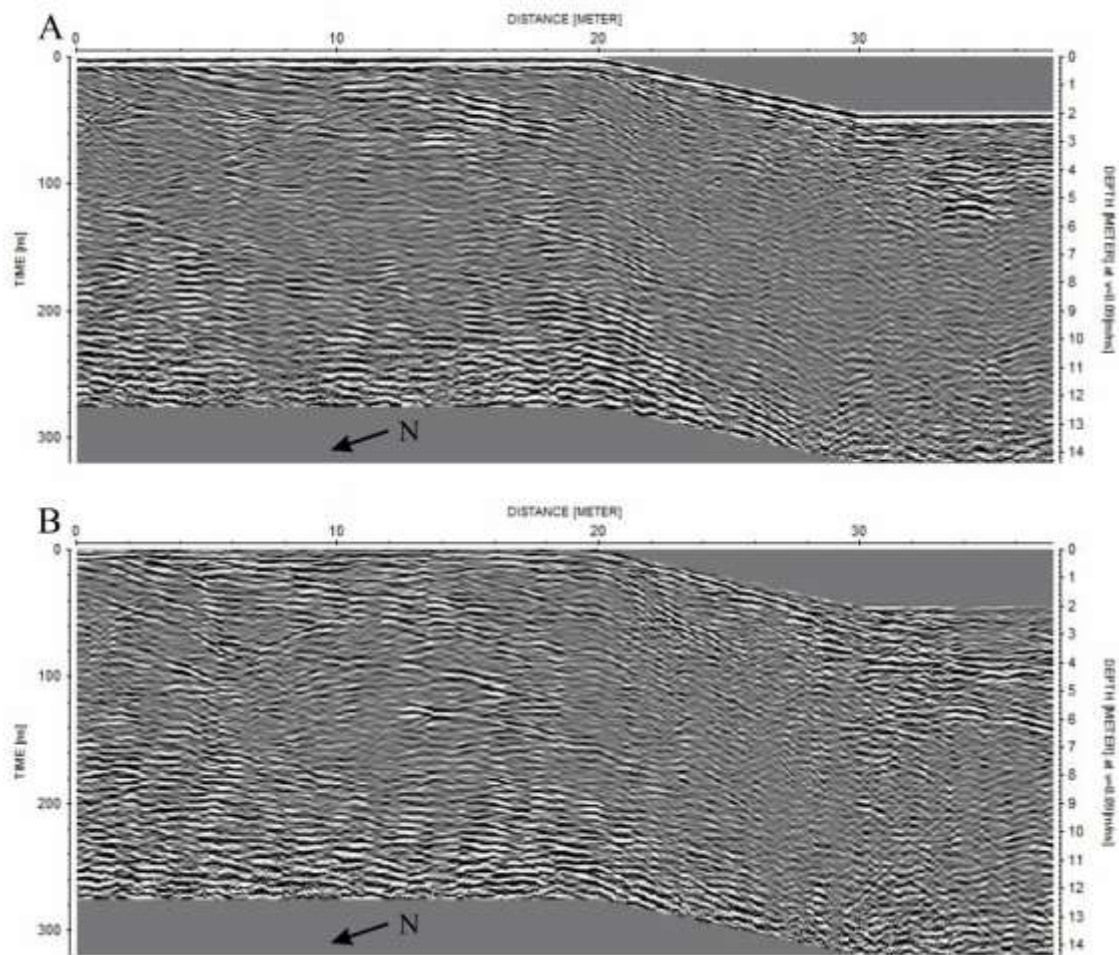


Figura r – Radargramas da secção 4 (*File___305* e *File___306*) da área A de Vilar de Mouros (Caminha, Viana do Castelo), com comprimento máximo de 61,54 m e 60,94 m, respetivamente, e profundidade máxima de 13,75 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 200 MHz.

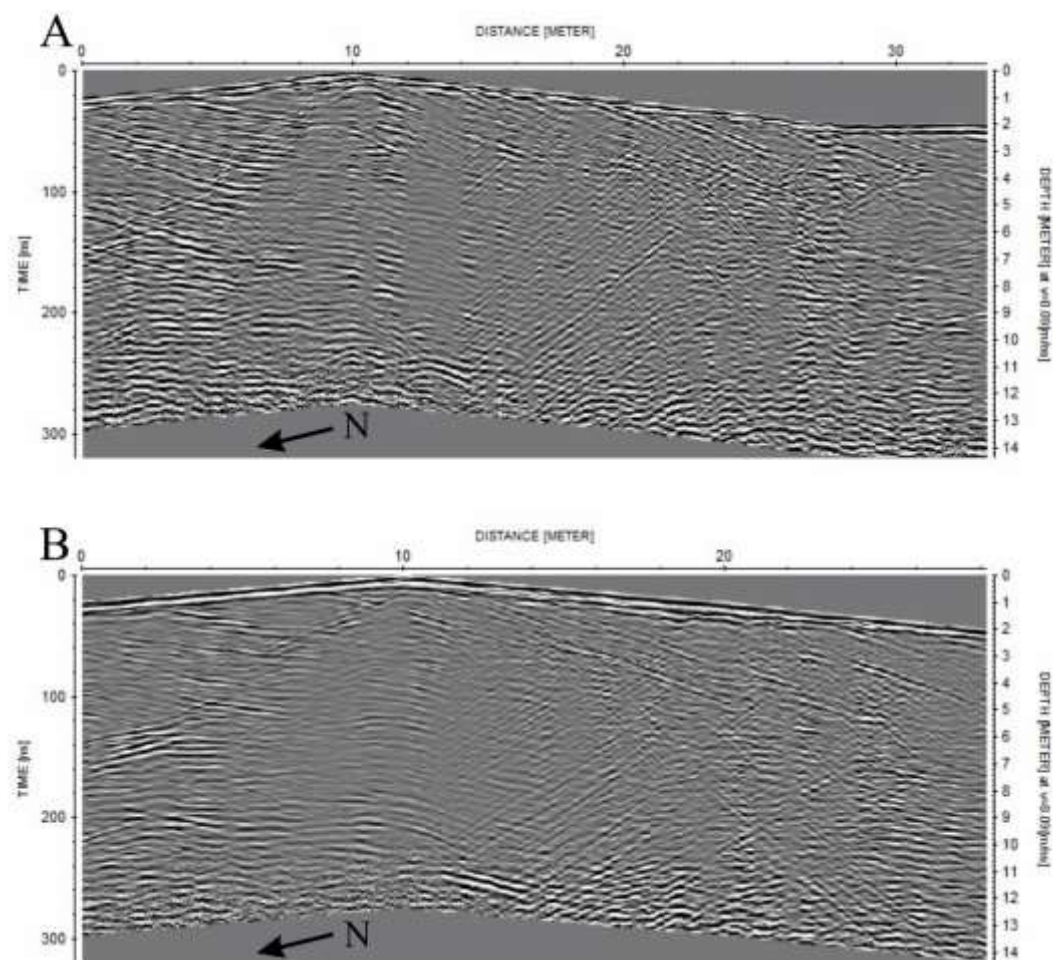


Figura s – Radargramas da secção 5 (*File___307* e *File___308*) da área A de Vilar de Mouros (Caminha, Viana do Castelo), com comprimento máximo de 50,94 m e 49,78 m, respetivamente, e profundidade máxima de 13,75 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” Antena de 200 MHz.

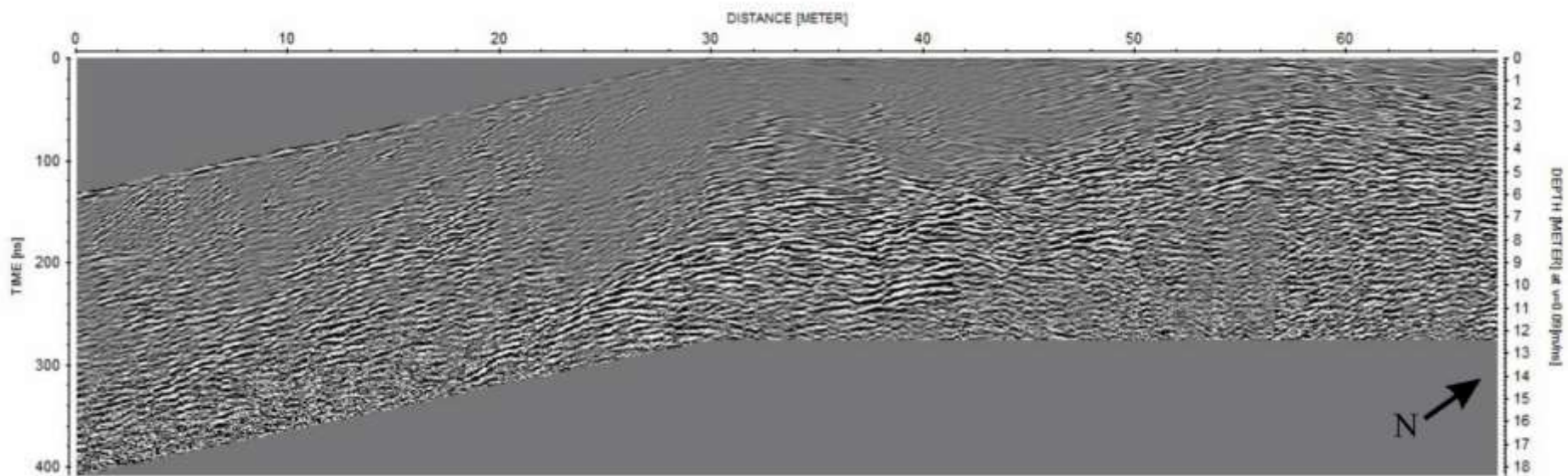


Figura t – Radargrama da única secção (*File___309*) da área B de Vilar de Mouros (Caminha, Viana do Castelo), com comprimento máximo de 67,13 m e profundidade máxima de 17,90 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz.



Figura u – Levantamento fotográfico das secções da área A em Malpartida (Almeida, Guarda) (outubro, 2021).



Figura v – Levantamento fotográfico das secções da área C em Malpartida (Almeida, Guarda), principalmente do bloco solto de como ele se encontrava em relação aos hasteais da área C1 e C3 (outubro, 2021).

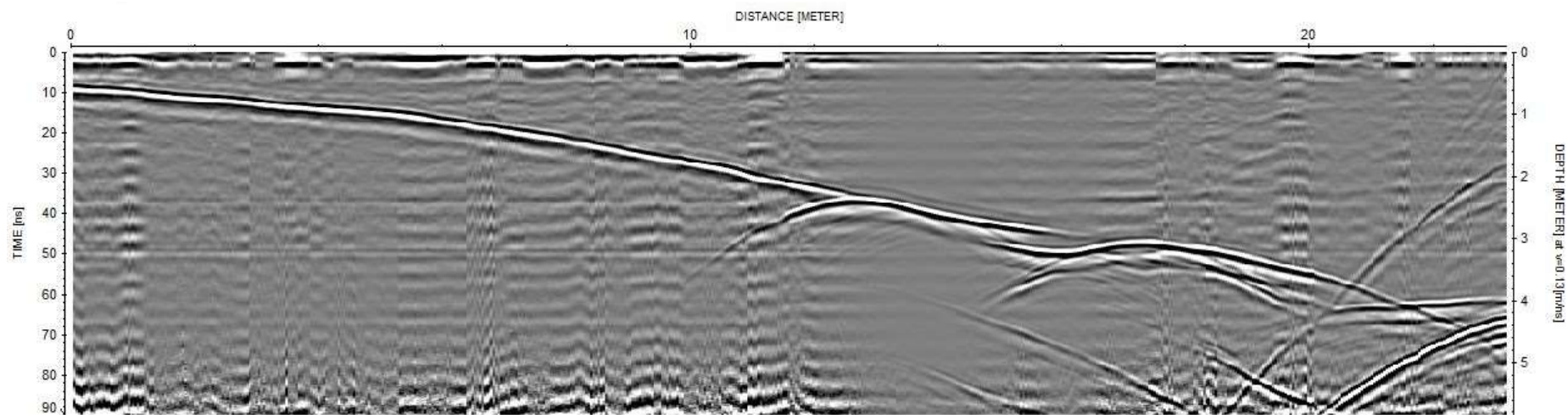


Figura w – Radargrama da secção A1 (*File___411*) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção S-N, com comprimento máximo de 12,22 m e profundidade máxima de 5,40 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

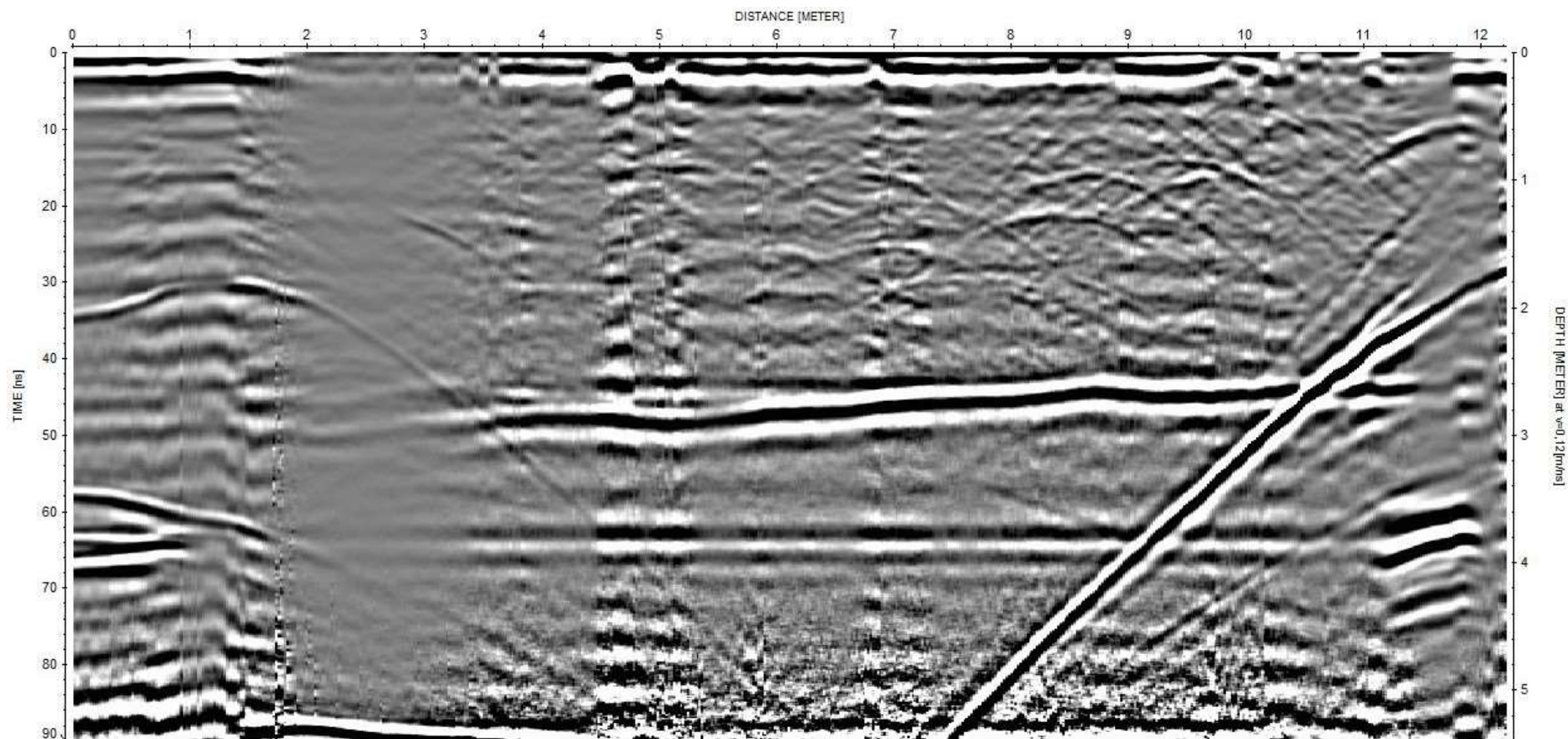


Figura x – Radargrama da secção A1 (*File_412*) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção E-W, com comprimento máximo de 20,30 m e profundidade máxima de 6,30 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

