

UNIVERSIDADE DE COIMBRA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
Departamento de Ciências da Terra

# CASOS DE ESTUDO COM UTILIZAÇÃO DE GPR

Reconhecimento e caracterização de  
estruturas geológicas, arqueológicas e  
estruturas subterrâneas

José Luís Lopes Carvalho

Tese no âmbito do Mestrado em Geociências, especialização em Recursos Geológicos orientada pelo Professor Doutor Fernando Pedro Ortega de Oliveira Figueiredo e co-orientada pelo Mestre João António Marques Duarte e apresentada ao Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2018



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA



\* Por opção do autor, esta dissertação foi escrita de acordo com as regras anteriores ao novo acordo ortográfico

## **AGRADECIMENTOS**

A presente dissertação de Mestrado é o resultado do apoio, colaboração e entreada de diferentes pessoas e instituições, sem as quais o mesmo não teria sido possível. Assim, de forma muito cordial e sincera, quero expressar toda a minha amizade e agradecimento pela ajuda prestada, em especial:

- Ao meu orientador, Professor Doutor Fernando Pedro Ortega Figueiredo, por todo o apoio, pelas oportunidades proporcionadas a todos os níveis e pelos contactos adquiridos através dele, por estar sempre disponível quando necessário (mesmo quando outros “problemas” mais urgentes exigiam a sua presença e atenção), pelos ensinamentos transmitidos quer académicos quer pessoais, pelas conversas informais ora de desabafo, ora de descontração, e muito principalmente e acima de tudo, pela grande amizade que para sempre irei estimar;

- Ao meu co-orientador (e Grande Amigo), Mestre João António Duarte, por todo o incansável apoio, por todo o tempo (e bem sei que ele tem pouco) e disponibilidade quase inacabável para me ajudar na grande maioria das situações, por toda a paciência que teve durante algumas discussões e trocas de ideias quando me surgiam algumas dúvidas, por todos os “empurrões” e “raspanetes” sempre saudáveis, para que este e outros trabalhos fossem realizados no devido tempo, por ouvir alguns desabafos e estar sempre pronto para me dar bons conselhos, pelas boas conversas de trabalho de campo e de gabinete (e de lazer também), por ter sido parte integrante deste trabalho, por acreditar no meu valor, e principalmente pela enorme amizade sincera;

- Ao Professor Doutor Alexandre Manuel Tavares, pela sua amizade e por no momento de dúvida e impasse no que toca à escolha do tema da tese saber perceber o que seria melhor para mim, acreditar no meu valor enquanto pessoa e “profissional” de geociências, e ter confiado em mim o suficiente para me sugerir trabalhar com o equipamento em questão apesar das dificuldades;

- Ao Professor Doutor Luís Vitor Duarte, pela sua amizade e apoio ao longo de todo o percurso académico, e pelos constantes “empurrões” para o terminar. Acima de tudo por ter sido o primeiro a acreditar no meu valor logo nos primeiros anos da licenciatura, proporcionando-me várias oportunidades de aprender mais sobre geologia para além das aulas, e por me ter dado a conhecer melhor e mais cedo do que seria normal o meio científico onde aos poucos me vou inserindo. Nunca irei esquecer isso;

- Ao Doutor Ricardo Louro Silva, pela amizade e por todo o conhecimento que me transmitiu durante os vários trabalhos nos quais simpaticamente me deixou colaborar durante os meus primeiros anos de estudante de licenciatura, e que serviram para eu crescer e enriquecer em termos de conhecimentos acerca de várias áreas das Ciências da Terra;

- À Professora Lídia Gil Catarino, pela amizade e por todos os conselhos que me deu ao longo do meu percurso académico e em particular ao longo deste trabalho;

- A todos os Professores do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra pela sua simpatia e amabilidade para comigo, e por terem contribuído nas mais variadas formas para a minha formação pessoal e académica;

- Aos funcionários do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra pela simpatia, carinho e amizade;

- A todos os meus colegas de curso e amigos em geral por todo o apoio, companheirismo, paciência, disponibilidade e incentivo durante todo o meu percurso académico;

- À Marta Santos, que ao longo de todos estes anos em que nem sempre as coisas correram da forma esperada e me fizeram duvidar do rumo a seguir, me incentivou vivamente e nunca deixou que eu desistisse de alcançar este dia;

- À D.<sup>a</sup> Isabel e ao Sr. José, que são como uma segunda família, e que desde cedo na minha vida e de uma forma muito subtil, contribuíram para me tornar quem sou hoje;



CASOS DE ESTUDO COM UTILIZAÇÃO DE GPR  
Reconhecimento e caracterização de estruturas geológicas, arqueológicas e estruturas  
subterrâneas

- A toda a minha família pelo carinho e apoio, em particular à minha avó Isaura, que está sempre pronta para me ajudar seja no que for, e por me ter inculcido o “bichinho” de ser estudante da Universidade de Coimbra;

... e a todos aqueles que passaram pela minha vida e que, de uma forma ou de outra, contribuíram para me tornar na pessoa que hoje sou.



## RESUMO

Esta dissertação teve como objectivo principal explorar as potencialidades de um equipamento de RADAR de Penetração de Solo (*Ground Penetrating/Probing Radar - GPR*) recentemente adquirido pelo Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra. Desta forma, para além do conhecimento proporcionado pelos dados dos resultados obtidos, pretende-se também dotar o mestrando do conhecimento necessário para utilizar este equipamento e respectivos softwares de tratamento de dados de GPR, para que no futuro esse conhecimento seja usado em outros estudos.

Baseado no conhecimento teórico e prático existente sobre esta técnica geofísica electromagnética e na polivalência e versatilidade permitidas por este equipamento em particular, foram realizados vários estudos de caso, uns de âmbito mais científico e outros de âmbito mais técnico, em várias áreas disciplinares onde a aplicabilidade deste método é cada vez mais tida em conta: “Utilização de GPR no reconhecimento de estruturas geológicas em zonas costeiras”, “Utilização de GPR no reconhecimento de estruturas arqueológicas no Convento de Cristo – Tomar”, “Prospecção arqueológica de uma vila romana com recurso a GPR em Vale de Mouro – Mêda”, “Relatório técnico dos trabalhos de prospecção geofísica para mapeamento de estruturas subterrâneas pelo método de GPR na vila de Luso” e “Uso de métodos não destrutivos para análise estrutural de materiais pétreos – Caracterização por ultrassons e GPR”.

As investigações efectuadas permitiram agilizar algumas metodologias, refinar assuntos e estudos anteriores dentro das temáticas abordadas, bem como possibilitar a realização de parcerias com entidades independentes para futuros estudos com recurso a esta técnica geofísica.

**PALAVRAS-CHAVE:** GPR; Processamento de dados; Arqueologia; Estruturas subterrâneas; Geotecnia.



## **ABSTRACT**

*The main objective of this dissertation was to explore the potential of a Ground Penetrating/Probing Radar - GPR equipment recently acquired by the Department of Earth Sciences of the University of Coimbra. In this way, in addition to the knowledge provided by the data of the results obtained, it is also intended to provide to the master student the necessary knowledge to use this equipment and its GPR data processing softwares, so that in the future this knowledge could be used in other studies.*

*Based on the existing theoretical and practical knowledge about this electromagnetic geophysical technique and in the versatility permitted by this particular equipment, several study cases were carried out, some of more scientific ambit and others with a more technical ambit, in various disciplinary areas where the applicability of this method is increasingly taken into account: "Use of GPR in the recognition of geological structures in coastal areas", "Use of GPR in the recognition of archaeological structures in Convent of Christ – Tomar", "Archaeological prospection of a roman village with the use of GPR in Vale de Mouro – Mêda", "Technical report of the geophysical prospecting fieldwork for mapping underground structures by the GPR method in the village of Luso" and "Use of Non-destructive methods for structural analysis of petrous materials – ultrasound and GPR characterization".*

*Investigations have made possible to expedite some methodologies, refine previous subjects and studies within the topics covered, as well as enable partnerships with independent entities for future studies with the use of this geophysical technique.*

**KEY-WORDS:** GPR; Data processing; Archaeology; Underground structures; Geotechnics.



## ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objectivos.....	1
1.2 Estrutura geral da dissertação .....	2
1.3 Radar de Penetração de Solo - GPR .....	3
1.3.1 Descrição do método/equipamento .....	3
1.3.2 Evolução do método/equipamento GPR.....	7
1.4 Princípios teóricos .....	10
CAPÍTULO 2 – CASOS DE ESTUDO .....	17
2.1 CASO DE ESTUDO 1.....	
UTILIZAÇÃO DE GPR NO RECONHECIMENTO DE ESTRUTURAS GEOLÓGICAS EM ZONAS COSTEIRAS .....	19
2.1.1 Resumo.....	21
2.1.2 Introdução .....	22
2.1.3 Objectivos .....	22
2.1.4 Localização do estudo e contexto geológico .....	22
2.1.5 Aquisição de dados de GPR.....	24
2.1.6 Processamento de dados de GPR .....	25
2.1.7 Resultados .....	26
2.1.8 Conclusões .....	28
2.1.9 Agradecimentos .....	29
2.1.10 Referências bibliográficas – Caso de estudo 1 .....	29
2.2 CASO DE ESTUDO 2.....	
UTILIZAÇÃO DE GPR NO RECONHECIMENTO DE ESTRUTURAS ARQUEOLÓGICAS NO CONVENTO DE CRISTO - TOMAR.....	31
2.2.1 Resumo.....	32
2.2.2 Introdução .....	33
2.2.3 Objectivos .....	34
2.2.4 Métodos .....	34
2.2.5 Resultados .....	35
2.2.6 Discussão e conclusões .....	39
2.1.7 Agradecimentos .....	40
2.2.8 Referências bibliográficas – Caso de estudo 2.....	41

2.3 CASO DE ESTUDO 3.....	
PROSPECÇÃO ARQUEOLÓGICA DE UMA VILLA ROMANA COM RECURSO A GPR EM VALE DE MOURO – MÊDA .....	43
2.3.1 Resumo.....	44
2.3.2 Introdução .....	45
2.3.3 Objectivos .....	49
2.3.4 Métodos .....	49
2.3.5 Resultados e discussão.....	51
2.3.6 Conclusões .....	60
2.3.7 Agradecimentos .....	61
2.3.8 Referências bibliográficas – Caso de estudo 3.....	61
2.4 CASO DE ESTUDO 4.....	
RELATÓRIO TÉCNICO DOS TRABALHOS DE PROSPECÇÃO GEOFÍSICA PARA MAPEAMENTO DE ESTRUTURAS SUBTERRÂNEAS PELO MÉTODO DE GPR NA VILA DE LUSO .....	63
2.4.1 Introdução .....	64
2.4.2 Abordagem usada para o estudo .....	65
2.4.2.1 Localização geográfica das áreas de aquisição .....	65
2.4.2.2 Equipamentos / materiais usados .....	66
2.4.2.3 Equipamentos / materiais usados .....	67
2.4.3 Enquadramento geológico e geomorfológico.....	68
2.4.4 Resultados da aquisição .....	70
2.4.4.1 Planos de cada zona (em profundidade) obtidos através do cruzamento de dados dos perfis adquiridos e descrição de observações efectuadas.....	70
2.4.4.2 Plano geral de todas as áreas em profundidade .....	88
2.4.5 Conclusões e considerações finais.....	89
2.4.6 Agradecimentos .....	90
2.4.7 Referências bibliográficas – Caso de estudo 4.....	90
2.5 CASO DE ESTUDO 5.....	
USO DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE MATERIAIS PÉTREOS – CARACTERIZAÇÃO POR ULTRASSONS E GPR .....	93
2.5.1 Resumo.....	94
2.5.2 Introdução .....	95
2.5.3 Métodos e metodologias .....	96
2.5.4 Resultados e discussão.....	100
2.5.5 Conclusões .....	102



CASOS DE ESTUDO COM UTILIZAÇÃO DE GPR  
Reconhecimento e caracterização de estruturas geológicas, arqueológicas e estruturas  
subterrâneas

2.5.6 Agradecimentos .....	105
2.5.7 Referências bibliográficas – Caso de estudo 5 .....	106
CAPÍTULO 3 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES GERAIS .....	109
3.1 Conclusões gerais .....	109
3.2 Recomendações gerais .....	109
3.3 Síntese autocrítica e reflectiva do trabalho realizado .....	110
CAPÍTULO 4 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	111
ANEXOS .....	113



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da aquisição de dados pelo método de reflexão com equipamento GPR e correspondente radargrama de ondas ( <a href="http://scantech.ie/scantech-about-gpr.html">http://scantech.ie/scantech-about-gpr.html</a> , acedido em 27 de Maio de 2018).....	4
Figura 2 - Aspecto visual da reflexão de uma onda EM dependendo do tipo e das propriedades dieléctricas de cada um dos materiais atingidos - da esquerda para a direita: (1) vara de aço, (2) tubo de PVC oco, (3) tubo de PVC com água no interior ( <a href="https://www.geophysical.com/whatisgpr">https://www.geophysical.com/whatisgpr</a> , acedido em 27 de Maio de 2018). ....	5
Figura 3 - Sistema GPR usado na prospecção de potenciais vias de instalação de pipelines no Canadá (1975) (ANNAN, 2002). ....	8
Figura 4 - Equipamento GPR <i>Noggin Smart Cart - Sensors &amp; Software Inc.</i> (ANNAN, 2002). ....	10
Figura 5 - Equipamento GPR e os seus componentes (adaptado de <a href="https://www.sensoft.ca">https://www.sensoft.ca</a> , acedido em 11 de Setembro de 2018). ....	10
Figura 6 - Esquema de aquisição de dados por GPR (HRUSKA, 1999). ....	11
Figura 7 - Localização dos perfis GPR adquiridos para este trabalho experimental e localização dos furos de sondagem usados para comparação com os dados dos radargramas – Quiaios, Tocha (adaptado de <i>Google Earth Pro</i> , 2018). ....	23
Figura 8 - Localização da área de execução dos perfis GPR na carta geológica de Portugal 1:50 000 – 19A – Cantanhede (polígono azul claro) e localização litostratigráfica (polígono azul escuro na legenda).....	24
Figura 9 - Radargrama “raw” da secção A-B, da antena de 100MHz. ....	25
Figura 10 - Radargramas da secção A-B com a antena de 100MHz, obtidos após processamento, com várias combinações coloridas. ....	26
Figura 11 - Esquema representativo do conjunto dos radargramas adquiridos: A,B,C – Secções adquiridas, com quebra do perfil em B; I,II,III – Divisões criadas nos radargramas para facilitar a visualização do mesmo (ver ANEXO I, II, III e IV para visualização mais pormenorizada e completa). ....	26
Figura 12 - Radargrama de 100MHz (exagero vertical 2x e horizontal 1.5x): A,B,C – Camadas geológicas; Traço “cheio” – Principais horizontes reflectores; Tracejado – Falhas prováveis. ....	27
Figura 13 - a) Radargrama da divisão I (50 e 100MHz); b) Ampliação do local da sondagem F8. ....	27
Figura 14 - Radargrama de 100 MHz da secção A-B, com hipotético nível freático assinalado a azul. ....	27
Figura 15 - Sala da Bela Vista no momento da aquisição dos dados GPR, com a grelha de aquisição representada a amarelo (foto de autor, Março 2018). ....	35
Figura 16 - Planta geral do Piso 3 do Convento de Cristo, com indicação a azul da área onde o estudo de GPR foi realizado, com referencial XY para alinhamento dos perfis GPR na planta (gentilmente cedida pelo Senhor Rui Ferreira, Assistente Técnico – Convento de Cristo). ....	36
Figura 17 - Plano da sala à profundidade de 1,7 metros. ....	37
Figura 18 - Plano da sala à profundidade de 2,6 metros. ....	37

Figura 19 - Plano da sala à profundidade de 3 metros. ....	38
Figura 20 - Plano da sala à profundidade de 3.2 metros. ....	38
Figura 21 - Plano da sala à profundidade de 3.3 metros. ....	39
Figura 22 - Mapa da Província Lusitania com a localização da freguesia de Coriscada (retirado de COIXÃO & SILVINO, 2010). ....	45
Figura 23 - Planta da <i>Villa</i> de Vale do Mouro (retirado de CORREIA <i>et al.</i> , 2016). ....	47
Figura 24 - O "Tesouro de Mêda" - achado único de 4526 moedas romanas (retirado de COIXÃO & SILVINO, 2010). ....	48
Figura 25 - O mosaico de Baco da <i>Villa</i> de Vale do Mouro <i>in situ</i> (retirado de CORREIA <i>et al.</i> , 2016). ....	48
Figura 26 - Localização das áreas de aquisição de GPR (Meda1 - 1, Meda2 - 2, Meda3 - 3, Meda4 - 4, Meda5 - 5), Poço e Zona dos banhos/Termas ( <i>Google Earth Pro</i> , Agosto 2018). ....	50
Figura 27 - Localização dos perfis GPR adquiridos (linhas a vermelho); ( <i>Google Earth Pro</i> , Agosto 2018). ....	51
Figura 28 - Plano em profundidade dos dados de GPR (0,380 a 0,475 metros); ( <i>Google Earth Pro</i> , Agosto 2018). ....	53
Figura 29 - Plano em profundidade dos dados de GPR (0,475 a 0,570 metros); ( <i>Google Earth Pro</i> , Agosto 2018). ....	53
Figura 30 - Plano em profundidade dos dados de GPR (0,570 a 0,665 metros); ( <i>Google Earth Pro</i> , Agosto 2018). ....	54
Figura 31 - Plano em profundidade dos dados de GPR (0,855 a 0,950 metros); ( <i>Google Earth Pro</i> , Agosto 2018). ....	55
Figura 32 - Plano em profundidade dos dados de GPR (1,140 a 1,235 metros); ( <i>Google Earth Pro</i> , Agosto 2018). ....	56
Figura 33 - Plano em profundidade dos dados de GPR (1,330 a 1,425 metros); ( <i>Google Earth Pro</i> , Agosto 2018). ....	57
Figura 34 - Plano em profundidade dos dados de GPR (1,520 a 1,615 metros); ( <i>Google Earth Pro</i> , Agosto 2018). ....	57
Figura 35 - Plano em profundidade dos dados de GPR (1,805 a 1,900 metros); ( <i>Google Earth Pro</i> , Agosto 2018). ....	58
Figura 36 - Plano em profundidade dos dados de GPR (2,850 a 2,945 metros); ( <i>Google Earth Pro</i> , Agosto 2018). ....	59
Figura 37 - Plano em profundidade dos dados de GPR (3,325 a 3,420 metros); ( <i>Google Earth Pro</i> , Agosto 2018). ....	59
Figura 38 - Plano em profundidade dos dados de GPR (3,990 a 4,085 metros); ( <i>Google Earth Pro</i> , Agosto 2018). ....	60
Figura 39 – Localização das áreas de estudo ( <i>Google Earth Pro</i> , 2018). ....	65
Figura 40 - Equipamento GPR a ser utilizado no dia dos trabalhos (foto do autor, 18 de Abril 2018). ....	66
Figura 41 - Excerto de uma Carta Geológica da área de estudo (adaptado de DINIS, 2004). ....	68

CASOS DE ESTUDO COM UTILIZAÇÃO DE GPR  
Reconhecimento e caracterização de estruturas geológicas, arqueológicas e estruturas  
subterrâneas

Figura 42 - Foto do interior do aluimento (notar os blocos de rocha no leito da linha de água, bem como a fracção mais argilosa no material rochoso desagregado); (foto do autor, 18 de Abril 2018).....	69
Figura 43 - Mapa altimétrico da zona envolvente à área de estudo (assinalada pela estrela) (Adaptado de <i>Global Mapper</i> , 18 de Abril 2018).....	70
Figura 44 - Zona A - <i>Slice view</i> a 8 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5</i> e <i>Google Earth Pro</i> ). .....	71
Figura 45 - Zona A - <i>Slice view</i> a 10 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5</i> e <i>Google Earth Pro</i> ). .....	72
Figura 46 - Zona A - <i>Slice view</i> a 11 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5</i> e <i>Google Earth Pro</i> ). .....	72
Figura 47 - Zona A - <i>Slice view</i> a 11.75 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5</i> e <i>Google Earth Pro</i> ). .....	73
Figura 48 - Zona A - <i>Slice view</i> a 12 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5</i> e <i>Google Earth Pro</i> ). .....	73
Figura 49 - Zona A - <i>Slice view</i> a 18 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5</i> e <i>Google Earth Pro</i> ). .....	74
Figura 50 - Zona B - <i>Slice view</i> a 0.25 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5</i> e <i>Google Earth Pro</i> ). .....	75
Figura 51 - Zona B - <i>Slice view</i> a 0.50 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5</i> e <i>Google Earth Pro</i> ). .....	76
Figura 52 - Zona B - <i>Slice view</i> a 1.50 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5</i> e <i>Google Earth Pro</i> ). .....	76
Figura 53 - Zona B - <i>Slice view</i> a 10.50 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5</i> e <i>Google Earth Pro</i> ). .....	77
Figura 54 - Zona B - <i>Slice view</i> a 11 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5</i> e <i>Google Earth Pro</i> ). .....	77
Figura 55 - Zona B - <i>Slice view</i> a 12 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5</i> e <i>Google Earth Pro</i> ). .....	78
Figura 56 - Zona B - <i>Slice view</i> a 14 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5</i> e <i>Google Earth Pro</i> ). .....	78
Figura 57 - Zona B - <i>Slice view</i> a 18 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5</i> e <i>Google Earth Pro</i> ). .....	79
Figura 58 - Zona C - <i>Slice view</i> a 1 metro de profundidade ( <i>EKKO Project v.5</i> e <i>Google Earth Pro</i> ). .....	80
Figura 59 - Zona C - <i>Slice view</i> a 3.5 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5</i> e <i>Google Earth Pro</i> ). .....	81
Figura 60 - Zona C - <i>Slice view</i> a 4 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5</i> e <i>Google Earth Pro</i> ). .....	81
Figura 61 - Zona C - <i>Slice view</i> a 7 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5</i> e <i>Google Earth Pro</i> ). .....	82

Figura 62 - Zona D - <i>Slice view</i> a 1.5 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5 e Google Earth Pro</i> ).	84
Figura 63 - Zona D - <i>Slice view</i> a 2 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5 e Google Earth Pro</i> ).	84
Figura 64 - Zona D - <i>Slice view</i> a 3 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5 e Google Earth Pro</i> ).	85
Figura 65 - Zona D - <i>Slice view</i> a 4 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5 e Google Earth Pro</i> ).	85
Figura 66 - Zona D - <i>Slice view</i> a 4.5 metros de profundidade ( <i>EKKO Project v.5 e Google Earth Pro</i> ).	86
Figura 67 - Mapa geral de GPR e localização aparente das estruturas (Profundidades das <i>slice views</i> usadas: Zona A - 9m de profundidade; Zona B - 1.5m de profundidade; Zona C - 4m de profundidade; Zona D - 2.5m de profundidade) ( <i>EKKO Project v.5 e Google Earth Pro</i> ).	88
Figura 68 - Esquema da grelha pré-definida com um espaçamento entre linhas de 0.10m (face A do bloco).	97
Figura 69 - Esquema de aquisição com um espaçamento de 0.10 m entre linhas numa das colunas.	97
Figura 70 - Modelo fotogramétrico do Bloco nr.4 (ref.2064) da pedreira de Eduardo Marques & Rosa Lda.	98
Figura 71 - Mapa colorido de velocidades baseado nos valores medidos através do ensaio de ultrassons na face A do bloco.	99
Figura 72 - Um dos perfis / radargramas adquiridos na face A (coordenadas x=0; y=2).	100
Figura 73 - Plano de ultrassons em profundidade (A) e plano de GPR em profundidade (B) da mesma face do bloco (face A), ambos a 5cm de profundidade. (i) Grão mais fino, (ii) Grão mais grosseiro.	101
Figura 74 - Face A do bloco usado para o estudo.	102
Figura 75 - Modelo 3D representativo do bloco criado através da combinação especial dos perfis GPR obtidos e processados.	104

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo de frequências de várias antenas, aplicações práticas, e profundidades médias de alcance (adaptado de SENSORS AND SOFTWARE INC., 2005). .....	12
Tabela 2 - Propriedades eléctricas de alguns meios (ELTESTA, 2003).....	13
Tabela 3 - Parâmetros usados na aquisição dos perfis de GPR. A velocidade do meio escolhida corresponde à velocidade padrão do equipamento usado para “solo húmido”. .....	25
Tabela 4 - Tabela de correspondência entre os valores medidos e as estruturas interpretadas.....	102





## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1 Objectivos

A dissertação apresentada teve vários objectivos, intrinsecamente ligados à questão de este ser um equipamento novo no Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra (DCT-UC): (1) “novo”, por ter sido adquirido no final do ano anterior (2017); (2) “novo”, por ser o primeiro equipamento GPR adquirido por esta instituição, e ainda não haver experiência por parte da comunidade do DCT-UC no uso deste tipo de equipamento.

Assim, os objectivos desta dissertação foram:

- (1) - Testar e familiarizarmo-nos com o equipamento;
- (2) - Explorar ao máximo dentro do tempo disponível as potencialidades do equipamento nas mais variadas áreas científicas e técnicas, no que toca à sua aplicabilidade;
- (3) - Comparar a sua potencialidade perante outros métodos, para a resolução de determinados problemas/questões práticas;
- (4) - Familiarizarmo-nos com a aquisição e processamento dos dados de GPR, definindo uma metodologia básica para esses fins, adaptada a cada caso específico;
- (5) - Permitir que o mestrando adquira o maior conhecimento e experiência possíveis no uso deste tipo de equipamentos, contribuindo assim para um enriquecimento académico/científico do DCT-UC nesta área e neste método geofísico em particular;

- (6) - Usar o equipamento/método geofísico como meio para promover parcerias de investigação científica e/ou estudos de âmbito mais técnico e aplicado com outras entidades.

## 1.2 Estrutura geral da dissertação

Esta dissertação encontra-se estruturada em 4 capítulos. O presente capítulo – **Introdução (I)** – aborda as questões introdutórias tais como os objectivos da dissertação, a sua forma de organização, uma descrição do método geofísico utilizado para estes estudos e por fim os princípios teóricos do mesmo. O segundo capítulo – **Casos de estudo (II)** – é o capítulo onde se apresentam em forma de artigo ou relatório os vários estudos realizados, com os respectivos agradecimentos e referências bibliográficas específicos de cada um, a saber:

**1 - Utilização de GPR no reconhecimento de estruturas geológicas em zonas costeiras**, artigo apresentado no “X Congresso Nacional de Geologia” (2018, Ponta Delgada);

**2 - Utilização de GPR no reconhecimento de estruturas arqueológicas no Convento de Cristo – Tomar**, trabalho que poderá no futuro resultar numa parceria com as entidades responsáveis por este espaço histórico-cultural;

**3 - Prospecção arqueológica de uma villa romana com recurso a GPR em Vale de Mouro – Mêda**, trabalho que resultará num estudo/artigo e em possíveis trabalhos futuros em parceria com a UTAD e a Câmara Municipal de Mêda;

**4 - Relatório técnico dos trabalhos de prospecção geofísica para mapeamento de estruturas subterrâneas pelo método de GPR na vila de Luso**, pedido pela Câmara Municipal da Mealhada, afim de orientar os trabalhos técnicos de resolução de um aluimento de terras junto ao Pavilhão Gimnodesportivo de Luso (Abril de 2018);

**5 - Uso de métodos não destrutivos para análise estrutural de materiais pétreos – Caracterização por ultrassons e GPR**, artigo escolhido para apresentação oral e publicação na revista online do “4<sup>rd</sup> World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium” (2018, Praga – República Checa).

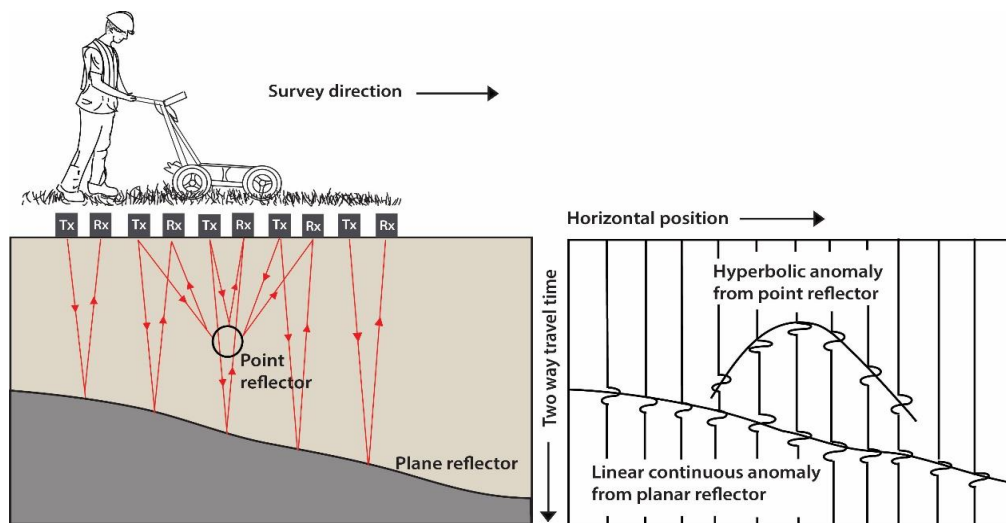
No terceiro capítulo – **Conclusões e recomendações gerais (III)** – são expostas as principais conclusões gerais da dissertação e sugeridas recomendações para investigações futuras, bem como uma síntese autocrítica do trabalho realizado. O último capítulo engloba as **Referências bibliográficas (VII)** gerais deste trabalho.

## **1.3 Radar de Penetração de Solo - GPR**

### **1.3.1 Descrição do método/equipamento**

O GPR – “Ground Probing Radar” ou “Ground Penetrating Radar” (em português Georradar ou Radar de Penetração no Solo) – é um método geofísico electromagnético (EM) relativamente recente, capaz de detectar remotamente objectos, materiais e/ou estruturas independentemente da sua natureza, que estejam enterrados no solo ou sob uma estrutura/matéria opaca, o que permite desta forma planificar mais eficazmente trabalhos nas mais variadas áreas, tais como Geologia, Engenharia, Geotecnia, Arqueologia, Ambiente e Ordenamento, Exploração de Recursos, Ciências Forenses, etc., sem criar impactos físicos na área desses trabalhos, poupando assim tempo e recursos associados a esses mesmo impactos.

O método GPR é um método geofísico EM activo de aquisição e registo de informação em profundidade do subsolo. Funciona através do envio de um pequeno impulso de energia electromagnética em profundidade ao longo do subsolo, com uma determinada frequência, a partir de uma antena emissora (TX), e regista a intensidade e o tempo do retorno desse mesmo impulso que chega à antena receptora (RX). Após penetrarem no subsolo e ao longo do seu trajecto entre a antena TX e RX, os impulsos electromagnéticos sofrem fenómenos de reflexão, refacção, atenuação e absorção, estes intrinsecamente ligados às propriedades de condutividade eléctrica, permissividade dieléctrica e permeabilidade magnética dos materiais atravessados por essa mesma onda/impulso EM (Figura 1).



**Figura 1** - Esquema da aquisição de dados pelo método de reflexão com equipamento GPR e correspondente radargrama de ondas (<http://scantech.ie/scantech-about-gpr.html>, acedido em 27 de Maio de 2018).

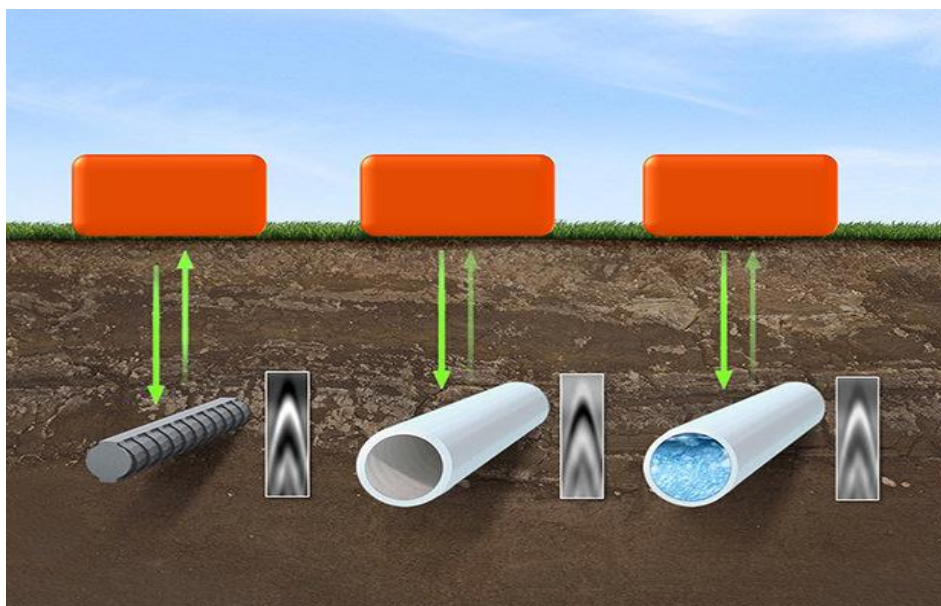
Desta forma, o tempo de envio e de retorno de um sinal em profundidade (velocidade de propagação da onda no meio) indica-nos a profundidade aparente a que se encontra determinado alvo/descontinuidade entre materiais, e o contraste na amplitude/intensidade e aspecto da reflexão desse sinal nesse ponto indica-nos as diferenças entre as propriedades dieléctricas entre esses meios materiais, estruturas e objectos (quanto maior o contraste entre eles, maior é a quantidade de energia electromagnética reflectida nesse ponto) (Figura 2).