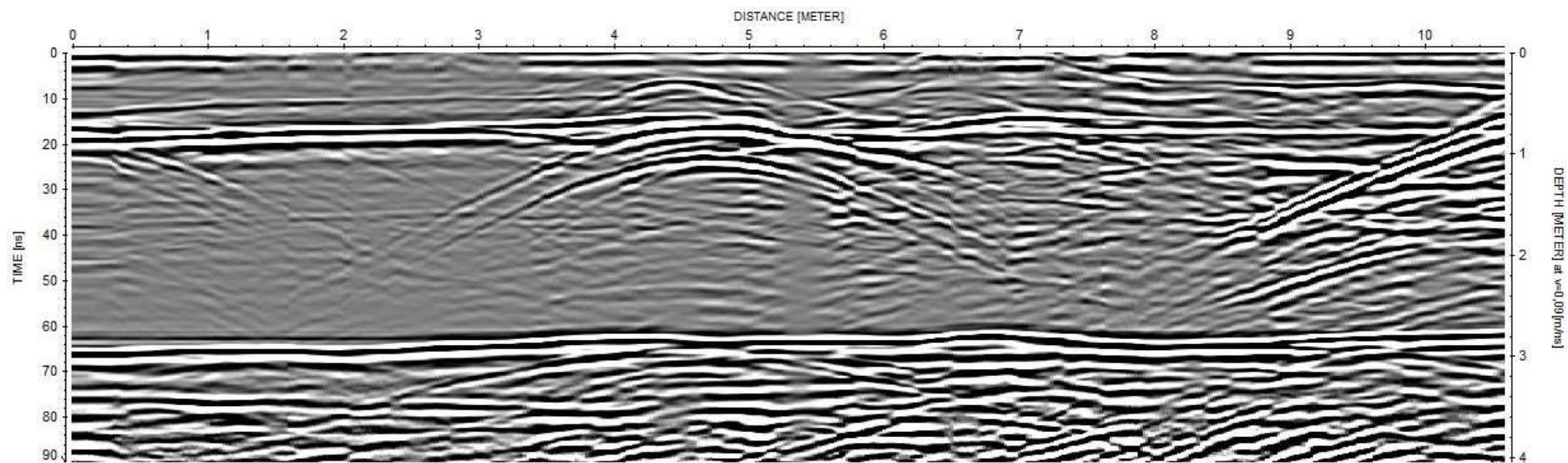


Figura y – Radargrama da secção A2 (*File___403*) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção N-S, com comprimento máximo de 10,60 m e profundidade máxima de 4,05 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

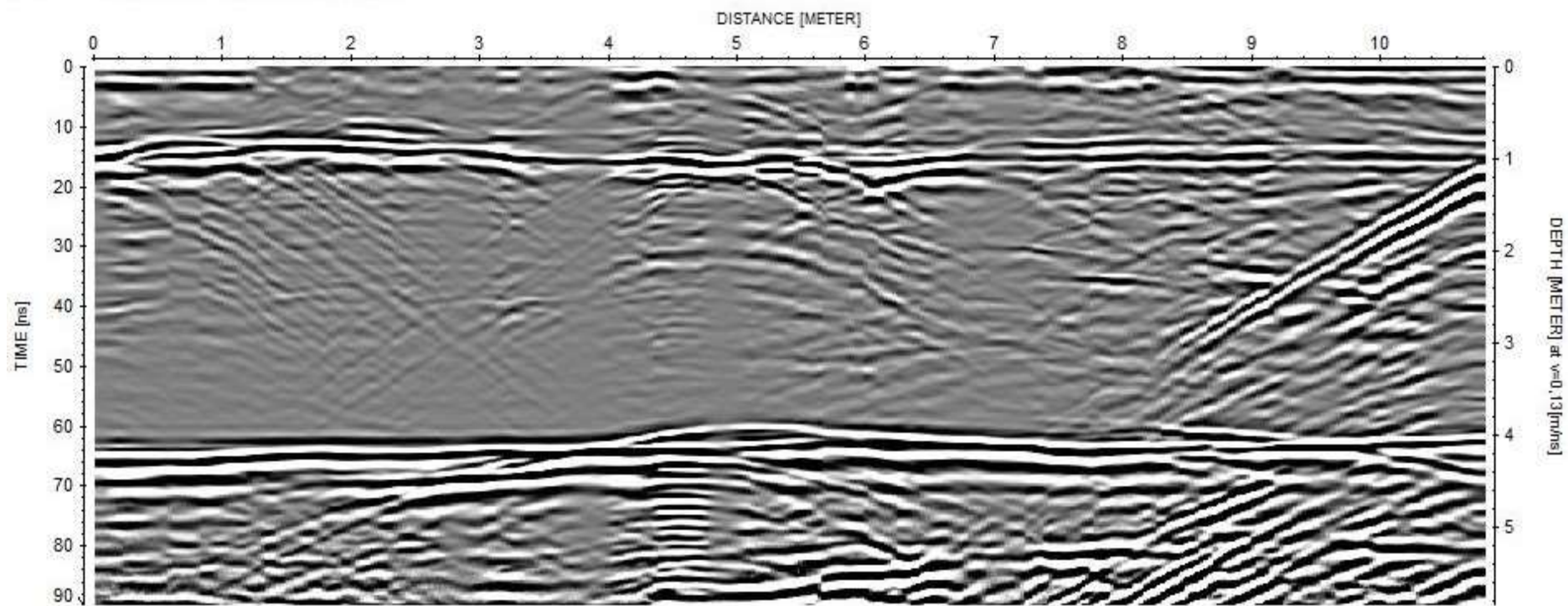


Figura z – Radargrama da secção A2 (File___404) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção N-S, com comprimento máximo de 10,80 m e profundidade máxima de 5,80 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz.

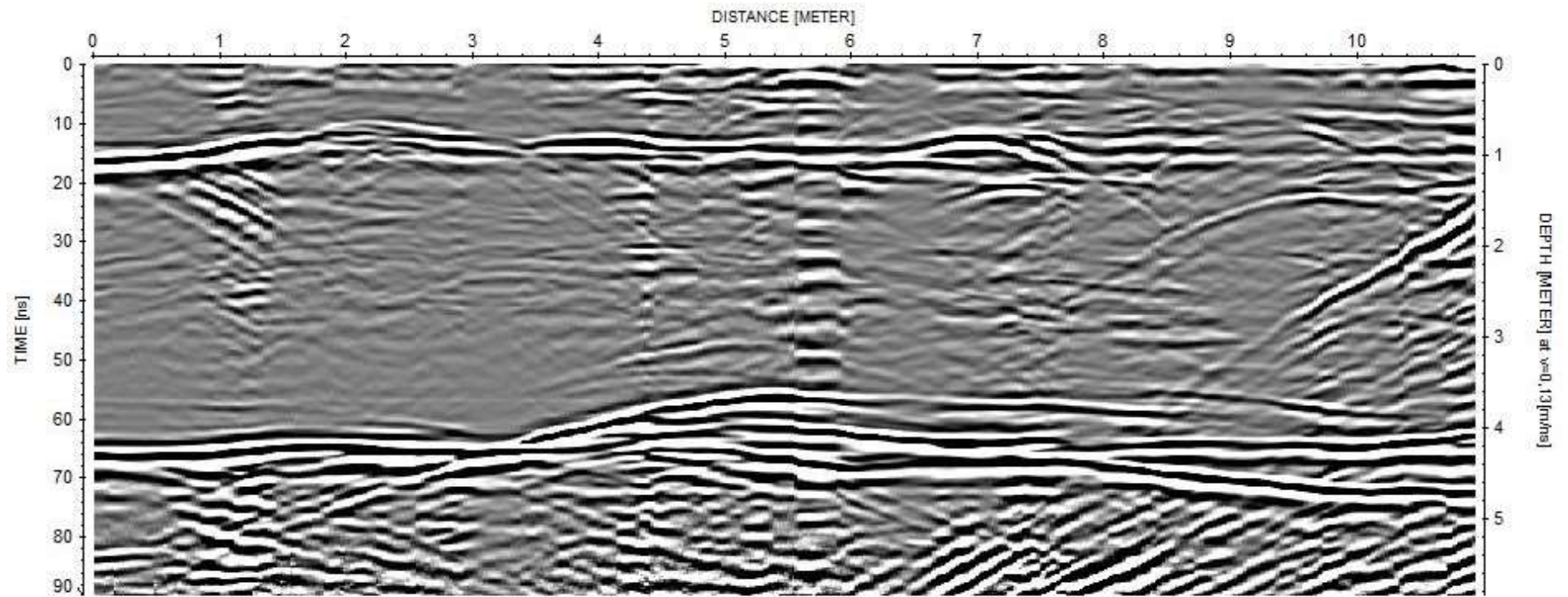


Figura aa – Radargrama da secção A2 (*File__405*) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção N-S, com comprimento máximo de 10,90 m e profundidade máxima de 5,80 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

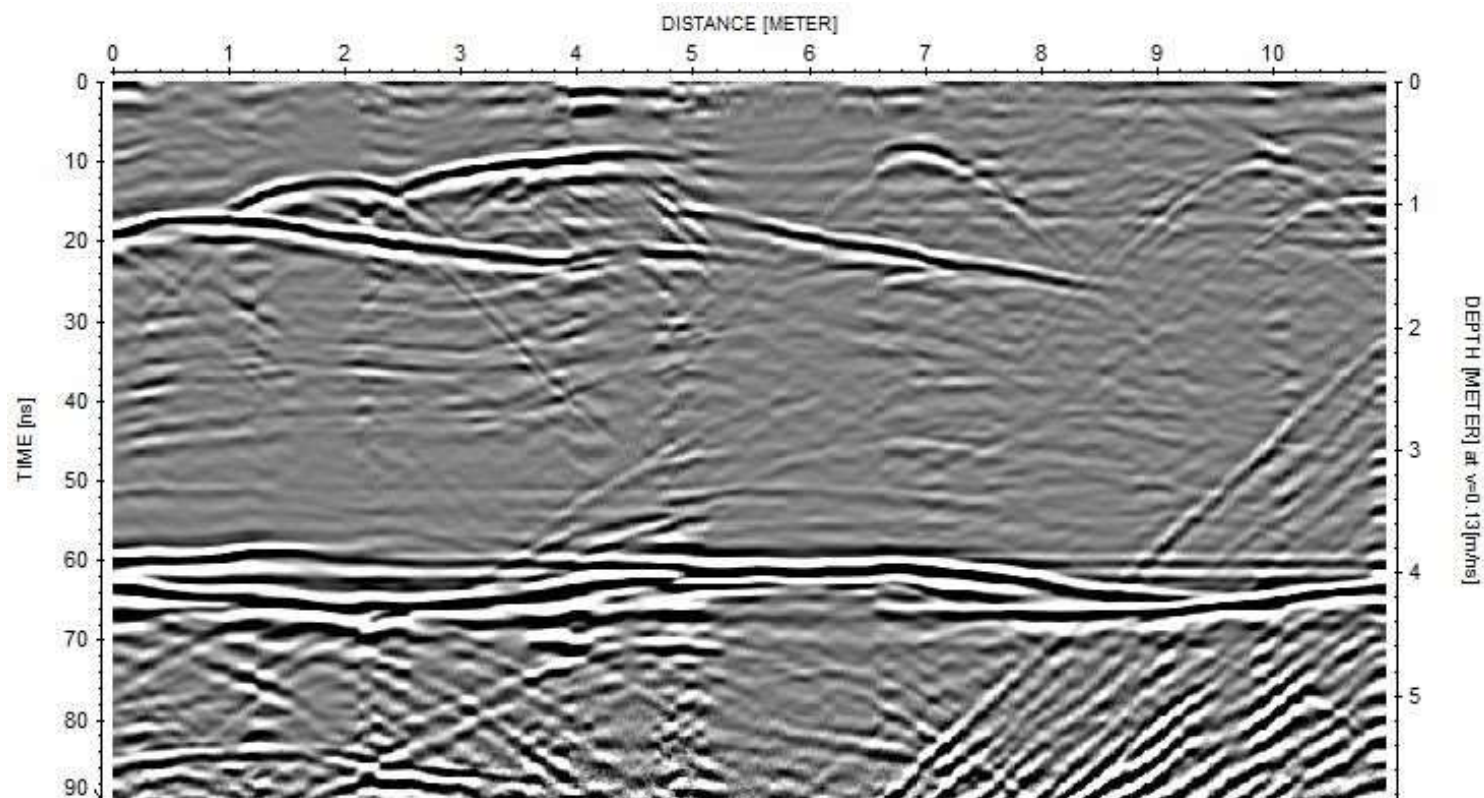


Figura bb – Radargrama da secção A2 (*File_406*) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direcção N-S, com comprimento máximo de 11,00 m e profundidade máxima de 5,82 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz.

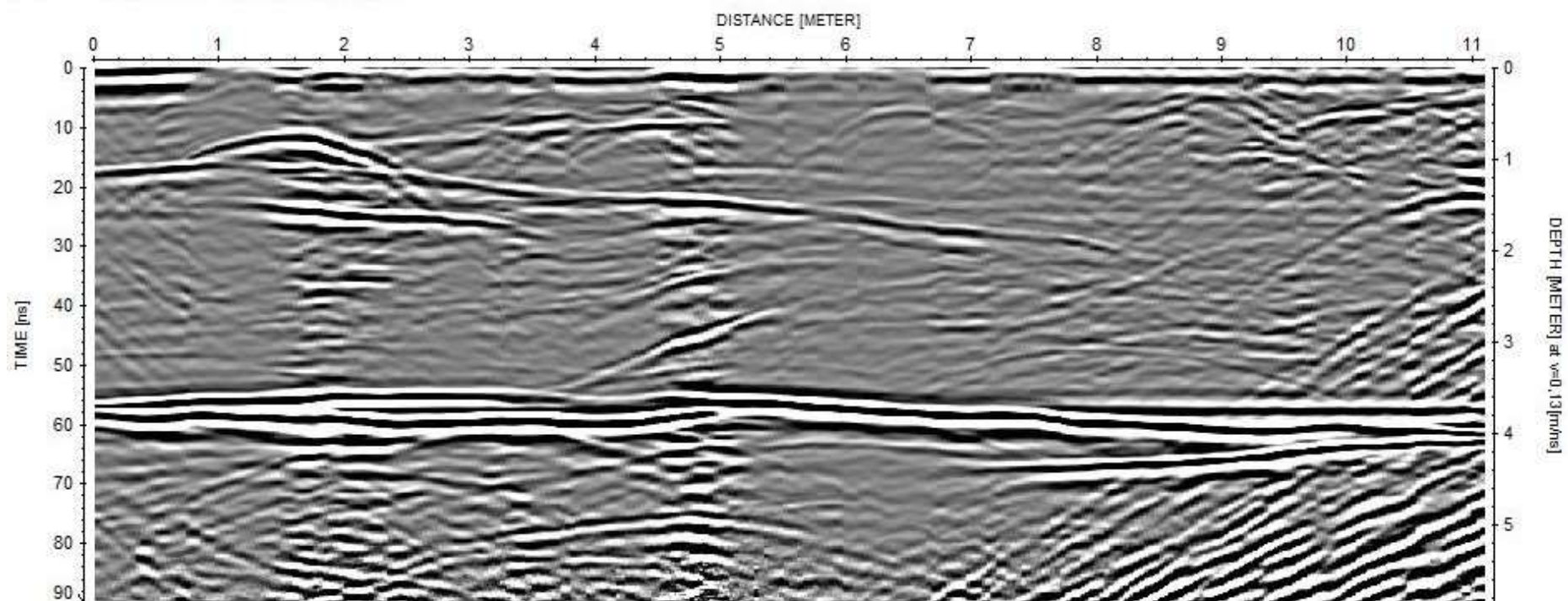


Figura cc – Radargrama da secção A2 (*File__407*) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção N-S, com comprimento máximo de 11,00 m e profundidade máxima de 5,82 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

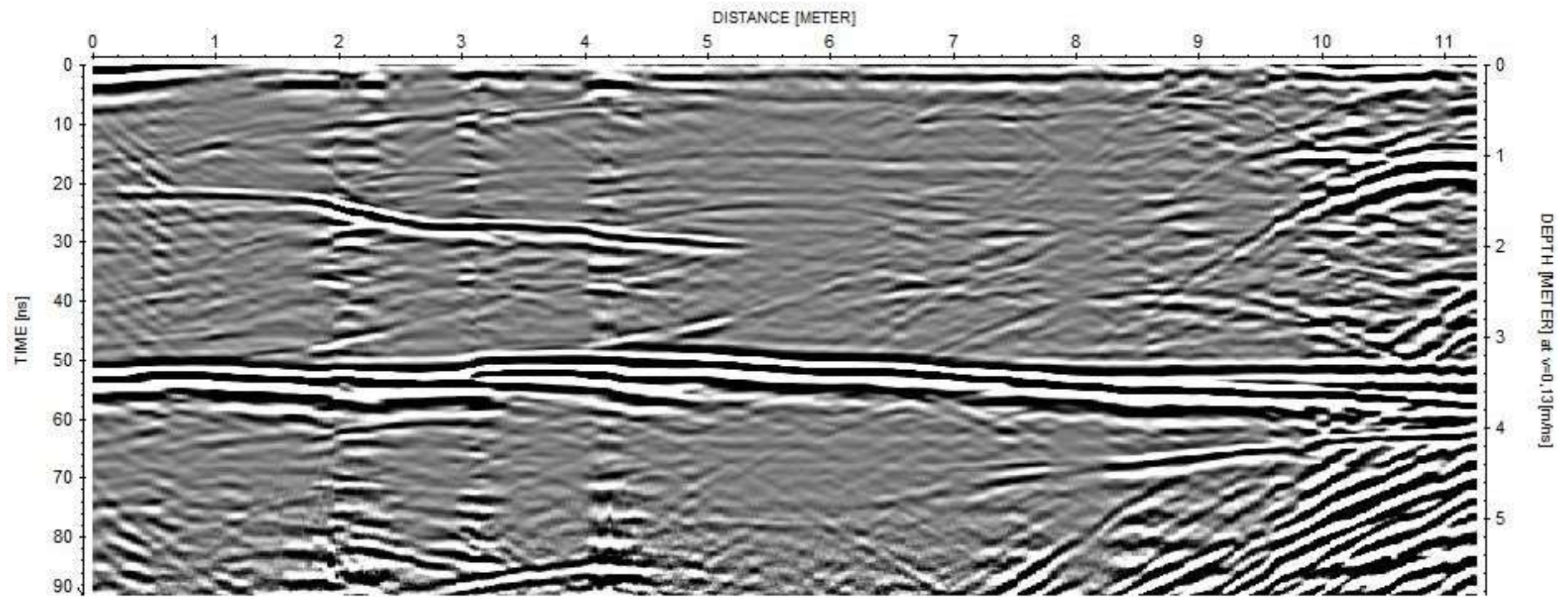


Figura dd – Radargrama da secção A2 (*File___408*) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção N-S, com comprimento máximo de 11,26 m e profundidade máxima de 5,82 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz.