Posto isto, são vários os factores a considerar que influenciam e condicionam um estudo com recurso ao equipamento de georradar, a saber:

» **Frequência da antena a usar** – a frequência da antena usada influencia a profundidade e a resolução espacial da investigação. Altas frequências (cerca de 1000 MHz) permitem uma maior resolução de investigação e a detecção de objectos/estruturas mais pequenas (na ordem dos centímetros), mas pelo contrário estão limitadas a uma profundidade média de investigação de cerca de 60 centímetros. Inversamente, baixas frequências (cerca de 50 MHz) permitem uma maior profundidade média de investigação (até por volta dos 30 metros), mas estão limitadas a uma menor resolução de investigação, detectando apenas objectos com dimensões maiores, da ordem dos metros.

» **Propriedades electromagnéticas dos materiais** – estas influenciam principalmente a velocidade de propagação das ondas e a sua intensidade de reflexão. Em certos casos podem também influenciar a profundidade de investigação, visto que devido a estas propriedades alguns materiais tendem a absorver, dissipar ou a atenuar o sinal, fazendo assim com que parte dele não seja reflectido ou que não chegue sequer à profundidade que seria espectável (por exemplo os metais, que são considerados reflectores absolutos, e que não permitem que o sinal EM os atravesse. Assim, qualquer objecto que esteja por baixo de um outro objecto metálico não é observado, pois nenhum sinal chega até ele).

» **Teor em água presente nos materiais** – A água influencia bastante o percurso do sinal EM de GPR. Materiais com uma constante dieléctrica alta reduzem a velocidade da onda, e não permitem que esta tenha a devida penetração. Os materiais com alta condutividade rapidamente atenuam o sinal. A presença de água nos solos/materiais faz aumentar drasticamente as suas constantes dieléctricas, atenuando ou ocultando reflectores, influenciando a profundidade de penetração das ondas EM ou até mesmo induzindo em erro a profundidade a que poderão estar realmente esses reflectores, entre outros problemas.



**Figura 2** - Aspecto visual da reflexão de uma onda EM dependendo do tipo e das propriedades dieléctricas de cada um dos materiais atingidos - da esquerda para a direita: (1) vara de aço, (2) tubo de PVC oco, (3) tubo de PVC com água no interior (<https://www.geophysical.com/whatisgpr>, acedido em 27 de Maio de 2018).

Toda esta dinâmica do envio de sinais EM e recepção dos mesmos pelas antenas e posterior transformação destes sinais em dados informáticos é coordenada por uma unidade de controlo. Para além de transformar os dados da aquisição em dados digitais, a unidade de controlo permite também armazenar esses dados e visualizá-los em tempo real durante a aquisição na forma de sequências 2D de perfis, designados por “radargramas”.

Da unidade de controlo retiramos os dados digitais (ficheiros informáticos) originais que resultaram da aquisição. Esses dados serão então visualizados e interpretados directamente ou após uma série de processamentos em laboratório com recurso a um computador e a um software especializado para esse efeito que nos permite corrigir anomalias, associar perfis 2D de modo a criar modelos 3D da área de aquisição, realçar reflectores, entre muitas outras possibilidades, de modo a aproximar o modelo o mais possível à realidade.

Tal como outras técnicas geofísicas, a performance do GPR é específica para cada local, e o seu uso pode não ser viável em determinadas áreas/situações. Devido a isso, as condições do subsolo, acessos, composição dos materiais e dimensão dos objectos devem ser tidas em conta.

- (1) As anomalias de uma aquisição de GPR assentam no contraste detectável entre as propriedades eléctricas dos objectos alvo e dos materiais envolventes. Se não existe contraste entre estes, não será evidente qualquer anomalia.
- (2) O sinal EM do GPR não é capaz de atravessar materiais altamente condutores (como por exemplo metais, solos húmidos ou materiais saturados em água salgada, ou qualquer outro fluído altamente condutor).
- (3) O processamento de dados GPR e a sua interpretação pode ser complicado e um pouco ambíguo. Devido a isso o tratamento destes dados geofísicos deve ser feito por pessoal especializado neste tipo de métodos.
- (4) O GPR não é um método que sirva para obter medidas absolutas, isto é, serve para localizar áreas saturadas em água mas não o seu teor exacto, por exemplo.
- (5) O GPR é um método geofísico interpretativo, baseado na identificação de reflectores, que poderão não corresponder a um único e determinado objecto. Deste modo é

necessário correlacionar e complementar com outras informações ou mesmo com outros métodos físicos mecânicos (como por exemplo sondagens) e geofísicos (outros métodos de prospecção).

### **1.3.2 Evolução do método/equipamento GPR**

Entre 1900 – 1950 existiu uma enorme quantidade de estudos sobre a propagação das ondas de rádio, e apesar de em muitos deles se referir a possibilidade dessas ondas EM serem usadas para prospectar a subsuperfície da Terra, não existem trabalhos acerca do êxito da aplicação desta técnica para esse fim (ANNAN, 2002).

Entre 1950 – 1955, EL SAID (1956) (citado em ANNAN,2002) tentou pela primeira vez usar sinais de radiofrequência para medir a profundidade de um nível aquífero.

Surge entre 1955 – 1960 a observação por parte da USAF (*United States Air Force*) de erros de altimetria associados às medições de radar, durante a tentativa de aterrar numa calote polar da Gronelândia (WAITE & SCHMIDT, 1961; citados em ANNAN, 2002). Desta forma observou-se a penetração e reflexão das ondas em materiais subsuperficiais, criando assim o interesse na investigação e desenvolvimento de uma técnica de ecolocalização por ondas de radiofrequência de subsuperfícies geladas.

Nos anos entre 1960 – 1970 continuou a usar-se este método principalmente para estudos em glaciares (BAILEY *et al.*, 1964; BENTLEY, 1964; WALFORD, 1964; citados em ANNAN, 2002) (Figura 3). Ao mesmo tempo, à medida que os anos avançam, são realizadas cada vez mais pesquisas sobre a utilização ondas de radiofrequência em materiais geológicos, sendo as principais levadas a cabo por COOK (1973) em minas de carvão, e por HOLSER *et al.* (1972), UNTERBERGER (1978) e THIERBACH (1973) (citados em ANNAN, 2002) em depósitos salinos subterrâneos.



**Figura 3** - Sistema GPR usado na prospecção de potenciais vias de instalação de pipelines no Canadá (1975) (ANNAN, 2002).

Com o planeamento do programa espacial *Apollo* e a necessidade de estudar a subsuperfície lunar, os trabalhos de ANNAN (1973) acrescentaram alguns desenvolvimentos a esta técnica.

Com o crescente desenvolvimento e conhecimento do método, este evoluiu, dando origem a empresas de fabrico e venda de equipamentos geofísicos, especialistas no método de georradar, como é o caso da *Geophysical Survey Systems Inc.* (MOREY, 1975, citado em ANNAN 2002).

Até 1980 o método de radar de penetração de solo evoluiu muito, surgindo um inúmero conjunto de aplicações científicas e práticas com recurso a este método. Ainda assim, segundo os relatórios do *Geological Survey of Canada* desta época, era um método difícil de usar, devido ao seu tamanho, peso e consumo energético, o que o tornava num método muito pouco prático. Desta forma, e entre os anos de 1980 – 1985, o método de radar de penetração de solo foi um pouco posto de parte, perdendo assim interesse para outros métodos geofísicos. Assim, o optimismo inicial no potencial do uso desta técnica deu lugar a uma descrença no método, muito devido aos problemas anteriormente referidos, e também devido a muitos ambientes geológicos não serem favoráveis à utilização deste método devido às suas propriedades electromagnéticas (ANNAN, 2002).



Depois de um período de descrença, o método de GPR volta a tornar-se um método cada vez mais usado e nas mais variadas áreas. A evolução na tecnologia e no processamento dos dados fez com que os prós do método fossem amplificados, e os contras fossem reduzidos ou eliminados, fazendo com que cada vez mais se tornasse num método fácil de usar e cada vez mais versátil. A evolução dos computadores e do cálculo computadorizado deu origem a novos algoritmos, que permitem uma melhor e mais correcta filtração dos dados obtidos, dando oportunidade a que este método se tornasse cada vez mais fiável.

Entretanto, desde 1995 até ao ano 2000 da evolução dos computadores e do armazenamento de dados, criou-se uma rotina de aquisição de dados em grelha, que permite rapidamente criar mapas 2D e 3D das áreas estudadas, facilitando muito o seu estudo e sua interpretação (GRASMUECK, 1996; ANNAN *et al.*, 1997; citados em ANNAN, 2002).

Hoje em dia o método de GPR (tendo sempre em conta algumas das suas limitações que se prendem principalmente com as propriedades dieléctricas dos materiais), é extremamente fiável, e permite que qualquer grupo de investigação minimamente familiarizado com os conceitos básicos de geofísica possa usar este método e obter resultados bastante interessantes e que facilmente podem ser interpretados por um maior número de pessoas, em alguns casos mesmo até durante a própria aquisição *in situ* (Figura 4). Além disso, presume-se que com o continuar da evolução dos componentes electrónicos, capacidade de processamento e armazenamento de dados e também num maior conhecimento sobre as propriedades físicas inerentes a este método, rapidamente se torne num método bastante usado nas mais variadas situações e para uma infinidade de casos, quer de ordem mais técnica (reconhecimento de estruturas, plumas de contaminação, etc), quer de ordem mais científica (mapeamento de estruturas geológicas, prospecção de níveis aquíferos, entre muitos outros casos).



**Figura 4** - Equipamento GPR *Noggin Smart Cart* - *Sensors & Software Inc.* (ANNAN, 2002).

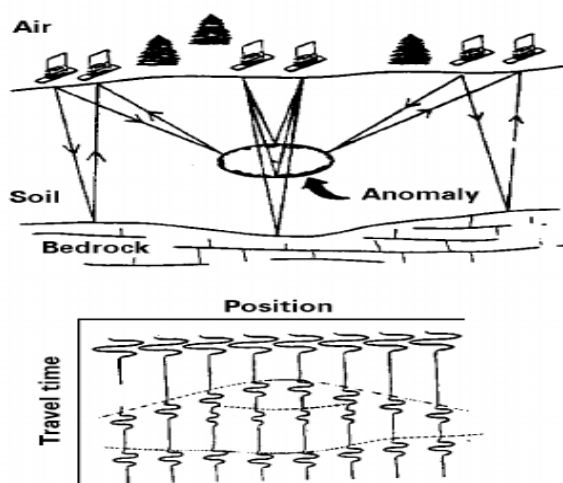
## 1.4 Princípios teóricos

Um sistema GPR é constituído normalmente por: (1) fonte de alimentação, (2) unidade de aquisição, (3.1) par de antenas bi-estáticas transmissora (TX) e receptora (RX) (Figura 5) ou em alguns casos (3.2) uma antena monoestática (TX/RX).



**Figura 5** - Equipamento GPR e os seus componentes (adaptado de <https://www.sensoft.ca>, acedido em 11 de Setembro de 2018).

Segundo os trabalhos de JOL (2008) e descrito por LOURENÇO *et al.* (2012) temos que, com recurso a um gerador que emite impulsos de ondas electromagnéticas a partir de uma antena TX, essas ondas são difundidas a partir dessa mesma antena para o meio/material de estudo, onde se propagam com uma velocidade determinada principalmente pela permissividade eléctrica do meio ( $\epsilon$ ). Ao encontrarem no seu percurso objectos ou limites entre meios com diferentes propriedades eléctricas, sofrem desvios por refacção, reflexão e difracção. Parte dessa radiação emitida retorna à superfície, onde é captada por uma antena RX, e armazenada na forma de dados informáticos na unidade de controlo (Figura 6).



**Figura 6** - Esquema de aquisição de dados por GPR (HRUSKA, 1999).

A aplicação do GPR para visualizar o interior das estruturas/materiais baseia-se na relação entre a velocidade das ondas e as propriedades dos materiais. Assim como no método sísmico, os dados que são obtidos das estruturas resultam da interpretação dos intervalos de tempo que as ondas demoram a atravessar um meio, desde que são emitidas até serem detectadas, depois de reflectidas nas discontinuidades que encontrar ao longo do seu percurso.

A velocidade de propagação das ondas electromagnéticas é representada em metro por nanossegundo (m/ns).

Os principais factores que influenciam a profundidade de alcance das ondas emitidas pelo GPR são a frequência das antenas usadas (Tabela 1) os parâmetros físicos do meio (condições geológicas do local). Desta forma, antes de se efectuar qualquer estudo, temos que definir quais os objectivos do levantamento (dimensões dos alvos, as

profundidades a que podemos encontrá-los e que resolução se pretende). Quanto maior a frequência das ondas emitidas, maior será a definição das imagens que resultam dos dados adquiridos, mas, pelo contrário, menor é a penetração (profundidade alcançada), e vice-versa.

**Tabela 1** - Exemplo de frequências de várias antenas, aplicações práticas, e profundidades médias de alcance (adaptado de SENSORS AND SOFTWARE INC., 2005).

Frequência	Aplicações	Profundidade de penetração ideal aproximada (m)
1000 MHz	Inspecções em cimento, identificação de vazios, arqueologia	1,25
500 MHz	Engenharia, meio ambiente, identificação de vazios, arqueologia	2,5
250 MHz	Geologia, engenharia, mineração, meio ambiente, arqueologia	5
100 MHz	Geologia, mineração, meio ambiente, arqueologia	10
50 MHz	Geologia	20

A velocidade das ondas electromagnéticas ( $v$ ) (1) em qualquer meio é função da velocidade da luz no vazio ( $c= 0,3 \text{ m/ns}$ ), da permitividade relativa/constante dieléctrica ( $K$ ) (valores tabelados para cada tipo de material) (Tabela2), da permeabilidade magnética relativa ( $\mu$ ), e do factor de perda ( $P$ ), sendo que  $P$  é dado por  $P= \sigma/\omega\epsilon$ , sendo  $\sigma$  a condutividade do meio,  $\omega=2\pi f$  a frequência angular, e  $\epsilon=K\epsilon_0$  a permitividade do meio, sendo  $\epsilon_0$  a permitividade do vazio ( $\epsilon_0=8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ).

$$(1) v = \frac{c}{\sqrt{\frac{K\mu}{2} (1 + \sqrt{1 + P^2})}}$$

Para materiais não magnéticos ( $\mu=1$ ), com factores de perda baixos ( $P \approx 0$ ), como areias ou outros solos comuns, a velocidade das ondas electromagnéticas (1) reduz-se a (2):

$$(2) v = \frac{c}{\sqrt{\frac{K\mu}{2} (1 + \sqrt{1 + P^2})}}$$

As equações (1) e (2), tendo em conta os valores dos parâmetros das constantes dieléctricas típicos dos solos, mostram que a velocidade de propagação das ondas electromagnéticas no solo é menor que no ar.

Existem vários tipos de aquisição, podendo o arranjo espacial das antenas ser alterado, consoante o tipo de estudo que queremos fazer. Na maioria das vezes, e também em todos os casos de estudo deste trabalho, a técnica utilizada foi a de reflexão, que consiste em mover as antenas ao longo da superfície, em simultâneo (TX atrás e RX à frente). Para pequenas distâncias entre o TX e RX em relação à profundidade total, o tempo de viagem das ondas pode ser convertido em profundidade  $d$  através do produto da velocidade média de propagação da onda EM ( $v$ ) no meio estudado (Tabela 2), por metade do tempo de percurso  $t$  (Figura 6).

**Tabela 2** - Propriedades eléctricas de alguns meios (ELTESTA, 2003).

Material	Constante dieléctrica/ Permitividade relativa ( $K$ )	Condutividade (mS/m)	Velocidade (m/ns)	Atenuação (dB/m)
Ar	1	0	0,3	0
Água destilada	80	0,01	0,033	0,002
Água doce	80	0,5	0,033	0,1
Água do mar	80	30000	0,01	1000
Areia seca	3 - 5	0,01	0,15	0,01
Areia saturada	20 - 30	0,1 - 1,0	0,06	0,03 - 0,3
Calcário	4 - 8	0,5 - 2	0,12	0,4 - 1
Xisto	5 - 15	1 - 100	0,09	1 - 100
Lodo	5 - 30	1 - 100	0,07	1 - 100
Argila	4 - 40	2 - 1000	0,06	1 - 300
Granito	4 - 6	0,01 - 1	0,13	0,01 - 1
Sal (seco)	5 - 6	0,01 - 1	0,13	0,01 - 1
Gelo	3 - 4	0,01	0,16	0,01

Sabendo que entre TX e RX existe uma certa distância  $x$  (*offset*), a equação que traduz isto é (3):

$$(3) \quad d = 0,5(v^2 t^2 + x^2)^{1/2}$$

Com estas equações e com os parâmetros mencionados anteriormente, é possível criar imagens em profundidade através dos dados adquiridos. Recorrendo a softwares específicos podemos processar esses dados de modo a tornar mais visíveis as anomalias EM presentes ao longo dos perfis.

CASOS DE ESTUDO COM UTILIZAÇÃO DE GPR  
Reconhecimento e caracterização de estruturas geológicas, arqueológicas e estruturas  
subterrâneas





## **CAPÍTULO 2 – CASOS DE ESTUDO**

Neste capítulo apresentam-se os vários casos de estudo com recurso a um equipamento de GPR, realizados durante a construção deste trabalho. Desta forma, ao fazer vários trabalhos e nas mais variadas áreas, pretendeu-se explorar o potencial deste equipamento e dotar o mestrando da experiência necessária para a realização de futuros trabalhos.



## **2.1 CASO DE ESTUDO 1**

### **UTILIZAÇÃO DE GPR NO RECONHECIMENTO DE ESTRUTURAS GEOLÓGICAS EM ZONAS COSTEIRAS**

**J. Carvalho<sup>1</sup>, F. Figueiredo<sup>2</sup>, J. Duarte<sup>3</sup>, Ana M. Castilho<sup>4</sup>**

(1) Departamento de Ciências da Terra da UC, Portugal, jose.carvalho.geo@gmail.com

(2,4) Centro de Geociências, Departamento de Ciências da Terra da UC, Portugal,  
fpedro@dct.uc.pt, amcastil@dct.uc.pt

(3) IQGeo – Serviços, Lda. e Centro de Geociências da UC, Portugal,  
joao.aduarte@iqgeo.pt



### 2.1.1 Resumo

O objetivo deste estudo foi reconhecer e avaliar o desenvolvimento vertical e lateral de estruturas geológicas em ambientes costeiros com o uso de GPR (Radar de Penetração Terrestre). Foi escolhida uma secção quebrada, devido a problemas de acessibilidade, com um comprimento de cerca de 7 quilómetros. Esta secção, perto da Lagoa das Braças (Tocha, Cantanhede-Portugal) tem uma direção média de ESE para WNW. A aquisição de dados foi feita pelo método de reflexão, utilizando dois sistemas de antenas com uma frequência de 50 MHz e 100 MHz cada par, respectivamente. Os dados adquiridos foram processados e obteve-se uma secção GPR que alcançou uma profundidade média de investigação de cerca de 20 metros. Neste radargrama é possível reconhecer várias estruturas geológicas que podem ser interpretadas como possíveis descontinuidades e estruturas sedimentares. Em relação a estas últimas estruturas, os seus limites verticais e horizontais são claramente identificáveis e podem ser relacionados com os logs de furos de sondagens desta área. Para o objectivo proposto, o método e a metodologia provaram ser eficazes, propondo em estudos futuros a integração destes dados com outros obtidos pelo mesmo método e por outros métodos e metodologias que permitam uma identificação e caracterização da natureza dessas estruturas.

**Palavras-chave:** Reconhecimento de estruturas geológicas, ambientes costeiros, GPR (Radar de Penetração no Solo), processamento de dados, perfis de GPR (radargrama).

### **2.1.2 Introdução**

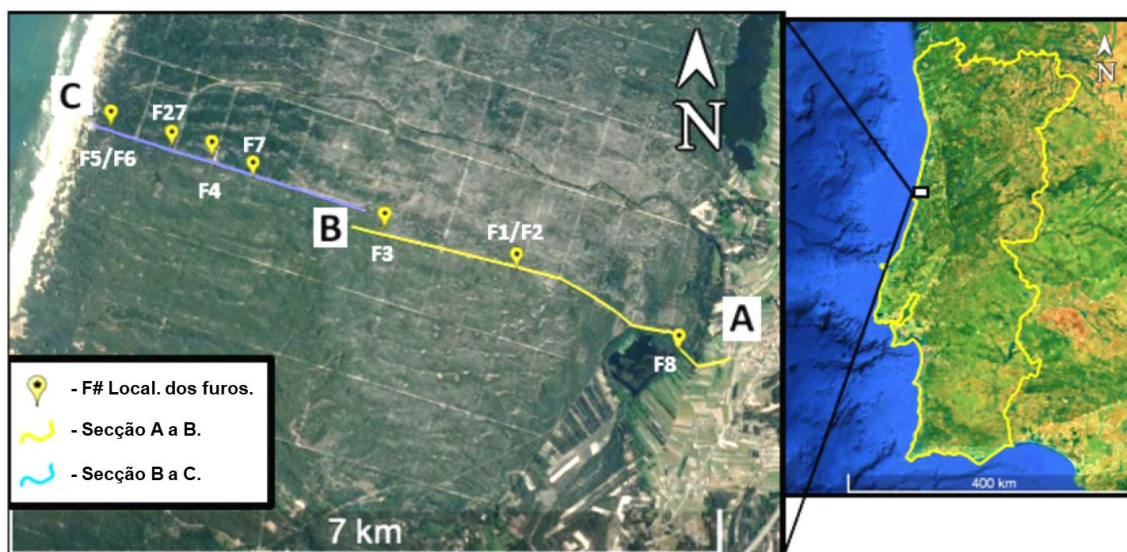
O método do radar de penetração terrestre (GPR) é um método geofísico electromagnético de alta frequência, que se baseia na detecção das propriedades dielétricas dos materiais (materiais geológicos neste caso), que condicionam o padrão da onda gerada pelo equipamento. Através deste método é possível obter rapidamente imagens com algum detalhe de perfis em profundidade, e com elas fazer interpretações e estudos sobre a evolução lateral e/ou vertical de uma determinada estrutura. Como todos os métodos, ele também tem suas limitações, que estão intrinsecamente relacionadas com as propriedades de propagação de ondas eletromagnéticas em materiais. Dadas as suas características específicas, foi o método escolhido para realizar este estudo experimental.

### **2.1.3 Objectivos**

Este trabalho experimental teve como objectivos avaliar as potencialidades do equipamento e permitir familiarizarmo-nos com ele, o reconhecimento de estruturas geológicas em ambientes costeiros tendo em conta as suas características específicas, avaliar o desenvolvimento vertical e lateral destas mesmas estruturas assim como a sua interpretação geológica e estrutural, comparar com trabalhos existentes na área de estudo para calibração e validação de resultados obtidos e desenvolver uma metodologia fiável para a aquisição e processamento dos dados neste tipo de ambientes.

### **2.1.4 Localização do estudo e contexto geológico**

O estudo foi realizado perto das aldeias de Tocha e Quiaios-Cantanhede, Portugal (Figura 7). É uma área costeira onde existem várias lagoas, cuja gênese é muitas vezes relacionada com a recente evolução do litoral (ALMEIDA, 1995; CARVALHO, 1952; BARBOSA *et al.*, 1988; DIAS *et al.*, 2000).



**Figura 7** - Localização dos perfis GPR adquiridos para este trabalho experimental e localização dos furos de sondagem usados para comparação com os dados dos radargramas – Quiaios, Tocha (adaptado de *Google Earth Pro*, 2018).

Em grande parte desta área temos materiais arenosos recentes com idade provável Plistocénica superior a Holocénica (de acordo com CARVALHO, 1964; DAUVEAU, 1980; RODRIGUES *et al.*, 1991; SOARES, 1993; citados por CASTILHO, 2008). Assim, de Este para Oeste segundo BARBOSA *et al.* (1988) e ALMEIDA (1995) temos areias hidro-eólicas (de granulometria da areia fina, com fracção argilosa inferior a 10%, geralmente bem calibradas, consideradas de origem eólica com posterior transporte aquático), seguidas de campos dunares (sequência de corpos dunares conjugados, com uma orientação aparente WNW-ESE quase perpendicular à linha de costa, ocupando a maior parte da área estudada e formando um corredor ao longo de toda a costa, com uma largura total de 3 a 5 km e de orientação aproximada N-S) e que terminam num estreito cordão dunar (de material arenoso de origem eólica, que constitui o cordão dunar primário) que dá por fim lugar a areias de praia (areias grosseiras e areão que apresentam um contacto estreito com o mar) (Figura 8).



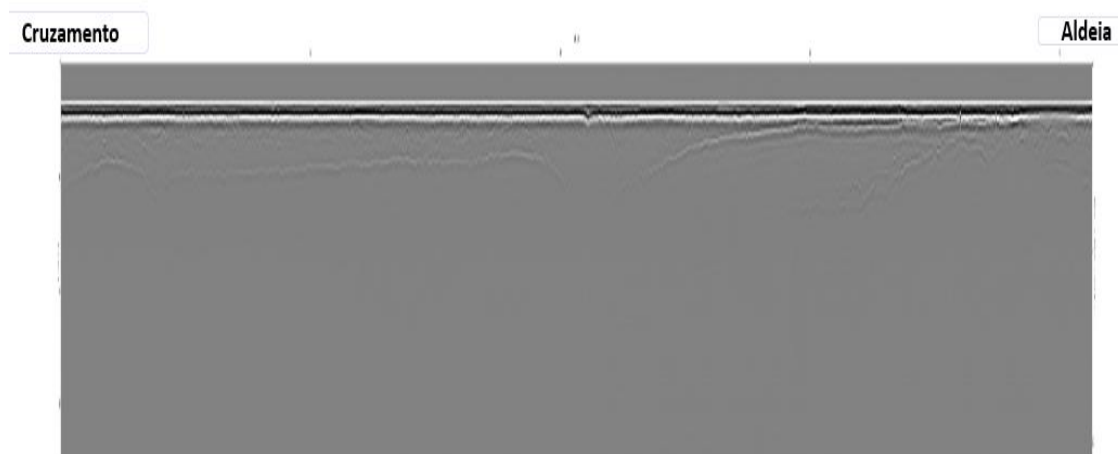


**Tabela 3** - Parâmetros usados na aquisição dos perfis de GPR. A velocidade do meio escolhida corresponde à velocidade padrão do equipamento usado para “solo húmido”.

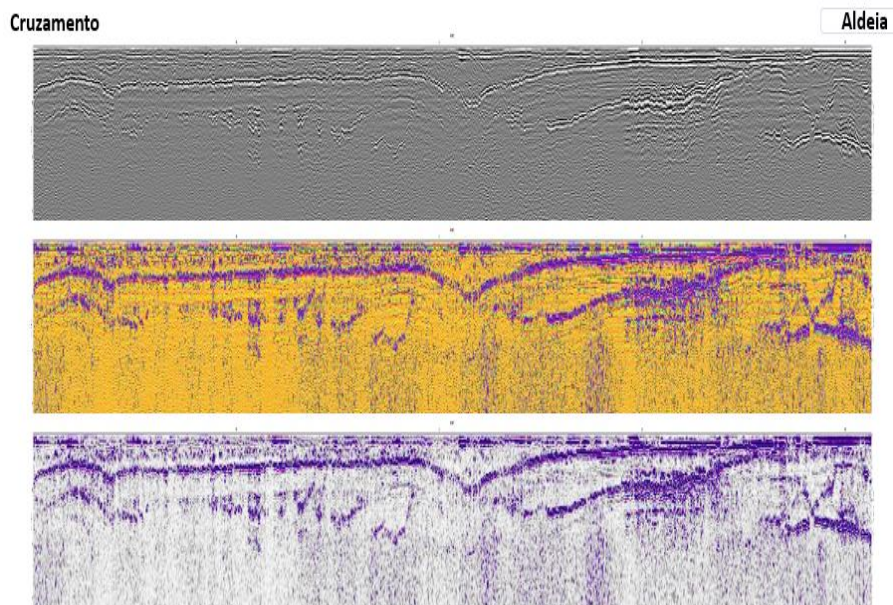
<u>Parâmetros de Aquisição</u>	<u>Secção A-B-C 50 MHz</u>	<u>Secção A-B 100 MHz</u>
<b>Método</b>	Reflecção	
<b>Modo de aquisição e trigger</b>	Contínuo, odómetro	
<b>Tipo de antenas</b>	Bi-estáticas, não blindadas	
<b>Frequência das antenas</b>	50 MHz	100 MHz
<b>Geometria / espaçamento entre antenas</b>	Common offset: 1 m	Common offset: 40 cm
<b>Janela temporal</b>	1000 ns	350,4 ns
<b>Velocidade do meio</b>	0,100 m/ns	
<b>Espaçamento entre “disparos”</b>	50 cm	25 cm
<b>Stacking</b>	16	32

### 2.1.6 Processamento de dados de GPR

Os dados adquiridos (Figura 9) foram processados no software REFLEXW® ver.7.5.9 da SANDMEIER-GEO®. Foi aplicado um modelo de processamento básico nos radargramas tendo como base as metodologias propostas por ANNAN (2003) e CASSIDY (2009). Desta forma começou por aplicar-se uma correcção geográfica e topográfica aos perfis seguida da subtracção DC-shift, ajuste ao tempo zero, filtro dewow, remoção do background, filtro passa-banda, função ganho aplicada manualmente segundo o eixo dos Y (Figura 10), e por fim o ajuste topográfico do radargrama.



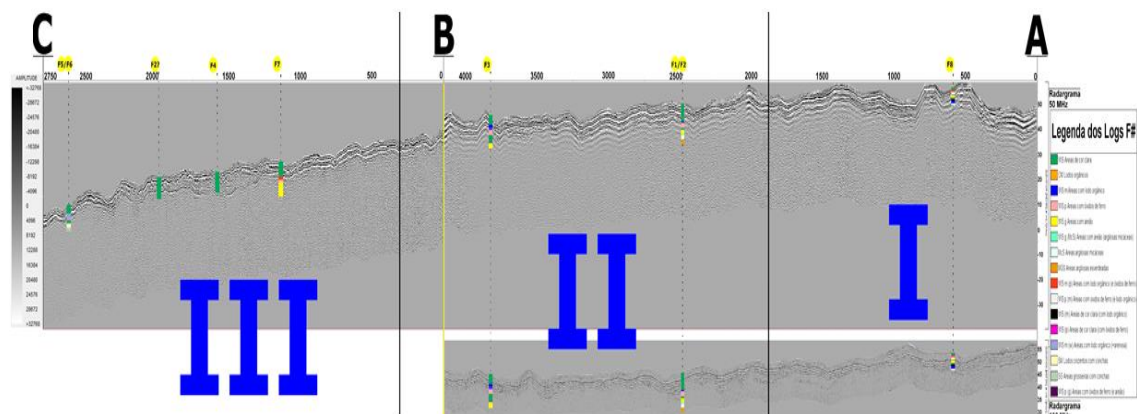
**Figura 9** - Radargrama “raw” da secção A-B, da antena de 100MHz.



**Figura 10** - Radargramas da secção A-B com a antena de 100MHz, obtidos após processamento, com várias combinações coloridas.

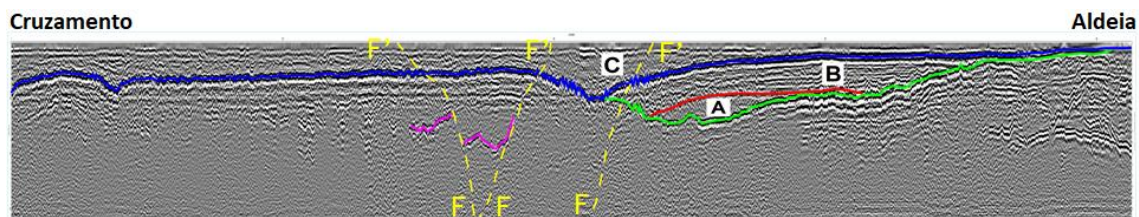
### 2.1.7 Resultados

Após o processamento dos dados, os radargramas obtidos foram comparados com os dados dos furos de sondagem baseados nos trabalhos de CASTILHO (2008) nesta área. Para isso foram escolhidos os furos mais próximos das secções GPR estudadas (Figura 11).

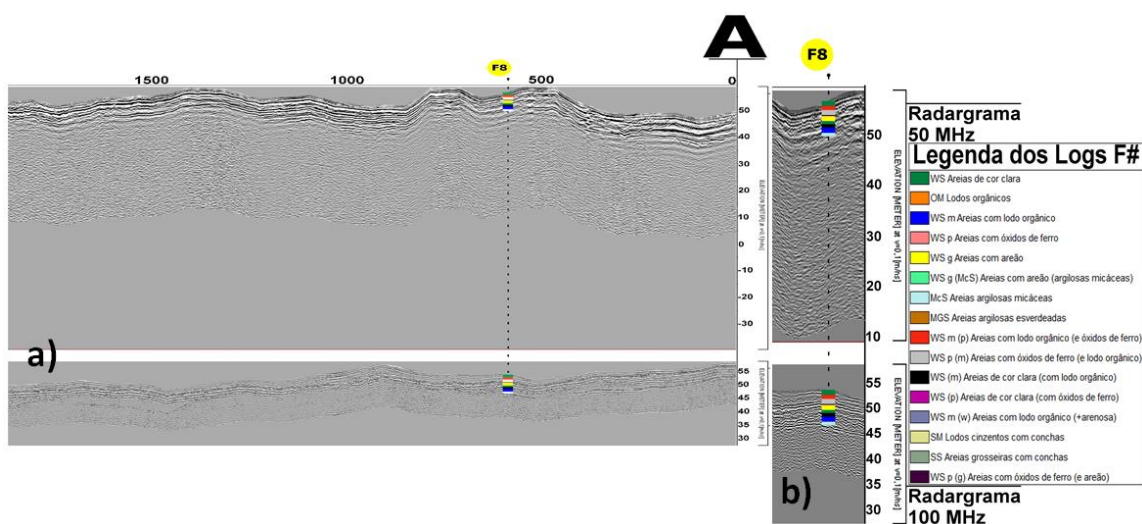


**Figura 11** - Esquema representativo do conjunto dos radargramas adquiridos: A,B,C – Secções adquiridas, com quebra do perfil em B; I,II,III – Divisões criadas nos radargramas para facilitar a visualização do mesmo (ver ANEXO I, II, III e IV para visualização mais pormenorizada e completa).

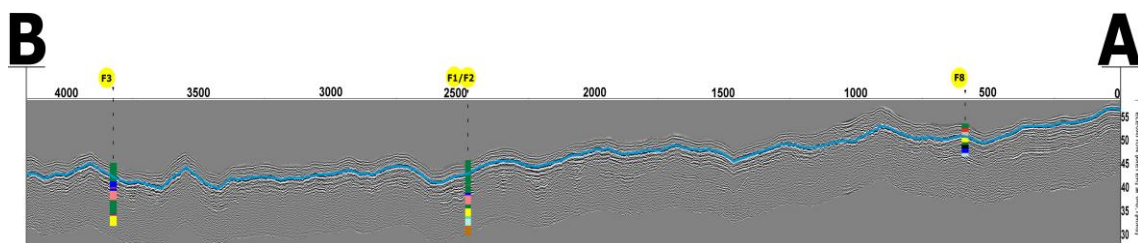
CASOS DE ESTUDO COM UTILIZAÇÃO DE GPR  
Reconhecimento e caracterização de estruturas geológicas, arqueológicas e estruturas  
subterrâneas



**Figura 12** - Radargrama de 100MHz (exagero vertical 2x e horizontal 1.5x): A,B,C – Camadas geológicas; Traço “cheio” – Principais horizontes reflectores; Tracejado – Falhas prováveis.



**Figura 13** - a) Radargrama da divisão I (50 e 100MHz); b) Ampliação do local da sondagem F8.



**Figura 14** - Radargrama de 100 MHz da secção A-B, com hipotético nível freático assinalado a azul.

### **2.1.8 Conclusões**

Baseando-nos nos dados anteriormente apresentados, podemos concluir que os resultados da aquisição e o respectivo processamento dos perfis GPR provaram-se satisfatórios: é bem visível uma correlação entre os principais reflectores dos radargramas e as principais intercalações de materiais descritos nos furos de sondagem, bem como algumas estruturas geológicas e estruturais (A presença de litologias mais condutivas aumenta o poder reflector).

É visível também uma redução do sinal a cerca de 10 m de profundidade, que após cruzar com os dados dos logs de sondagem vemos que o reflector presente a essa profundidade corresponde ao topo de uma camada de argilas e lodos orgânicos (materiais que reduzem drasticamente a penetração das ondas electromagnéticas do GPR. A presença de litologias mais condutivas aumentam a atenuação do sinal.

As diferenças entre as frequências das antenas usadas revelam igualmente diferenças nas resoluções dos radargramas;

Devido às características do meio (presença de camadas argilosas e camadas com óxidos) a profundidade de penetração das ondas foi cerca de 16 m. Assim, o ideal seria ter usado apenas a antena de 100MHz, afim de obter uma maior resolução ao longo de todo o perfil e reduzir o tempo de aquisição.

O conhecimento adquirido ao longo deste estudo experimental irá servir para definir uma metodologia que permita obter mais e melhor informação possível em menos tempo, afim de facilitar a aquisição de várias secções ao longo da área de estudo, tendo em vista a criação de um modelo tri-dimensional das principais estruturas presentes neste local.

### 2.1.9 Agradecimentos

- Agradecemos à Professora Doutora Ana Maria Castilho, por todas as explicações que pacientemente nos deu acerca de alguns dos dados da sua tese de doutoramento necessários para este estudo, e por todo o apoio em geral facultado durante a realização deste trabalho;

- Agradecemos à bolsista do Centro de Geociências Mestre Daniela Pedrosa, pelo apoio gentilmente facultado durante o dia da aquisição dos dados de campo;

- Agradecemos o apoio financeiro da FCT-MEC através de fundos nacionais e, quando aplicável, co-financiado pelo FEDER no âmbito da parceria PT2020, através dos projectos de investigação UID/Multi/00073/2013 do Centro de Geociências e UID/MULTI/00308/2013.

### 2.1.10 Referências bibliográficas – Caso de estudo 1

ALMEIDA, A. C. D. (1995). *Dunas de Quiaios, Gândara e Serra da Boa Viagem: uma abordagem ecológica da paisagem* (Doctoral dissertation).

ANNAN, P. (2003). Ground penetrating radar principles, procedures and applications. *Sensors and software*, 278.

BARBOSA, B., SOARES, A. F., ROCHA, R. B., MANUPPELLA, G. e HENRIQUES, M. H. (1988) - *Notícia explicativa da folha 19-A (Cantanhede) da Carta Geologica de Portugal na escala de 1:50000*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

CARVALHO, G. S. (1952). Les dépôts détritiques plio-pleistocènes et la morphologie de la «Gândara» au Nord de la Serra da Boa Viagem (Portugal). *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 6, 275-294.

CASSIDY, N. J. (2009). Ground penetrating radar data processing, modelling and analysis. *Ground penetrating radar: theory and applications*, 141-176.

CASTILHO, A. M. (2008). *Lagoas de Quiaios. Contribuição para o seu conhecimento geológico e hidrogeológico* (Doctoral dissertation, Dissertação de Doutoramento. Universidade de Coimbra).

DIAS, J. M. A., BOSKI, T., RODRIGUES, A., & MAGALHÃES, F. (2000). Coast line evolution in Portugal since the Last Glacial Maximum until present—a synthesis. *Marine Geology*, 170(1-2), 177-186.

SANDMEIER, K. J. (2017). *REFLEXW Manual Version 8.5 Windows™ XP/7/8/10 – program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data*. Sandmeier geophysical research. Germany. 617 pp.

SOARES, A. FERREIRA. (1993). " O tempo das caretas"(Pretexto para algumas ideias). In: *3ª Reunião do Quaternário Ibérico: Actas: Coimbra, 27 de Setembro a 1 de Outubro de 1993*. Universidade de Coimbra. p. 363-376.



## **2.2 CASO DE ESTUDO 2**

### **UTILIZAÇÃO DE GPR NO RECONHECIMENTO DE ESTRUTURAS ARQUEOLÓGICAS NO CONVENTO DE CRISTO - TOMAR**

**J. Carvalho<sup>1</sup>, J. Duarte<sup>2</sup>, F. Figueiredo<sup>3</sup>**

(1) Departamento de Ciências da Terra da UC, Portugal,  
jose.carvalho.geo@gmail.com

(2) IQGeo – Serviços, Lda. e Centro de Geociências da UC, Portugal,  
joao.aduarte@iqgeo.pt

(3) Centro de Geociências, Departamento de Ciências da Terra da UC, Portugal,  
fpedro@dct.uc.pt

### **2.2.1 Resumo**

Este estudo experimental teve como objectivos o reconhecimento de possíveis estruturas arqueológicas em profundidade tais como salas, galerias, e cavidades, no Convento de Cristo, em Tomar – Portugal, com recurso a um equipamento de geo-radar, o qual pretendeu-se também testar o seu desempenho, viabilidade e potencialidade para trabalhos futuros nesse mesmo âmbito e neste mesmo local. Foi realizada uma aquisição em forma de grelha com cerca de 6x7 metros numa área relativamente conhecida (Zona da Enfermaria – Sala da Bela Vista). Os perfis foram adquiridos com recurso a um equipamento de GPR com antenas bi-estáticas blindadas de 250 MHz, através do método de reflexão. Os dados obtidos foram processados num software específico para esse efeito, permitindo combinar os vários perfis da grelha adquirida de modo a criar uma série de planos em profundidade. Com estes resultados foi possível observar algumas estruturas, que possivelmente correspondem a estruturas já conhecidas. Desta forma observou-se que, apesar do pouco planeamento e tempo despendido na aquisição dos dados, o método e a metodologia usados são válidos e permitem a sua aplicação para o fim pretendido, ainda que possam ser refinados (aquisição). Torna-se assim viável a realização de futuros trabalhos neste mesmo local, e com esta mesma metodologia.

**Palavras-chave:** Reconhecimento de estruturas arqueológicas, GPR, Convento de Cristo, Património histórico, Tomar.



## 2.2.2 Introdução

*“A origem do castelo de Tomar está intimamente ligada aos primórdios do reino de Portugal e à presença dos Templários na península ibérica, então ocupada na maioria do seu território, pelos reinos islâmicos. Era o tempo das Cruzadas e a península, à semelhança da Palestina, era reconhecida como terra de cruzada. Nesse contexto os Templários tomam parte na formação dos novos reinos cristãos da península ibérica. Os cavaleiros templários vieram para Portugal em 1128. Em 1159, irão receber de D. Afonso Henriques, pela sua participação nas conquistas de Santarém e de Lisboa (1147), um vasto território situado a meia distância entre Coimbra e Santarém, o Termo de Ceras. Nesta região fundaram o Castelo e Vila de Tomar. Em 1312, no seguimento das perseguições contra os Templários perpetradas por Filipe IV, rei de França, a Ordem foi extinta, pelo papa Clemente V. Porém D. Diniz logra manter os cavaleiros e os bens dos Templários, sob o nome de uma nova ordem de cavalaria, circunscrita ao seu Reino. Em 1319, ao fim de alguns anos de negociações com a Santa Sé, é instituída a Milícia de Nosso Senhor Jesus Cristo. A nova de cavalaria teve o espírito e a regra idênticos aos da extinta Ordem do Templo.”*

*- Retirado de [www.conventocristo.gov.pt](http://www.conventocristo.gov.pt), em 3 de Setembro de 2018.*

Todas estas fases de ocupação deste monumento ao longo da sua história levaram a que através dos tempos este sofresse alterações, quer de estilos arquitectónicos, quer de arranjo e disposição dos seus espaços.

Este conjunto de modificações, algumas não tão minuciosamente documentadas, levam a que por vezes certas partes mais antigas deste monumento, que poderão ainda ter algum interesse histórico e/ou material, estejam soterradas ou disfarçadas por construções posteriores. É assim com este pressuposto que se propôs usar o método GPR para o reconhecimento de forma não destrutiva de estruturas ocultas neste monumento.

O local escolhido para a realização deste trabalho foi a Sala da Bela Vista (Figura 15), que corresponde a um salão situado nos espaços da Grande Enfermaria e Botica Nova,

nas alas Filipina e Joanina, construídas sob a zona norte da antiga muralha do castelo templário.

### **2.2.3 Objectivos**

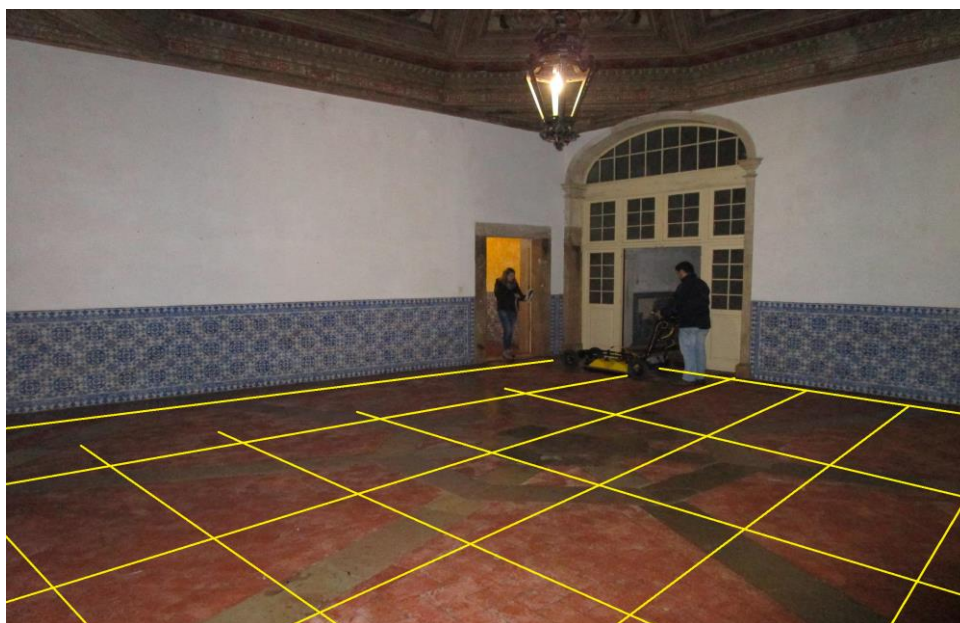
Para este trabalho experimental pretendeu-se testar e avaliar as potencialidades do equipamento GPR numa zona relativamente conhecida deste monumento para o reconhecimento de estruturas arqueológicas em profundidade e definir uma metodologia de aquisição e processamento de dados para esse mesmo fim. Os resultados obtidos e as observações feitas a todo o processo da realização deste trabalho experimental serão apresentados aos coordenadores deste espaço, que consoante o seu parecer poderão requerer futuramente estudos semelhantes, mais localizados e melhor definidos.

### **2.2.4 Métodos**

Na Sala da Bela Vista, local escolhido para a realização do estudo, foi definida uma grelha com cerca de 6 por 7 metros, com perfis adquiridos de metro a metro segundo um referencial cartesiano XY (Figura 15). A aquisição foi feita com recurso a um equipamento GPR PULSEKKO da Sensors&Software, acoplado ao respectivo SmartCart.

O método utilizado foi o da reflexão, com recurso a um conjunto de antenas bi-estáticas blindadas (transmissora e receptora) de 250MHz, com uma separação permanente entre ambas de 0,40 m.

Como parâmetros de aquisição definiu-se uma janela temporal de aquisição de 100 ns, um *step size* de 0,15 m, um número de *stacks* de 64 e foi definida uma velocidade para o meio de 0,100 m/ns.

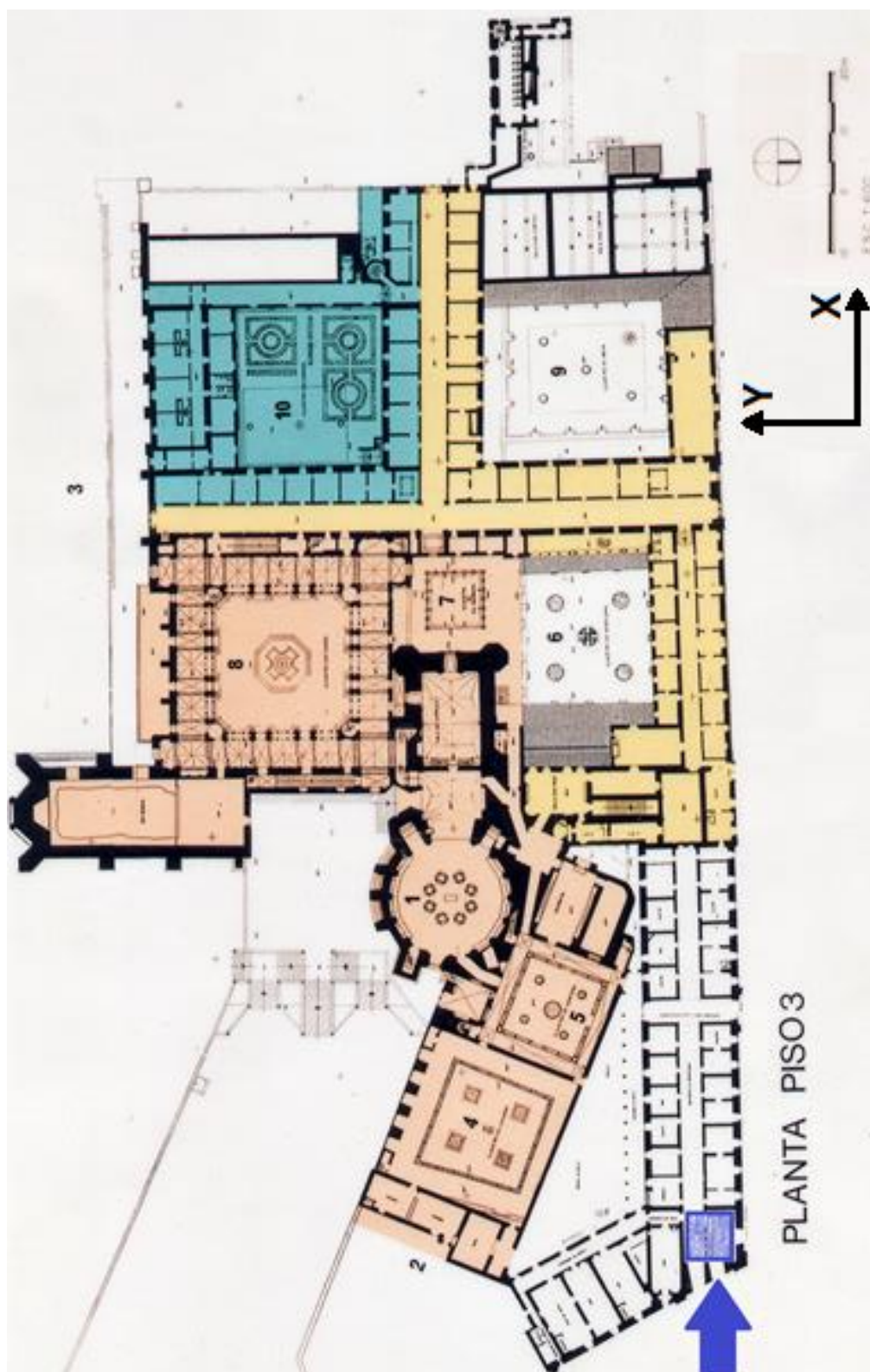


**Figura 15** - Sala da Bela Vista no momento da aquisição dos dados GPR, com a grelha de aquisição representada a amarelo (foto de autor, Março 2018).

Os dados obtidos durante a aquisição foram tratados no software EKKO\_Project ver.5, desenvolvido pela Sensors&Software. Neste software foi possível agrupar os perfis obtidos num referencial correspondente à grelha adquirida no terreno. Após ter os perfis devidamente localizados, foram aplicados vários filtros durante o processamento, de modo a obter uma melhor visualização dos principais reflectores presentes. Desta forma foi possível criar uma série de *slice-views* da área de estudo, correspondentes a vários planos em profundidade dessa mesma área.

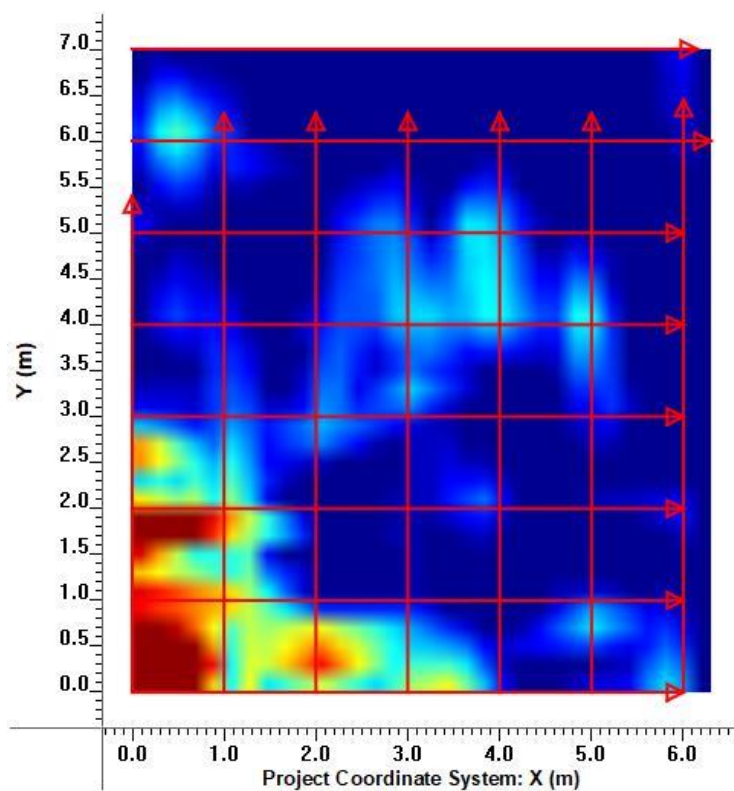
### 2.2.5 Resultados

Após o tratamento dos dados GPR adquiridos e cruzando-os com a planta do convento (Figura 16), obtiveram-se uma série de modelos 2D de várias *slice-views* da Sala da Bela Vista, a várias profundidades, até uma profundidade máxima de 4,4 m, alguns dos quais apresentam resultados interessantes.

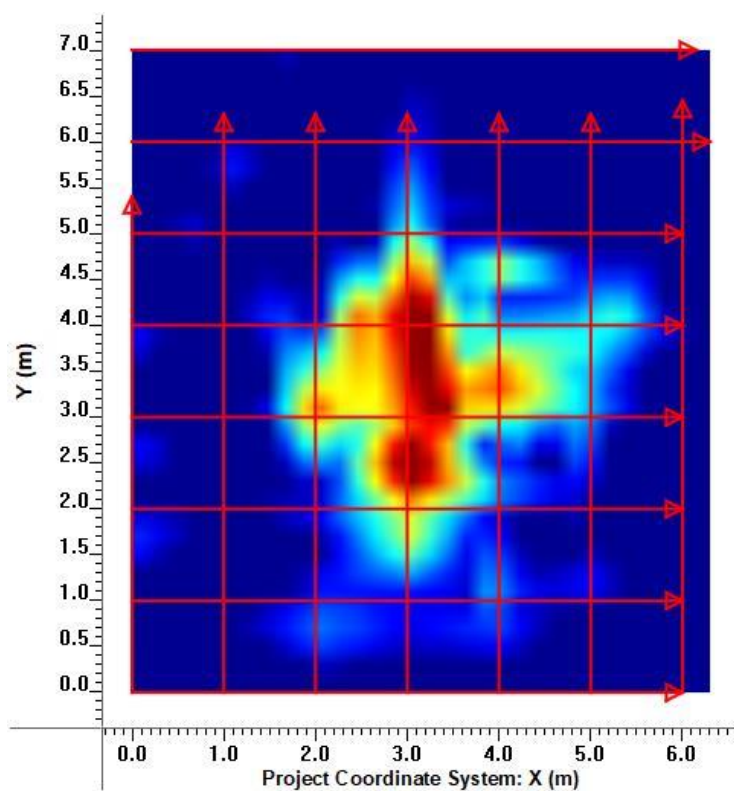


**Figura 16** - Planta geral do Piso 3 do Convento de Cristo, com indicação a azul da área onde o estudo de GPR foi realizado, com referencial XY para alinhamento dos perfis GPR na planta (gentilmente cedida pelo Senhor Rui Ferreira, Assistente Técnico – Convento de Cristo).

CASOS DE ESTUDO COM UTILIZAÇÃO DE GPR  
Reconhecimento e caracterização de estruturas geológicas, arqueológicas e estruturas  
subterrâneas

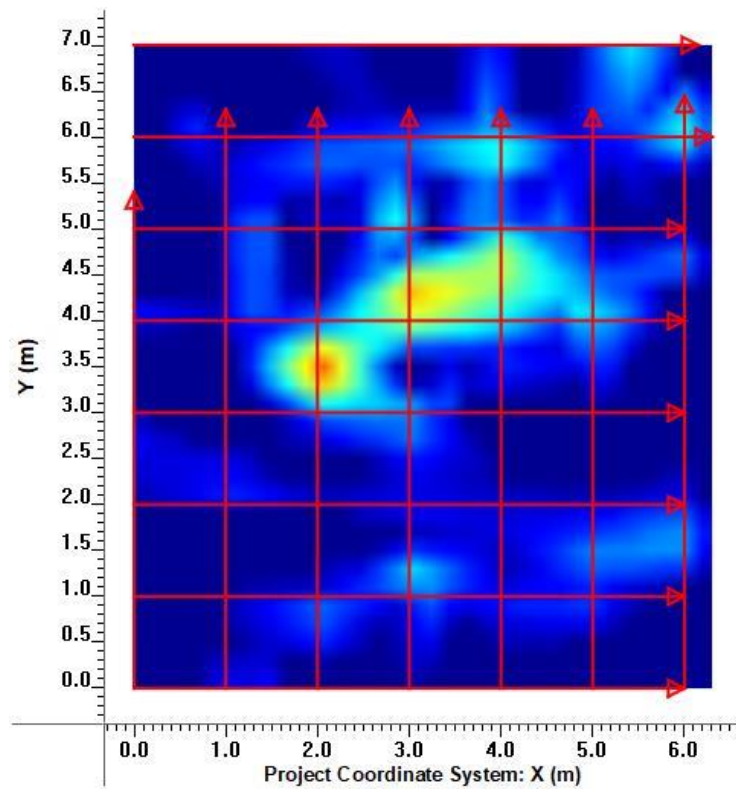


**Figura 17** - Plano da sala à profundidade de 1,7 metros.

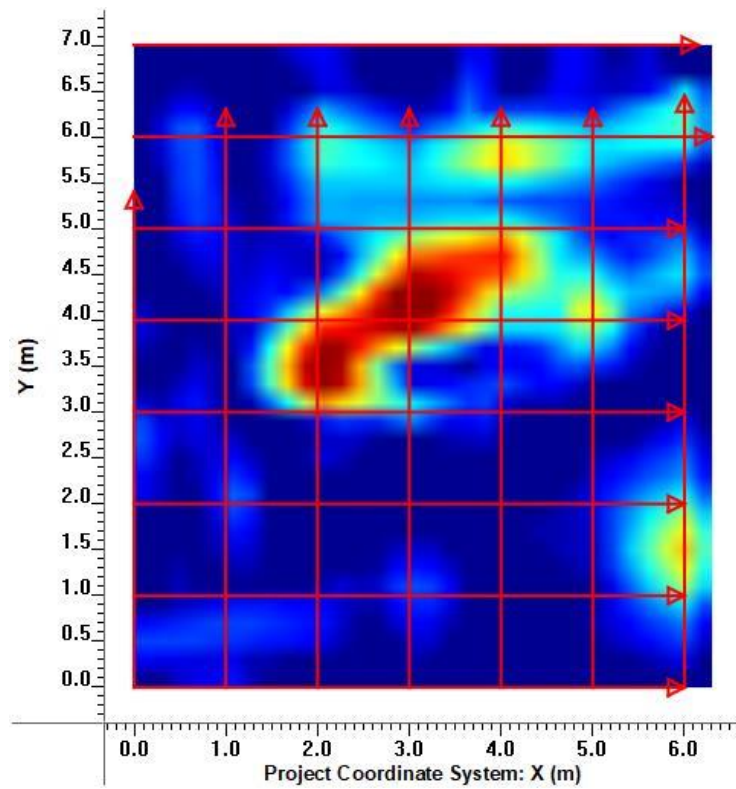


**Figura 18** - Plano da sala à profundidade de 2,6 metros.

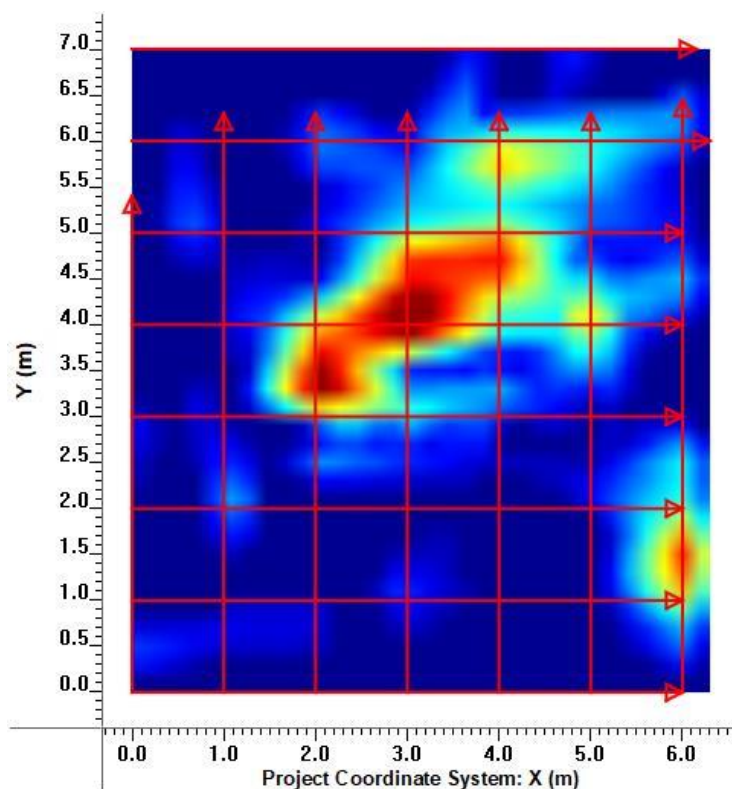




**Figura 19** - Plano da sala à profundidade de 3 metros.



**Figura 20** - Plano da sala à profundidade de 3.2 metros.



**Figura 21** - Plano da sala à profundidade de 3.3 metros.

### 2.2.6 Discussão e conclusões

Pela análise dos resultados obtidos a partir do tratamento dos dados adquiridos durante a realização deste estudo, é possível observar algumas estruturas bem evidentes ao longo dos planos em profundidade correspondentes ao substrato da Sala da Bela Vista. Essas estruturas foram interpretadas sem qualquer informação prévia sobre o que poderia estar por baixo dessa sala, para que as interpretações fossem o menos influenciadas possível.

Na Figura 17 temos uma estrutura assinalada com cores avermelhadas, no canto inferior esquerdo, a 1,7 m de profundidade. Em termos de localização, esta estrutura situa-se no ponto de flexão da fachada do convento, e por isso mesmo considera-se que poderá ser uma parte da muralha antiga, da época dos Templários, que poderia ter nesse local um género de reforço estrutural devido a ser precisamente o local de flexão desta, ou então parte de uma comunicação para a estrutura seguidamente descrita.

Entre os 2,6 m e os 3,3 m de profundidade (Figuras 18; 19; 20; 21) observa-se uma estrutura aparentemente circular de dimensão considerável, imperfeita, no centro da sala, estrutura essa que interpretamos como sendo possivelmente uma antiga torre da muralha dos Templários, da qual algumas partes poderão ter ruído, e terem sido preenchidas com material de aterro, para dar sustento à parte Filipina, e de seguida, à Sala da Bela Vista.

Nas Figuras 20 e 21, nas coordenadas  $X=6$ ;  $Y=4,5$ , temos uma estrutura alongada menos evidente que começa nessa zona e se vai prolongando até à estrutura central mais evidente, descrita no parágrafo anterior, que pensamos que poderá ser algum túnel de acesso ao piso inferior da Sala da Bela Vista.

Estas interpretações foram discutidas com o Assistente Técnico do Convento de Cristo, que confirmou a existência de um pequeno túnel naquele local, e também de um antigo torreão, recordação da antiga muralha Templária.

Desta forma, sabendo que os resultados obtidos e as interpretações feitas de acordo com eles estão em concordância com as informações fornecidas à posteriori pelo Assistente Técnico, consideramos que este método é promissor e que a metodologia empregada neste estudo foi válida e a mais correcta para o tempo disponível para a aquisição. Assim, tendo isso em consideração, a metodologia será refinada, propondo a realização de novas campanhas de GPR, com maior tempo disponível, para que desta forma seja possível a aquisição de uma malha de estudo mais apertada, que fornecerá dados em profundidade com mais detalhe, permitindo assim obter uma maior resolução no que concerne à observação de estruturas e sua interpretação.

### **2.1.7 Agradecimentos**

- Agradecemos ao Sr. Rui Ferreira (Assistente Técnico, Convento de Cristo) e ao Prof. Doutor Fernando Costa (Conservação e Restauro, IPT), a oportunidade e amabilidade com que nos permitiram fazer este estudo experimental neste local, e também por todo o apoio prestado e material disponibilizado.



### **2.2.8 Referências bibliográficas – Caso de estudo 2**

SENSORS AND SOFTWARE INC. (2015). *EKKO\_Project User's Guide – With Processing, Bridge Deck Condition & Pavement Structure Modules*. Sensors & Software Inc. Canada. 177pp

<http://www.boticaconvento.ipt.pt>, acedido em 3 de Setembro de 2018

<http://www.conventocristo.gov.pt>, acedido em 3 de Setembro de 2018



## **2.3 CASO DE ESTUDO 3**

### **PROSPECÇÃO ARQUEOLÓGICA DE UMA VILLA ROMANA COM RECURSO A GPR EM VALE DE MOURO – MÊDA**

**J. Carvalho<sup>1</sup>, F. Figueiredo<sup>2</sup>, J. Duarte<sup>3</sup>, J. Lourenço<sup>4</sup>, R. Neto<sup>5</sup>**

(1) Departamento de Ciências da Terra da UC, Portugal,  
jose.carvalho.geo@gmail.com

(2) Centro de Geociências, Departamento de Ciências da Terra da UC, Portugal,  
fpedro@dct.uc.pt

(3) IQGeo – Serviços, Lda. e Centro de Geociências da UC, Portugal,  
joao.aduarte@iqgeo.pt

(4) Departamento de Geologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal,  
martinho@utad.pt

(5) Câmara Municipal de Mêda, Portugal,  
ruitinaneto@iol.pt

### 2.3.1 Resumo

A pedido da Câmara Municipal de Mêda e numa parceria entre investigadores do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra (DCT – UC), do Departamento de Geologia da Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro (DG – UTAD) e da Câmara Municipal de Mêda, foi realizada uma campanha de georradar, na zona adjacente ao Sítio Arqueológico Romano de Vale do Mouro, na freguesia de Coriscada, concelho de Mêda. Local de várias campanhas de prospecção arqueológica muito promissoras desde 2003 e que permitiram descobrir vários achados importantes desta e de outras épocas da história deste povoado, pensa-se que parte deste património único ainda esteja por descobrir. Seguindo este pressuposto, esta campanha de prospecção geofísica com recurso a um equipamento de georradar teve como intuito perceber se é possível existirem mais partes deste povoado por descobrir, e se sim, perceber qual o seu dimensionamento e localização das suas estruturas arqueológicas. Para isso essa zona foi dividida em várias áreas, varridas em toda a sua extensão por vários perfis de GPR equidistantes. Após a aquisição dos perfis, estes foram georreferenciados, cruzados e processados, de modo a criar mapas 2D em profundidade dos dados de GPR destas áreas. Através desses mapas foi possível retirar informações e fazer interpretações acerca do que se encontra naquela zona, em profundidade, permitindo assim tecer conclusões sobre a viabilidade da realização de novas escavações e campanhas de prospecção arqueológica nesta zona.