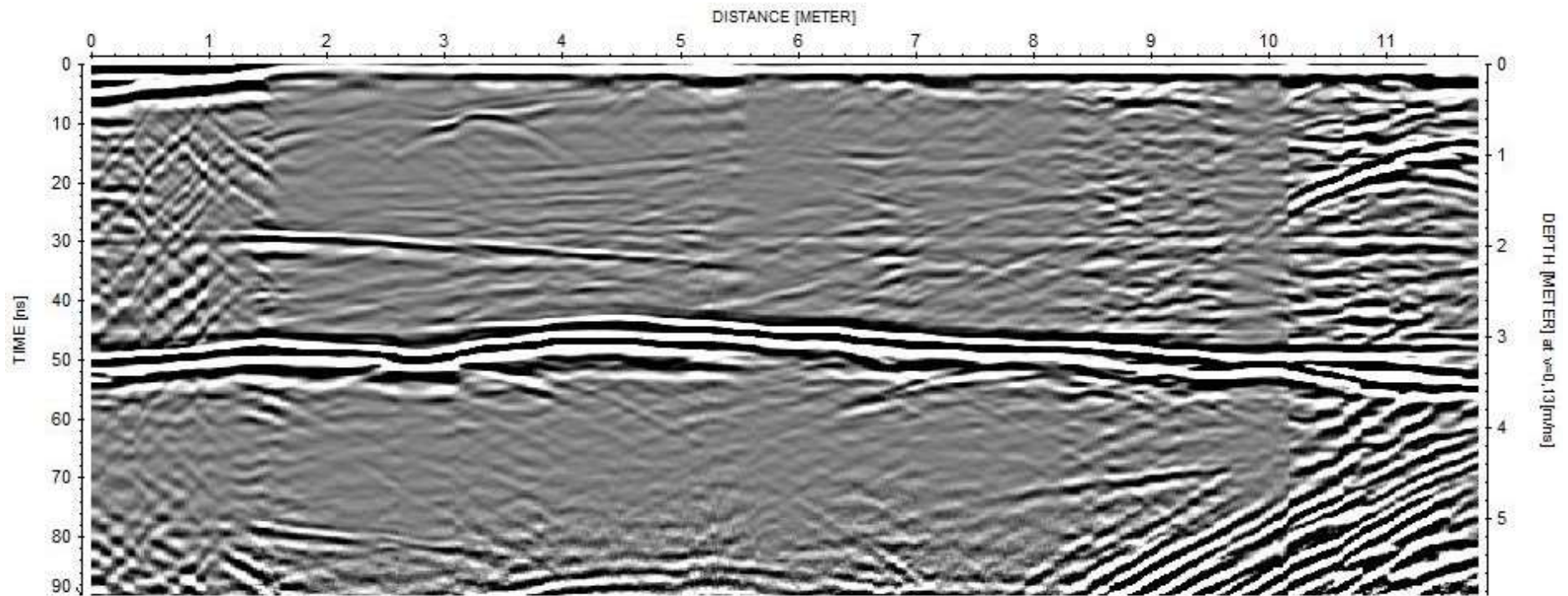


Figura ee - Radargrama da secção A2 (*File__409*) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção N-S, com comprimento máximo de 11,76 m e profundidade máxima de 5,80 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o "*fk migration*" e "*XFlipProfile*". Antena de 400 MHz.

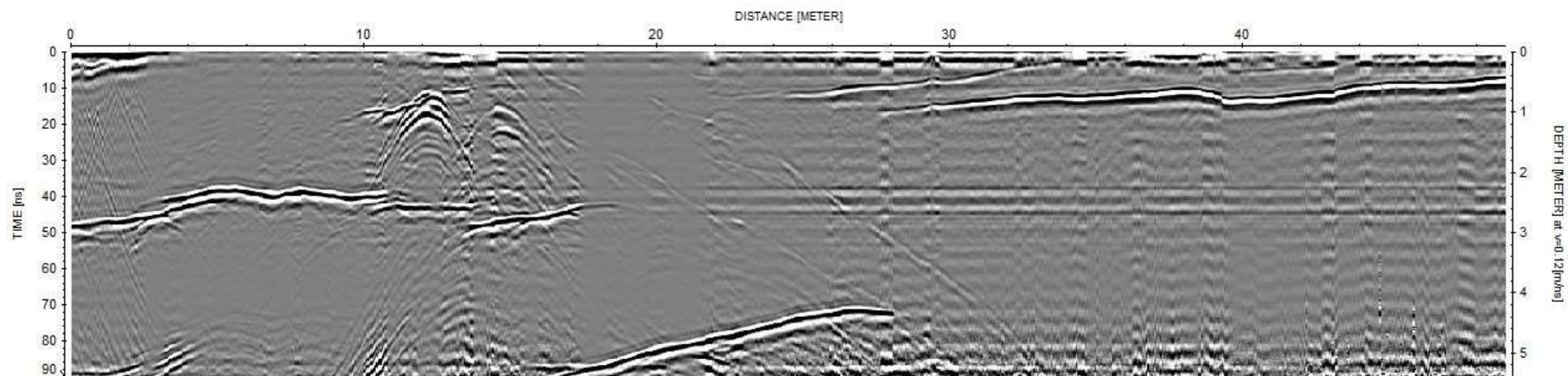


Figura ff - Radargrama da secção A3 (*File_410*) da área A de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção N-S, com comprimento máximo de 48,95 m e profundidade máxima de 5,80 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o "*fk migration*" e "*XFlipProfile*". Antena de 400 MHz.

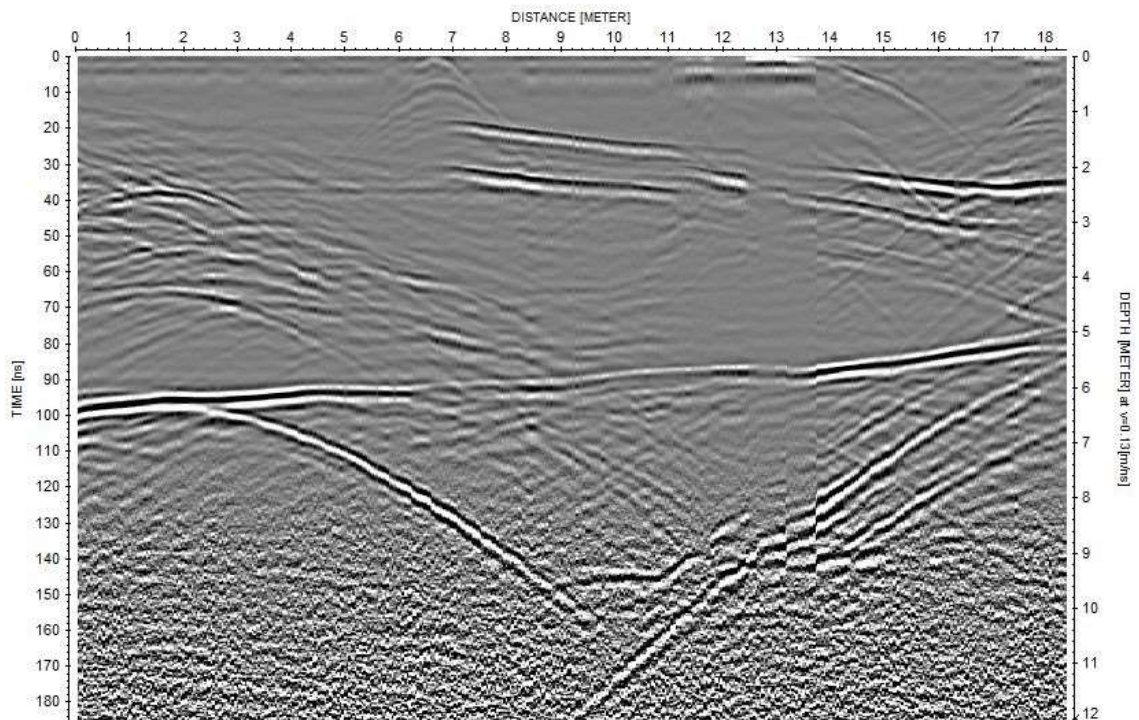


Figura gg – Radargrama da secção C1 (*File___414*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção S-N, com comprimento máximo de 18,39 m e profundidade máxima de 12,91 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 200 MHz.

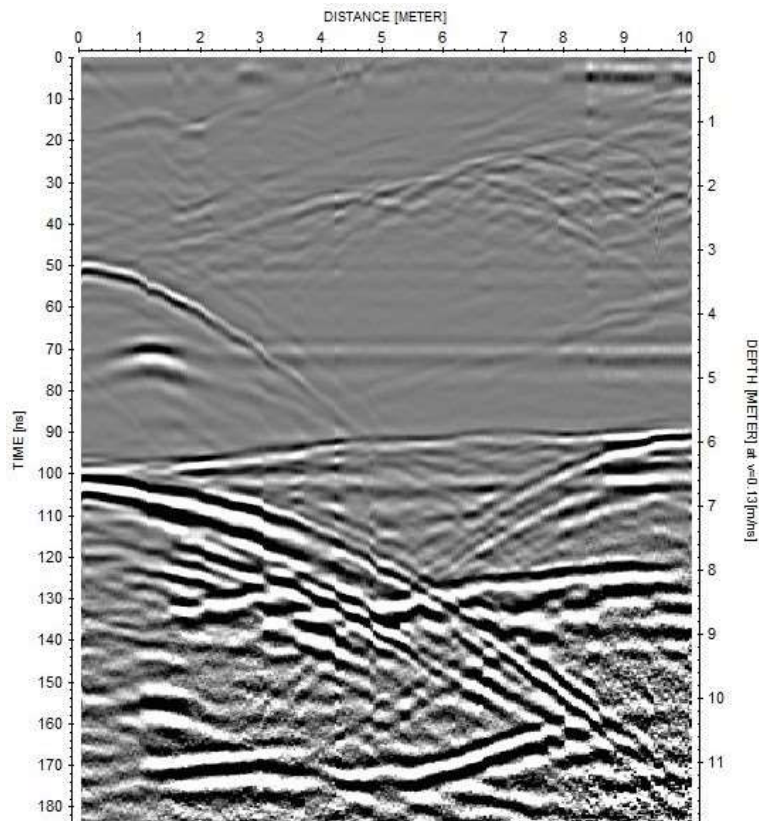


Figura hh – Radargrama da secção C2 (*File___416*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção W-E, com comprimento máximo de 10,10 m e profundidade máxima de 12,84 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 200 MHz.

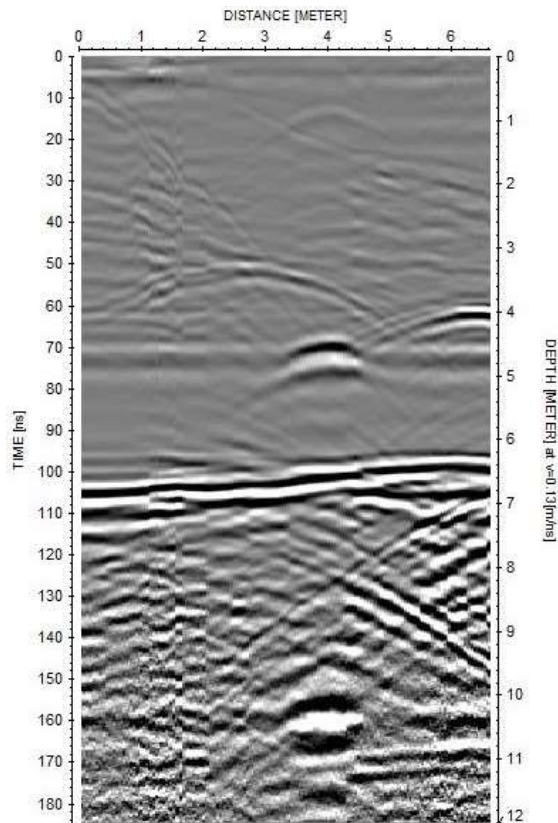


Figura ii – Radargrama da secção C2 (File 415) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção S-N, com comprimento máximo de 6,62 m e profundidade máxima de 12,38 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 200 MHz.

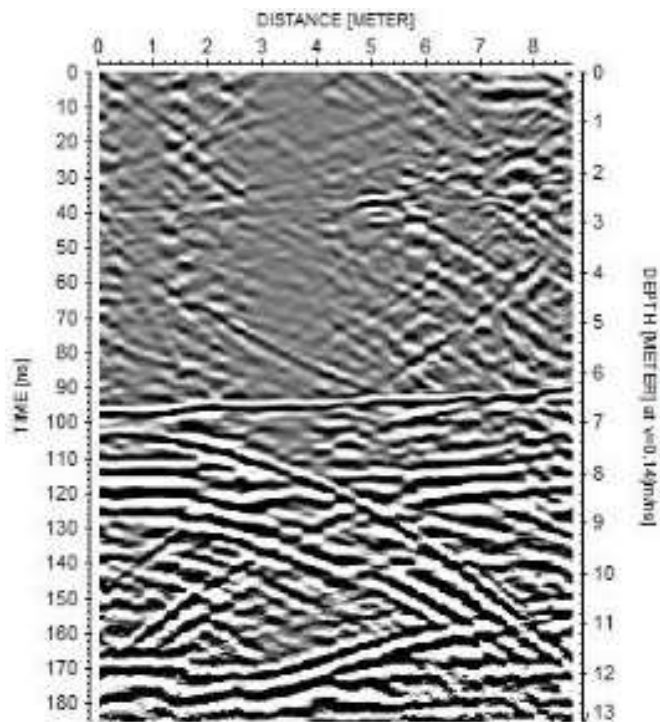


Figura jj – Radargrama da secção C2 (File 415) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção W-E, com comprimento máximo de 8,70 m e profundidade máxima de 12,91 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 200 MHz.