**Palavras-chave:** Reconhecimento de estruturas arqueológicas, GPR, Vale do Mouro, *Villa romana*, Mêda.

### 2.3.2 Introdução

Desde há bastante tempo que a presença romana em Portugal (*Lusitania* – Figura 22) é um facto comprovado por vários achados arqueológicos, em vários pontos do país. Para além das principais cidades, como o exemplo de Conímbriga, existiram também pequenos povoados, espalhados praticamente por todo o país.

Em 2003 uma equipa composta por arqueólogos franco-portugueses descobriu a *Villa* de Vale do Mouro, perto da Coriscada (Mêda, distrito da Guarda).



**Figura 22** - Mapa da Província Lusitania com a localização da freguesia de Coriscada (retirado de COIXÃO & SILVINO, 2010).

O local estudado e acima citado, do qual é possível avistar a ribeira de Massueime, situa-se numa vertente de encosta ao longo de um pequeno vale de natureza granítica, a cerca de 490 m de altitude e a 3.5 km da aldeia de Coriscada.

Esta descoberta teve um impacto enorme na compreensão e interpretação histórica desta área no Interior Norte de Portugal, na medida em que aparentemente esta região teria sofrido um baixo grau de Romanização, com uma maior ocupação por parte de pequenos povoados rurais indiferenciados. O Sítio Arqueológico de Vale do Mouro vem alterar por completo esta ideia pré-concebida, contribuindo assim para um melhor conhecimento e compreensão da ocupação romana nesta região (COIXÃO & SILVINO, 2010).

Ao longo do último século da Hispânia e Lusitânia romanas nas regiões mais densamente ocupadas, a tendência era o abandono de pequenos povoados para formar aglomerados populacionais face à pressão das grandes *villae*. No entanto, pensa-se que nas zonas mais rurais, como é o caso do Interior Norte de Portugal, isto não se verificaria, devido à falta de achados arqueológicos até à data, que sejam indicadores dessa tendência. No entanto, este facto é contrariado pela descoberta de algumas *villae* nesta região, como é o exemplo da *Villa* de Vale do Mouro, que sugere a existência de um núcleo populacional que ao longo do tempo se foi fortalecendo e redor da villa através de uma ocupação contínua, e podendo em alguns casos originar aldeias (CARVALHO, 2016).

Assim, a enorme importância do Sítio Arqueológico de Vale do Mouro resulta das suas características enquanto “sítio” - como o facto de ter sido alvo de várias ocupações antrópicas ao longo do tempo em que existiu, tornando este sítio numa *Villa* rural com dimensões consideráveis em relação a um povoado do mesmo tipo, assemelhando-se mais tardiamente a um *Vicus*/aldeia, onde já existiriam algumas oficinas (tais como ferreiro) e também onde se buscava algum conforto e bem-estar, visível na qualidade dos materiais usados na construção das casas e na existência de sistemas de distribuição de água e banhos aquecidos (COIXÃO & SILVINO, 2010) (Figura 23) - mas também devido a uma série de achados arqueológicos de enorme importância encontrados neste mesmo local – um dos maiores tesouros numismáticos desta época que corresponde a um aglomerado de moedas romanas (4526 moedas) junto com vários utensílios (COIXÃO & SILVINO, 2010) (Figura 24), uma painel de mosaicos romanos bem preservado representativo do culto ao deus Baco (CORREIA *et al.*, 2016) (Figura 25), e ainda um conjunto de fragmentos ósseos de um esqueleto de um indivíduo adulto, de sexo masculino, sepultado no centro deste Sítio Arqueológico (FURTADO & FERREIRA, 2009).

CASOS DE ESTUDO COM UTILIZAÇÃO DE GPR  
Reconhecimento e caracterização de estruturas geológicas, arqueológicas e estruturas  
subterrâneas

Até então, a necrópole desta *Villa* ainda não foi descoberta, mas é muito provável que exista, premissa esta baseada em testemunhos orais de que algumas lápides e urnas foram descobertas a Norte da *Villa*, área na qual foi encontrada uma lápide romana reaproveitada na construção de um muro (COIXÃO & SILVINO, 2010).

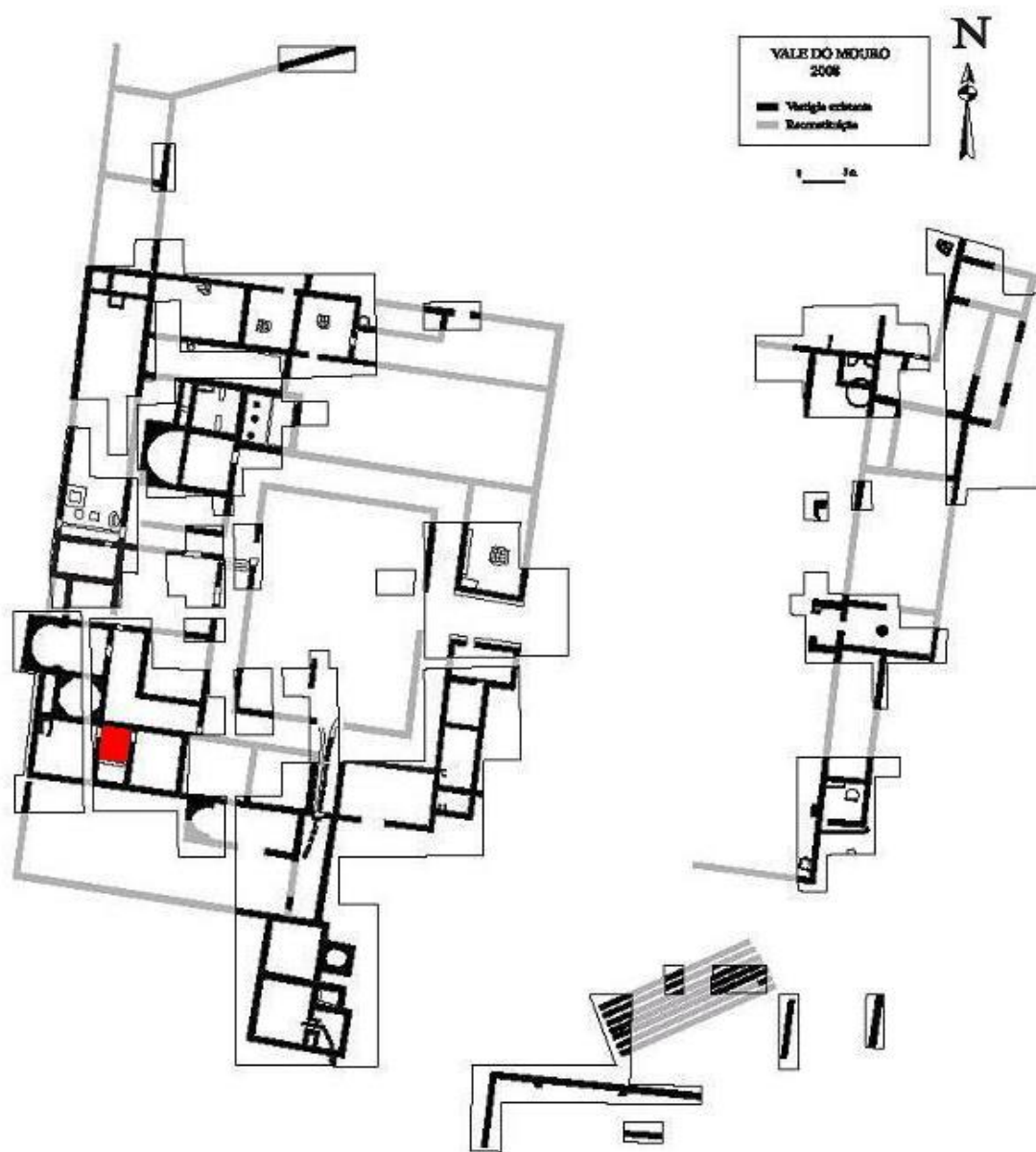


Figura 23 - Planta da *Villa* de Vale do Mouro (retirado de CORREIA *et al.*, 2016).



**Figura 24** - O "Tesouro de Mêda" - achado único de 4526 moedas romanas (retirado de COIXÃO & SILVINO, 2010).



**Figura 25** - O mosaico de Baco da *Villa de Vale do Mouro in situ* (retirado de CORREIA *et al.*, 2016).



Baseado nestes pressupostos, foi elaborado um estudo com recurso a levantamentos fotogramétricos desta área e um estudo de GPR em áreas de possível interesse de prospecção arqueológica.

### **2.3.3 Objectivos**

Esta campanha de prospecção arqueológica com recurso a levantamentos fotogramétricos através de um VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) e levantamentos geofísicos de GPR teve como objectivos criar um ortofotomapa de alta resolução do Sítio arqueológico através de fotogrametria, de modo a visualizarem-se as estruturas já existentes e expostas pelas várias campanhas de excavações arqueológicas, e de seguida cruzar esse ortofotomapa com as áreas de GPR adquiridas.

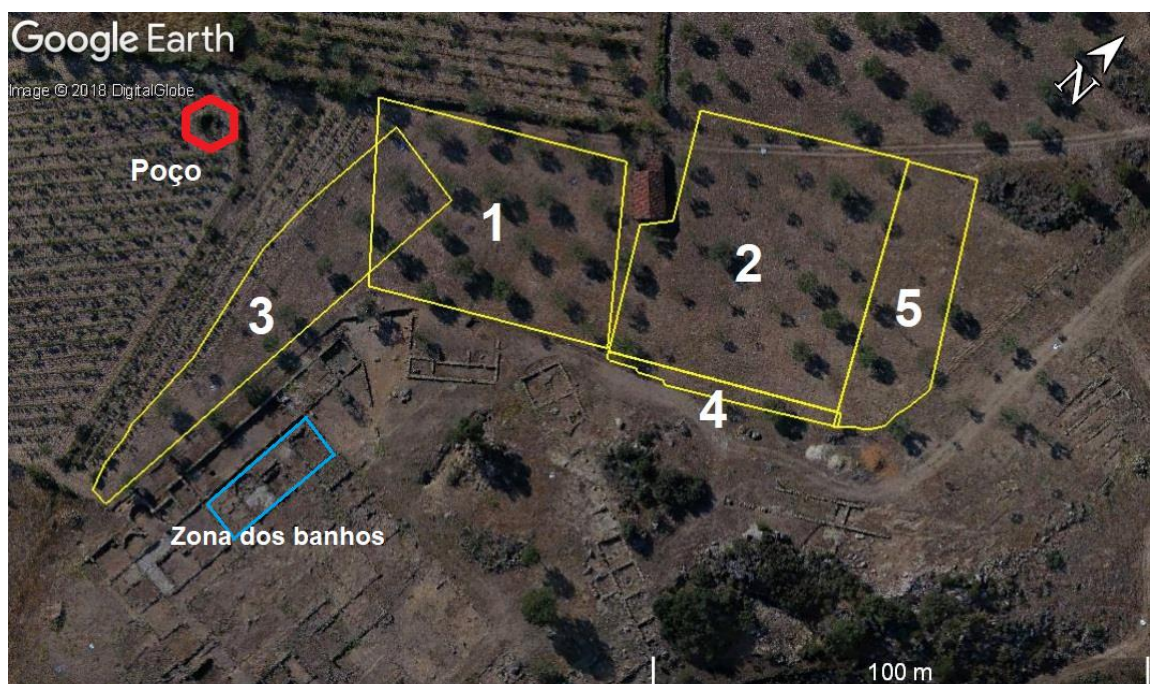
Desta forma através dos perfis de GPR pretende-se saber se é possível existirem mais estruturas arqueológicas soterradas por descobrir naquela área, e se sim, cruzar esses dados em profundidade com o que já está descoberto e mapeado pela fotogrametria, para que seja mais facilmente possível correlacionar estruturas visíveis e já descobertas, com estruturas que possam existir em profundidade no subsolo, e desta forma obter mais e melhor informação acerca deste local arqueológico.

### **2.3.4 Métodos**

Os levantamentos aerofotogramétricos para a criação dos ortofotomapas foram realizados com recurso a um drone/VANT, por varrimento de superfície. Foram colocados vários alvos pela superfície do terreno, alvos esses cujas suas coordenadas foram posteriormente adquiridas com recurso a um GNSS-RTK. Os dados visuais resultantes do varrimento da superfície foram processados e georreferenciados de acordo com as posições dos alvos na imagem e suas coordenadas geográficas.

Para os levantamentos de GPR, a área total de estudo foi dividida em 5 áreas para facilitar a aquisição e o tratamento dos dados (*Meda1 a Meda5* – Figura 26). Cada uma dessas áreas foi adquirida por perfis rectilíneos, paralelos entre si, com uma equidistância de cerca de 1,6 m, cobrindo a totalidade de todas as áreas, e para cada um dos perfis GPR foram retiradas as coordenadas geográficas do seu ponto inicial e final através de um

GPS diferencial, permitindo assim depois colocar os perfis na sua localização real e original cartograficamente (Figura 27). No que concerne aos parâmetros de aquisição, o método escolhido foi o método de reflexão, utilizando um conjunto de antenas bi-estáticas blindadas (transmissora e receptora) de 250MHz, com um espaçamento de 0,40 m, uma janela temporal de 60 ns e um *step size* de 0,05 m. Para o cálculo da profundidade dos radargramas foi também definida uma velocidade de propagação das ondas EM no meio de 0,15 m/ns, valor padrão indicado pelo equipamento para solos secos / graníticos (que é o caso).



**Figura 26** - Localização das áreas de aquisição de GPR (Meda1 - 1, Meda2 - 2, Meda3 - 3, Meda4 - 4, Meda5 - 5), Poço e Zona dos banhos/Termas (*Google Earth Pro*, Agosto 2018).



**Figura 27** - Localização dos perfis GPR adquiridos (linhas a vermelho); (*Google Earth Pro*, Agosto 2018).

Para o tratamento dos dados de GPR foi utilizado um programa específico para esse efeito, o *EKKOProject V.5*. Foram inseridas as coordenadas geográficas iniciais e finais de cada um dos perfis de radar, de modo a georreferenciá-los para poder correlacionar os dados espacialmente. Após os perfis estarem georreferenciados, estes foram processados (ajuste ao tempo zero, filtro dewow, remoção do background e função ganho).

Por fim, os resultados do processamento dos dados de GPR foram exportados para um ficheiro KMZ e cruzados com o ortofotomapa no *software Google Earth Pro*, obtendo assim modelos 2D de vários planos em profundidade das áreas adquiridas por GPR, anexados geograficamente ao ortofotomapa de alta resolução do Sítio Arqueológico.

### 2.3.5 Resultados e discussão

Como resultados obtiveram-se uma série de mapas coloridos 2D de vários planos em profundidade das áreas de aquisição de GPR, representando as diferenças de amplitude do sinal electromagnético. Estes mapas foram depois colocados sobre o ortofotomapa do Sítio, para que desta forma fosse mais fácil a correlação entre os dados e fazer

interpretações o mais correctas e aproximadas possível da realidade. Nas Figuras 28 - 38 temos exemplos de alguns dos planos em profundidade obtidos, que permitem observar a existência de algumas estruturas no subsolo.

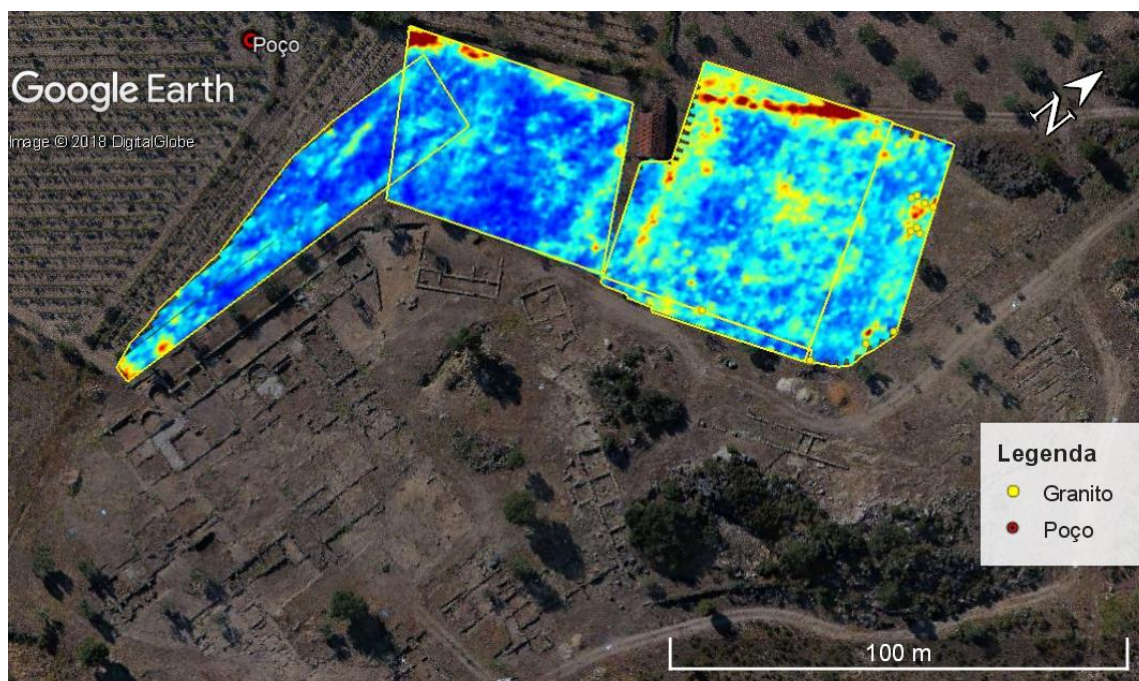
Os marcadores amarelos referidos na legenda das Figuras correspondem a locais onde existe granito a aflorar. O poço está referenciado porque junto a esse local existia um ribeiro que corria de NNW para SSW, que servia para alimentar os balneários das termas (zona central da área Meda3).

Na Figura 28 observamos um plano a uma profundidade entre os 0,380 m e os 0,570 m no qual é possível observar vários alinhamentos bem definidos, marcados a vermelho, bem como alguns alinhamentos um pouco mais disformes mas igualmente bem marcados, em tons de amarelo. Estes alinhamentos, principalmente os mais vincados (a vermelho) assumem formas rectilíneas, que podem indicar a existência de fachadas de casas ou muros, principalmente em redor do barracão existente no local. Já alguns dos amarelos e as manchas de tons mais claros, aparentam assumir uma continuidade (alinhamentos rectilíneos), mas a maioria é tão disforme que não se pode afirmar com certezas que correspondam a algumas estruturas.

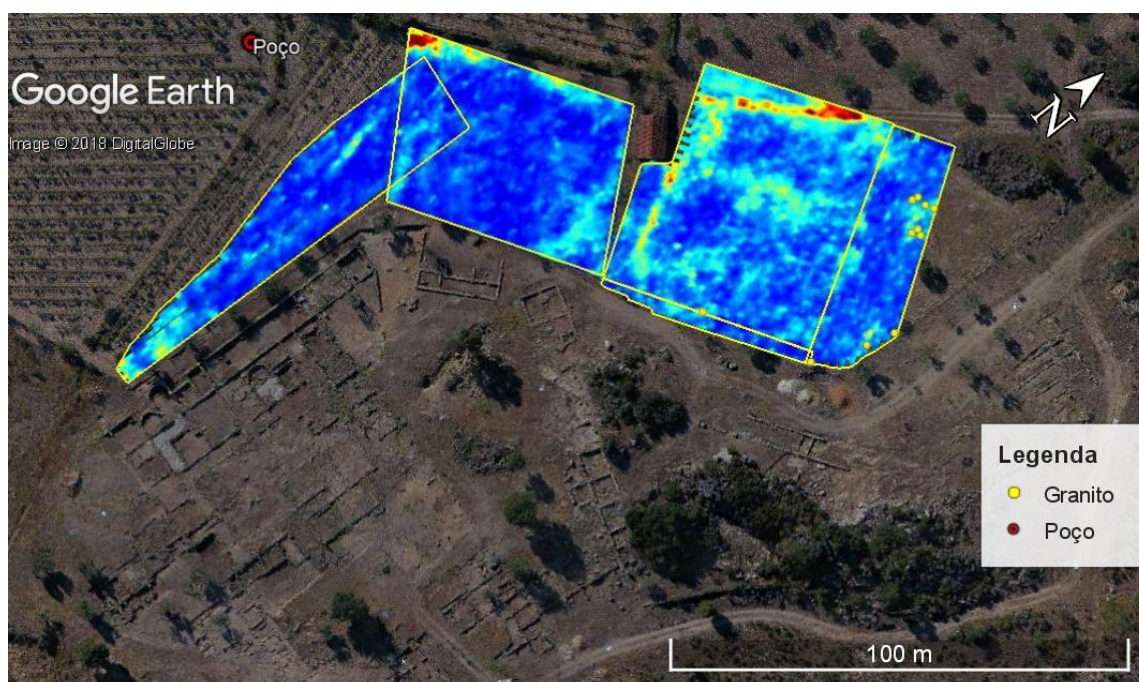
Na Figura 29 observamos um plano a uma profundidade entre os 0,475 m e os 0.665 m no qual é possível observar muitos dos alinhamentos referidos na Figura 28, sugerindo assim uma continuidade vertical destas possíveis estruturas.



CASOS DE ESTUDO COM UTILIZAÇÃO DE GPR  
Reconhecimento e caracterização de estruturas geológicas, arqueológicas e estruturas  
subterrâneas



**Figura 28** - Plano em profundidade dos dados de GPR (0,380 a 0,475 metros); (*Google Earth Pro*, Agosto 2018).

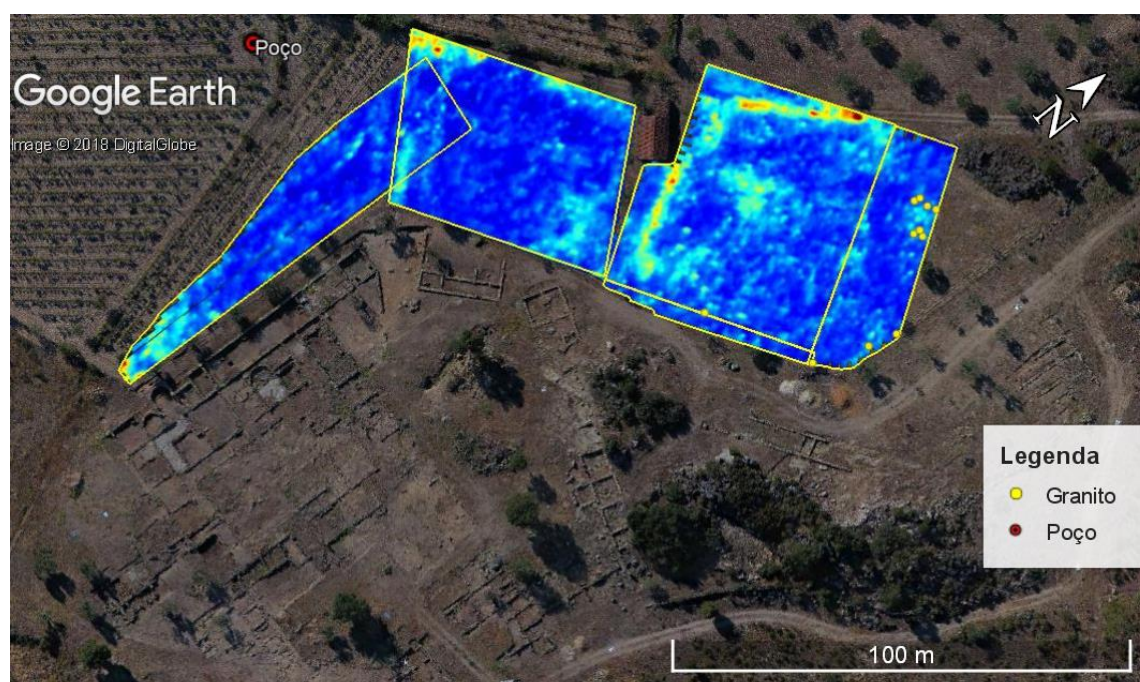


**Figura 29** - Plano em profundidade dos dados de GPR (0,475 a 0,570 metros); (*Google Earth Pro*, Agosto 2018).

Na Figura 30 observamos um plano a uma profundidade entre os 0,570 m e os 0,665 m no qual é possível observar, tal como nas figuras anteriores, vários alinhamentos bem

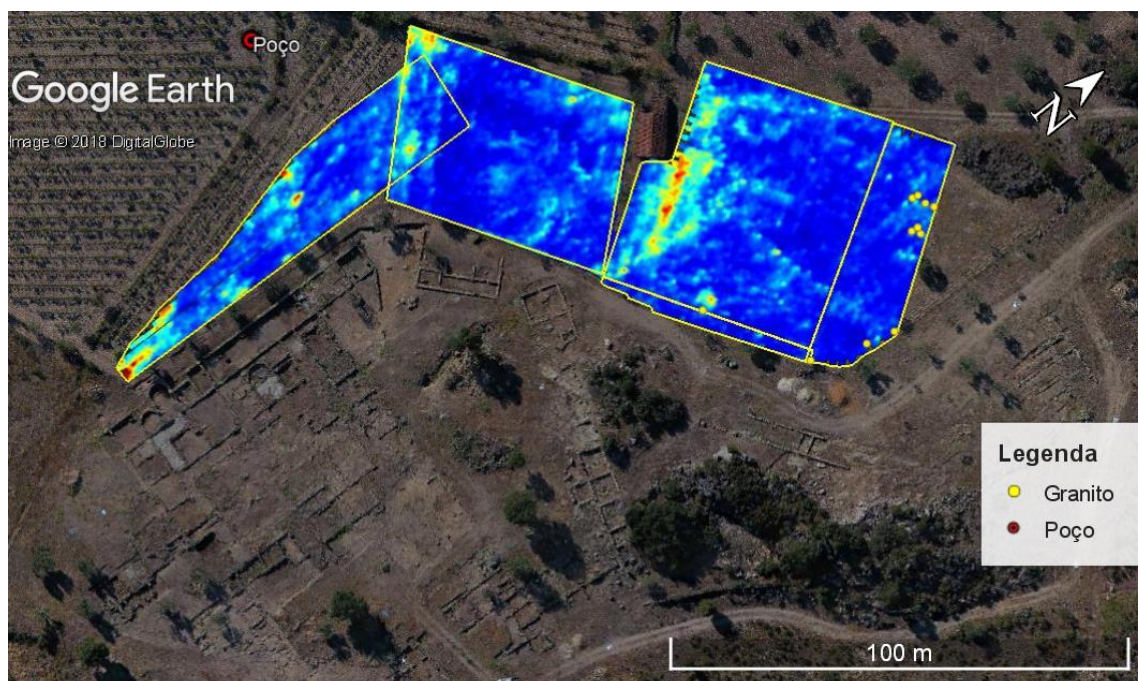


definidos, marcados a vermelho, bem como alguns alinhamentos um pouco menos definidos, a tons mais claros. Notam-se dois alinhamentos paralelos segundo NW-SE na zona de sobreposição das áreas Meda1 e Meda3, alinhamentos esses já visíveis no plano da figura anterior. Na área Meda2 continuam a ser visíveis os mesmos alinhamentos bem definidos já visíveis nas figuras anteriores, o que mais uma vez sugere a continuidade vertical em profundidade destas estruturas.



**Figura 30** - Plano em profundidade dos dados de GPR (0,570 a 0,665 metros); (*Google Earth Pro*, Agosto 2018).

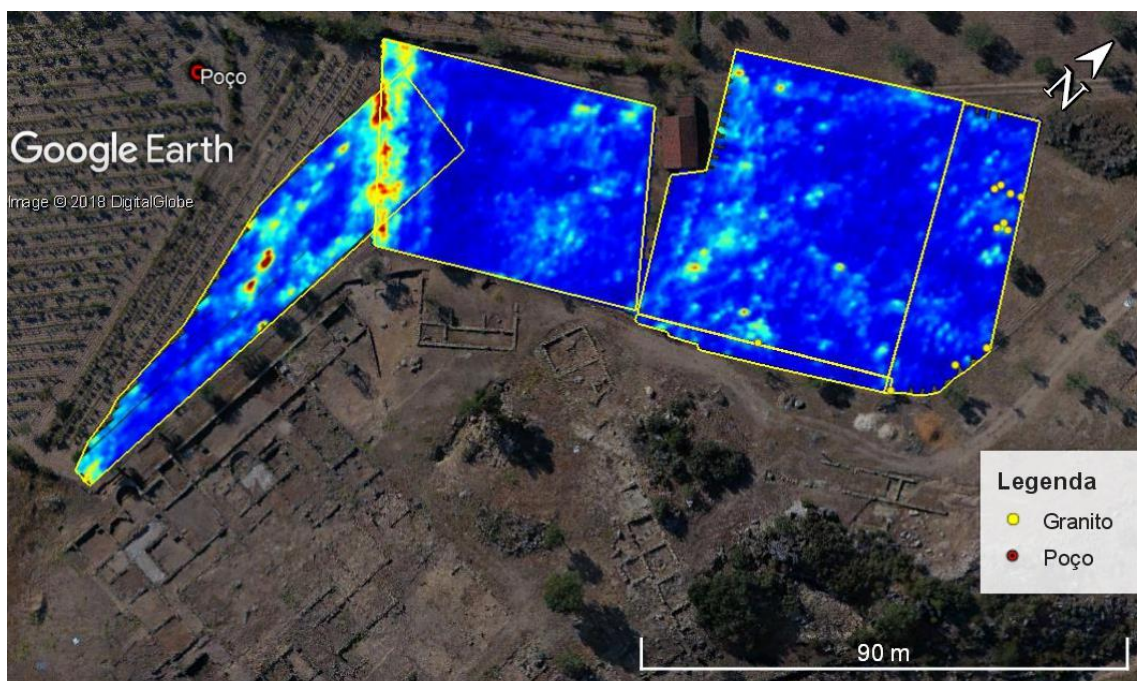
Na Figura 31 observamos um plano a uma profundidade entre os 0,855 m e os 0,950 m no qual damos conta que os alinhamentos bem definidos nas Figuras 28, 29 e 30 (alinhamentos SW-NE a Norte dos perfis Meda1 e Meda2) já praticamente não são visíveis, o que sugere que as estruturas prováveis que davam origem a essas assinaturas EM não continuam para além desta profundidade. No entanto o alinhamento NNW – SSW visível na lateral W da área Meda2 mantém-se ainda bem representado, e assim será até ao 1,40 m de profundidade. Outros alinhamentos começam a notar-se, tais como alinhamento quase rectilíneo, de direcção W-E, ao longo de mais de metade da área Meda2 e de toda a área de Meda5. É possível ver também uma anomalia na ponta Sul da área Meda3, anomalia essa que é constante em praticamente todo o perfil (na vertical) desde a superfície até à profundidade de 1,805 m.



**Figura 31** - Plano em profundidade dos dados de GPR (0,855 a 0,950 metros); (*Google Earth Pro*, Agosto 2018).

Na Figura 32 observamos um plano a uma profundidade entre os 1,140 m e os 1,235 m. Neste plano da área de estudo observa-se que as anomalias correspondentes aos dois alinhamentos paralelos segundo NW-SE na zona de sobreposição das áreas Meda1 e Meda3 tornaram-se numa anomalia bem demarcada, principalmente a que corresponde ao alinhamento mais junto à zona Meda3. Também na zona Meda3 temos uma anomalia NNW-SSE que apesar de já ser um pouco visível na Figura 31, acaba por se tornar mais evidente nas Figuras 32 e 33. A intersectar esta estrutura anteriormente referida, parecemos que existe uma outra anomalia mais disforme, alinhada segundo a direcção do poço para a zona das termas, anomalia essa que associamos a um antigo ribeiro, que corria aproximadamente ao longo desse mesmo alinhamento, e que serviria para abastecimento dos banhos termais.