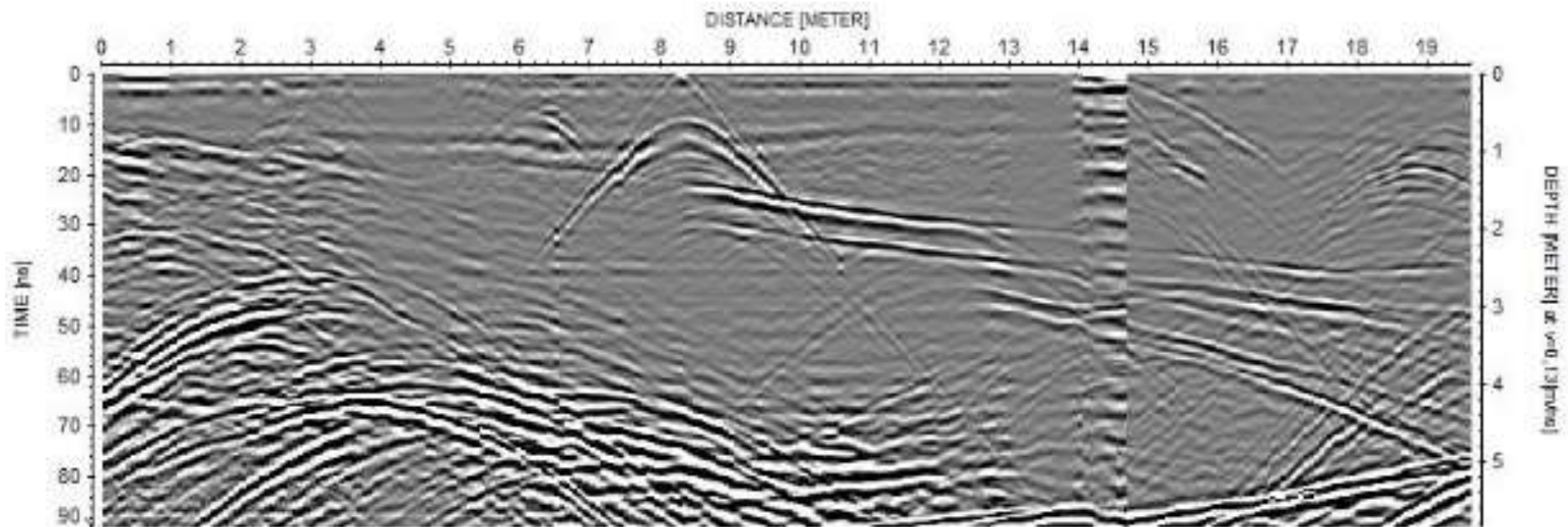


Figura kk – Radargrama da secção C1 (*File__387*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção S-N, com comprimento máximo de 19,60 m e profundidade máxima de 5,83 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

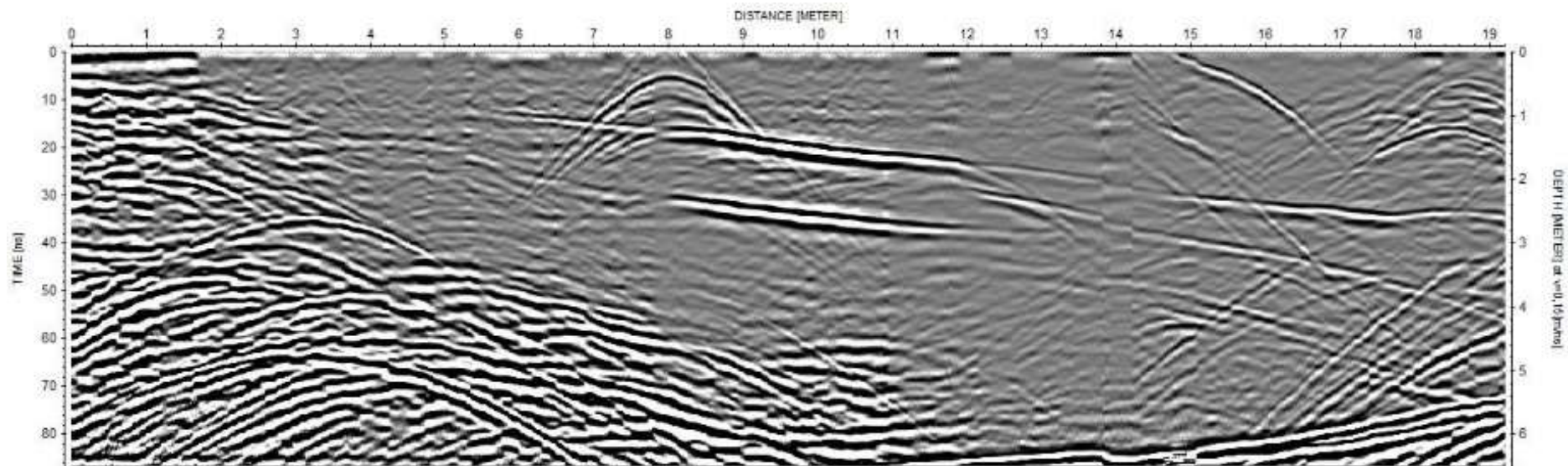


Figura II – Radargrama da secção C1 (*File_388*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção S-N, com comprimento máximo de 19,20 m e profundidade máxima de 6,47 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

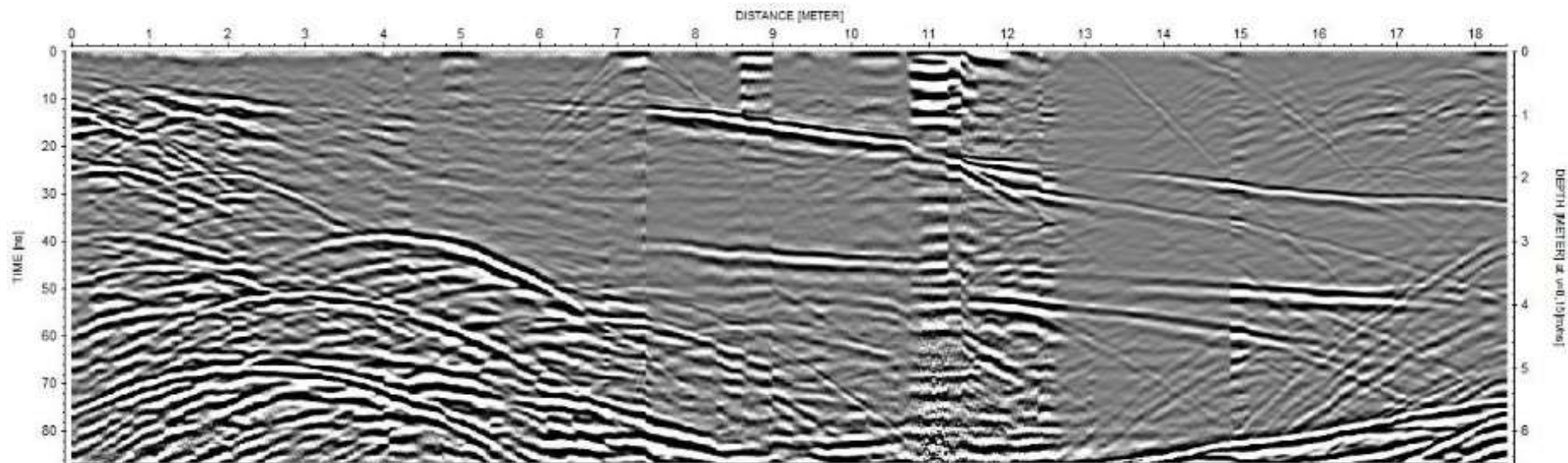


Figura mm – Radargrama da secção C1 (*File___389*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção S-N, com comprimento máximo de 18,43 m e profundidade máxima de 6,50 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

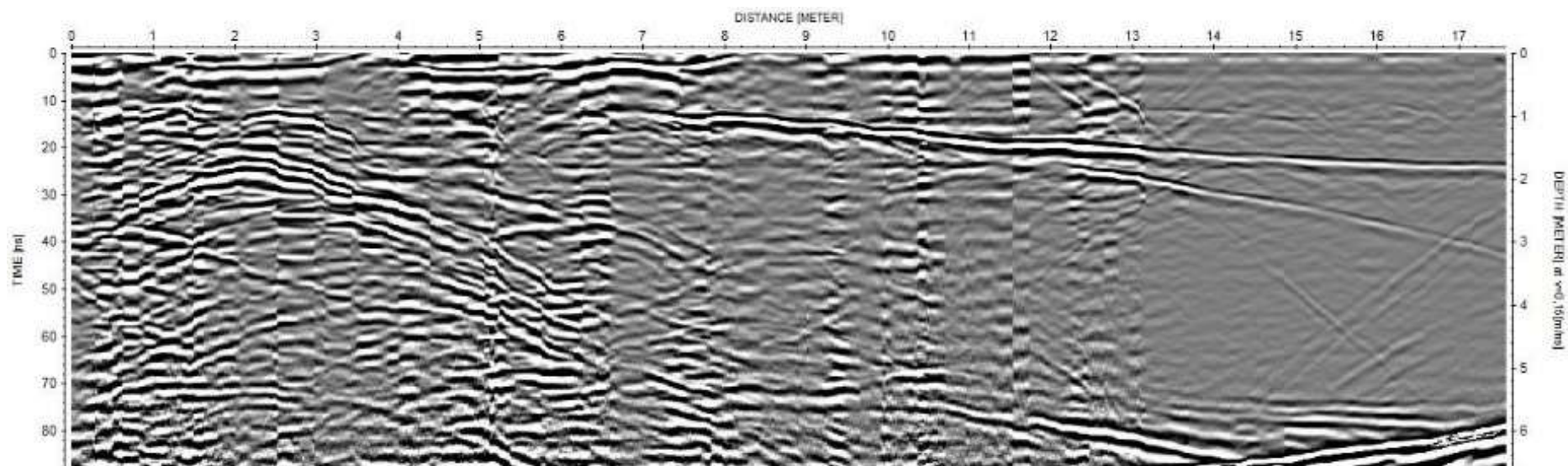


Figura nn – Radargrama da secção C1 (File___390) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção S-N, com comprimento máximo de 17,60 m e profundidade máxima de 6,60 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “fk migration” e “XFlipProfile”. Antena de 400 MHz.

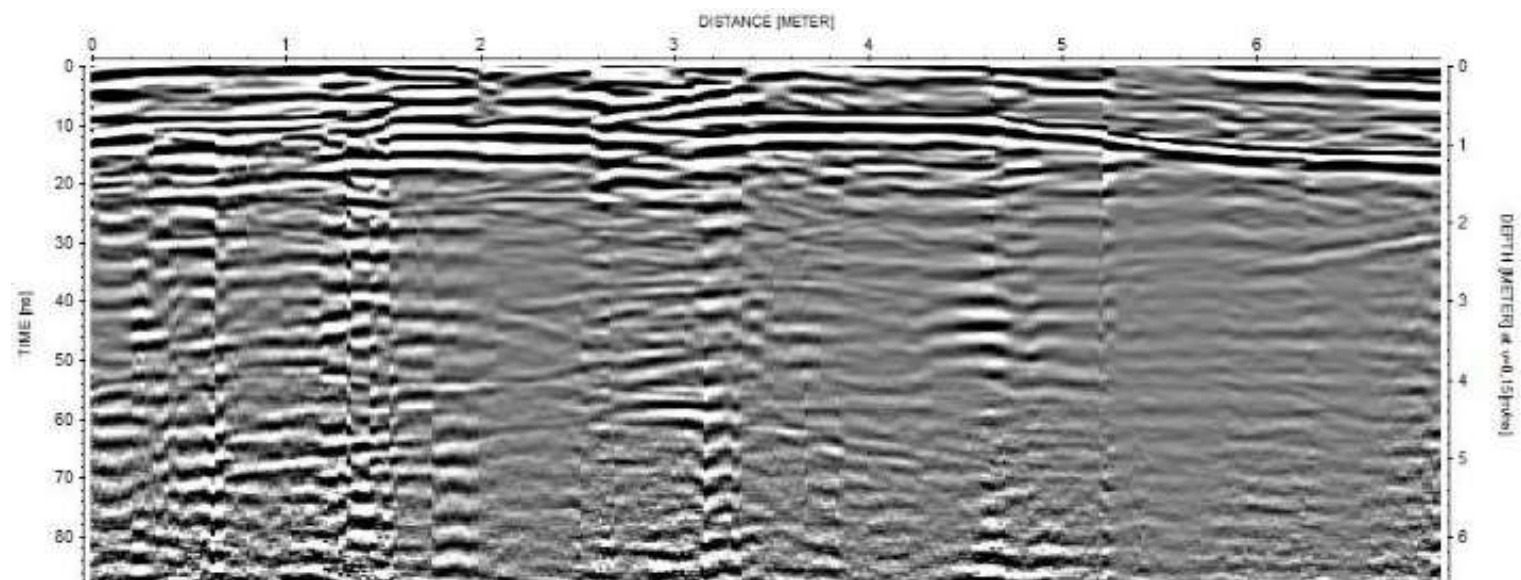


Figura oo – Radargrama da secção C1 (*File__391*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção S-N, com comprimento máximo de 7,00 m e profundidade máxima de 6,60 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

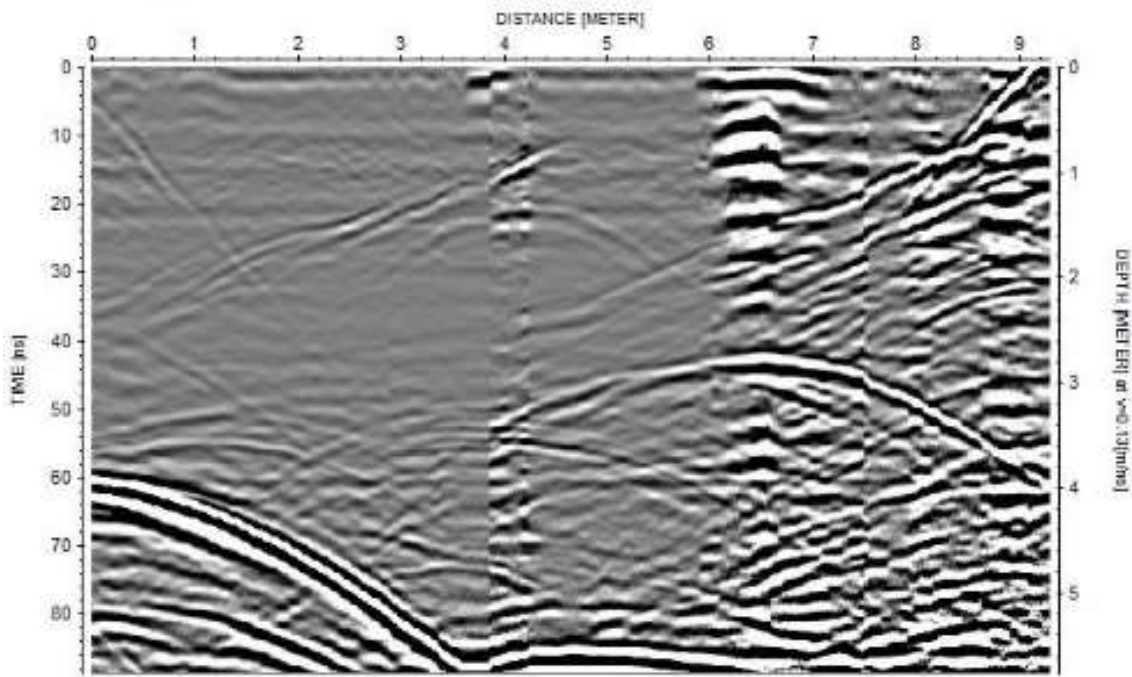


Figura pp – Radargrama da secção C2 (*File*___367) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção W-E, com comprimento máximo de 9,06 m e profundidade máxima de 5,77 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

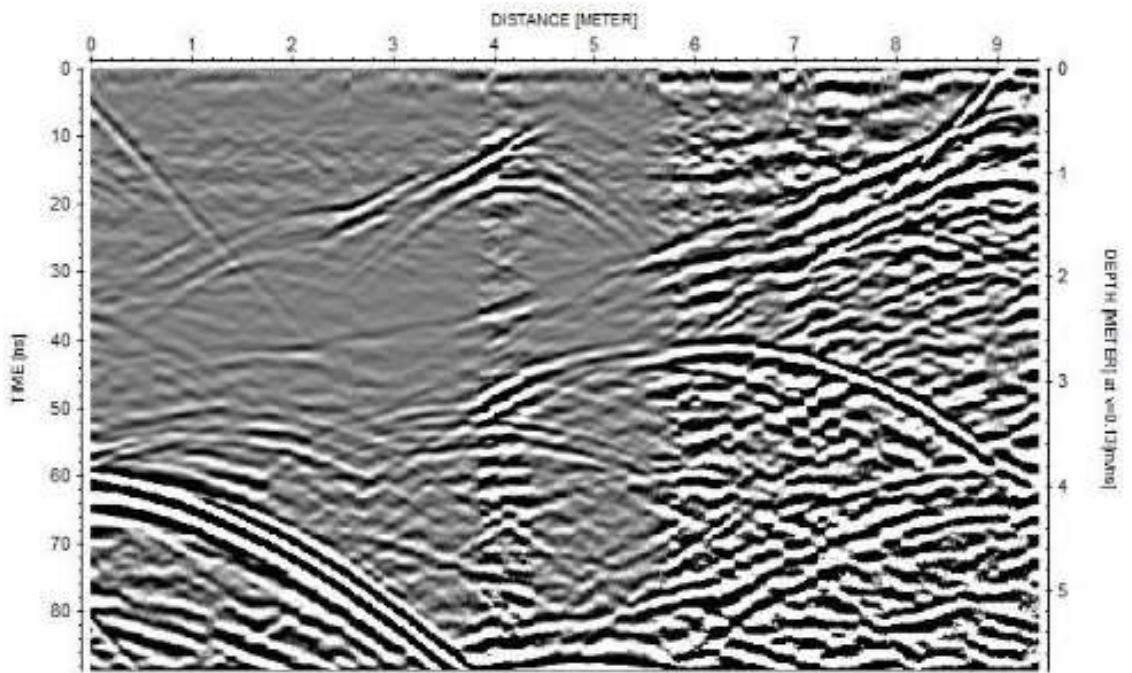


Figura qq – Radargrama da secção C2 (*File*___368) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção W-E, com comprimento máximo de 9,43 m e profundidade máxima de 5,77 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz.

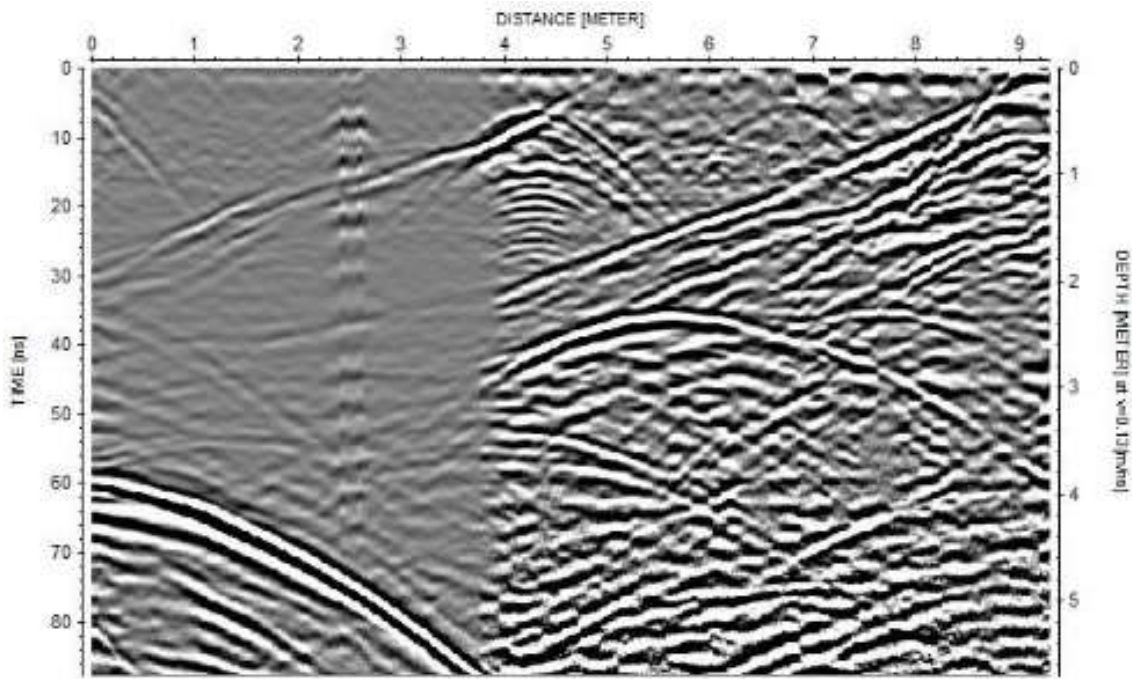


Figura rr – Radargrama da secção C2 (File___369) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção W-E, com comprimento máximo de 9,30 m e profundidade máxima de 5,70 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

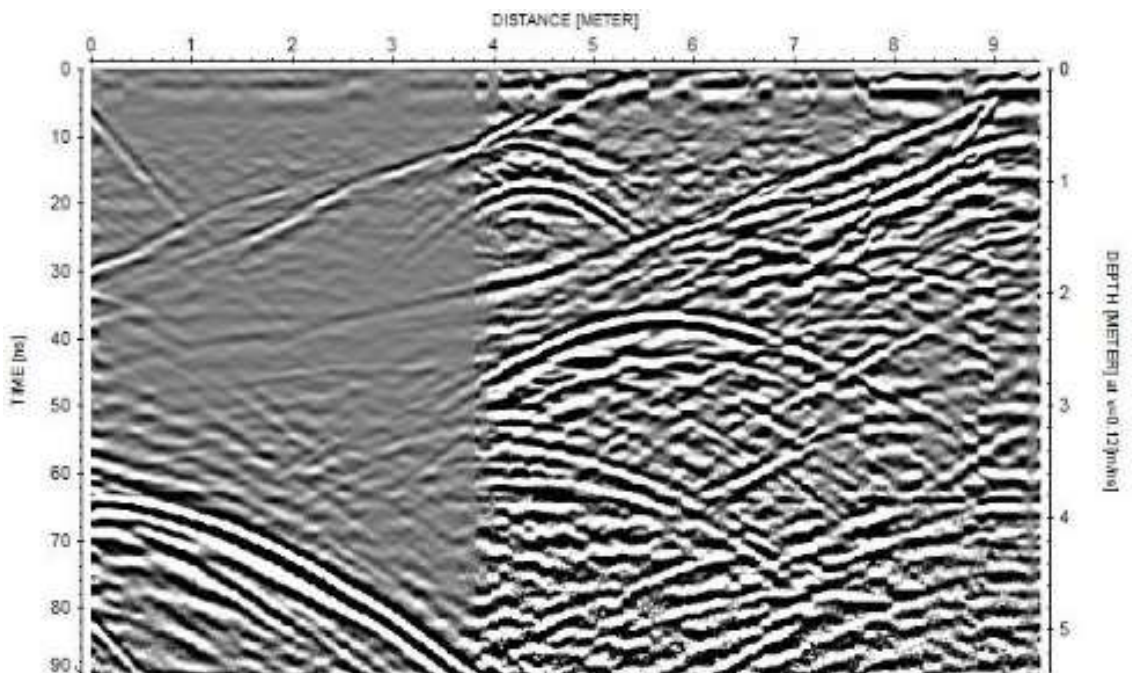


Figura ss – Radargrama da secção C2 (File___370) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção W-E, com comprimento máximo de 9,50 m e profundidade máxima de 5,37 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz.

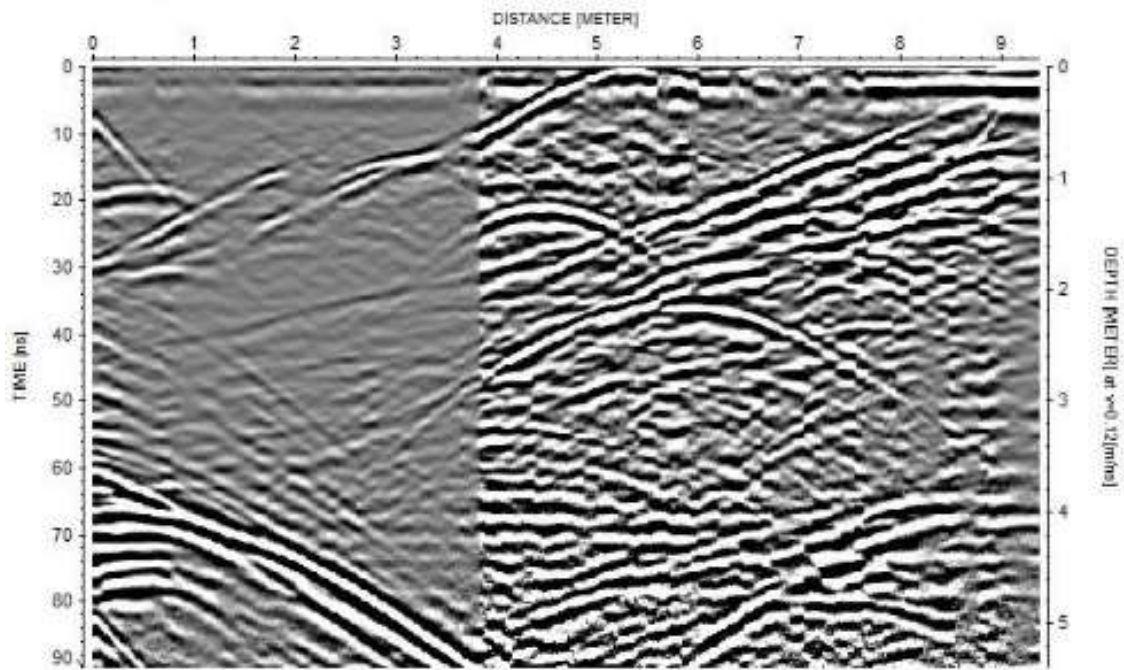


Figura tt – Radargrama da secção C2 (*File*___371) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção W-E, com comprimento máximo de 9,40 m e profundidade máxima de 5,40 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

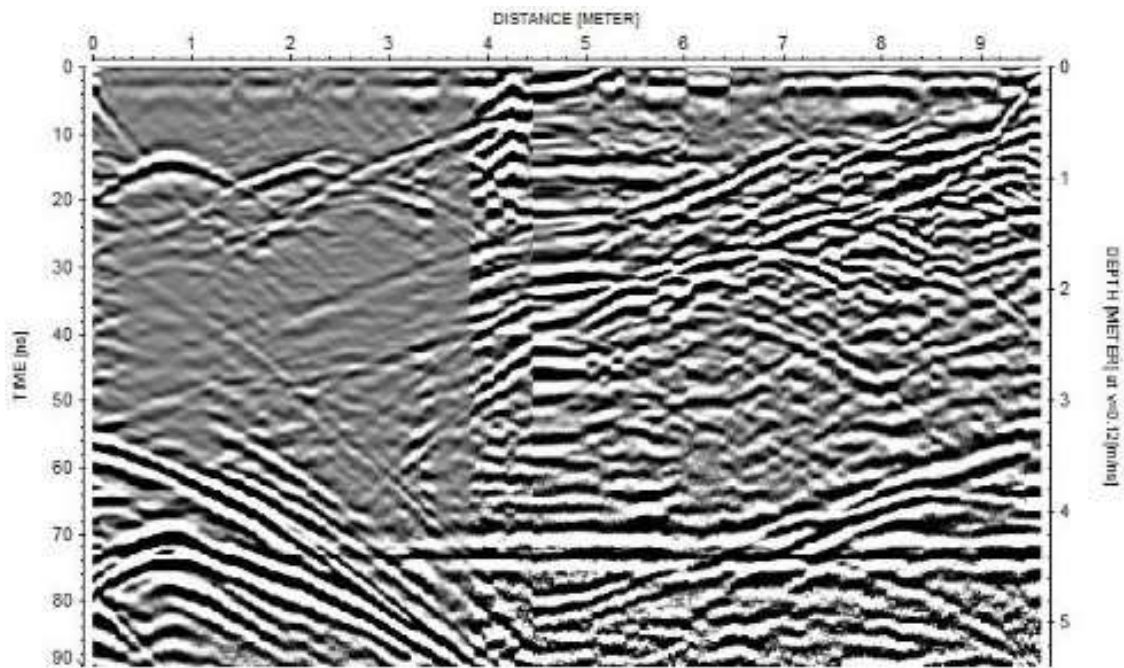


Figura uu – Radargrama da secção C2 (*File*___372) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção W-E, com comprimento máximo de 9,62 m e profundidade máxima de 5,40 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz.

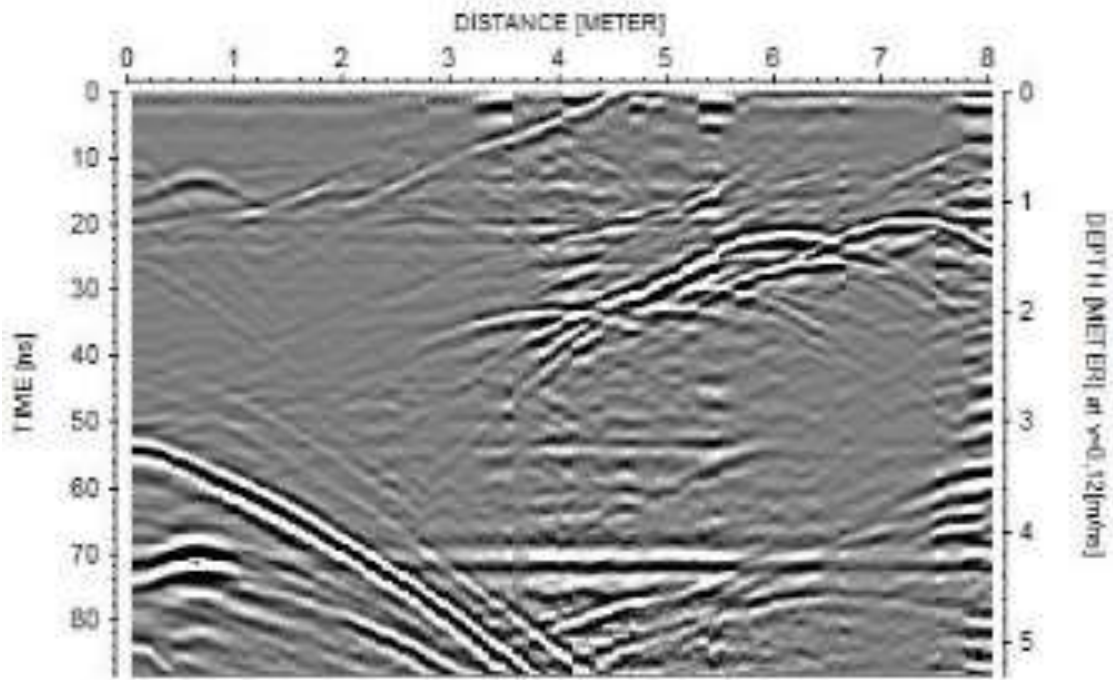


Figura vv – Radargrama da secção C2 (*File*___373) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção W-E, com comprimento máximo de 8,02 m e profundidade máxima de 5,35 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

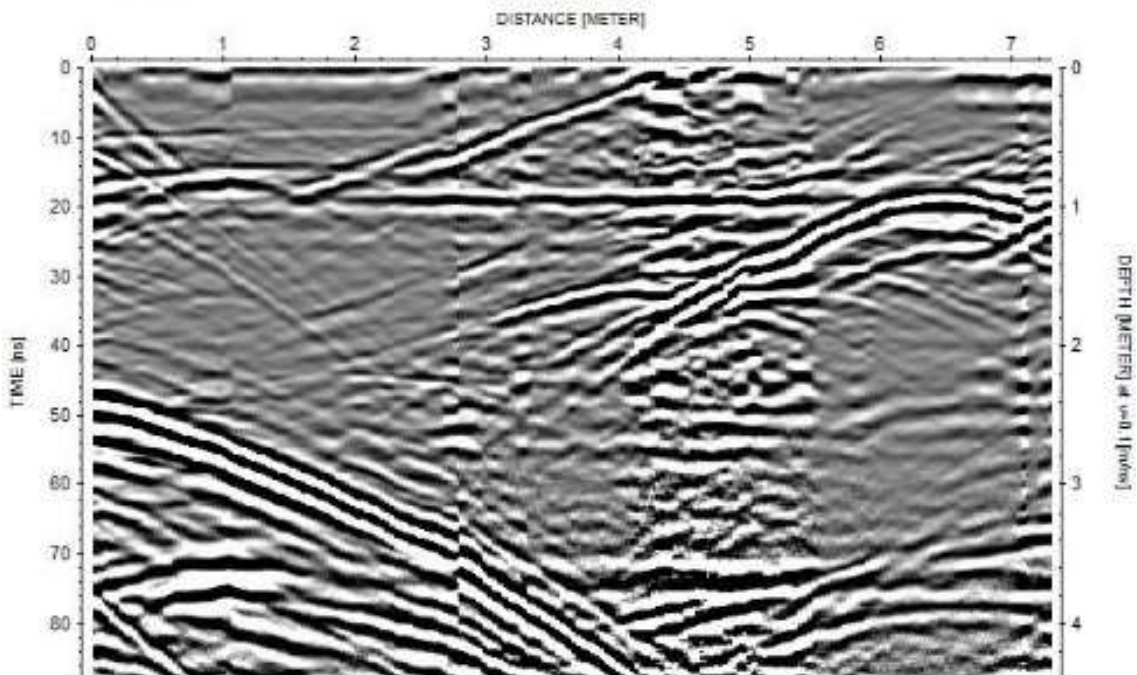


Figura ww – Radargrama da secção C2 (*File*___374) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção W-E, com comprimento máximo de 7,31 m e profundidade máxima de 4,32 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz.