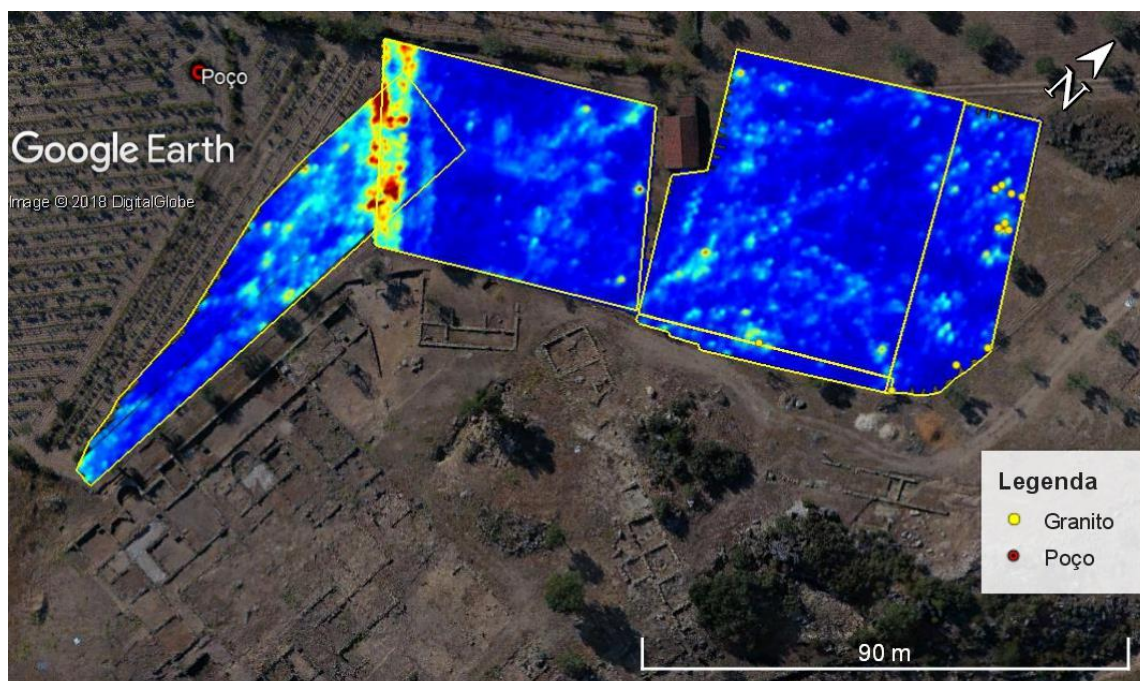
**Figura 32** - Plano em profundidade dos dados de GPR (1,140 a 1,235 metros); (*Google Earth Pro*, Agosto 2018).

Nas Figuras 33 e 34 observamos planos a profundidades entre os 1,330 e os 1,425 m, e entre os 1,520 e os 1,615 m, respectivamente. Destes planos para o plano da Figura 32 não existem grandes alterações muito significativas, ainda assim podemos destacar um alinhamento na área Meda1, com uma orientação aproximada N-S, que começa na zona do caminho/entrada do barracão e se prolonga até ao centro desta área. Julgamos que esta anomalia possa corresponder a uma antiga estrada que dava acesso ao interior do Sítio arqueológico.

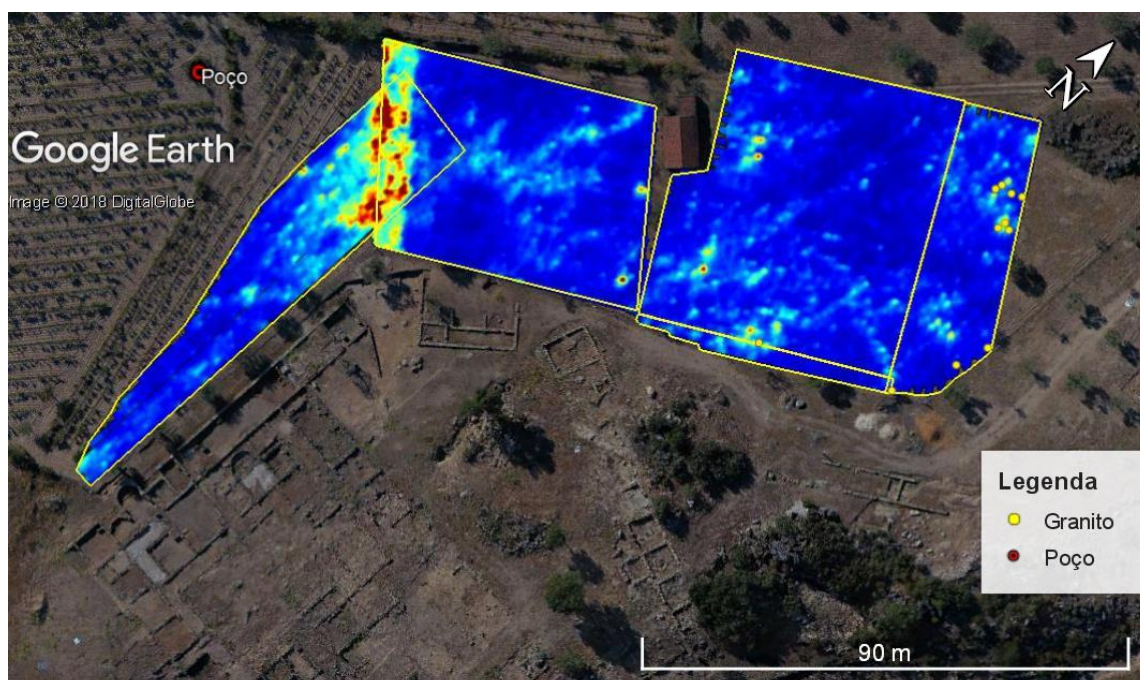
É possível observar nas áreas Meda1 e Meda2 junto à zona do barracão e também a sul deste, algumas anomalias fortes muito pontuais e localizadas, que podemos interpretar como sendo correspondentes a possíveis objectos metálicos. Para além disto, na área Meda2 observam-se também ténues anomalias rectilíneas, que poderão corresponder a alguns alinhamentos de estruturas (paredes?) mais finas e/ou degradadas.



CASOS DE ESTUDO COM UTILIZAÇÃO DE GPR  
Reconhecimento e caracterização de estruturas geológicas, arqueológicas e estruturas  
subterrâneas



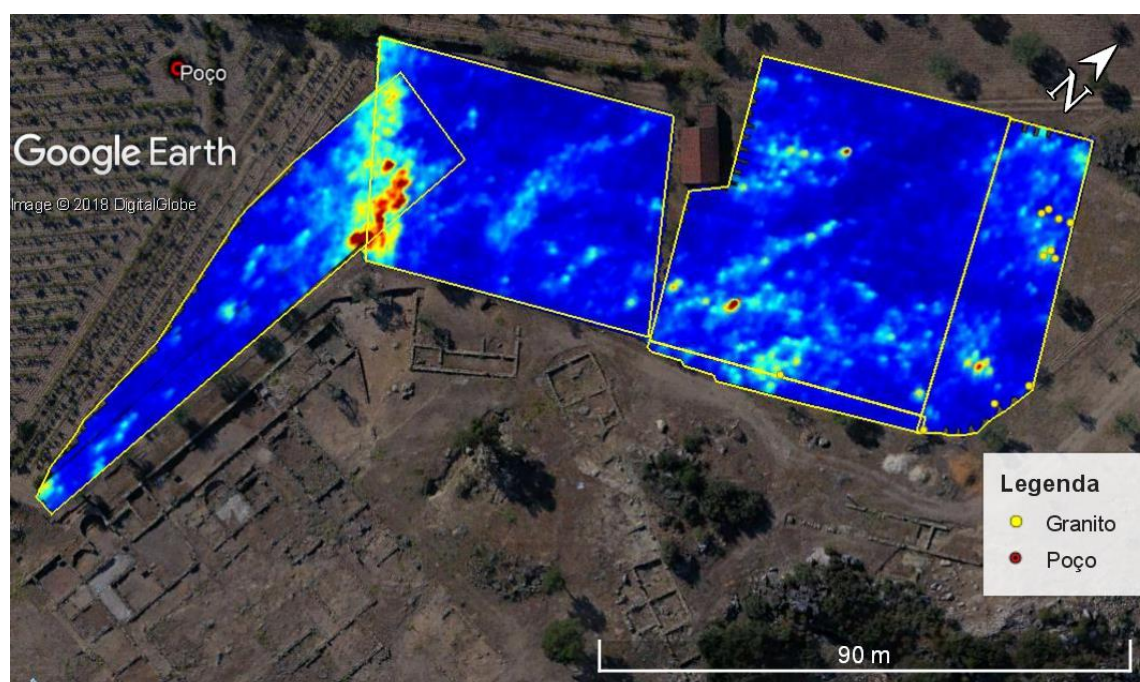
**Figura 33** - Plano em profundidade dos dados de GPR (1,330 a 1,425 metros); (*Google Earth Pro*, Agosto 2018).



**Figura 34** - Plano em profundidade dos dados de GPR (1,520 a 1,615 metros); (*Google Earth Pro*, Agosto 2018).



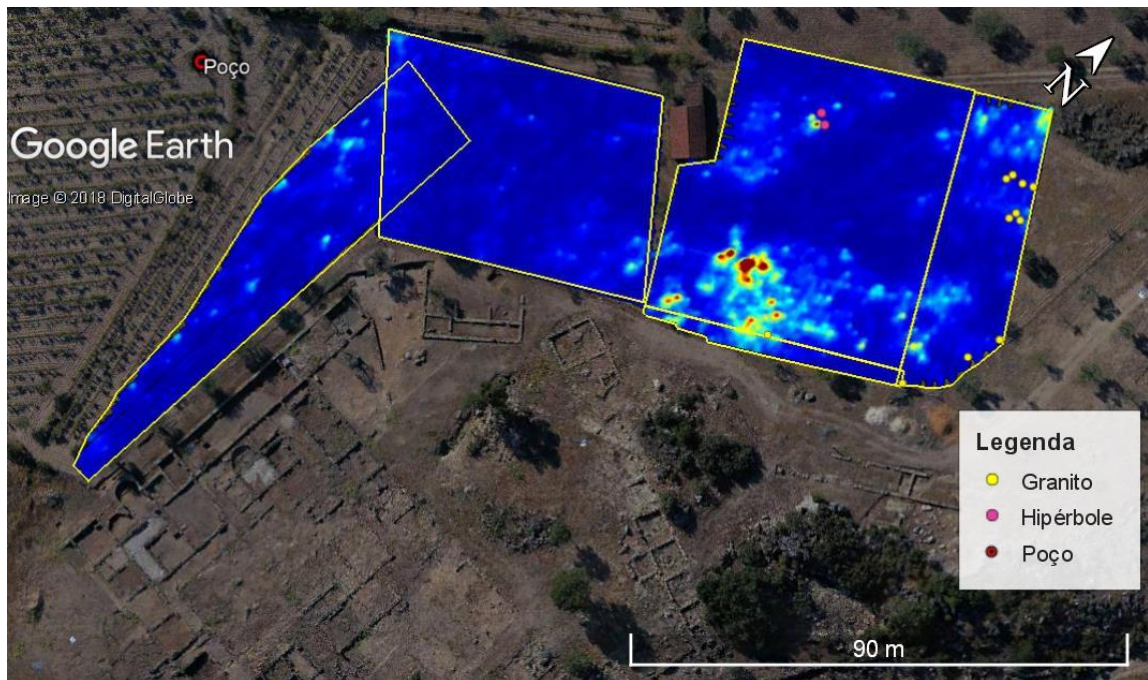
Na Figura 35 observamos um plano a uma profundidade entre os 1,805 m e os 1,900 m, no qual continuamos a observar as anomalias referidas na descrição dos planos da Figuras 33 e 34. Apenas temos a referir o aparecimento ou ênfase de algumas anomalias muito pontuais e localizadas (Meda2), e o desaparecimento de outras (Meda1). Nas áreas Meda2 e Meda5 temos um alinhamento correspondente a uma anomalia ténue mas bem definida, rectilínea, com uma orientação NNE – SSW.



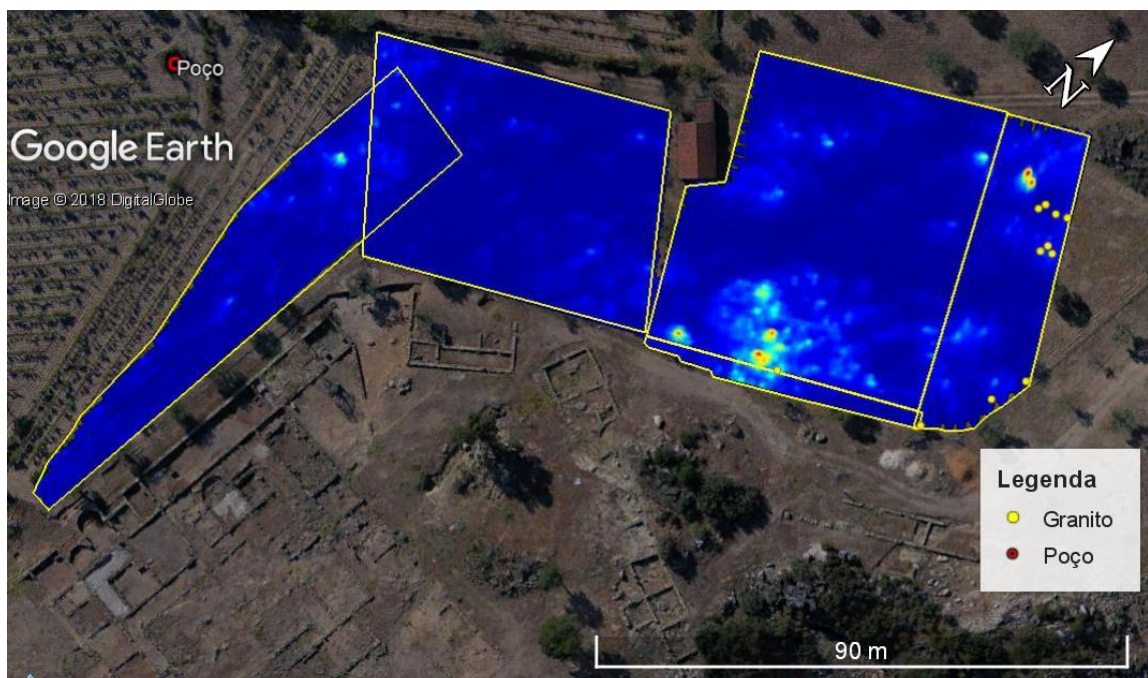
**Figura 35** - Plano em profundidade dos dados de GPR (1,805 a 1,900 metros); (*Google Earth Pro*, Agosto 2018).

Na Figura 36 observamos um plano a uma profundidade entre os 2,850 m e os 2,945 m, profundidade à qual a grande anomalia presente na sobreposição das áreas Meda1 e Meda3, já não existe, levando-nos a concluir que a base da estrutura que deu origem a esta anomalia se situa a uma profundidade de cerca de 2,375 m, de acordo com a visualização contínua de todos os planos obtidos, que nos permite observar que a anomalia resultante desta estrutura desaparece a partir da profundidade anteriormente indicada. Durante a aquisição foi possível observar nos radargramas duas hipérbolas muito bem marcadas, que correspondem a uma anomalia muito significativa, assinalada com pontos de cor rosa na Figura 36 com a legenda de “hipérbole”. Este facto pode indicar que neste local exista à profundidade deste plano, algo ou algum objecto que tenha uma condutividade alta (como por exemplo algo metálico), e que por isso valha a pena dar atenção a esta anomalia.

CASOS DE ESTUDO COM UTILIZAÇÃO DE GPR  
Reconhecimento e caracterização de estruturas geológicas, arqueológicas e estruturas  
subterrâneas



**Figura 36** - Plano em profundidade dos dados de GPR (2,850 a 2,945 metros); (*Google Earth Pro*, Agosto 2018).



**Figura 37** - Plano em profundidade dos dados de GPR (3,325 a 3,420 metros); (*Google Earth Pro*, Agosto 2018).



Na Figura 37 praticamente já não existe a presença de anomalias neste plano, que está a uma profundidade entre os 3,325 e os 3,420 m, e na Figura 38 (3,990 e os 4,085 m) as anomalias desaparecem por completo. Assim, concluímos que entre os cerca de 3,325 – 3,990 m temos a transição entre o solo da *Villa* e o substrato granítico.



**Figura 38** - Plano em profundidade dos dados de GPR (3,990 a 4,085 metros); (*Google Earth Pro*, Agosto 2018).

### 2.3.6 Conclusões

A partir da análise dos dados recolhidos e tratados podemos concluir que os objectivos principais deste trabalho foram alcançados. Foi possível reconhecer várias anomalias em profundidade que se assemelham em muito a alinhamentos de estruturas antropogénicas, algumas das quais puderam mesmo ser interpretadas e correlacionadas com estruturas já conhecidas, existentes no local. Desta forma, pelos resultados promissores deste estudo, acreditamos que exista bastante potencial para realizar novas campanhas de excavações arqueológicas nas áreas estudadas. Futuramente, tendo por base este estudo, tentar-se-á usar estes dados para a criação de modelos 3D, isolando as anomalias, para melhor se visualizar e perceber a evolução lateral e vertical das possíveis estruturas que lhe deram origem.

### 2.3.7 Agradecimentos

- Agradecemos à Câmara Municipal de Mêda na pessoa do Senhor Presidente Anselmo Sousa por todo o apoio e simpatia prestados. Nunca nos iremos esquecer da forma tão amável e fausta como fomos recebidos e tratados durante os dias dos trabalhos;
- Agradecemos ao Dr. Rui Tina Neto toda a amabilidade, paciência e forma impecável como coordenou toda a logística diária com a Câmara Municipal de Mêda, bem como por ter sido nosso “guia” e nos ter dado a conhecer muitos dos pontos de interesse e curiosidades desta região;
- Agradecemos ao Arquitecto Paisagista Sr. Mário Alves por nos ter permitido fazer este estudo nos seus terrenos, sem levantar qualquer objecção de maior;
- Agradecemos aos alunos da UTAD por todo o apoio prestado, amizade e momentos de confraternização durante os vários dias de trabalho de campo.

### 2.3.8 Referências bibliográficas – Caso de estudo 3

- CARVALHO, P. C. (2016). O final do mundo romano:(des) continuidade e/ou (in) visibilidade do registo nas paisagens rurais do interior norte da Lusitânia. *A Lusitânia. Entre Romanos e Bárbaros. VIII Mesa-redonda Internacional sobre a Lusitânia Romana*, pp. 397-435.
- COIXÃO, A. S., SILVINO, T. (2010). The villa of Vale do Mouro (Coriscada, Portugal), *Journal of Iberian Archeology*. 13. pp. 85-95.
- CORREIA, V. H., OLIVEIRA, C. F., & COIXÃO, A. S. (2016). O thiasos báquico rumo ao paradeisos. O exemplo do mosaico de Vale do Mouro (Coriscada, Meda). *Imagens do paradeisos nos mosaicos da Hispania*, pp. 66-88.
- FURTADO, M., FERREIRA, M. T. (2009). Estudo de Análise Antropológica (Vale de Mouro, Coriscada, Meda), *Cóavisão – cultura e ciência*. Nº11. pp. 137-147.
- SENSORS AND SOFTWARE INC. (2015). *EKKO\_Project User's Guide – With Processing, Bridge Deck Condition & Pavement Structure Modules*. Sensors & Software Inc. Canada. pp. 177
- <http://www.cm-meda.pt>, acedido em 28 de Agosto de 2018



## 2.4 CASO DE ESTUDO 4

# RELATÓRIO TÉCNICO DOS TRABALHOS DE PROSPECÇÃO GEOFÍSICA PARA MAPEAMENTO DE ESTRUTURAS SUBTERRÂNEAS PELO MÉTODO DE GPR NA VILA DE LUSO

**J. Carvalho<sup>1</sup>, F. Figueiredo<sup>2</sup>, J. Duarte<sup>3</sup>**

(1) Departamento de Ciências da Terra da UC, Portugal,  
jose.carvalho.geo@gmail.com

(2) Centro de Geociências, Departamento de Ciências da Terra da UC, Portugal,  
fpedro@dct.uc.pt

(3) IQGeo – Serviços, Lda. e Centro de Geociências da UC, Portugal,  
joao.aduarte@iqgeo.pt

### **2.4.1 Introdução**

Este trabalho e consequente relatório foi solicitado ao Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra pela Câmara Municipal da Mealhada.

O trabalho de prospecção geofísica foi feito no interior e orla exterior do pavilhão gimnodesportivo de Luso, Mealhada. Neste local houve um aluimento de terras com abertura de uma cratera, e constatou-se que existe pelo menos uma linha de água que circula por baixo desta edificação.

Pretendeu-se com este trabalho localizar as linhas de água subterrâneas existentes na área envolvente do pavilhão com recurso ao método geofísico de Radar de Penetração no Solo (GPR), tendo sido efectuados estudos em quatro zonas na orla e no interior desta edificação.

O trabalho de Campo decorreu no dia 18 de Abril de 2018, com uma equipa constituída pelo consultor em geologia e geofísica da IQGeo-Serviços, Lda. e doutorando pelo Departamento de Ciência da Terra da Universidade de Coimbra João António Duarte e pelo aluno de mestrado em Geociências José Luís Lopes Carvalho. A coordenação dos trabalhos e respectiva orientação técnica e científica foi feita pelo docente do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra e orientador dos anteriores referidos, Prof. Eng. Fernando Pedro Ortega Figueiredo.

Neste relatório é fornecida uma explicação básica e sucinta sobre o método geofísico utilizado, de modo a ser possível entender as técnicas utilizadas e os resultados obtidos.

Os resultados obtidos serão apresentados através de imagens e mapas, acompanhados das respectivas interpretações e considerações, relacionando estes com a dinâmica geológica envolvente.



## 2.4.2 Abordagem usada para o estudo

### 2.4.2.1 Localização geográfica das áreas de aquisição

O estudo foi feito dentro e nas imediações do Pavilhão Gimnodesportivo de Luso – Mealhada (coordenadas UTM: 29T, 4.470.705N, 552.475E, Carta Militar 1/25 000 da folha 219). Foram definidas 4 áreas distintas para facilitar a aquisição (Figura 39):

**Zona A** – Estacionamento lateral (lado da Sociedade da Água de Luso SA).

**Zona B** – Estacionamento ao fundo do pavilhão (onde se encontra o depósito de gás, junto à rotunda).

**Zona C** – Área junto à zona do bar do pavilhão e passeio junto ao lago.

**Zona D** – Interior do pavilhão (zona do campo e zona da bancada do lado do aluimento).



Figura 39 – Localização das áreas de estudo (Google Earth Pro, 2018).

#### 2.4.2.2 Equipamentos / materiais usados

- **Aquisição/trabalho de campo:**

- Equipamento GPR “pulseEKKO®”, respectivo *Smartcart* e antenas bi-estáticas não blindadas de 100MHz da Sensors&Software© (Figura 40);
- Fita métrica 50 metros;
- Meio de transporte / viatura;
- Mapas da área e caderno de apontamentos;
- Máquina fotográfica.

- **Tratamento e interpretação de dados:**

- Computador portátil, impressora e outros elementos informáticos para produção e impressão deste relatório;
- Software específico para tratamento de dados GPR;
- Software de edição de imagem;
- Cartas geológicas, documentos e outros elementos informativos acerca da área de estudo.



**Figura 40** - Equipamento GPR a ser utilizado no dia dos trabalhos (foto do autor, 18 de Abril 2018).

### 2.4.2.3 Equipamentos / materiais usados

- **Aquisição/trabalho de campo:**

A forma como os trabalhos decorreram e a metodologia usada definiu-se em função do tempo disponível, acessos e área a prospectar:

1. Breve volta de reconhecimento pela área para compreender o seu contexto geodinâmico e definir a melhor estratégia para os trabalhos;
2. Divisão estratégica da área total de estudo em 4 áreas mais pequenas de modo a facilitar o uso do GPR, contornar obstáculos existentes e tornar possível o estudo pretendido no tempo permitido;
3. Marcação dos perfis no terreno com recurso a fita métrica, e marcação dos mesmo nos mapas para posterior georreferenciação;
4. Aquisição dos perfis em cada uma das zonas definidas.

Desta forma foram adquiridos nas zonas B, C e D vários perfis cruzados, de forma a criar um modelo de *slice views* em profundidade dessas zonas. Na zona A optou-se por adquirir apenas 2 perfis paralelos devido a esta área ter uma largura relativamente pequena em relação ao seu comprimento.

- **Tratamento e interpretação de dados:**

Os dados adquiridos foram processados posteriormente em computador utilizando um software específico para o efeito (EKKO Project™ v.5). O processamento destes dados no software envolveu a georreferenciação dos perfis para criação de um modelo de *slice-views* em profundidade para cada zona englobando os dados das linhas adquiridas, e posterior aplicação de filtros para melhorar a visualização (remoção da componente de deslocamento contínua – “DC-Shift”, ajuste do tempo de propagação das ondas à real superfície do terreno – “time zero adjustment”, remoção de ruídos de fundo no sinal, aplicação de funções de ganho e filtros passa-banda). Para efeitos de cálculo de profundidades, a velocidade média das ondas EM no meio foi definida para 0,1 m/ns



(metros por nanossegundo), que é o valor mais usual para a maioria das áreas. A aquisição alcançou uma profundidade de cerca de 18 metros.

Os modelos criados foram exportados para ficheiros do tipo KMZ de modo a poderem ser localizados e visualizados geograficamente no software *Google Earth Pro*.

Por fim estes modelos são cruzados e comparados com as observações de campo, dados geológicos e geomorfológicos da área, e interpretados. Da sua interpretação obtêm-se as conclusões e considerações que resultam neste relatório.

### 2.4.3 Enquadramento geológico e geomorfológico

Recorrendo a uma carta geológica da área (DINIS, 2004) e remetendo a descrição das unidades para a Notícia Explicativa da Carta Geológica do Buçaco de Nery Delgado (por J. CARRÍNGTON DA COSTA, 1950) e para a descrição da legenda da Carta Geológica de Portugal à escala 1: 500 000. (OLIVEIRA *et al*, 1992) vemos que a área de estudo se situa numa zona afectada por várias falhas conjugadas, e também no contacto entre duas unidades geológicas distintas: Unidades do Precâmbrico e Paleozóico indiferenciadas (**PPI**) e Unidades do Pérmico – Carbónico (**PC**) (Figura 41 e respectiva legenda).

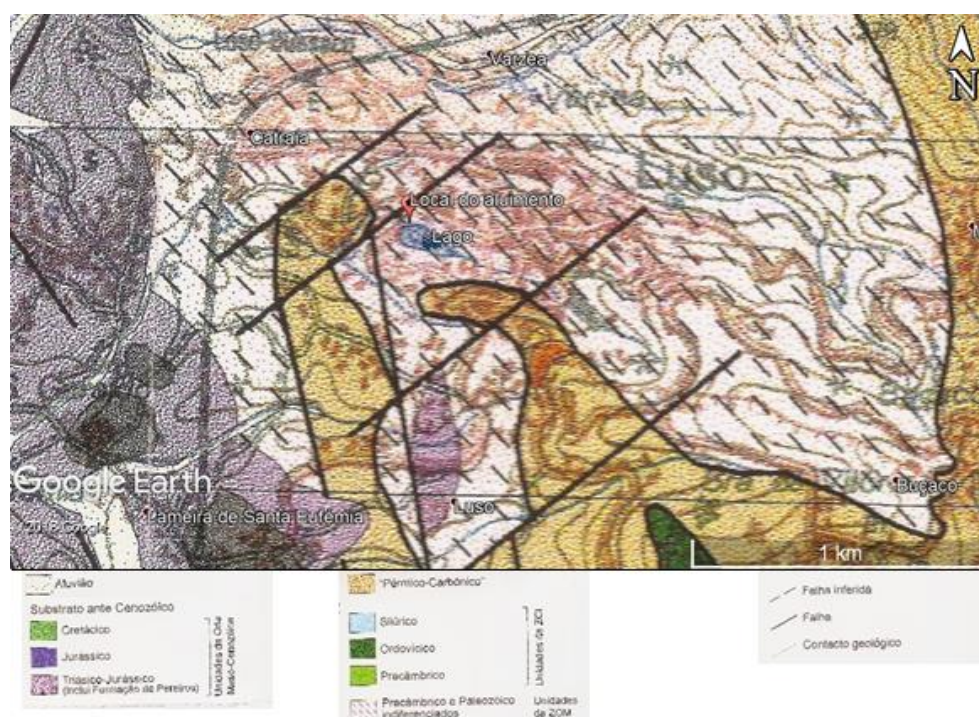


Figura 41 - Excerto de uma Carta Geológica da área de estudo (adaptado de DINIS, 2004).

**PPI** – Corresponde a um conjunto de unidades geológicas mais antigas compostas na sua maioria por xistos e grauvaques (Complexo Xisto-Grauváquico).

**PC** – Corresponde a um conjunto de unidades geológicas mais recentes em relação às anteriores, compostas por pelitos, arenitos e conglomerados.

Durante os trabalhos de campo foi possível observar no local do aluimento a presença de argilas e de blocos de rochas de dimensões relativamente consideráveis (da ordem dos decímetros) ao longo do leito da linha de água, o que nos remete para um contexto hidrodinâmico com uma circulação de água de alguma intensidade (Figura 42).

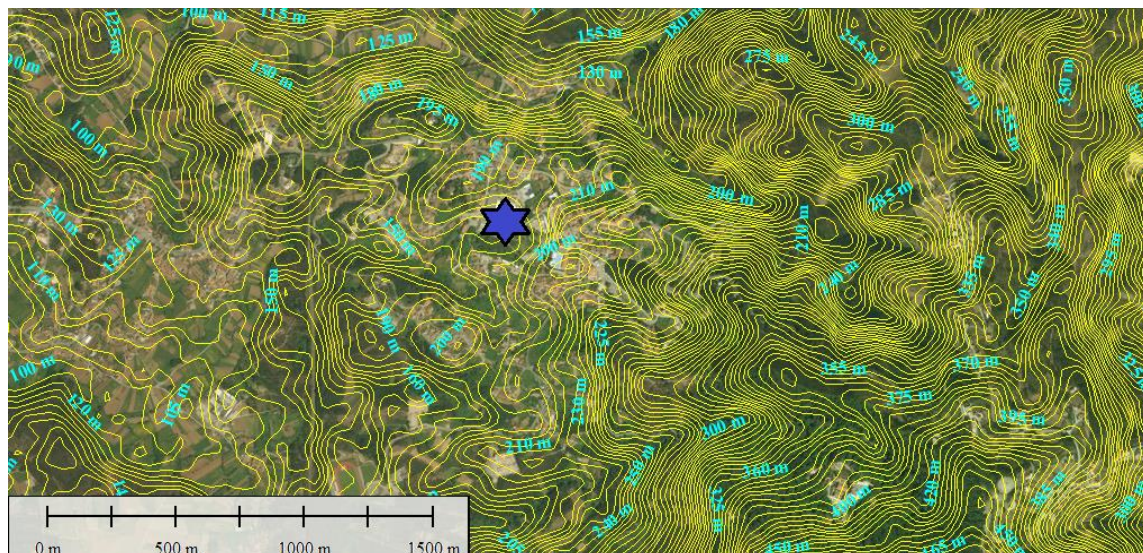


**Figura 42** - Foto do interior do aluimento (notar os blocos de rocha no leito da linha de água, bem como a fracção mais argilosa no material rochoso desagregado); (foto do autor, 18 de Abril 2018).

No que toca à geomorfologia do local e de uma forma muito sucinta, a área de estudo situa-se no fundo de uma confluência de vários vales com um desnível altimétrico relativamente considerável, o que torna esta zona algo semelhante a um “funil”, em que



toda a água que cai e circula nas imediações, vai confluir e escoar pela zona de estudo. Este facto é bem visível observando um mapa de curvas de nível de altimetria (Figura 43).



**Figura 43** - Mapa altimétrico da zona envolvente à área de estudo (assinalada pela estrela)  
(Adaptado de *Global Mapper*, 18 de Abril 2018).

## 2.4.4 Resultados da aquisição

### 2.4.4.1 Planos de cada zona (em profundidade) obtidos através do cruzamento de dados dos perfis adquiridos e descrição de observações efectuadas

De seguida apresenta-se para cada uma das zonas uma série de slice views (“vistas em fatias/planos”) a vários intervalos de profundidade, os quais nos parecem ter maior e mais pertinente informação acerca do estudo requisitado. Para cada uma das zonas são apresentadas uma série de considerações e interpretações possíveis para os elementos mais evidentes.

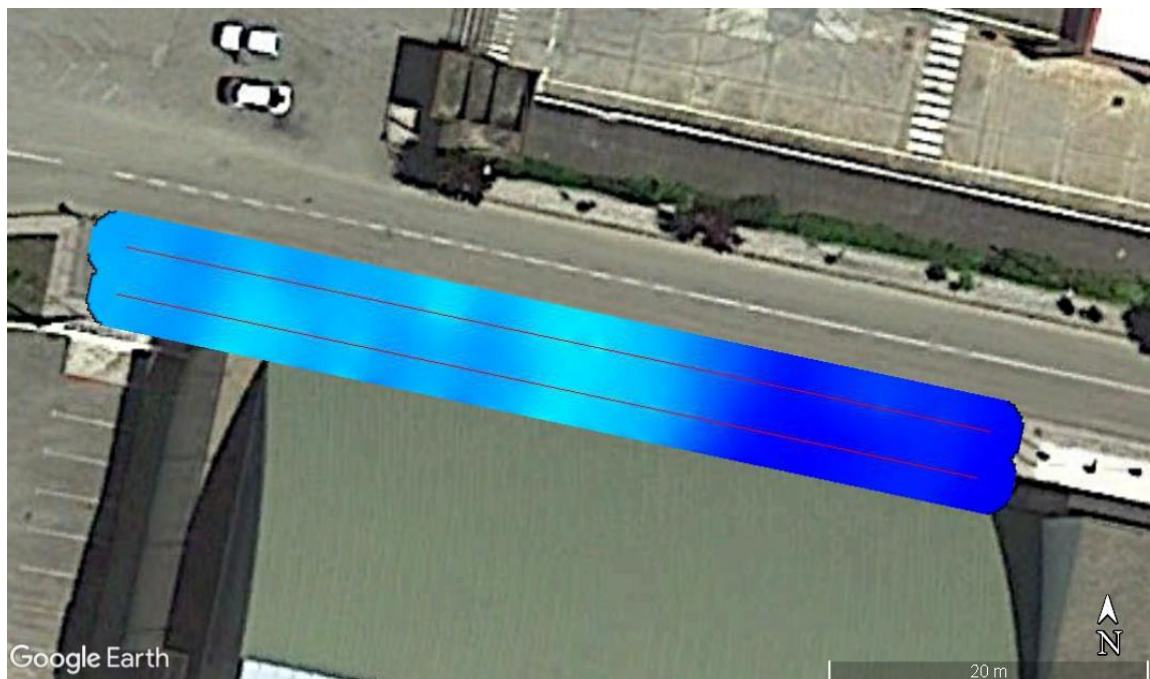
#### « Escala de cores »



A escala de cores acima apresentada diz respeito às amplitudes de reflexão do sinal GPR. A cor azul corresponde a baixas amplitudes de reflexão do sinal (ausência de reflectores, reflectores com propriedades muito semelhantes, ou

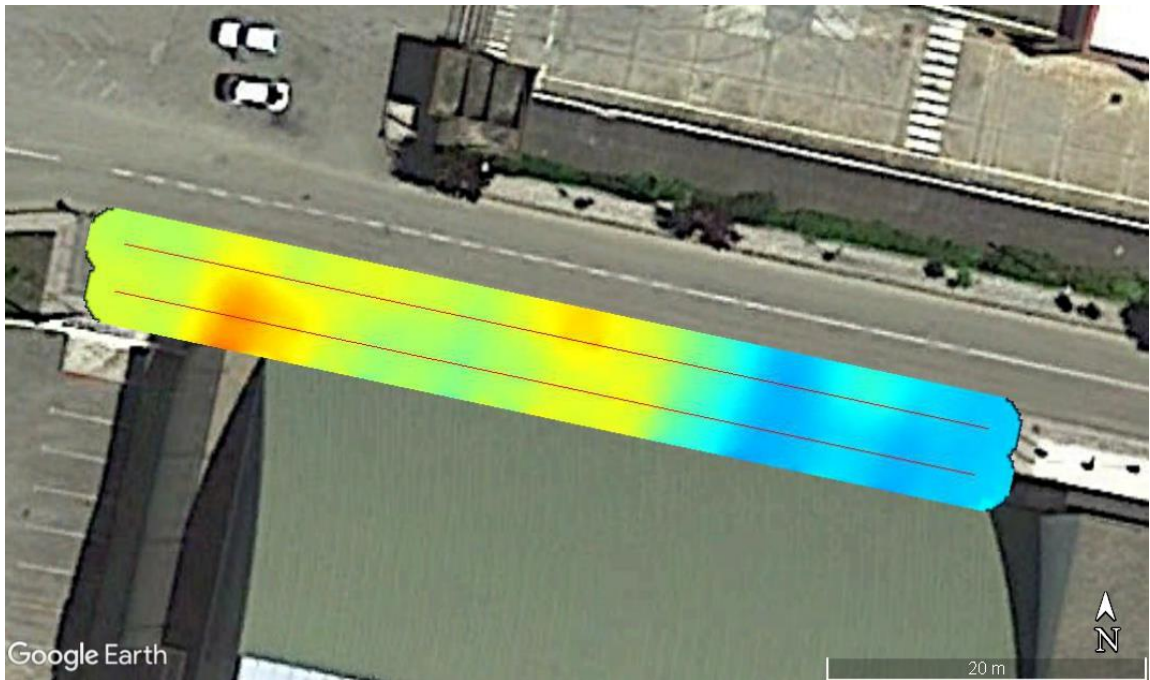
zonas de sombra, onde o sinal não conseguiu penetrar), enquanto que no outro extremo a cor vermelha indica altas amplitudes de reflexão (metais, ou reflectores entre meios com propriedades muito diferentes).

- **Zona A**

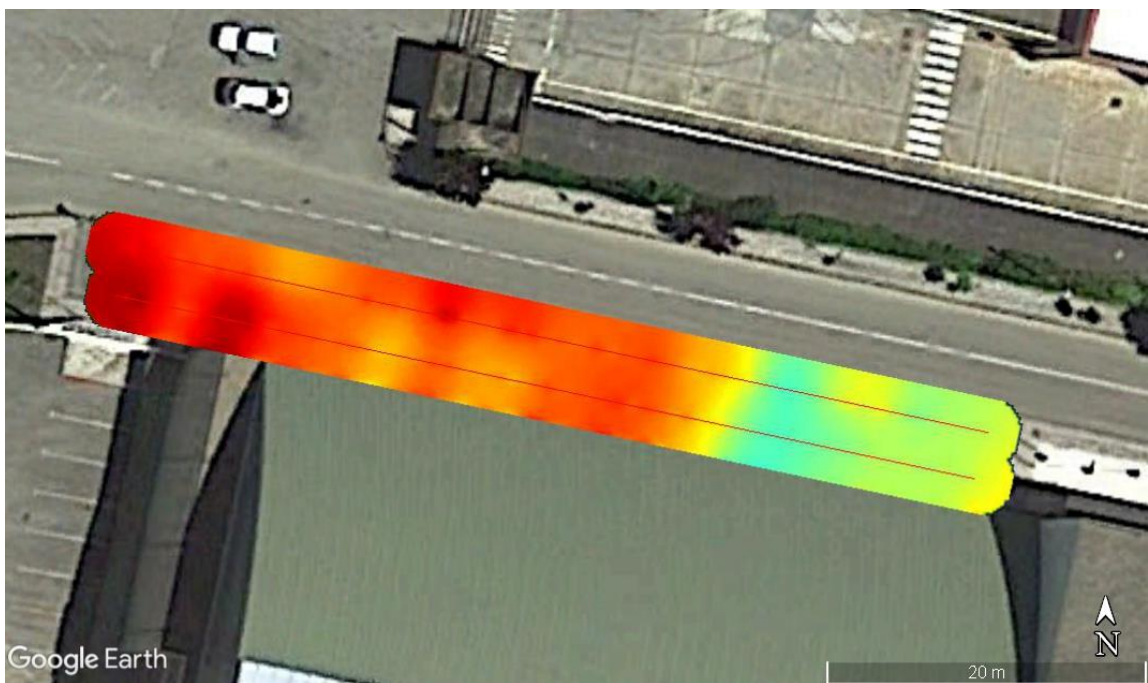


**Figura 44** - Zona A - *Slice view* a 8 metros de profundidade (EKKO Project v.5 e Google Earth Pro).





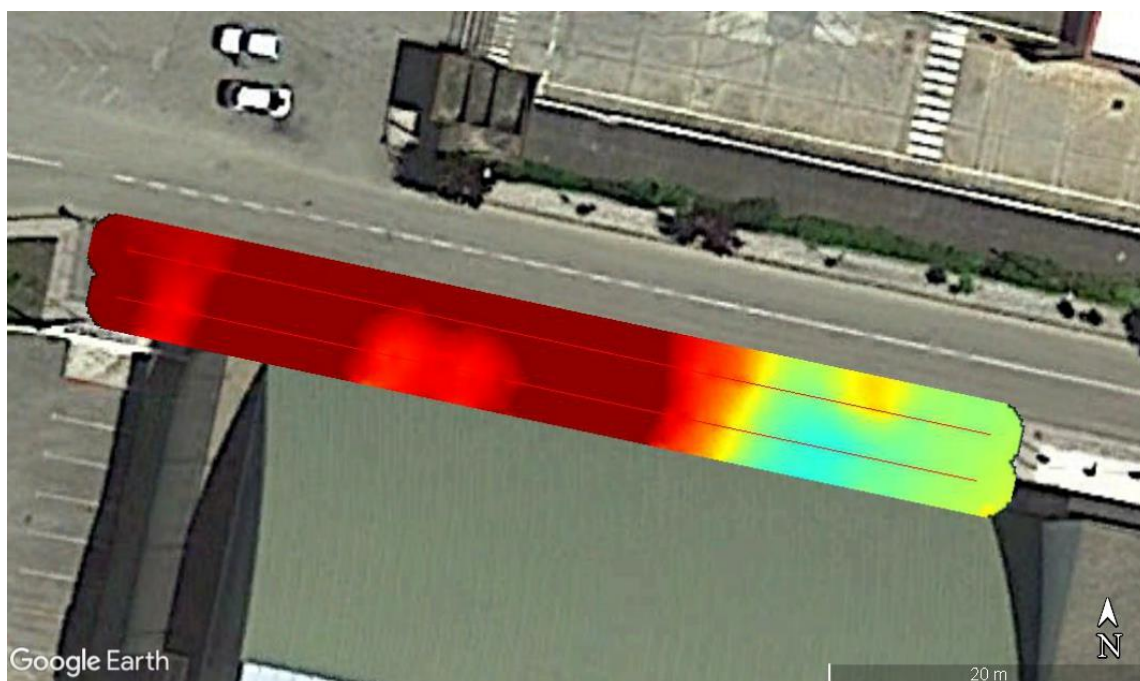
**Figura 45** - Zona A - *Slice view* a 10 metros de profundidade (EKKO Project v.5 e Google Earth Pro).



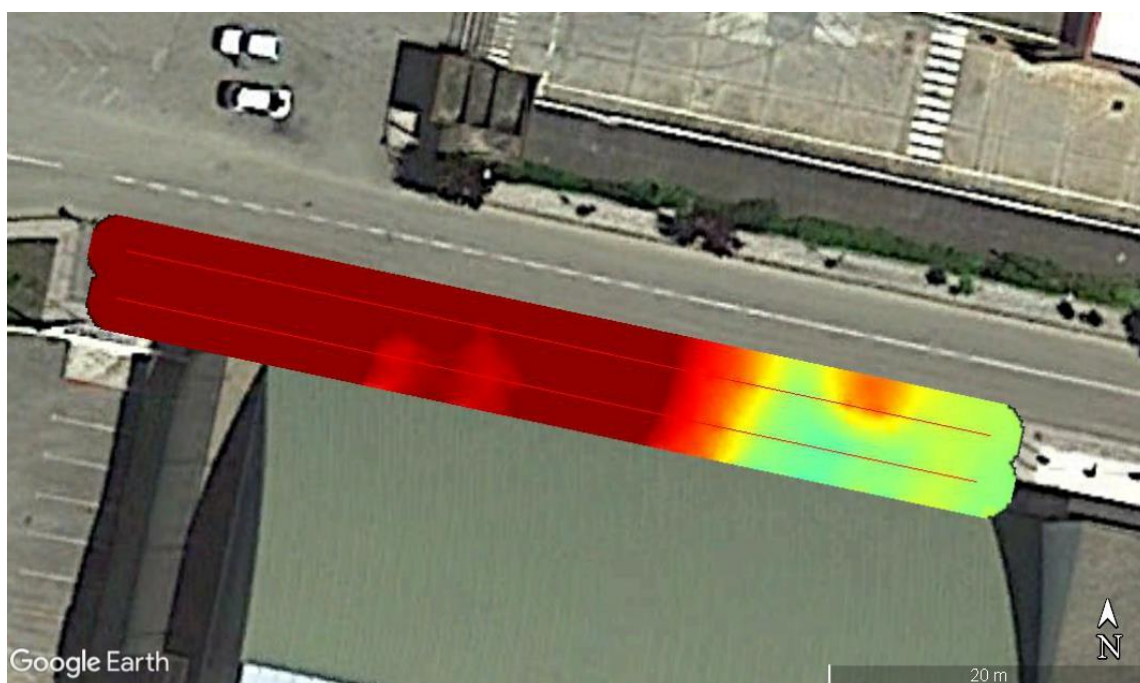
**Figura 46** - Zona A - *Slice view* a 11 metros de profundidade (EKKO Project v.5 e Google Earth Pro).



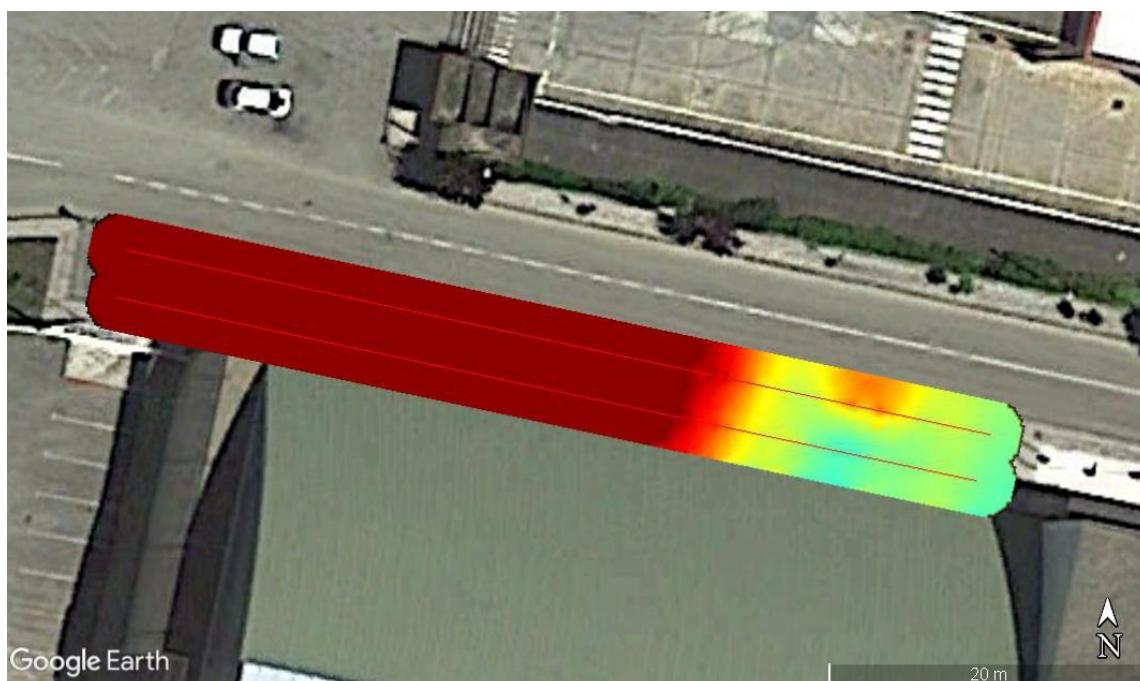
CASOS DE ESTUDO COM UTILIZAÇÃO DE GPR  
Reconhecimento e caracterização de estruturas geológicas, arqueológicas e estruturas  
subterrâneas



**Figura 47** - Zona A - *Slice view* a 11.75 metros de profundidade (*EKKO Project v.5* e *Google Earth Pro*).



**Figura 48** - Zona A - *Slice view* a 12 metros de profundidade (*EKKO Project v.5* e *Google Earth Pro*).



**Figura 49** - Zona A - *Slice view* a 18 metros de profundidade (*EKKO Project v.5* e *Google Earth Pro*).

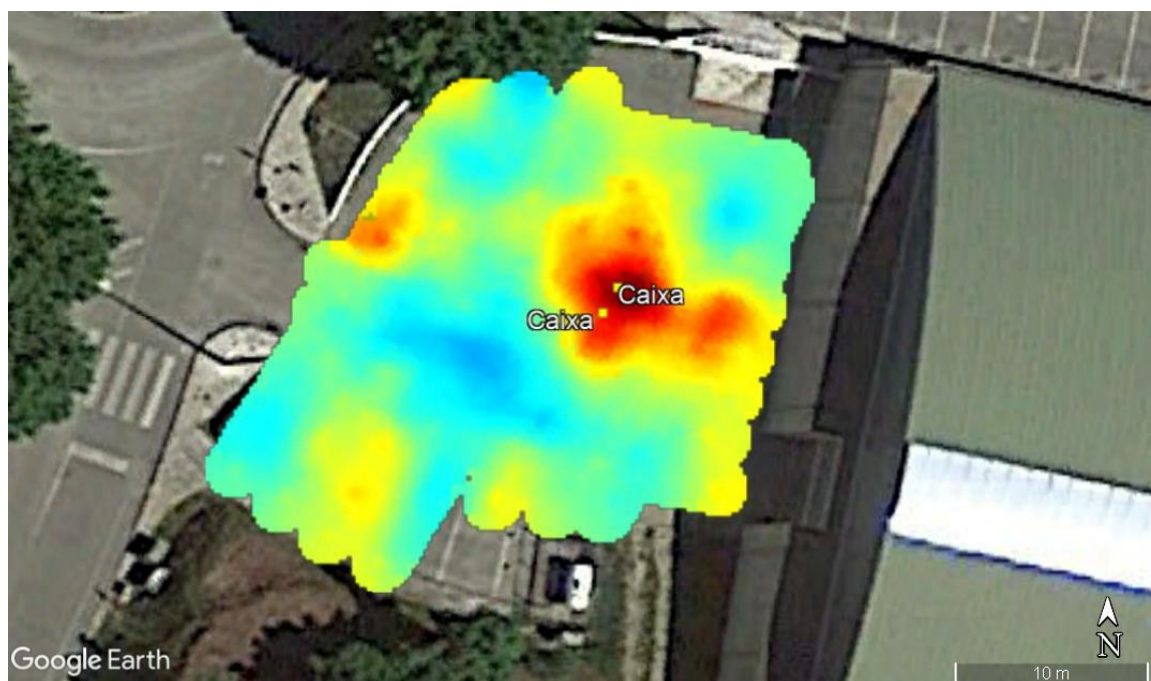
Na zona A é observável uma mancha bem definida na zona Este do mapa que é contínua em profundidade, que nos indica haver algum tipo de anomalia estrutural com grande impacto que tem menor amplitude de reflexão do que o meio envolvente devido aos tons claros que esta apresenta, em contraste aos vermelhos do resto da área (Figura 68, ponto W). Isto poderá remeter-nos para uma zona de vazios (galeria?), ou uma zona com grande teor em água. Apesar disso, essa primeira interpretação não nos convence totalmente pelo facto de ser uma anomalia muito profunda (aparecendo aos 8 metros e sendo contínua até aos 18 metros de profundidade pelo menos, profundidade a que julgamos não ser expectável a existência das galerias que se pretendem localizar).

A meio da zona existem pequenas variações de cor que vamos desconsiderar por não aparentar ter continuidade para a zona da S.A.L, de onde seria expectável vir uma tubagem ou galeria de acordo com informações dadas no local (o que não impede que seja alguma anomalia/estrutura que esteja a migrar desde a zona do pavilhão para aquele local).

Na parte mais Oeste da zona (Figura 48), temos uma anomalia perpendicular à área, que nos parece ter continuidade entre a S.A.L. (a norte) e a um fosso a cerca de 8 metros de

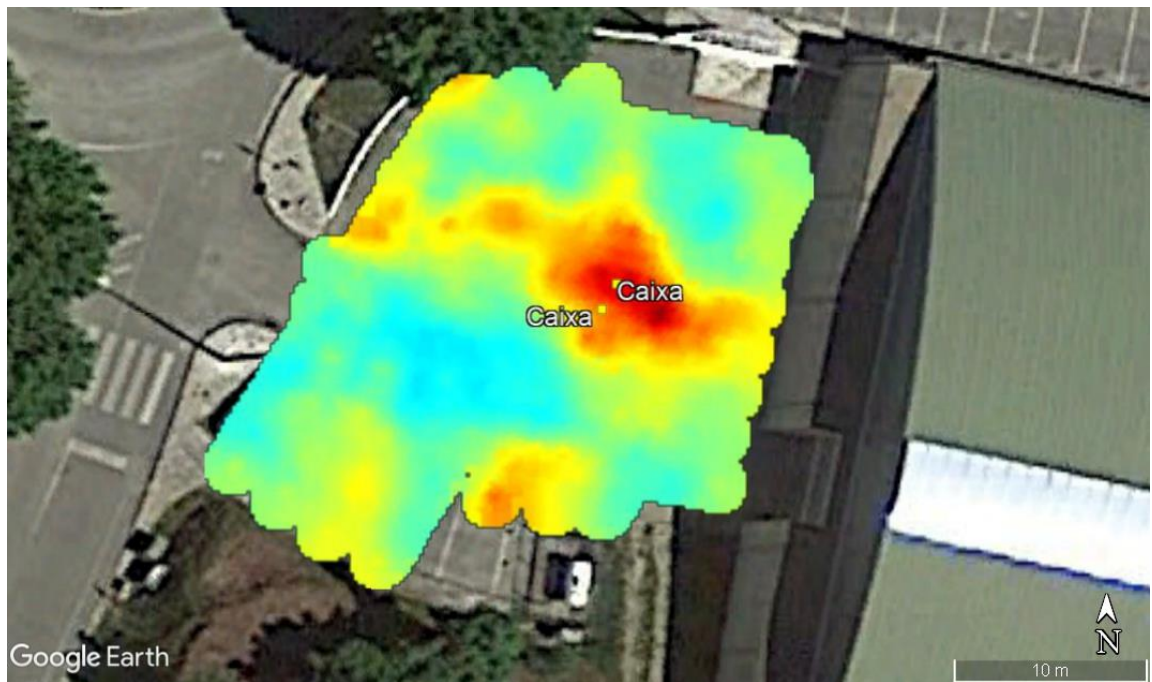
profundidade que nos foi informado existir junto às escadas de acesso entre esta zona e o parque de estacionamento junto da rotunda (Zona B, ponto X da Figura 68), o que nos leva a crer que exista aqui alguma estrutura do tipo das que se pretende localizar.

- **Zona B**

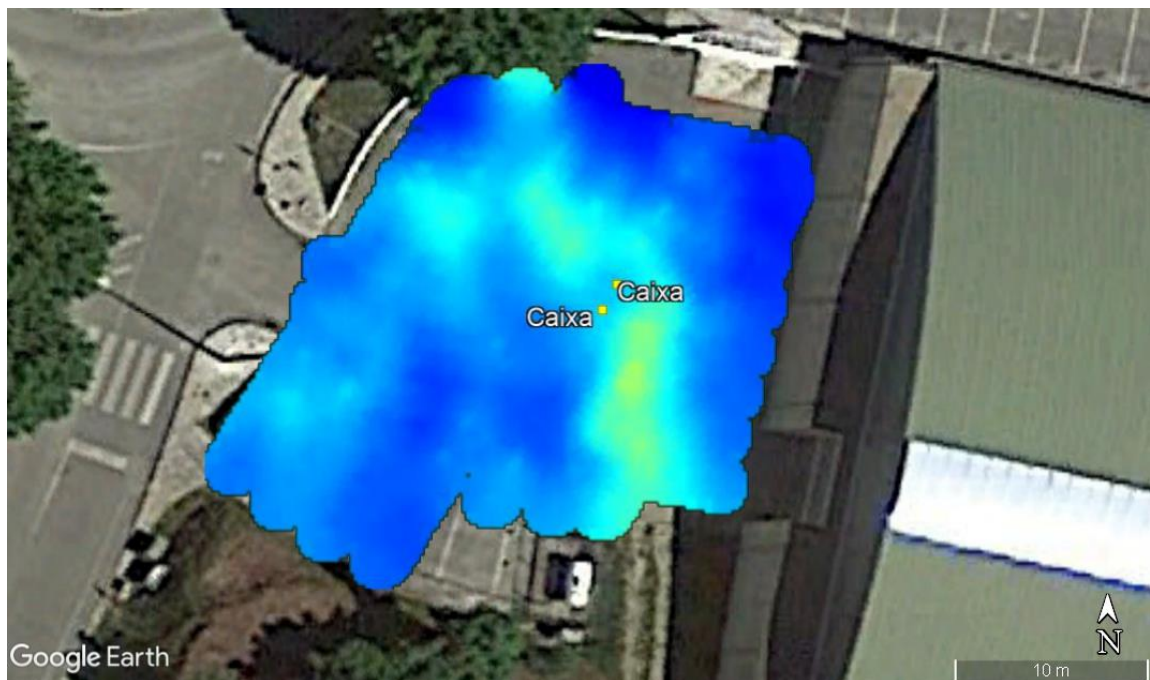


**Figura 50** - Zona B - *Slice view* a 0.25 metros de profundidade (EKKO Project v.5 e Google Earth Pro).

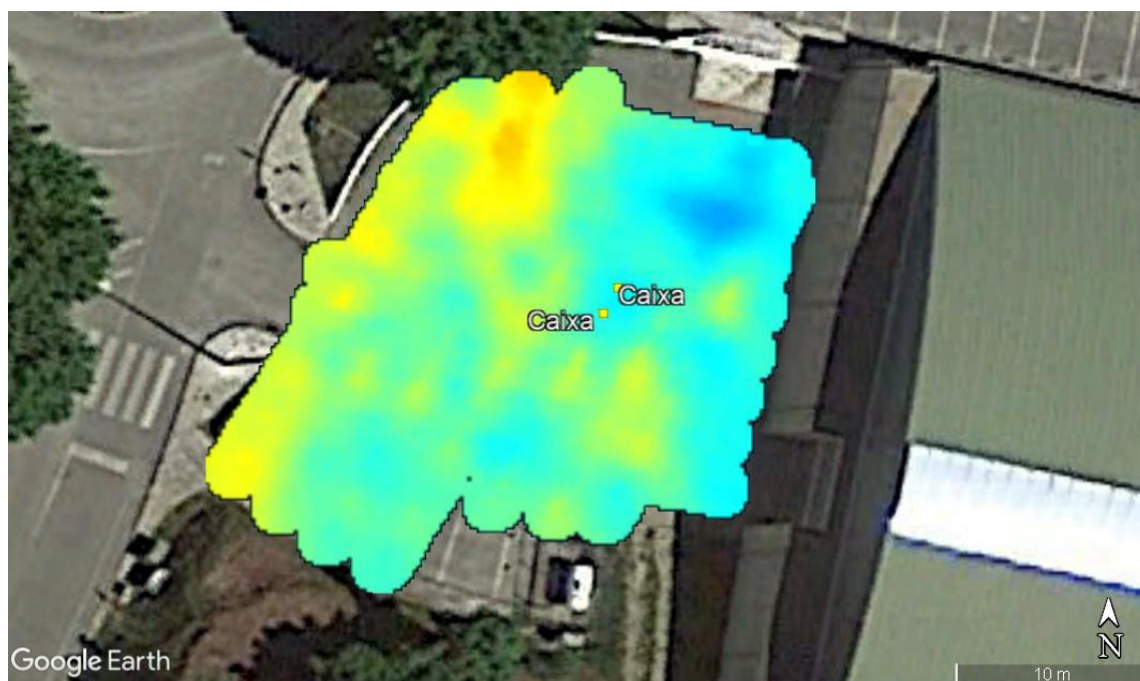




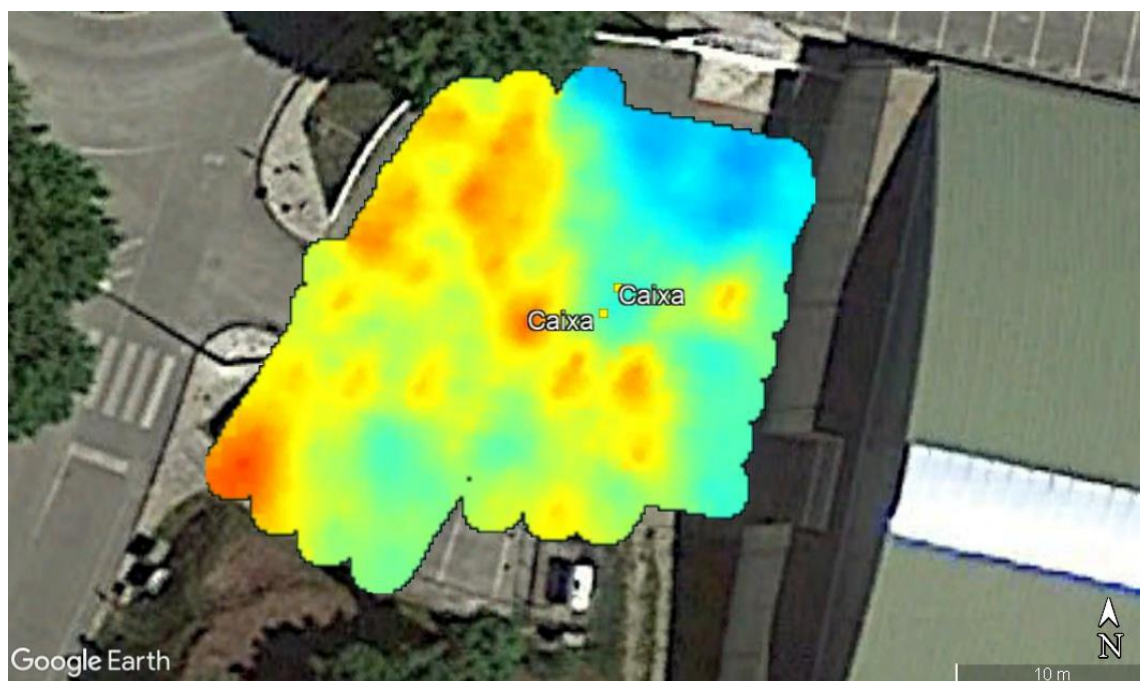
**Figura 51 - Zona B - Slice view a 0.50 metros de profundidade (EKKO Project v.5 e Google Earth Pro).**