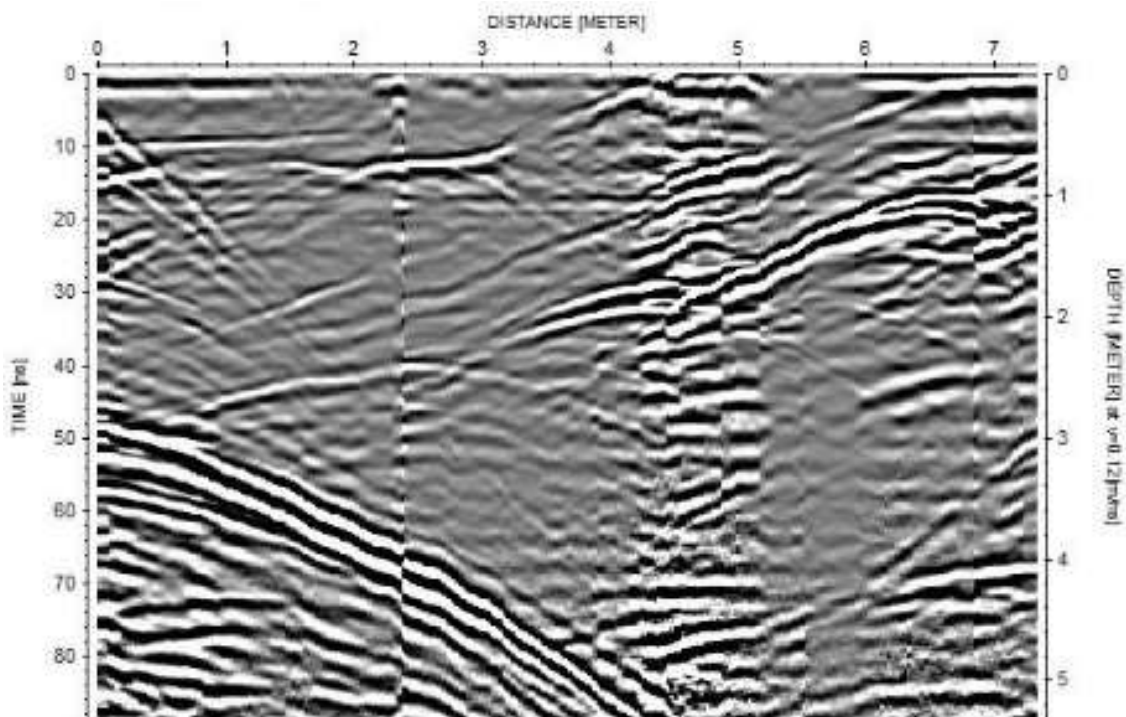


Figura xx – Radargrama da secção C2 (File___375) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção W-E, com comprimento máximo de 7,35 m e profundidade máxima de 5,27 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

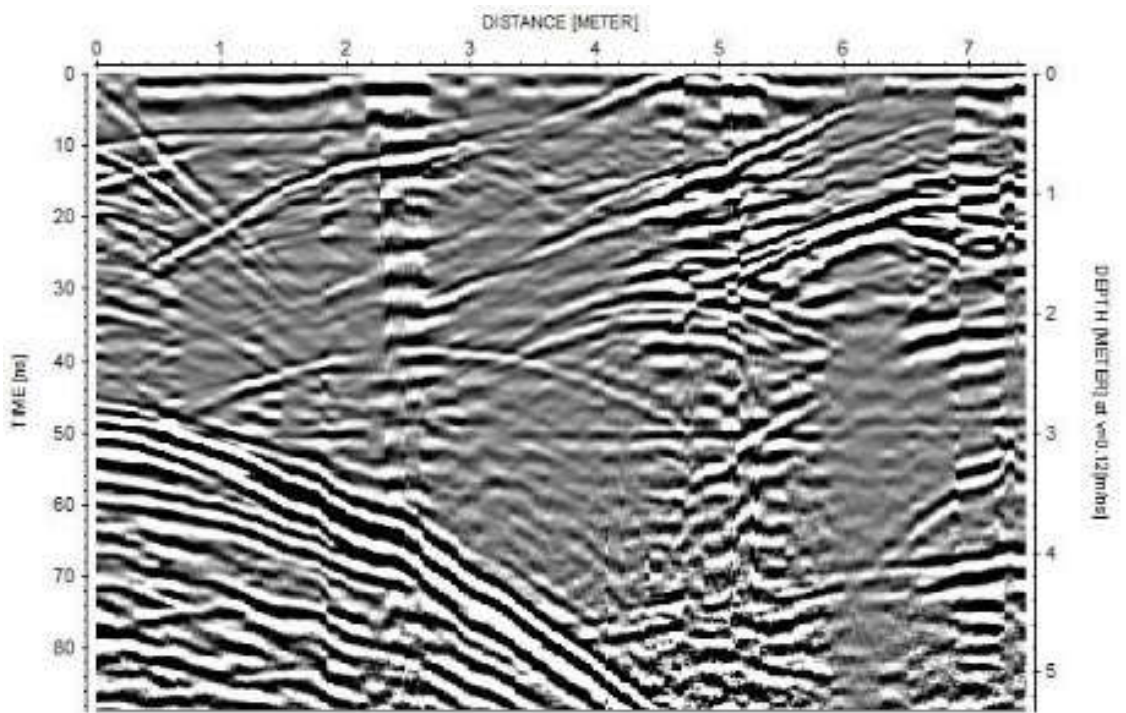


Figura yy – Radargrama da secção C2 (File___376) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção W-E, com comprimento máximo de 7,50 m e profundidade máxima de 5,31 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz.

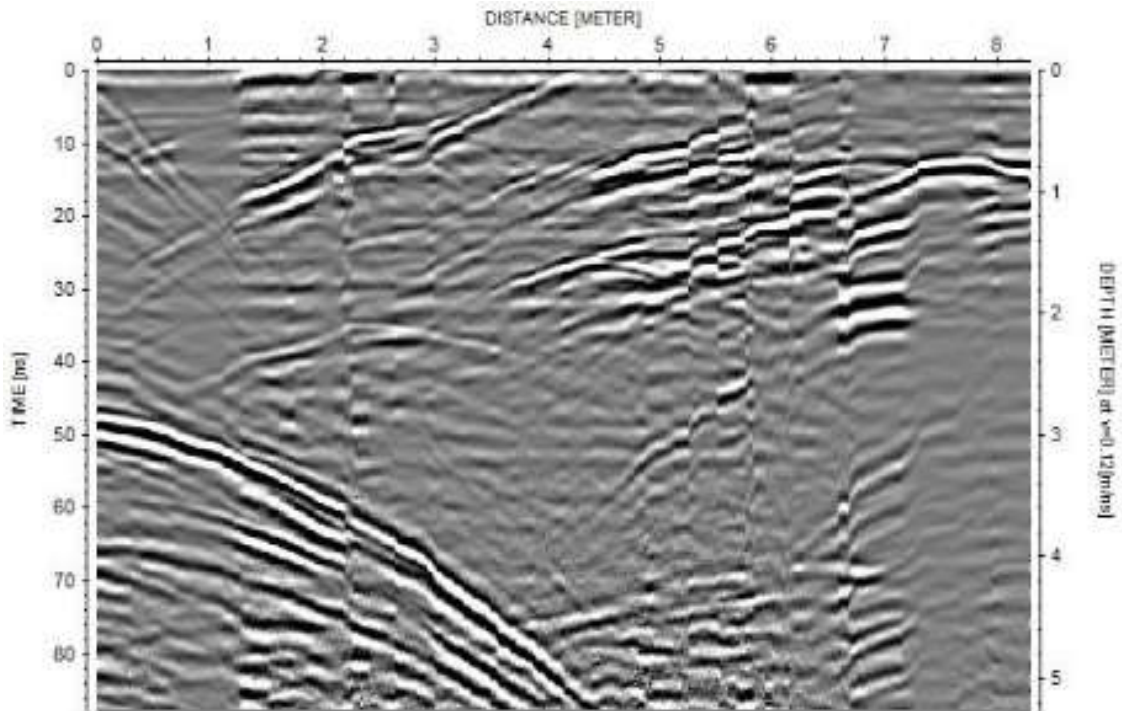


Figura zz – Radargrama da secção C2 (*File__377*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção W-E, com comprimento máximo de 8,31 m e profundidade máxima de 5,25 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

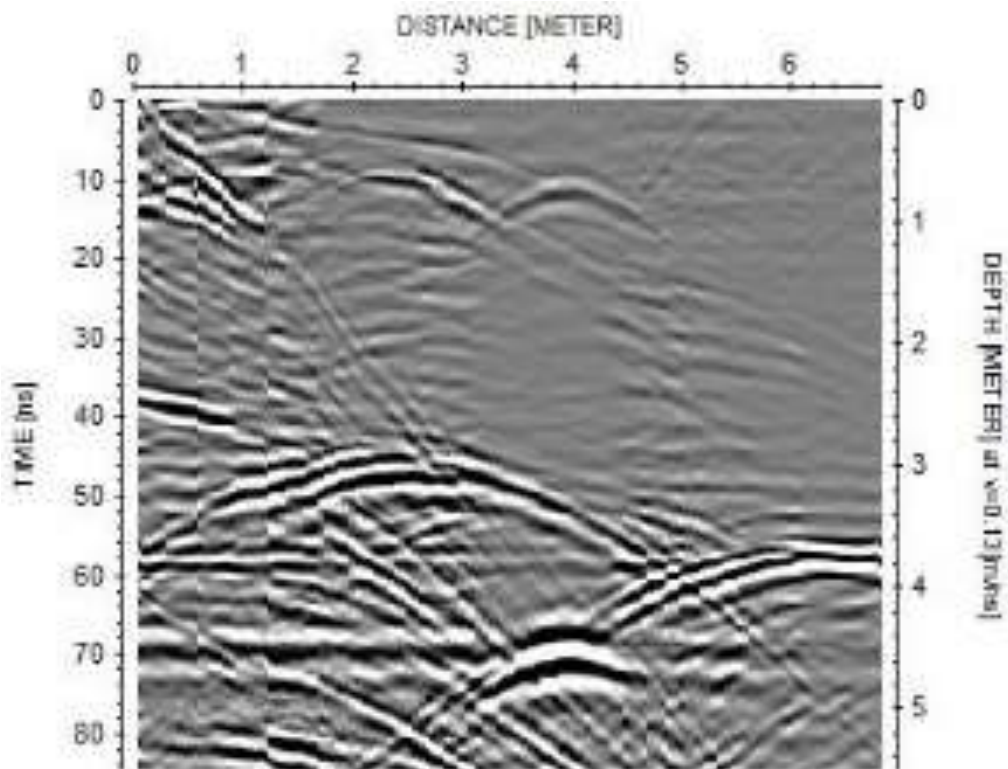


Figura aaa – Radargrama da secção C2 (*File__378*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção S-N, com comprimento máximo de 6,82 m e profundidade máxima de 5,37 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

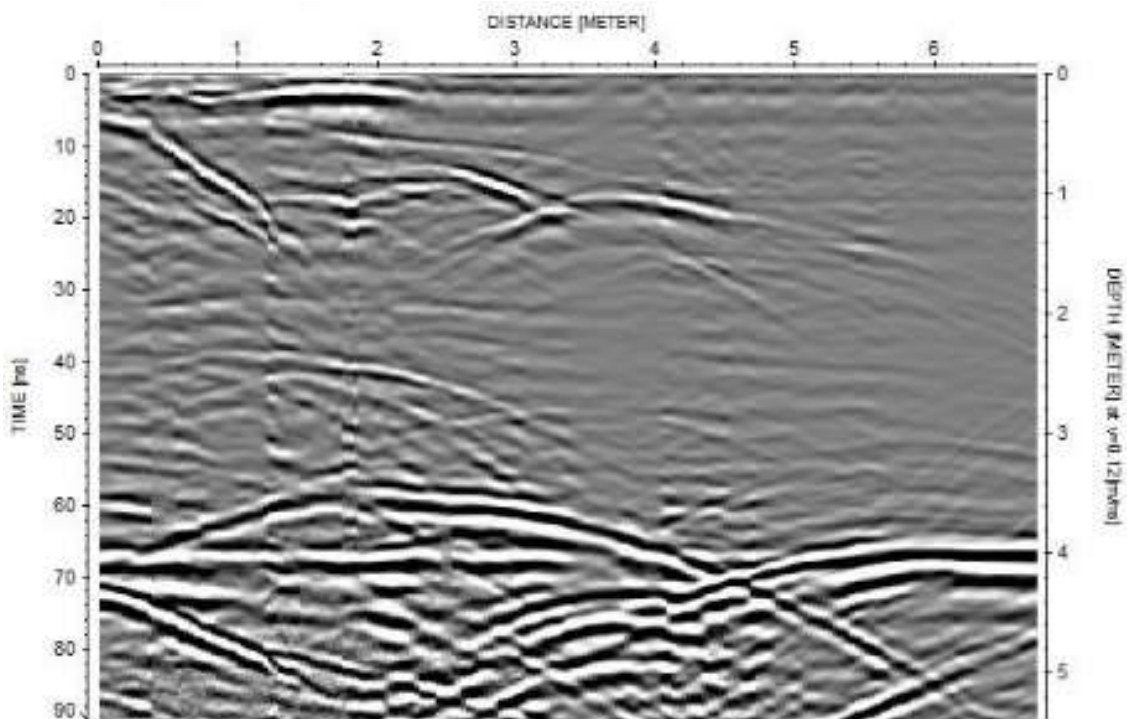


Figura bbb – Radargrama da secção C2 (*File* 379) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção S-N, com comprimento máximo de 6,75 m e profundidade máxima de 5,83 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz.

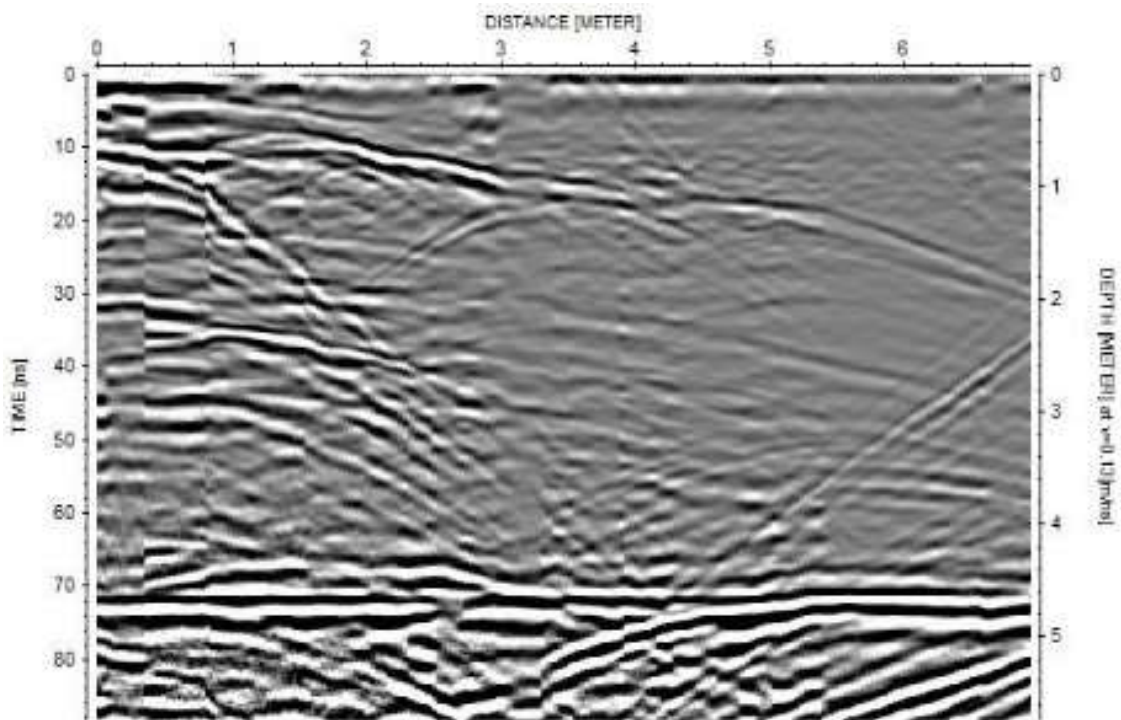


Figura ccc – Radargrama da secção C2 (*File* 380) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção S-N, com comprimento máximo de 6,94 m e profundidade máxima de 5,73 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

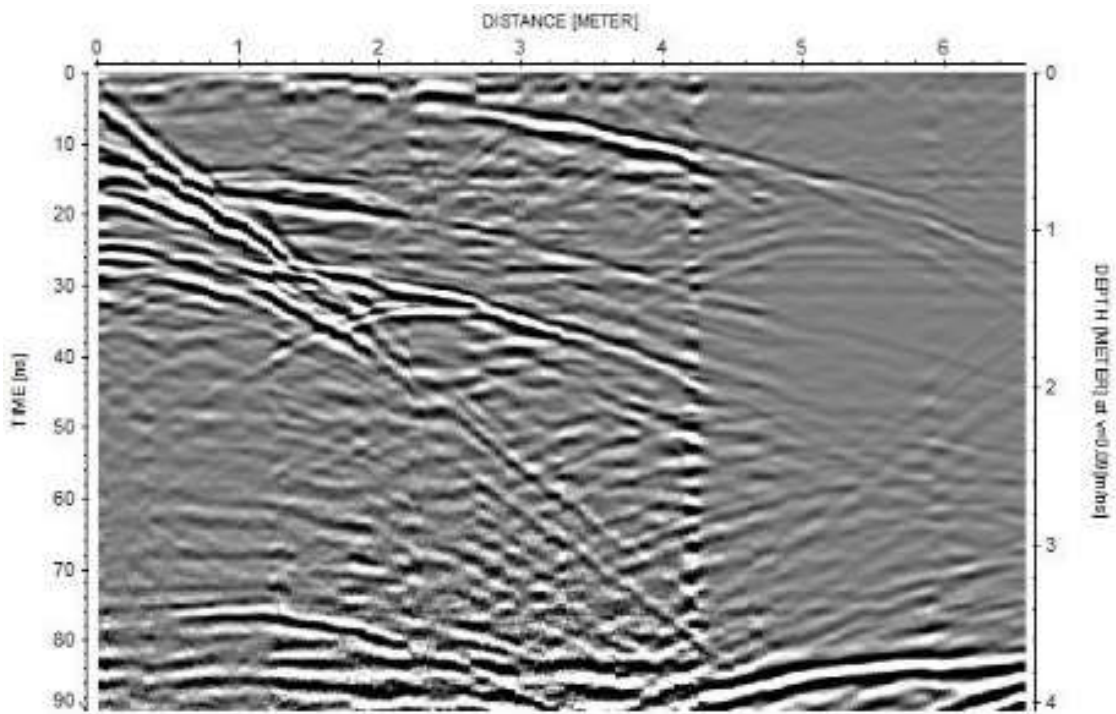


Figura ddd – Radargrama da secção C2 (*File__381*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção S-N, com comprimento máximo de 6,58 m e profundidade máxima de 4,02 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz

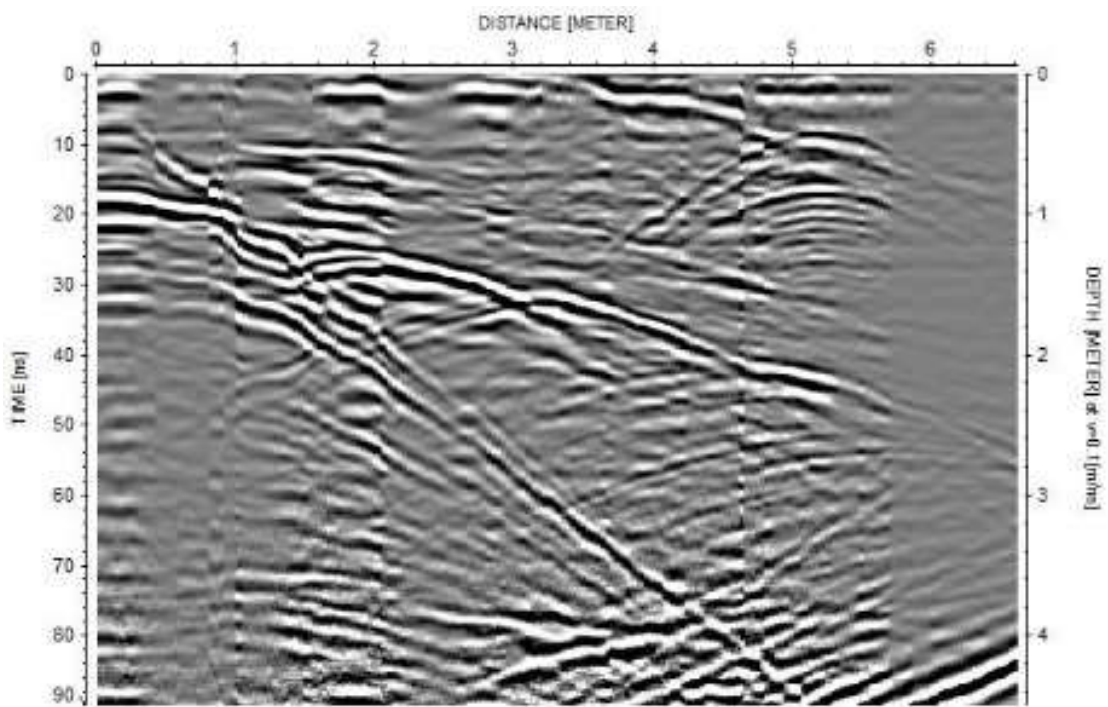


Figura eee – Radargrama da secção C2 (*File__382*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção S-N, com comprimento máximo de 6,62 m e profundidade máxima de 5,82 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

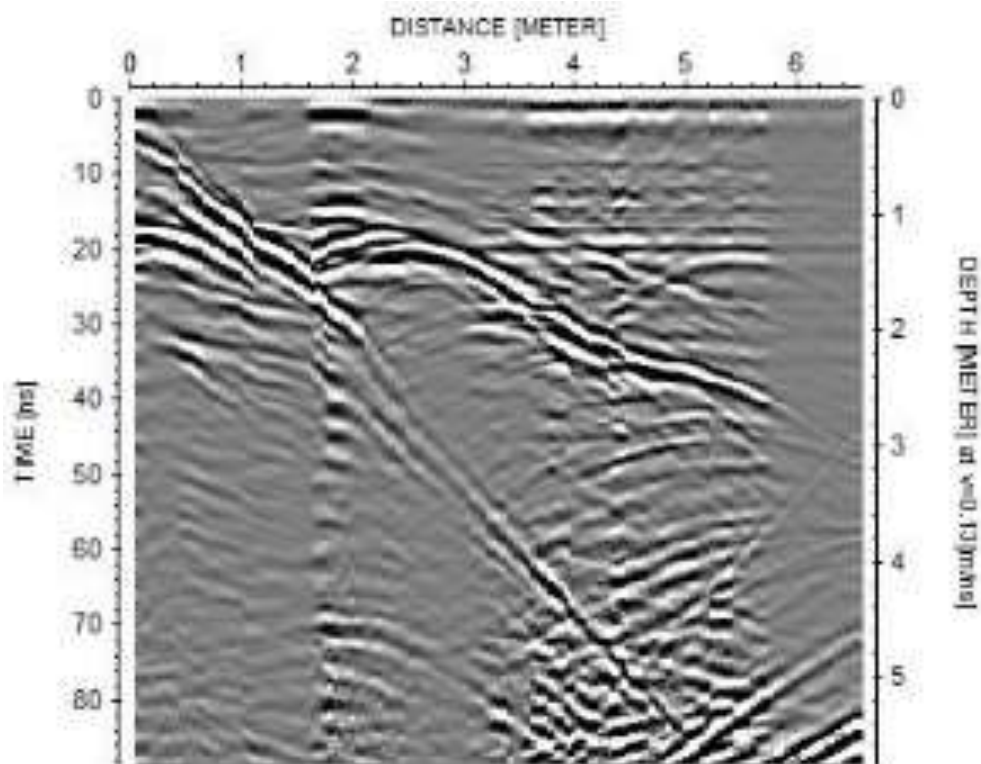


Figura fff – Radargrama da secção C2 (*File___383*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção S-N, com comprimento máximo de 6,60 m e profundidade máxima de 5,75 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz.

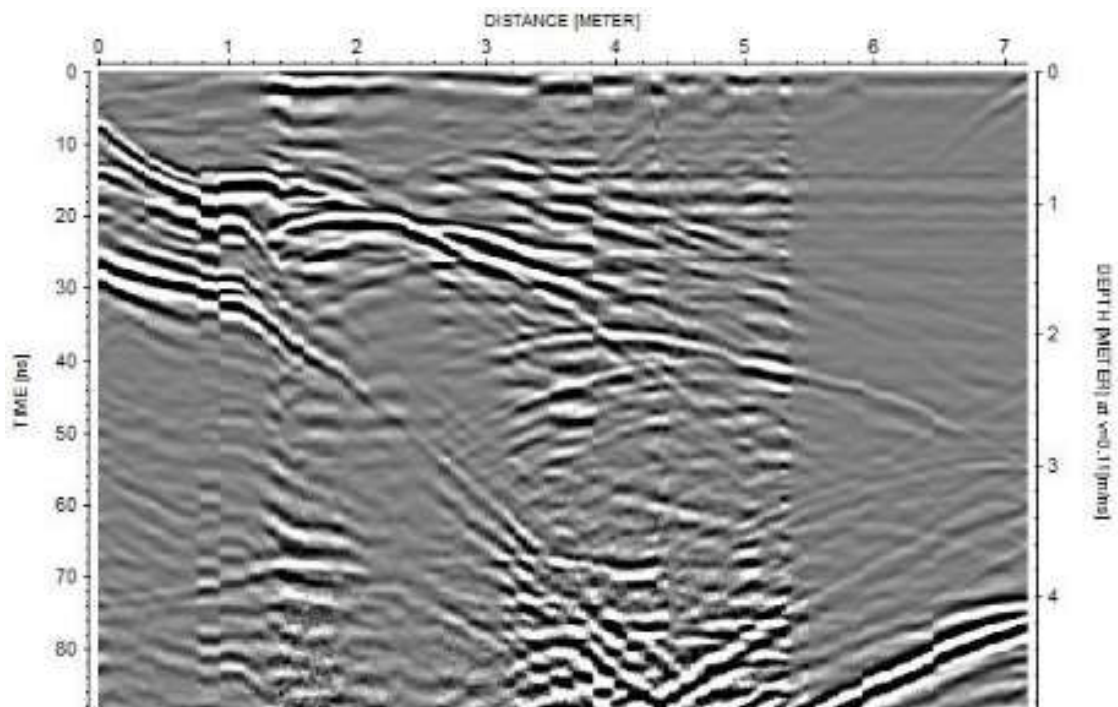


Figura ggg – Radargrama da secção C2 (*File___384*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção S-N, com comprimento máximo de 7,20 m e profundidade máxima de 5,52 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

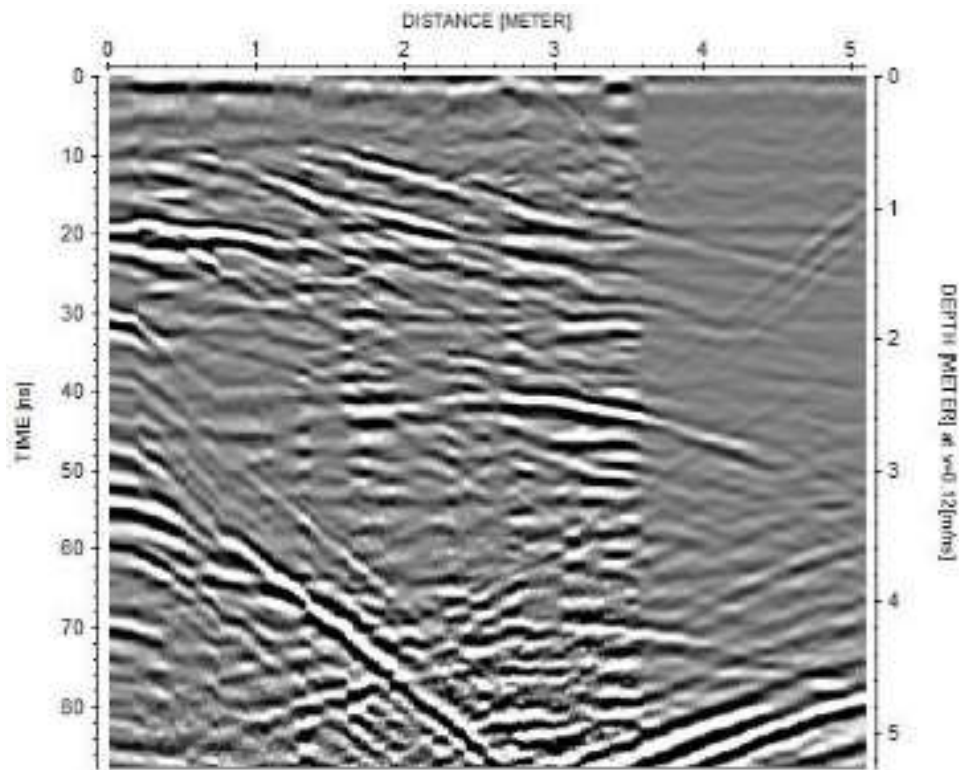


Figura hhh – Radargrama da secção C2 (File___385) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção S-N, com comprimento máximo de 5,10 m e profundidade máxima de 5,30 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*”. Antena de 400 MHz.

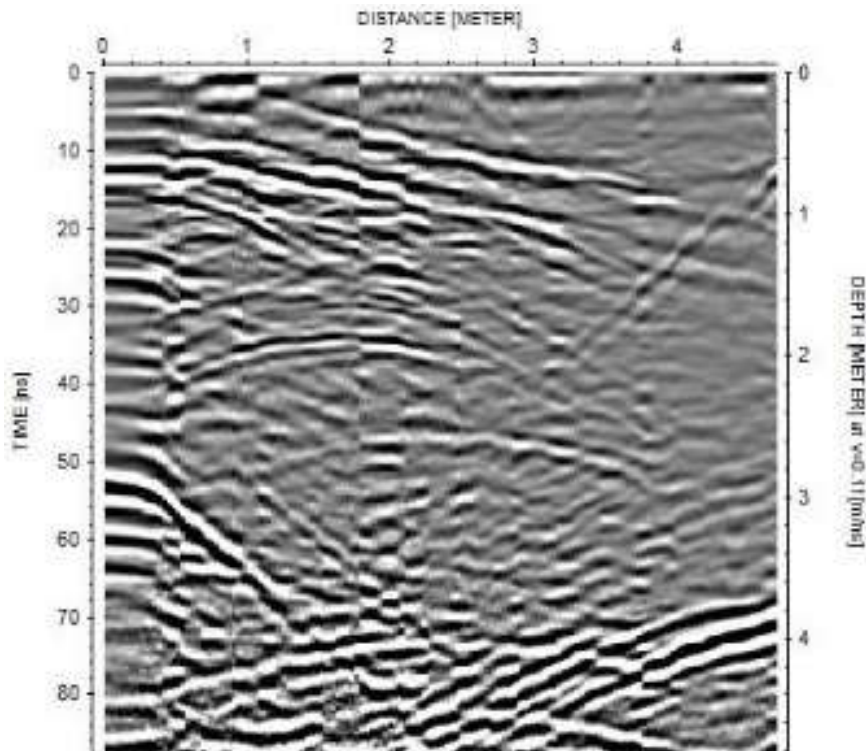


Figura iii – Radargrama da secção C2 (File___386) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda) de direção S-N, com comprimento máximo de 4,71 m e profundidade máxima de 4,80 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

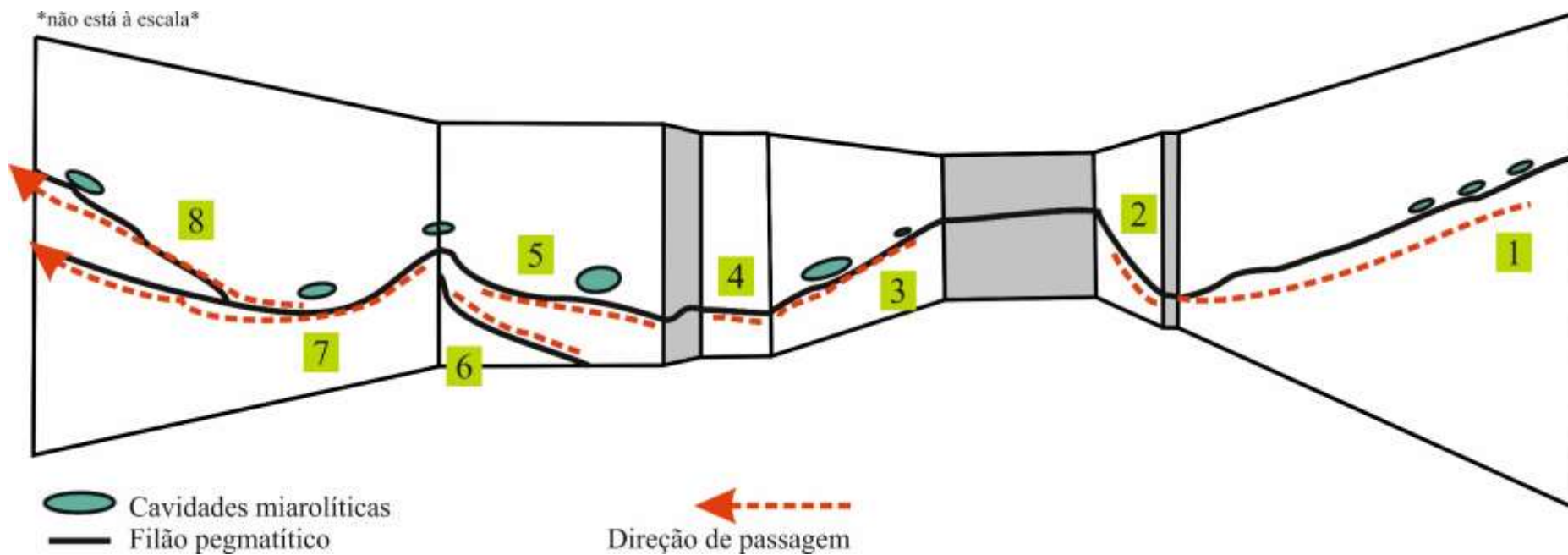


Figura jjj – Esquema de uma das frentes de desmonte da pedreira de Malpartida (Almeida, Guarda), correspondente à secção C5 da área C (sem escala). 1: Figura kkk; 2: Figurav III; 3: Figura mmm; 4: Figura nnn; 5: Figura ooo; 6: Figura ppp; 7: Figura rrr; 8: Figura qq.