**Figura 52 - Zona B - Slice view a 1.50 metros de profundidade (EKKO Project v.5 e Google Earth Pro).**

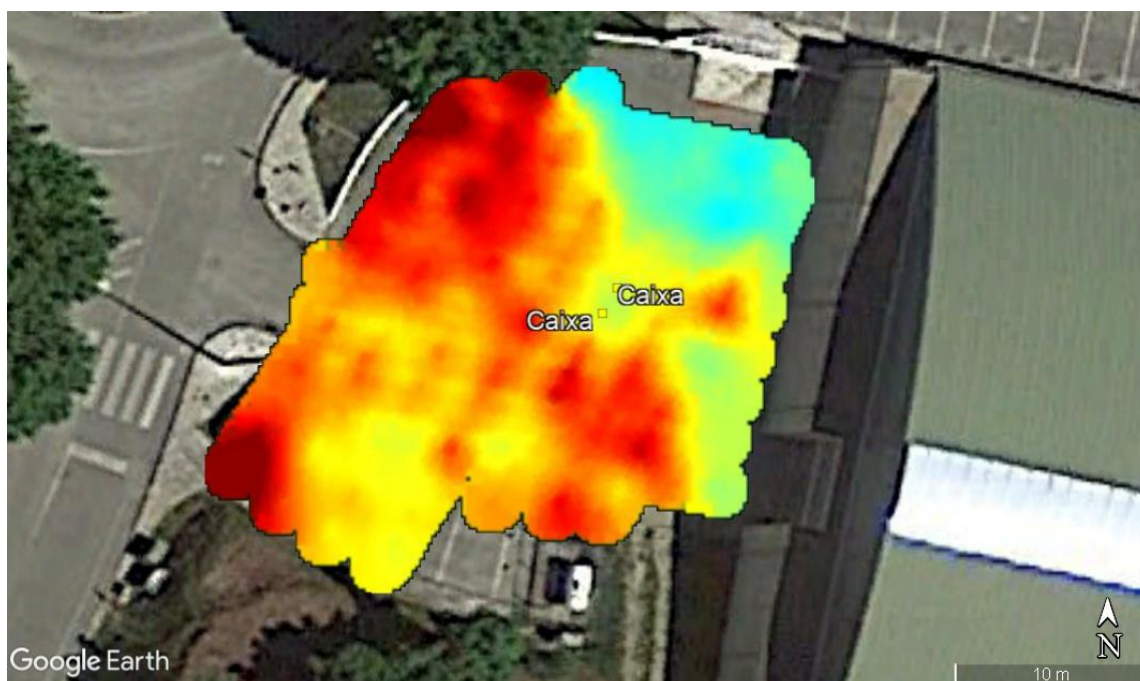


**Figura 53** - Zona B - *Slice view* a 10.50 metros de profundidade (*EKKO Project v.5* e *Google Earth Pro*).

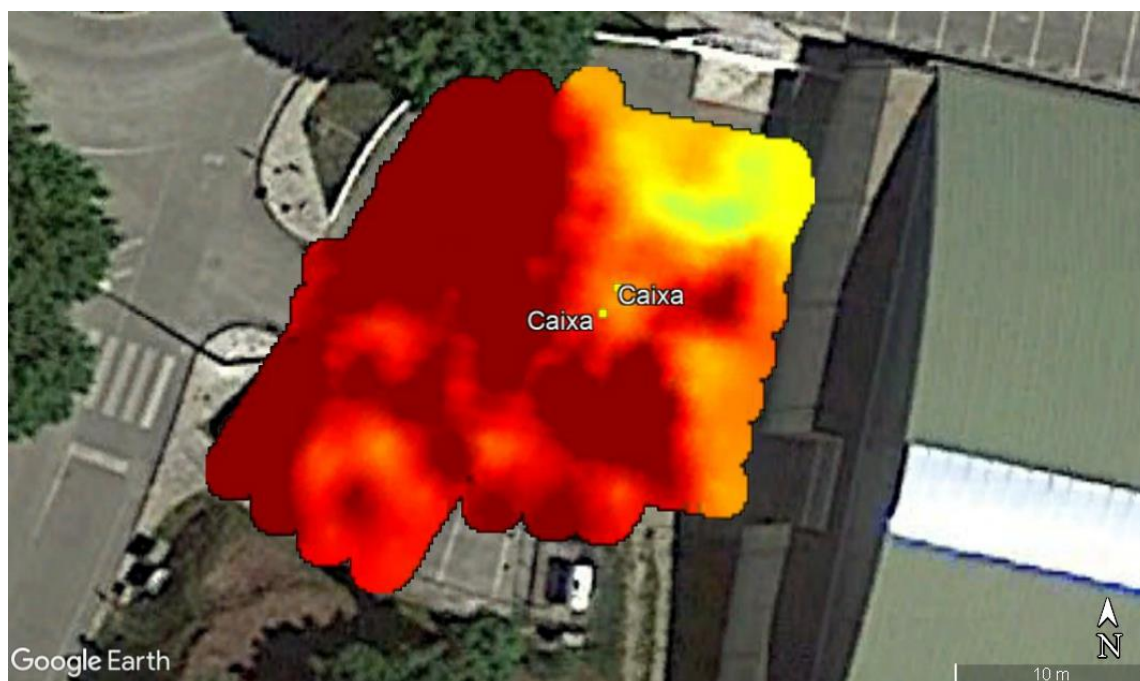


**Figura 54** - Zona B - *Slice view* a 11 metros de profundidade (*EKKO Project v.5* e *Google Earth Pro*).

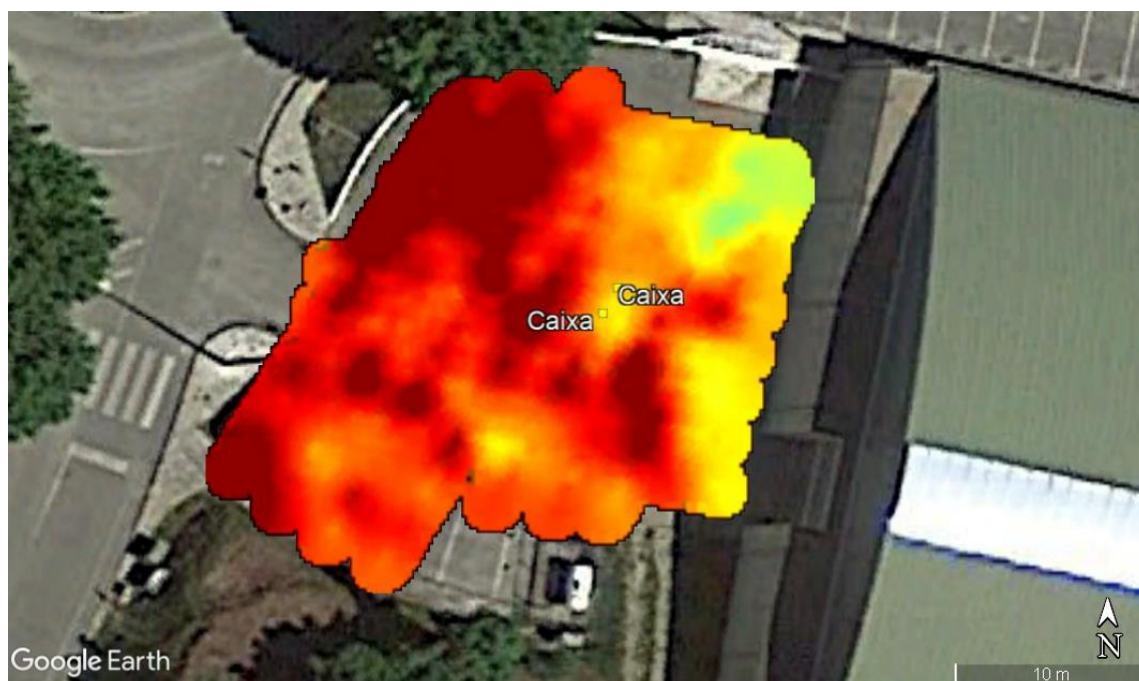




**Figura 55** - Zona B - *Slice view* a 12 metros de profundidade (EKKO Project v.5 e Google Earth Pro).



**Figura 56** - Zona B - *Slice view* a 14 metros de profundidade (EKKO Project v.5 e Google Earth Pro).



**Figura 57** - Zona B - *Slice view* a 18 metros de profundidade (EKKO Project v.5 e Google Earth Pro).

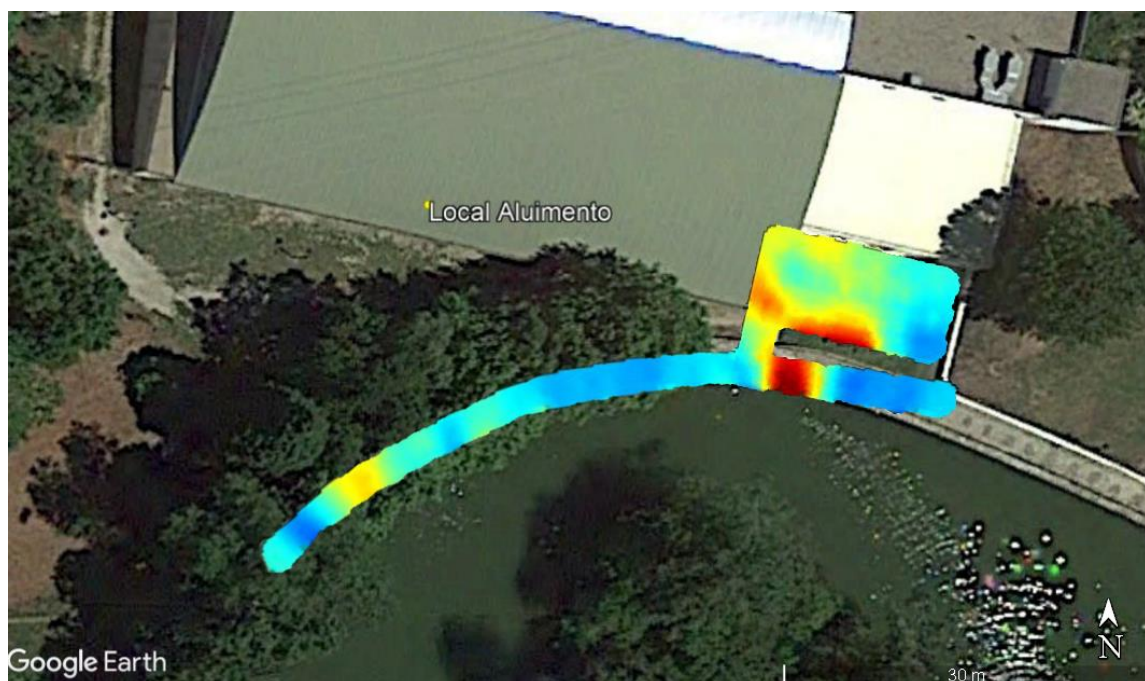
Na Zona B temos logo à superfície e até cerca de 1 metro de profundidade várias zonas com colorações diferentes bem visíveis. Neste caso, até esta profundidade, atribuímos os tons vermelhos e alaranjados com um alinhamento contínuo a condutas mais superficiais, e por isso mais recentes (escoamento de águas superficiais, caixas e respectivas tampas metálicas, grelhas, etc.). Já a mistura de manchas de cores mais claras (amarelos, azuis e verdes claros) até esta profundidade, atribuímos simplesmente a diferenças entre os materiais que compõem o aterro do parque.

Nas imagens seguintes (entre os 10,50 m e os 12 m) são evidentes áreas com tons mais claros (azulados e esverdeados), com alguma definição e continuação lateral e vertical, encaixadas em zonas de cores mais fortes (amarelos e laranjas). Devido ao aspecto em termos de morfologia e encaixe e também de tonalidade, julgamos que estas áreas de tons mais claros sejam áreas de saturação em água.

De notar que na parte Nordeste desta zona, junto à escada de acesso ao estacionamento lateral, temos uma anomalia com cerca de 5 metros de largura, que apresenta coloração

mais clara do que o resto da zona e se mantém sempre evidente (alterando apenas um pouco a sua morfologia) desde os 10 metros até aos 18 metros de profundidade. Atribuímos esta anomalia ao fosso de escoamento de águas referido na descrição da Zona A (Figura 68, ponto X).

- **Zona C**



**Figura 58** - Zona C - *Slice view* a 1 metro de profundidade (EKKO Project v.5 e Google Earth Pro).



CASOS DE ESTUDO COM UTILIZAÇÃO DE GPR  
Reconhecimento e caracterização de estruturas geológicas, arqueológicas e estruturas  
subterrâneas



**Figura 59** - Zona C - *Slice view* a 3.5 metros de profundidade (EKKO Project v.5 e Google Earth Pro).



**Figura 60** - Zona C - *Slice view* a 4 metros de profundidade (EKKO Project v.5 e Google Earth Pro).



**Figura 61** - Zona C - *Slice view* a 7 metros de profundidade (EKKO Project v.5 e Google Earth Pro).

A Zona C foi dividida em duas partes: uma que corresponde a uma grelha que cobriu a área junto ao bar do pavilhão e outra que corresponde a um perfil único junto ao lago.

A zona da grelha junto ao bar do pavilhão revelou-se um pouco inconclusiva. Entre a superfície e até aos 4 metros de profundidade existe uma variação de cores que nos remetem para a presença de uma anomalia que poderíamos interpretar como um vazio ou alguma área saturada em água. Acontece que neste local, temos divisões/salas no piso inferior, sendo que a partir dos 4 metros de profundidade esta mesma área passa a apresentar uma tonalidade vermelha forte, que interpretamos como sendo o reflector correspondente ao piso dessas salas que estão ao nível do campo do pavilhão.

Já no perfil junto ao lago, temos até à profundidade de 1 metro uma certa variação nas cores, mas que não nos evidencia a presença de estruturas significativas (a não ser uma anomalia de cor vermelho forte que aparece junto ao lago na zona

que dá acesso ao patamar junto ao bar, anomalia essa que corresponde a uma antiga conduta de descarga do lago, segundo nos foi informado).

Neste mesmo perfil, no início junto à área do bar do pavilhão, podemos observar aos 3,5 metros de profundidade (Figura 60) uma zona com tons mais claros, azulados, que parece estender-se para o canto sudeste da grelha adquirida junto ao bar, na qual apresenta tons mais amarelos, terminando de forma relativamente bem definida no limite da área vermelha. Pelo posicionamento dessa mancha correspondente a essa anomalia, podemos interpretar como não tendo relação com as anomalias que supostamente correspondem às salas inferiores do pavilhão, tratando-se assim de outro tipo de anomalia, e por conseguinte, outro tipo de estrutura (Figura 68, ponto Y).

A partir dos 4 e dos 7 metros de profundidade, todo o perfil se mantém com tons vermelhos bem fortes (talvez devido à possibilidade de existirem camadas mais argilosas que interferem com a propagação das ondas EM do equipamento), adquirindo ainda assim certas zonas de anomalias bem marcadas por tons de amarelo vivo. Associamos então a anomalia mais significativa (a amarelo) nas figuras 61 e 62 como sendo correspondente à linha de água subterrânea que provocou o aluimento junto ao pavilhão. A partir dos 7 metros não existe qualquer aspecto que se revele significativo.



- Zona D

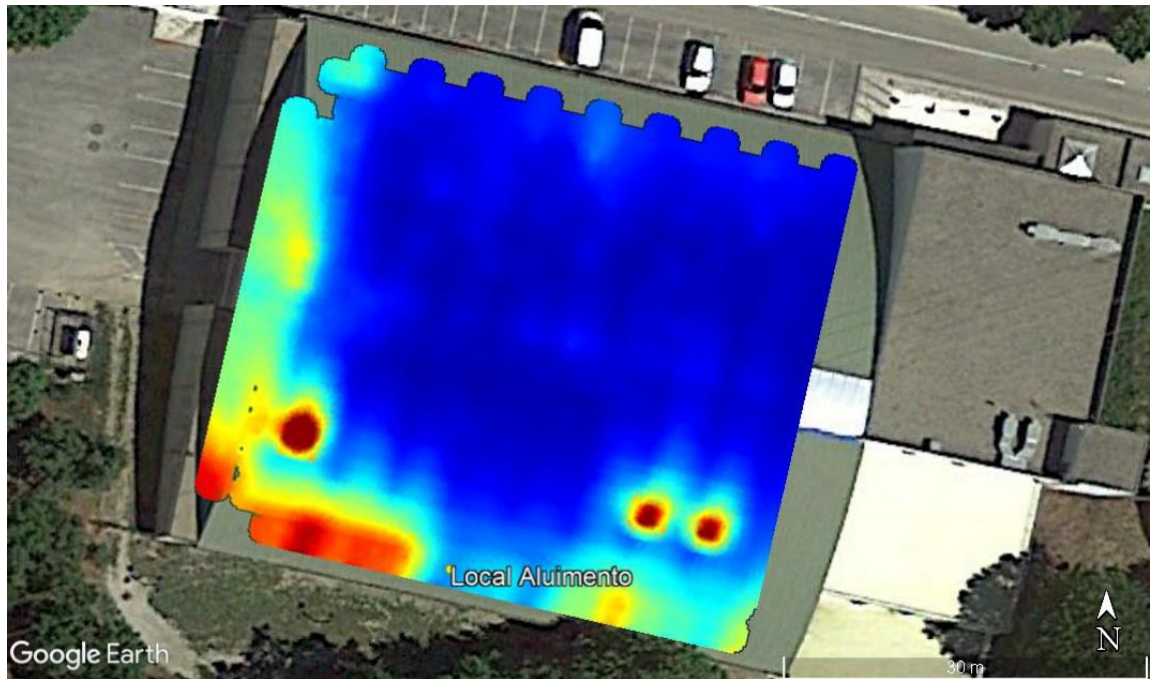


Figura 62 - Zona D - *Slice view* a 1.5 metros de profundidade (EKKO Project v.5 e Google Earth Pro).

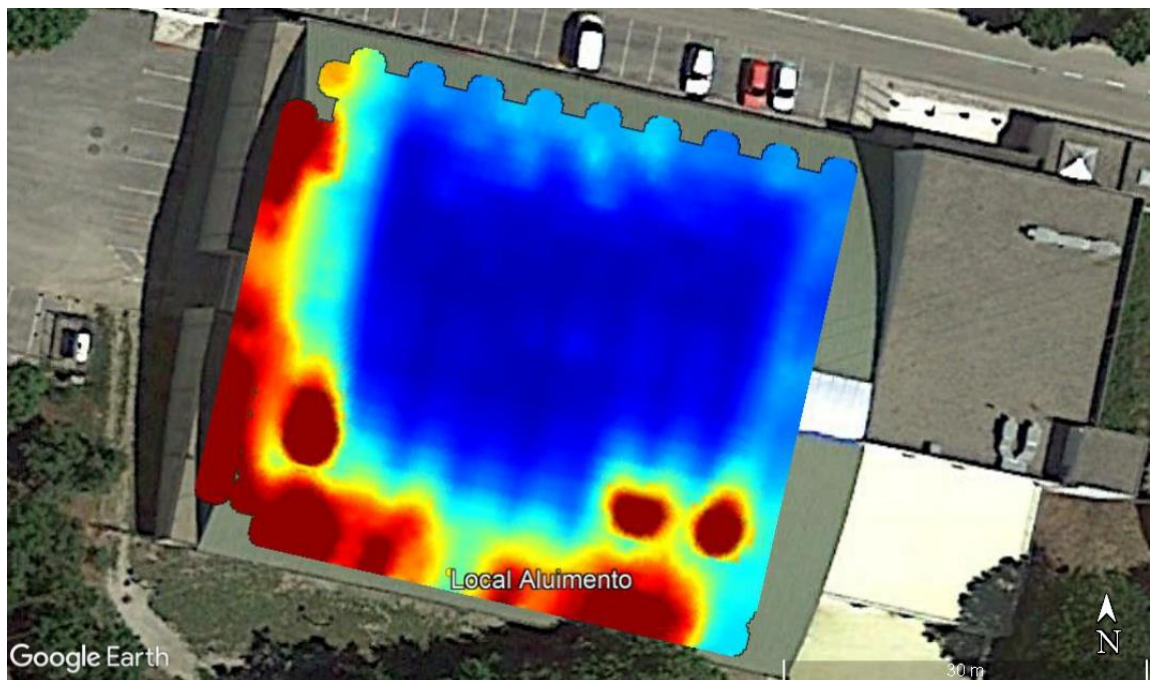
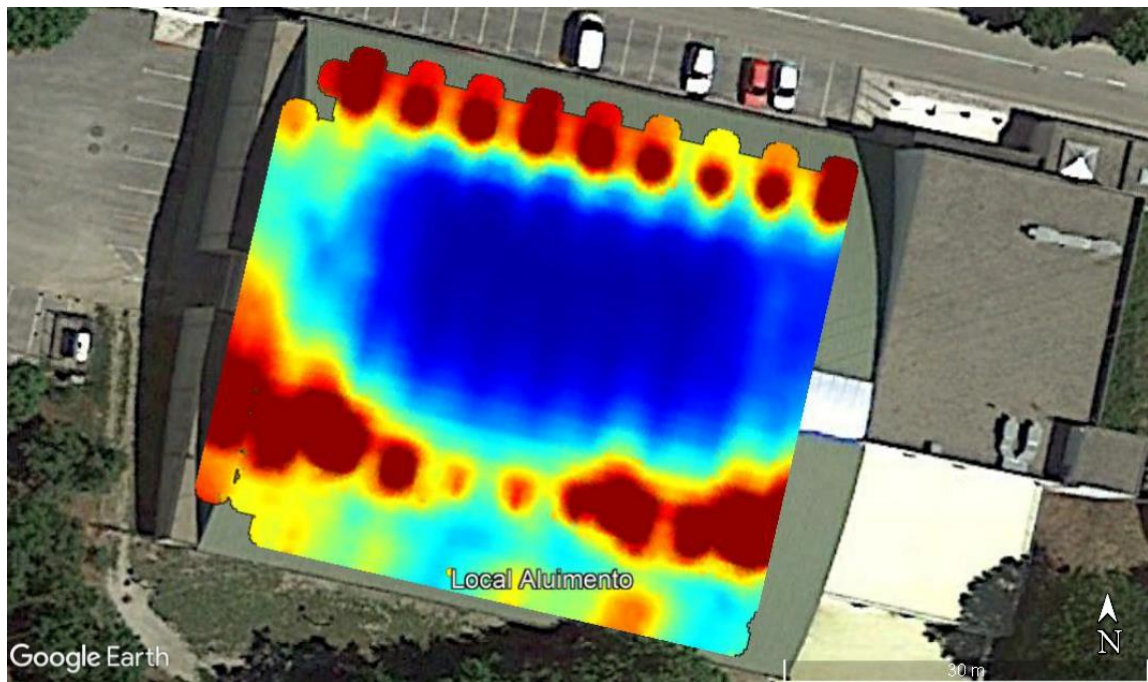
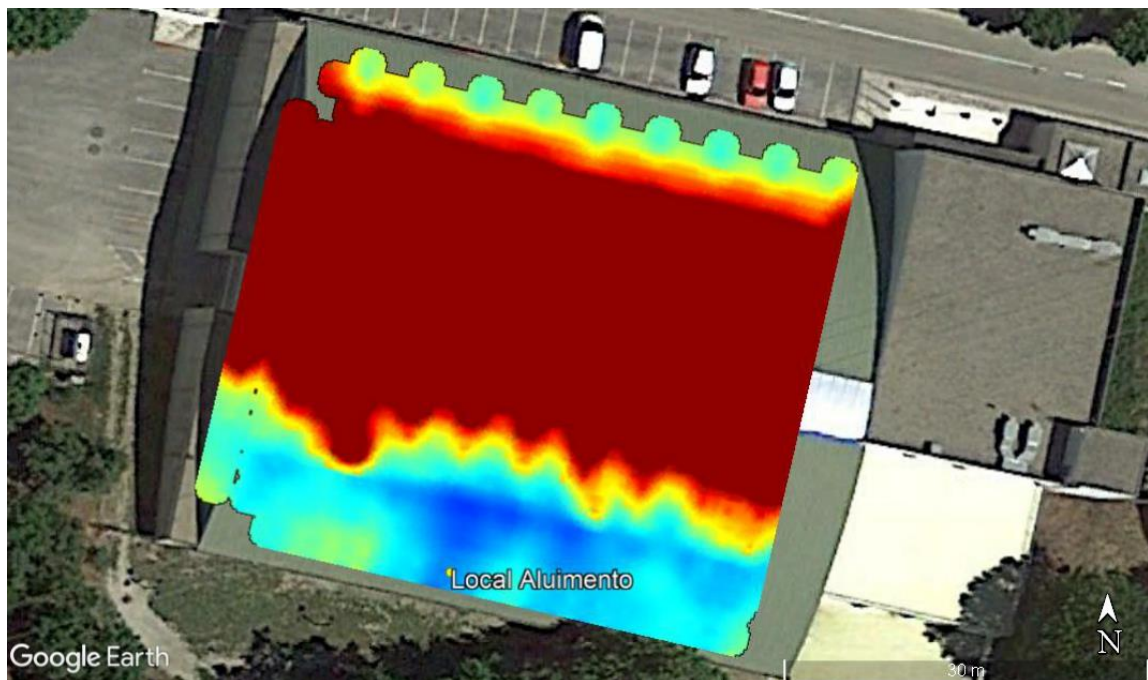


Figura 63 - Zona D - *Slice view* a 2 metros de profundidade (EKKO Project v.5 e Google Earth Pro).

CASOS DE ESTUDO COM UTILIZAÇÃO DE GPR  
Reconhecimento e caracterização de estruturas geológicas, arqueológicas e estruturas  
subterrâneas

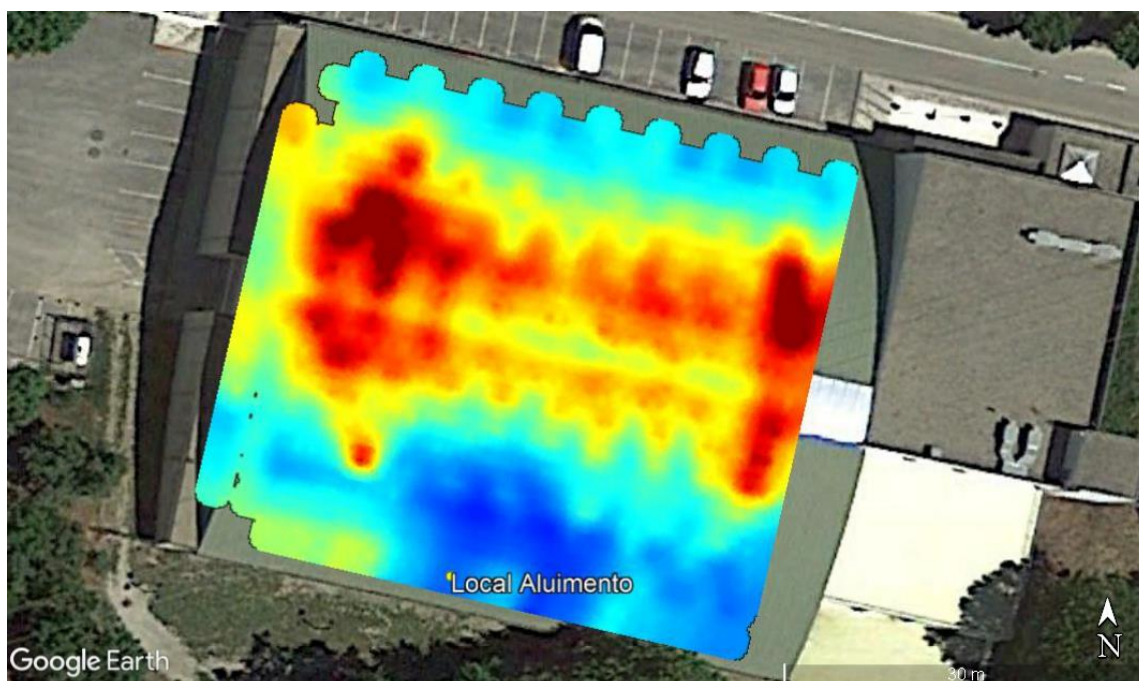


**Figura 64** - Zona D - *Slice view* a 3 metros de profundidade (EKKO Project v.5 e Google Earth Pro).



**Figura 65** - Zona D - *Slice view* a 4 metros de profundidade (EKKO Project v.5 e Google Earth Pro).





**Figura 66** - Zona D - *Slice view* a 4.5 metros de profundidade (*EKKO Project v.5* e *Google Earth Pro*).

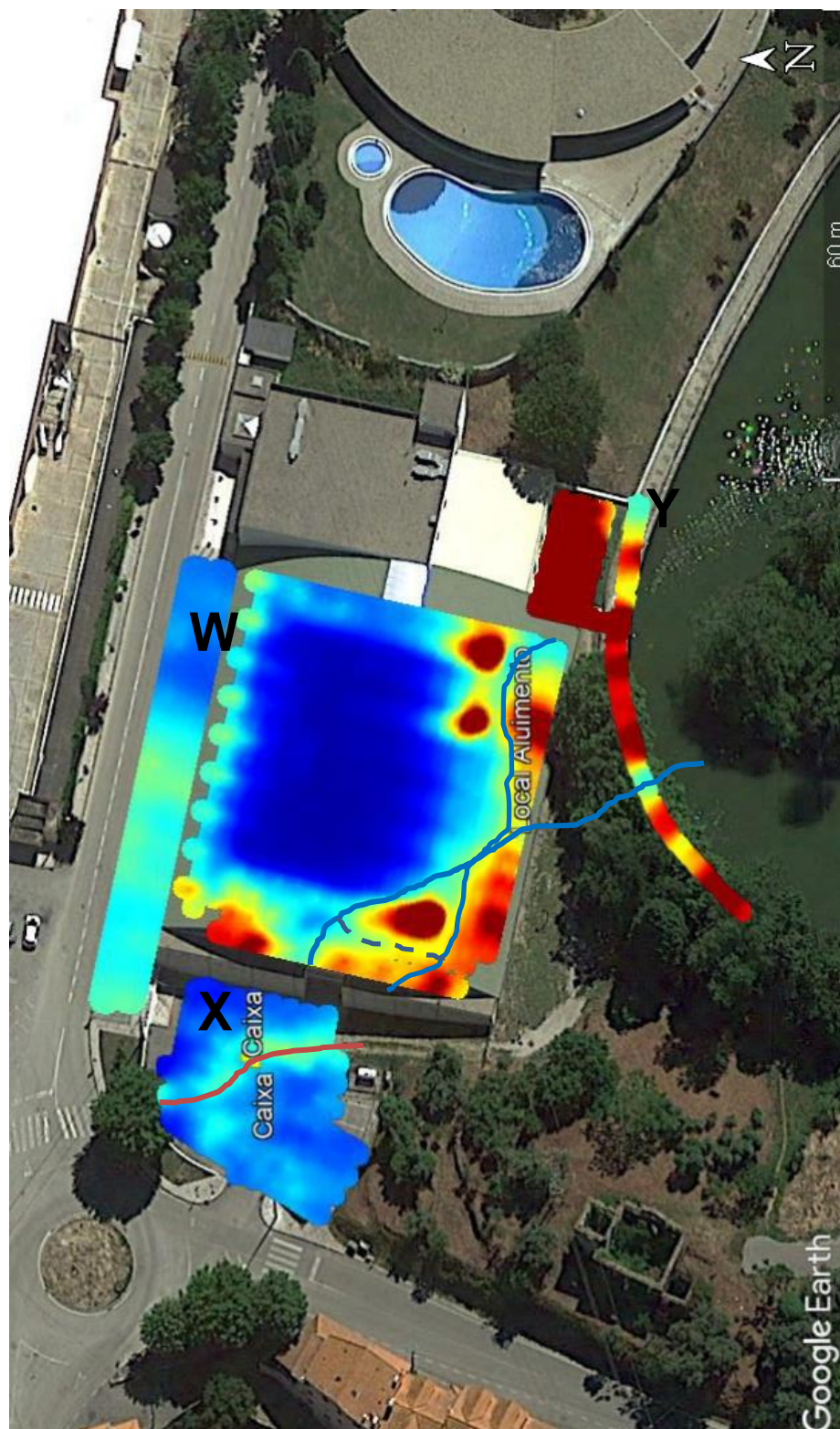
Na Zona D correspondente ao interior do pavilhão temos assinalado a tons de verde, azul claro e azul ligeiramente mais escuro o local exacto por onde circula a linha de água que deu origem ao alimento.

Assumindo esta paleta de cores e textura como assinatura correspondente ao local de passagem da linha de água, vemos que esta se prolonga quer para Este, quer para Oeste. Na Figura 65, a configuração das manchas coloridas leva-nos a crer que ela se prolonga e corta a zona do alinhamento de cor vermelha e vai circulando ao longo do bordo dessa mesma zona até junto à zona da porta do pavilhão (Zona B).

Do mesmo modo, tomando como referência as Figuras 65 e 66 e adoptando a mesma abordagem, a configuração de cores associadas à estrutura anteriormente referida leva-nos a julgar que esta se prolonga igualmente até ao canto inferior direito da área adquirida (área junto à zona do bar – Zona C), bem como para o canto inferior esquerdo da mesma área (em direcção ao depósito de gás – Zona B).

Grande parte da zona central do pavilhão assume valores de amplitude extremos (ora azuis escuros, ora vermelhos escuros). Julgamos que isso se relaciona com a presença das armaduras metálicas que compõem a laje do pavilhão, que acabam por interferir com as ondas EM enviadas pelo equipamento.

#### 2.4.4.2 Plano geral de todas as áreas em profundidade



**Figura 67** - Mapa geral de GPR e localização aparente das estruturas (Profundidades das *slice views* usadas: Zona A - 9m de profundidade; Zona B - 1.5m de profundidade; Zona C - 4m de profundidade; Zona D - 2.5m de profundidade) (EKKO Project v.5 e Google Earth Pro).



#### 2.4.5 Conclusões e considerações finais

Na Figura 68 temos uma interpretação mais geral e sumária do que já foi anteriormente explanado nas descrições da Zona A até Zona D. Assim, as letras W, X e Y corresponde às zonas de anomalia referidas nas Zonas A, B e C, respectivamente. As linhas a azul correspondem à interpretação das possíveis zonas de circulação de água/galerias. A linha a vermelho na Zona B corresponde à interpretação do traçado de uma das tubagens de escoamento de águas superficiais. Tentou-se que nesta mesma Figura anteriormente referida, as *slice views* de cada uma das quatro zonas estivessem representadas a uma profundidade comum relativamente umas às outras.

Não nos foi possível fazer a aquisição de perfis na ilha do lago devido ao elevado risco de danificar irreversivelmente o equipamento GPR.

Ao longo deste estudo concluímos que a geologia e a geodinâmica desta área foi fulcral para o problema surgido. Por ser uma área geomorfologicamente semelhante a um funil, é de prever que toda a massa de água que caia nesta pequena bacia vá escoar pelo local mais baixo, que é precisamente onde se situa o pavilhão. Para além disso, o declive desta área leva também a que a água percorra essas vertentes e chegue a esta zona com alguma intensidade (não é por mero acaso que ali existiam moinhos de água antigamente, e que muitas linhas de água convergiam para aquela zona).

Posto isto, a alteração dos xistos dá origem a argilas, que podem funcionar como boas camadas selantes de água e outros fluídos (impermeáveis), se se mantiverem relativamente húmidas. Recorde-se que a 2ª metade do ano de 2017 e parte inicial de 2018 foram particularmente secas, com a falta de chuva a levar muitas zonas do país a seca severa. Assim, as argilas perderam o seu conteúdo em água, secando e levando ao aparecimento de fendas, chamadas de “fendas de retracção/dessecação”. As várias semanas seguidas e repentinas de bastante chuva durante o mês de Março de 2018, fizeram com que os caudais das linhas de água aumentassem abruptamente. Isto associado à existência de fendas nas argilas nesta área fez com que a água circulasse por esta zona de uma forma mais livre e com mais intensidade, tendo assim a capacidade de levar algum material consigo, dando assim origem ao aluimento ocorrido.

## 2.4.6 Agradecimentos

- Agradecemos à Eng<sup>a</sup>. Filipa Damas Pinto – *Divisão de Administração e Conservação do Território, Câmara Municipal da Mealhada* e à Eng<sup>a</sup>. Arminda de Oliveira Martins, *Vereadora da Câmara Municipal da Mealhada*, todo o apoio e simpatia demonstrados durante o dia dos trabalhos e em todos os contactos realizados, bem como também pela inteira e imediata disponibilidade na cedência de material suplementar informativo acerca da zona onde foram feitos os trabalhos.

- Agradecemos também e em especial, o facto de permitirem usar os dados deste trabalho afim de serem integrados na tese de mestrado do aluno José Luís Carvalho como estudo de caso de utilização prática do método de GPR.

## 2.4.7 Referências bibliográficas – Caso de estudo 4

COSTA, J. C. (1950). Notícia sobre uma carta geológica do Buçaco, de Nery Delgado. *Serviços Geológicos de Portugal*. pp. 1-27

DINIS, Pedro Alexandre H. D. M. (2004). *Evolução pliocénica e quaternária do Vale do Cértima*. Coimbra.

EKKO\_Project User's Guide – With Processing, Bridge Deck Condition & Pavement Structure Modules. Sensors & Software Inc. Canada. 2015. 177pp.

INSTITUTO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO (2001) – *Carta Militar de Portugal à escala 1:25000*, Folha nº 219 (Mealhada), IGE, Lisboa.

OLIVEIRA, J. P., PEREIRA E., RAMALHO M., ANTUNES M. T., MONTEIRO J. H., (1992). *Folha Norte da Carta Geológica de Portugal, à escala de 1: 500 000*. Direcção Geral de Minas e de Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

CASOS DE ESTUDO COM UTILIZAÇÃO DE GPR  
Reconhecimento e caracterização de estruturas geológicas, arqueológicas e estruturas  
subterrâneas



## 2.5 CASO DE ESTUDO 5

### USO DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE MATERIAIS PÉTREOS – CARACTERIZAÇÃO POR ULTRASSONS E GPR

J. Duarte<sup>1</sup>, D. Pedrosa<sup>2</sup>, J. Carvalho<sup>3</sup>, F. Figueiredo<sup>4</sup>, L. Catarino<sup>5</sup>

(1) IQGeo – Serviços, Lda. e Centro de Geociências da UC, Portugal,  
joao.aduarte@iqgeo.pt

(2) Centro de Geociências, Departamento de Ciências da Terra da UC, Portugal,  
danielamfpedrosa@gmail.com

(3) Centro de Geociências, Departamento de Ciências da Terra da UC, Portugal,  
jose.carvalho.geo@gmail.com

(4) Centro de Geociências, Departamento de Ciências da Terra da UC, Portugal,  
fpedro@dct.uc.pt

(5) Centro de Geociências, Departamento de Ciências da Terra da UC, Portugal,  
lidiagil@dct.uc.pt

### 2.5.1 Resumo

Na indústria extractiva e no processo de transformação de rochas ornamentais, a presença de descontinuidades, tamanho do grão, porosidade e anisotropias texturais nos blocos explorados são factores de risco económico. Este estudo visa a identificação e a possível quantificação desses elementos.