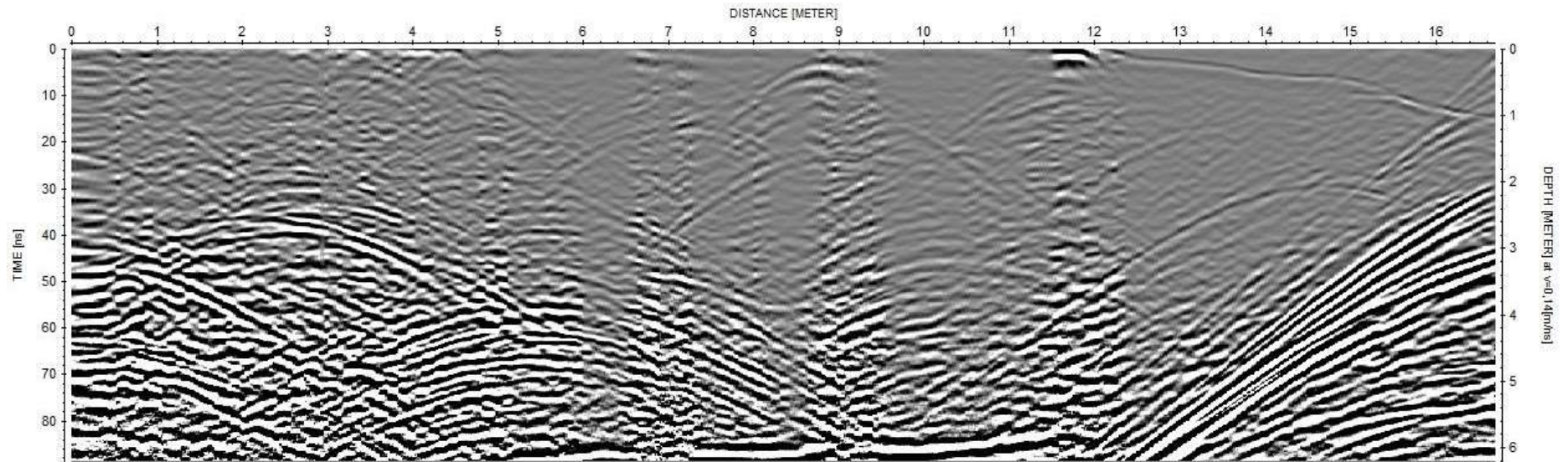


Figura kkk – Radargrama da secção C5 (*File___394*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda), corresponde ao número 1 da Figura jji, com comprimento máximo de 16,71 m e profundidade máxima de 6,20 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

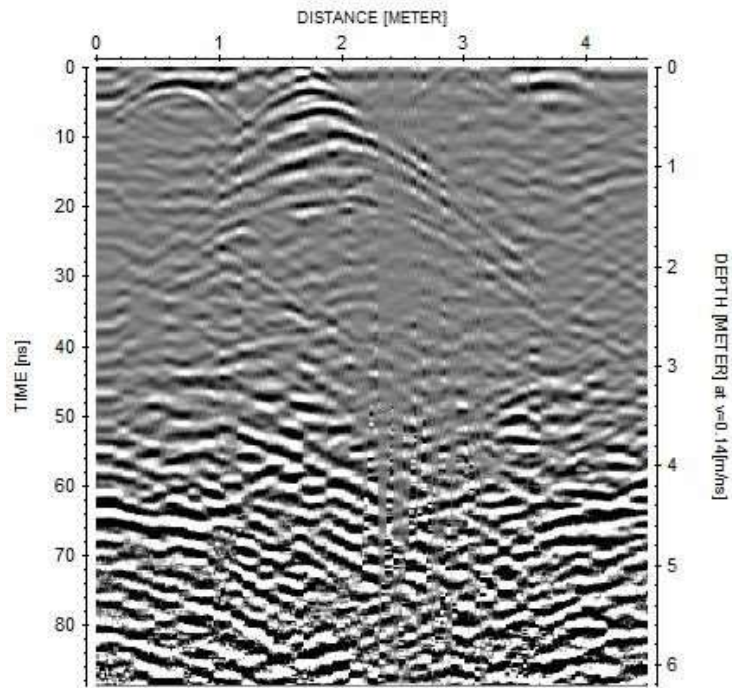


Figura III – Radargrama da secção C5 (*File__395*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda), corresponde ao número 2 da Figura jji, com comprimento máximo de 4,51 m e profundidade máxima de 6,15 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

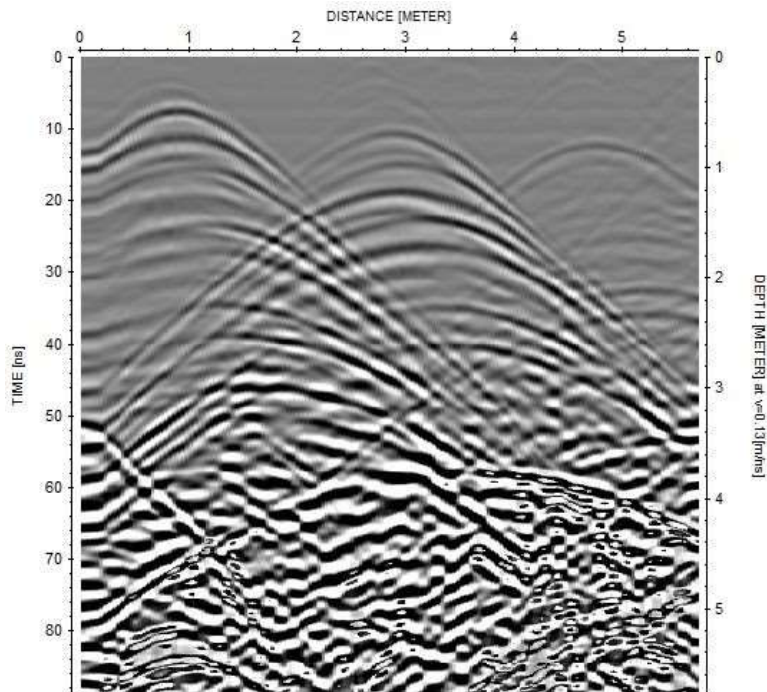


Figura mmm – Radargrama da secção C5 (*File__396*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda), corresponde ao número 3 da Figura jji, com comprimento máximo de 5,70 m e profundidade máxima de 6,20 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

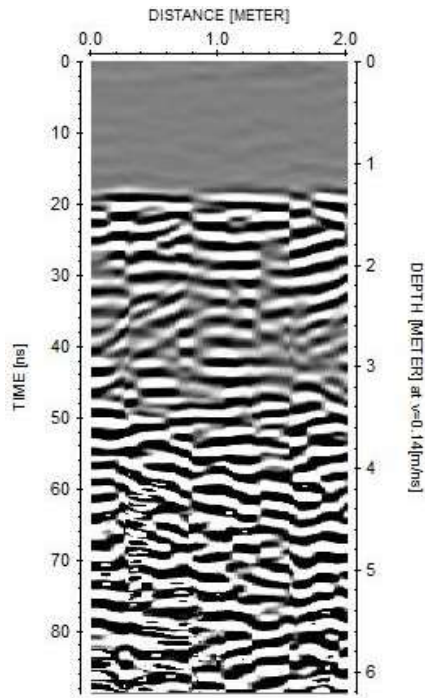


Figura nnn – Radargrama da secção C5 (File 398) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda), corresponde ao número 4 da Figura jji, com comprimento máximo de 2,02 m e profundidade máxima de 6,10 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

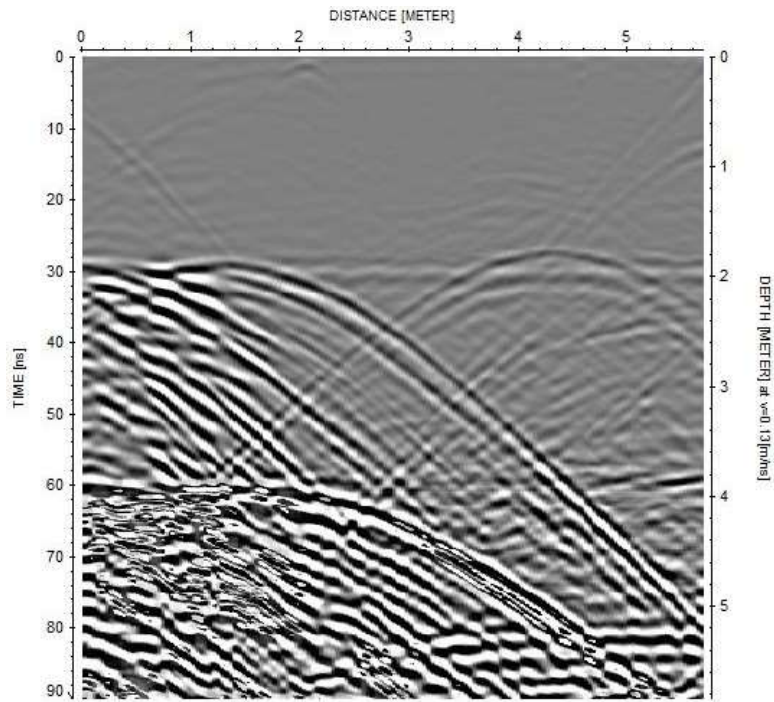


Figura ooo – Radargrama da secção C5 (File 399) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda), corresponde ao número 5 da Figura jji, com comprimento máximo de 5,71 m e profundidade máxima de 6,26 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

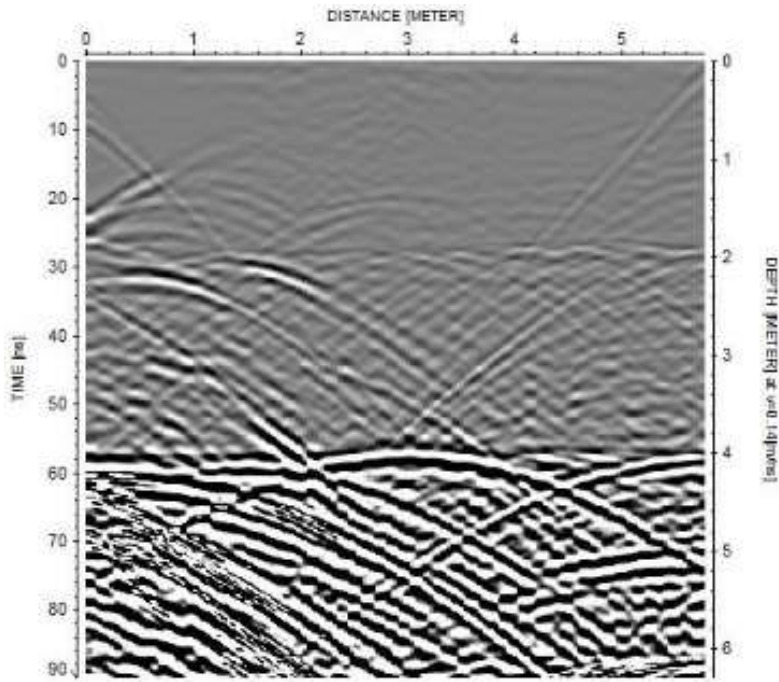


Figura ppp – Radargrama da secção C5 (*File* 400) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda), corresponde ao número 6 da Figura jji, com comprimento máximo de 5,80 m e profundidade máxima de 6,30 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

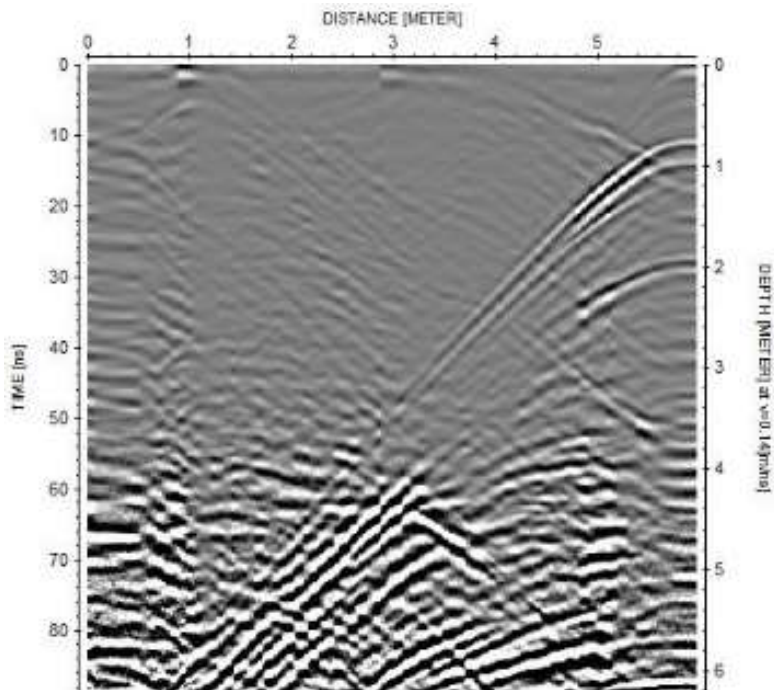


Figura qqg - Radargrama da secção C5 (*File* 402) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda), corresponde ao número 8 da Figura jji, com comprimento máximo de 5,98 m e profundidade máxima de 6,21 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.

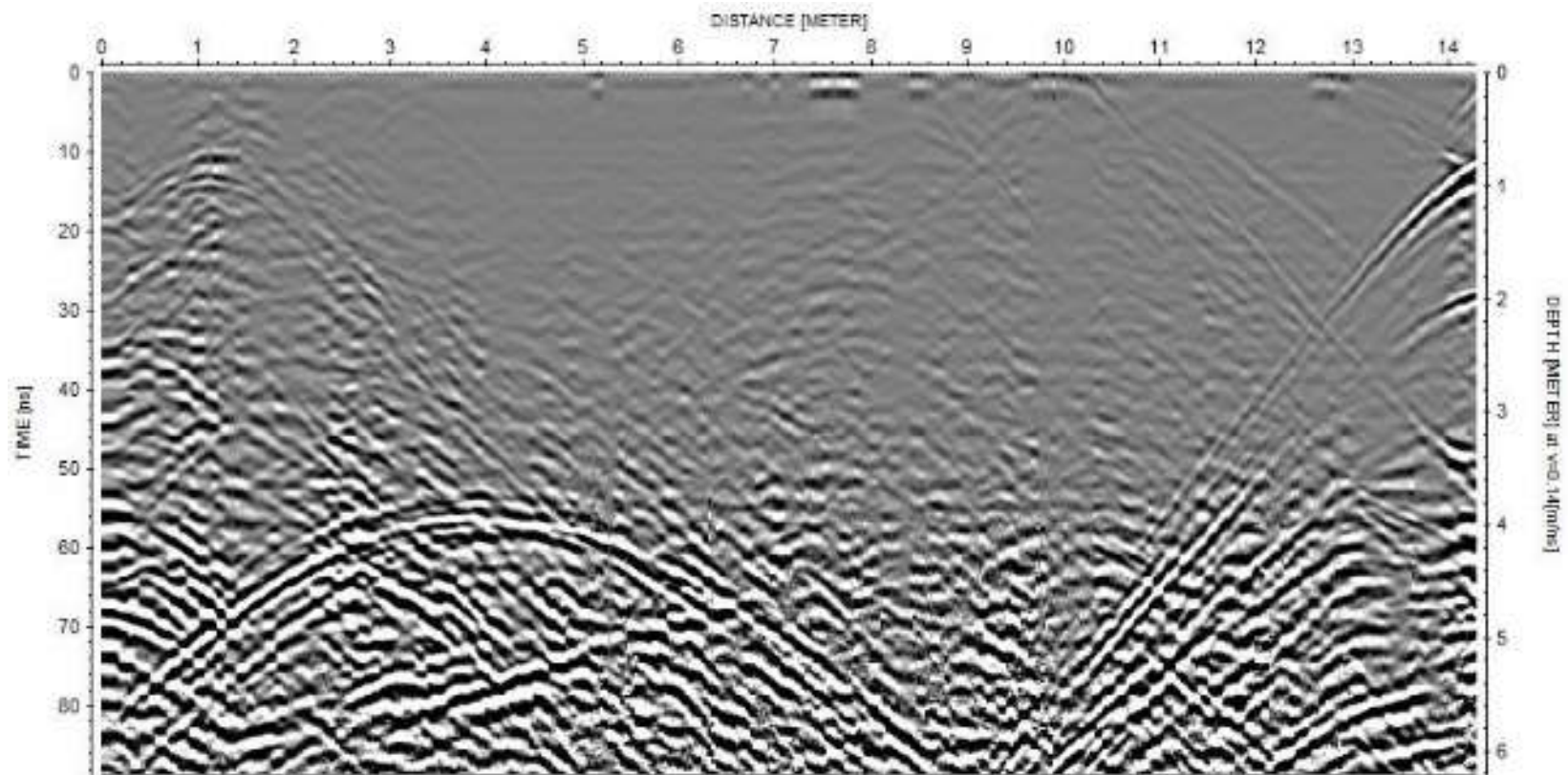


Figura rrr – Radargrama da secção C5 (*File__401*) da área C de Malpartida (Almeida, Guarda), corresponde ao número 7 da Figura jjj, com comprimento máximo de 14,30 m e profundidade máxima de 6,20 m. Para o tratamento dos dados foram usados os parâmetros mencionados na Tabela 3.2 (Capítulo III), excepto o “*fk migration*” e “*XFlipProfile*”. Antena de 400 MHz.