A existência de um método rápido de inspeção, de baixo custo e não intrusivo para a avaliação de blocos facilitaria o seu aproveitamento evitando desperdícios. Para esse efeito, dois métodos não-destrutivos (Teste de Ultrassons com Ondas “P” e Radar de Penetração de Solo (GPR)) foram testados num bloco de calcário e comparados os seus modelos obtidos.

O equipamento de ultrassons portátil usado foi um Proceq Pundit Lab (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester) baseado no método da taxa de impulsos com 54 kHz para fornecer a informação sobre a uniformidade, as cavidades, as fracturas e os defeitos do material em causa através da medição do tempo de propagação da onda ultrassónica e a medição da taxa de impulsos. O equipamento utilizado para a aquisição de dados GPR foi um PULSEEKKO GPR (SENSORS & SOFTWARE), com um sistema de duas antenas bi-estáticas (transmissora e receptora) com uma frequência de 1 GHz, utilizando o método de reflexão com deslocamento comum e com uma separação entre antenas de 0,15 metros (m). Para fazer uma comparação válida e representativa dos resultados obtidos, ambos os testes foram realizados com um espaçamento de 0,1 m entre as medições, de acordo com uma grelha comum previamente definida. No caso do teste de ultrassons, os mapas de cor das velocidades foram criados com base nos resultados das medições, e através desta diferença de cores foi possível detectar e localizar algumas das fraturas individuais e visíveis, mas também as fraturas não visíveis à superfície da face caracterizada. Aumentando a distância entre os transdutores, a profundidade de medição também aumenta, criando mapas da mesma face a diferentes profundidades. No método GPR é possível adquirir vários perfis GPR (radargramas) que após o seu processamento foram usados para criar modelos 2D, 2.5D e 3D que nos permitem identificar as estruturas existentes, sua evolução vertical e horizontal e as relações espaciais entre elas.

**Palavras-chave:** Rochas ornamentais, GPR, Ultrassons, Métodos não destrutivos, Aproveitamento de materiais pétreos.

## 2.5.2 Introdução

Na indústria da rocha ornamental, a primeira fase do processo é a extração da rocha na forma de blocos, que são subseqüentemente transformados e negociados em diferentes tipos de produtos (em blocos, placas serradas e em material de construção). Neste setor, todos os tipos de material pétreo são em parte extraídos e processados em diferentes dimensões e formas. A extração de rochas ornamentais é feita pelo corte de blocos com um volume de 3 a 5 metros cúbicos, que após o processamento origina placas de várias espessuras, dependendo da sua utilização.

A presença de descontinuidades nos maciços rochosos é um factor de risco económico que deve ser previamente identificado, determinando a viabilidade técnica e económica da exploração. Detectar características ocultas geralmente não é possível, exceto usando técnicas intrusivas. Para as indústrias extractivas e transformadoras, utilizar um procedimento de diagnóstico não destrutivo para o controlo de qualidade dos blocos seria um valor acrescentado.

É verdade que existem vários aspectos - padrão que indicam que testes devem ser feitos nas rochas, geralmente testes de caracterização físico-química, que são realizados numa fase de exploração ou transformação, mas ainda há uma necessidade crescente de usar um teste mais específico para facilitar aos profissionais deste setor o reconhecimento de fatores que permitam a implementação da exploração ou minimização dos riscos associados à transformação.

Este estudo é sobre a última temática, sendo de grande relevância e vantagem competitiva maximizar a qualidade dos produtos, evitando tanto quanto possível seus resíduos e, conseqüentemente, os custos relacionados. Se de início for possível conhecer uma descontinuidade, lacunas tridimensionais escondidas no interior do bloco, a variedade de tipos de rochas sedimentares e texturas, bem como o seu desenvolvimento horizontal e vertical embora não seja visível para a superfície, permitir-nos-á ter uma abordagem de corte diferente de acordo com a sua localização e tamanho, obtendo um maior aproveitamento deste e um menor custo para o proprietário.

Tendo em conta as dificuldades na obtenção de informações sobre a qualidade dos blocos rocha ornamental, o principal objectivo deste trabalho foi detectar e, se possível, localizar

eventuais descontinuidades internas através de técnicas não destrutivas, tais como Técnica do ultrassons e Radar de Penetração de Solo (GPR).

### 2.5.3 Métodos e metodologias

Para a realização deste trabalho foram utilizados dois equipamentos de acordo com os métodos:

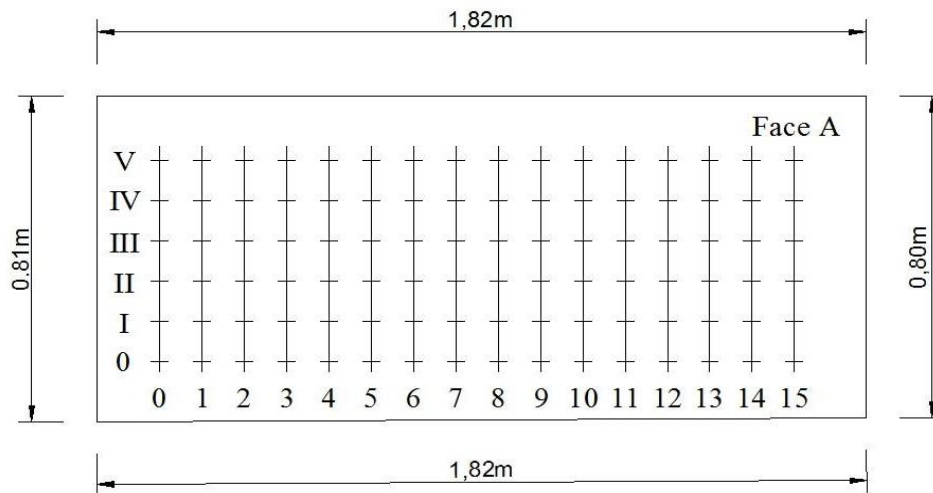
- I. **Método de Ultrassons** – equipamento Proceq Pundit Lab (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester);
- II. **Método GPR** – equipamento GPR PULSEEKKO da SENSORS & SOFTWARE.

O método de ultrassons é baseado no método de taxa de impulsos, para fornecer informação sobre a uniformidade, as cavidades, as fracturas e os defeitos do material em questão. Este equipamento permite a medição do tempo de viagem da onda ultrassónica e a medição da taxa de impulso. De acordo com o manual de instruções de funcionamento deste equipamento, são normalmente utilizados três tipos de transmissão: o método Directo, Semirecto e Indirecto ou Superficial. Desta forma, foram apenas realizados ensaios de contacto transmitindo ondas longitudinais pela amostra usando os transdutores como contactos, com uma frequência de 54 kHz, escolhida para penetrar em grãos finos e materiais de grão grosseiro até uma maior profundidade. Nestes ensaios, é essencial utilizar uma substância de acoplamento entre as faces dos transdutores e a amostra a ser testada para facilitar a transmissão de energia através das ondas ultrassónicas, neste caso, vaselina.

Foi decidido realizar apenas o ensaio de transmissão Superficial, com variantes no arranjo dos transdutores, aplicados num bloco de calcário com dimensões aproximadas de 1,80 m x 0,1 m x 2,20 m. Para facilitar as medições, foi desenhada e numerada em cada uma das faces do bloco uma grelha com linhas verticais e horizontais espaçadas 0,1 m de distância (Figura 68).

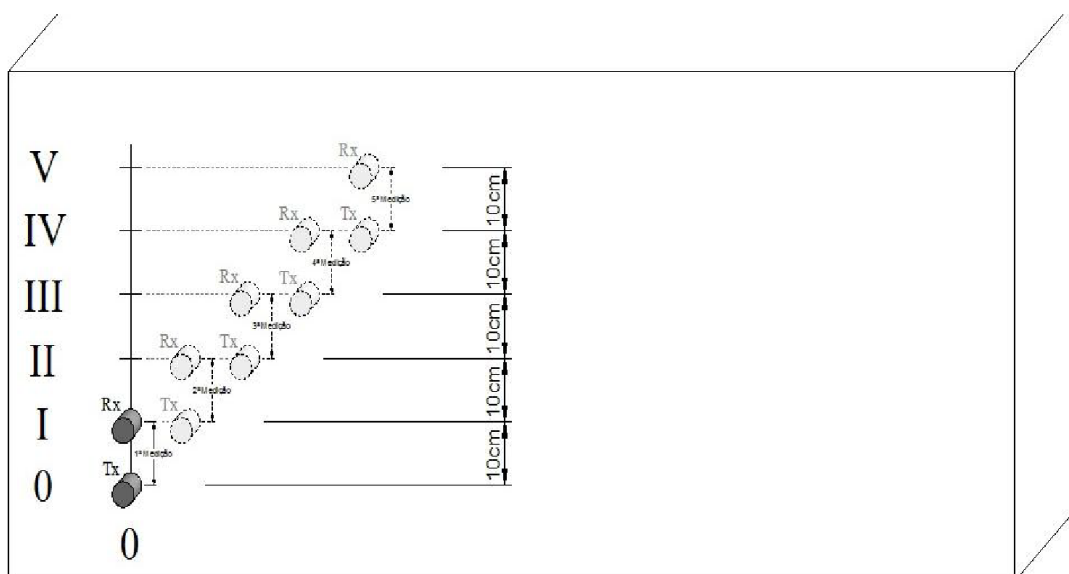


CASOS DE ESTUDO COM UTILIZAÇÃO DE GPR  
Reconhecimento e caracterização de estruturas geológicas, arqueológicas e estruturas  
subterrâneas



**Figura 68** - Esquema da grelha pré-definida com um espaçamento entre linhas de 0.10m (face A do bloco).

O Teste de Mapeamento - Transmissão por Superfície de Contacto foi efectuado em cada uma das linhas verticais com um espaçamento constante de 0,1 m. Aumentando a distância entre transdutores, a profundidade de medições dentro do bloco também aumenta, dando origem a mapas da mesma face, mas a diferentes profundidades de investigação (Figura 69). Os dados foram processados no software Surfer V8.1 da Golden, utilizando o algoritmo matemático de interpolação Kriging para criar o mapa de cores correspondente às velocidades medidas.

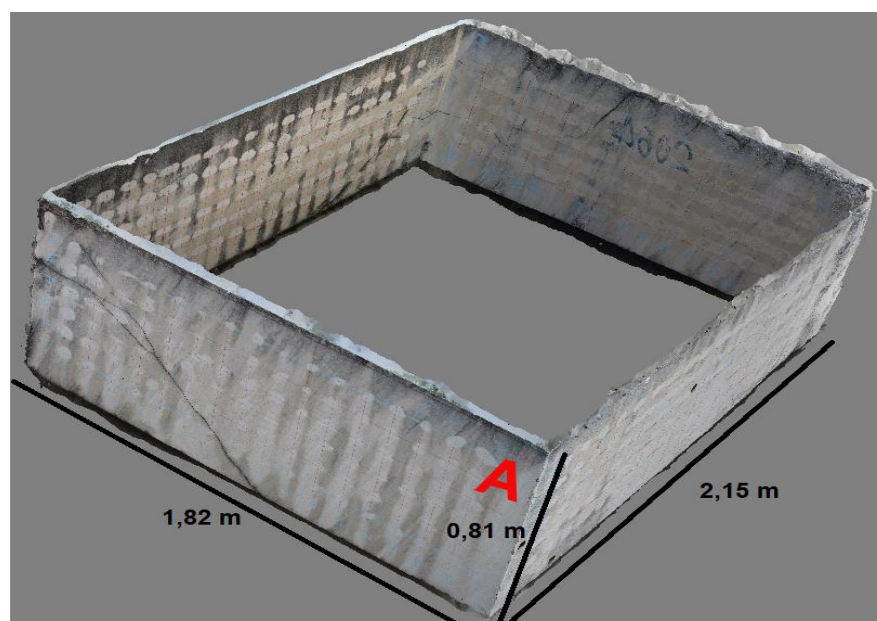


**Figura 69** - Esquema de aquisição com um espaçamento de 0.10 m entre linhas numa das colunas.

No método GPR, os dados foram adquiridos por reflexão com deslocamento comum das antenas, 0,10 m de espaçamento entre as medições (pontos correspondentes às medições feitas com ultrassons (Figura 68), utilizando duas antenas bi-estáticas blindadas (transmissora e receptora) de 1000 MHz, com uma distância fixa de 0,15 m entre elas. Para um bloco de calcário, a velocidade média padrão de propagação das ondas eletromagnéticas (EM) indicada pelo equipamento para este material é de 0,12 m/ns. Foi definida uma janela temporal de 22 ns e um stacking de 32. Com estes parâmetros de aquisição e após processamento dos dados (ajuste ao tempo zero, filtro dewow, DC-Shift, subtração do background e ajustes de ganho no sinal) foram obtidos radargramas com uma profundidade de investigação de cerca de 1,17 metros. Os radargramas obtidos para cada uma das faces foram combinados para criar um modelo de exibição de planos em profundidade para cada face do bloco. Os dados de aquisição foram processados no software REFLEXW ver 7.5.9, da SANDMEIER-geo.

O processamento de dados realizado neste caso foi apenas o básico, tentando ter tanta informação quanto possível sem alterar muito os dados originais adquiridos.

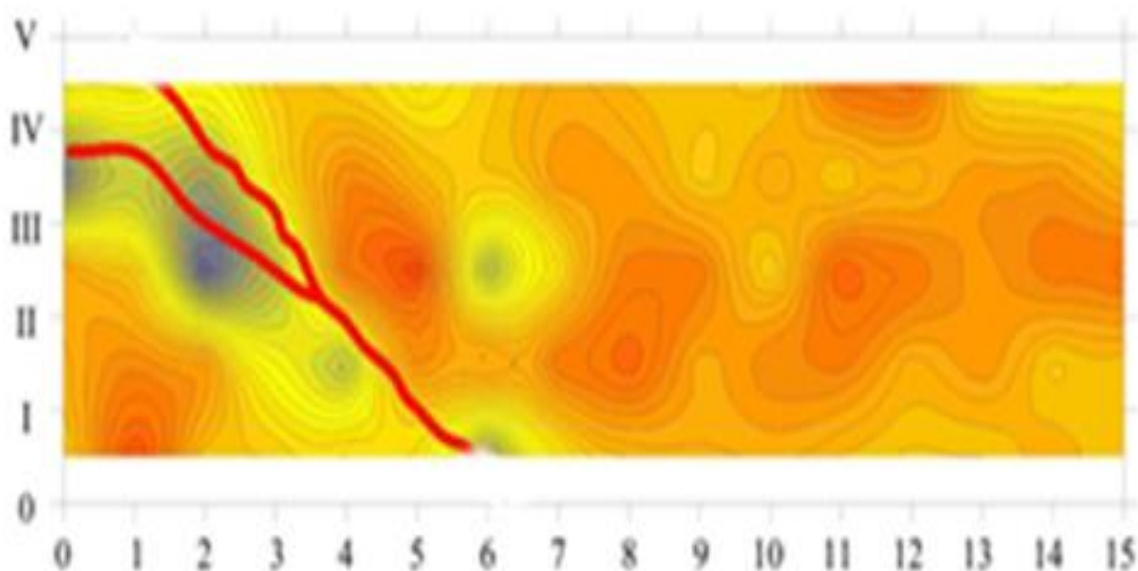
A Figura 70 mostra um modelo fotogramétrico do bloco, com indicação das dimensões e das faces em que os ensaios foram executados. O conjunto de ensaios descritos neste artigo dizem respeito somente à face representada como A.



**Figura 70** - Modelo fotogramétrico do Bloco nr.4 (ref.2064) da pedreira de Eduardo Marques & Rosa Lda.

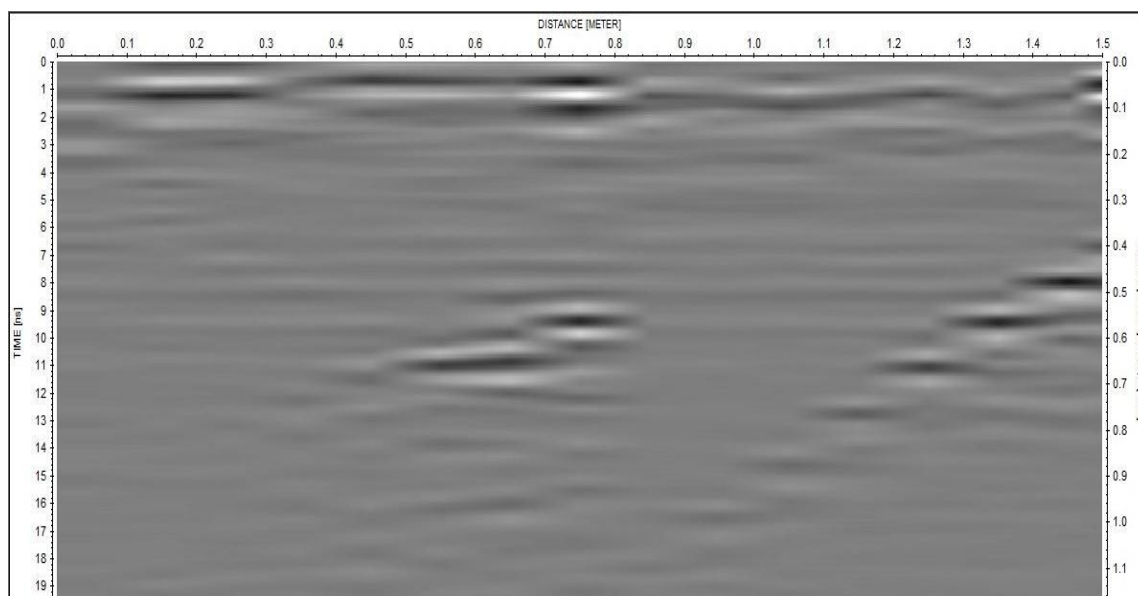
Para fazer uma comparação válida e representativa dos resultados, ambos os ensaios foram realizados com espaçamento de 0,1m entre transdutores e antenas, de acordo com a grelha previamente definida e igual para ambos (Figura 68).

No caso da caracterização por ultrassons, um mapa colorido de velocidades (Figura 71) foi desenvolvido com base nas medições. Foi possível, através das diferenças de cor, detectar e localizar algumas das fraturas visíveis individualizadas, mas também fraturas que não são visíveis na superfície da face testada. Ao aumentar a distância entre transdutores, a profundidade de medição dentro do bloco também aumenta, permitindo-nos criar mapas da mesma face, mas a profundidades diferentes. A partir desses resultados, pode ser traçado um gráfico de tempo/distância onde foi possível localizar e, por vezes, determinar a profundidade de discontinuidades internas.



**Figura 71** - Mapa colorido de velocidades baseado nos valores medidos através do ensaio de ultrassons na face A do bloco.

Com recurso ao GPR, foram obtidos vários perfis GPR (radargramas) (Figura 72) com os quais se criaram modelos 2D, 2.5D e 3D. Através destes modelos pudemos identificar as estruturas existentes, os seus limites verticais e horizontais e as relações espaciais entre elas.



**Figura 72** - Um dos perfis / radargramas adquiridos na face A (coordenadas  $x=0$ ;  $y=2$ ).

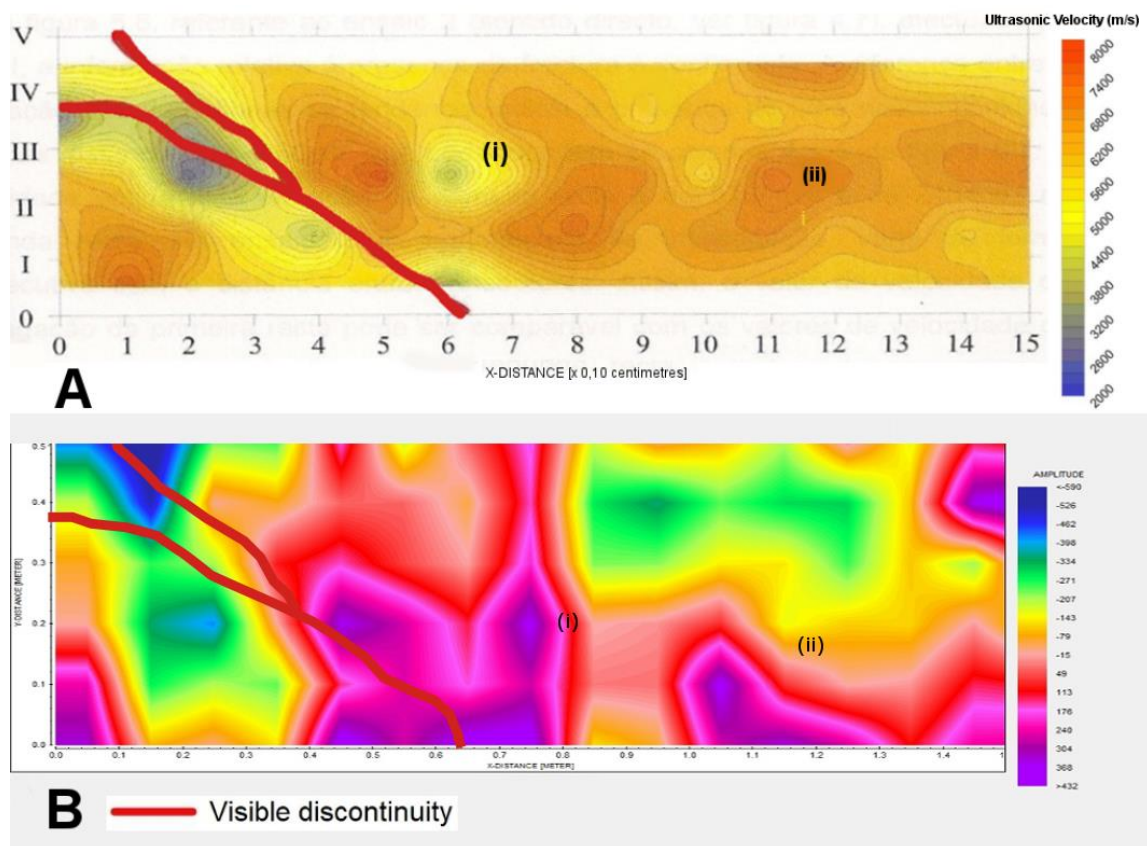
## 2.5.4 Resultados e discussão

No ensaio de transmissão por superfície de contacto (ultrassons), os valores das velocidades de propagação entre 7500 e 6500 m/s foram obtidos em áreas de grão mais grosseiro com uma matriz fina, entre 6000 e 5000 m/s em áreas de grão mais fino e homogéneo, e entre 4500 e 3500 m/s em zonas de fractura e em áreas distintas de anisotropia granulométrica (Figura 73A).

No ensaio de GPR os valores de amplitude de reflexão do sinal EM obtidos têm uma distribuição similar. Em zonas de vazios, o intervalo de amplitude varia de -590 a -398, em áreas com grão mais grosseiros entre -334 a -79, em áreas de grão mais finos e mais homogéneos entre -15 a +176 e em áreas com fluidos (água) entre +176 a +432, sendo possível distinguir áreas de anisotropia granulométrica.

A presença de discontinuidades é identificada observando-se a mudança abrupta dos valores de amplitude de reflexão, que corta uma estrutura existente e apresenta um arranjo linear. Se houver infiltração e percolação de fluidos, os valores apresentados são idênticos aos indicados para este caso, variam entre + 176 a + 432 (Figura 73B).

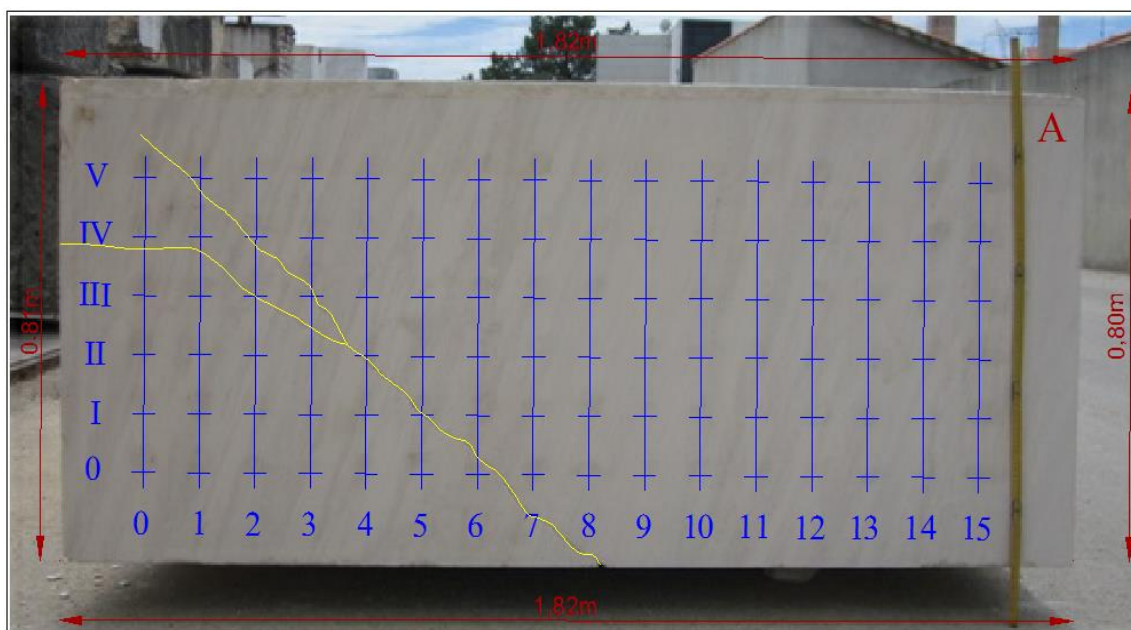
CASOS DE ESTUDO COM UTILIZAÇÃO DE GPR  
Reconhecimento e caracterização de estruturas geológicas, arqueológicas e estruturas  
subterrâneas



**Figura 73** - Plano de ultrassons em profundidade (A) e plano de GPR em profundidade (B) da mesma face do bloco (face A), ambos a 5cm de profundidade. (i) Grão mais fino, (ii) Grão mais grosso.

A comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos, associada à sua validação pela observação visual da face do bloco (Figura 74), permitiu-nos identificar as correspondências entre ambos e determinar quais as fontes responsáveis pelos valores medidos e descritos na Tabela 3, bem como a sua dispersão espacial, que está intimamente relacionada com as estruturas existentes.





**Figura 74** - Face A do bloco usado para o estudo.

**Tabela 4** - Tabela de correspondência entre os valores medidos e as estruturas interpretadas.

Velocidade dos Ultrassons (m/s)	Amplitude de sinal GPR	Tipo de estrutura interpretada
3500 to 4500	+432 to +176	Descontinuidades / Fluidos
4500 to 6500	+176 to -15	Grão Fino
6500 to 7500	-79 to -334	Grão Grosseiro
< 3500	-398 to -590	Vazios

### 2.5.5 Conclusões

O objetivo principal do presente trabalho consistiu na avaliação de um bloco de rocha ornamental usando ensaios não destrutivos, um ensaio de ultrassons e um ensaio de GPR. Este estudo destinava-se a avaliar características como o estado de alteração de rocha, textura e diferenças granulométricas no bloco, detectar e localizar eventuais descontinuidades no interior do bloco.



Os resultados obtidos a partir da aplicação destes métodos unicamente neste bloco de calcário permitiram concluir que as distribuições dos valores de velocidade de propagação das ondas têm uma relação directa com o que é observado na face do bloco, essencialmente quando o espaçamento entre os transdutores é de 0.10 m (ensaio de ultrassons). Desta forma, foi possível detectar e localizar fraturas visíveis e não visíveis na face do bloco e variações no tamanho do grão. Tendo em conta os objectivos deste estudo e os resultados apresentados para o teste de ultrassons, podem ser extraídas as seguintes conclusões:

- (1) Os transdutores a 0.10 m forneceram os resultados mais fáceis para interpretar e que permitiram estabelecer uma relação mais próxima com o que é observado nas faces do bloco;
- (2) Em áreas com grão mais grosseiro, a atenuação do sinal deveria ser maior, e por isso causar uma diminuição na velocidade de propagação das ondas. A partir dos testes realizados, isso não foi observado, verificando-se que a velocidade de propagação aumentou, o que pode ser justificado pela presença de matriz mais fina intercalando estas zonas do bloco, tornando-as mais compactas;
- (3) O alto grau de rugosidade da superfície do bloco é uma característica que não ajuda a realização dos testes, pois a superfície de contacto com os transdutores é reduzida;
- (4) Em relação à orientação das discontinuidades, verificou-se que, apesar de sua orientação em relação ao feixe da onda ultrassónica, é possível detectá-las usando ondas refletidas não-diretas.

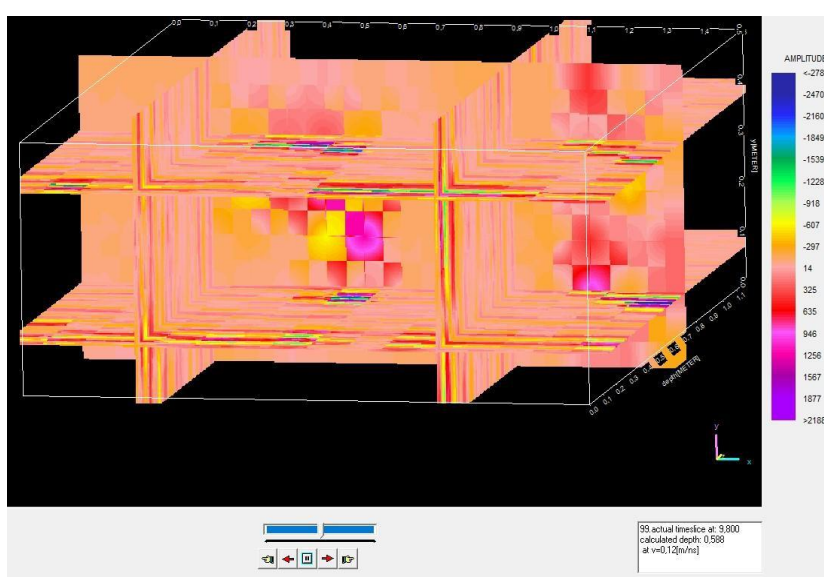
Sobre o método GPR que foi usado mais tarde, os seus resultados e interpretações poderiam ser refutados observando as faces do bloco usado para este estudo. Tal como no método de ultrassons, observou-se que as amplitudes de reflexão do sinal EM estão diretamente relacionadas com as variações texturais e estruturais visíveis nas faces do bloco. Desta forma, concluiu-se que:

- (1) A porosidade do grão é um fator a ser considerado e influencia a amplitude de reflexão do sinal. Os valores de amplitude obtidos para zonas de granulometria mais

grosseira são mais aproximados do valor para os vazios/poros (valores negativos). Embora essa correlação entre os métodos pareça contraditória, suspeitamos que isso se deve à presença de fluidos (água), na medida em que os valores de amplitude negativos estejam para zonas de granulometria mais grosseira devido ao grão ser mais compacto e, portanto, a água não ter capacidade de penetrar e migrar através da rocha, em oposição às zonas de granulometria mais fina, que mostra valores mais positivos (mais perto dos valores dos fluidos), o que sugere que há uma maior presença de água nestas zonas, devido à maior porosidade e menor compactação e calibração do grão.

(2) Com base no ponto anterior, consideramos que a análise dos resultados obtidos por este método requer um maior sentido crítico e atenção do que no método de ultrassons, uma vez que há mais fatores externos a considerar que influenciam os resultados (por exemplo, saturação de rocha na água).

(3) Em termos de aquisição e modelação de dados, foi revelado ser um método rápido, limpo e aquele em que mais informação é obtida em menos tempo. Ao contrário dos ultrassons, em que para cada espaçamento entre transdutores temos somente uma vista de um plano a uma determinada profundidade, no método de GPR temos a possibilidade de criar diversos planos desde a superfície até à profundidade máxima de penetração, mantendo os parâmetros iniciais de aquisição (Figura 75).



**Figura 75** - Modelo 3D representativo do bloco criado através da combinação especial dos perfis GPR obtidos e processados.

Futuramente, o bloco será cortado em placas, para nos permitir correlacionar as descontinuidades reais detectadas e visíveis nas faces, e relacionar os dados obtidos com o estado de alteração do material interiormente e as variações texturais.

Pode-se concluir assim que as metodologias propostas são válidas, que o objetivo do estudo foi alcançado e que as estruturas existentes foram identificadas com considerável resolução e precisão. Comparando os dois métodos baseando-nos neste estudo, consideramos que os ultrassons é o método que nos oferece resultados mais viáveis e aquele que tem menos influência de fatores externos que influenciam as propriedades da rocha e, conseqüentemente, os dados adquiridos, mas é um método que requer uma maior preparação da superfície do bloco para acoplar o equipamento, e que dá o menor número de dados para analisar.

O método GPR provou ser mais versátil, sem a necessidade de preparar previamente a superfície do bloco para fazer a aquisição, e é o método que em relação a quantidade de dados o que nos dá mais informações por aquisição, e o que nos dá uma forma de criar uma modelação mais completa e contínua ao longo do volume do bloco. No entanto, é o que requer mais cuidado em termos de uso e interpretação dos resultados devido à maior influência de fatores externos previamente mencionados.

Desta forma e considerando as virtudes e limitações de cada um dos métodos utilizados, consideramos que o uso de GPR provou ser o melhor método para o objetivo proposto.

### **2.5.6 Agradecimentos**

- Agradecemos à empresa IQGeo Serviços – e à empresa Eduardo Marques & Rosa a oportunidade e as condições necessárias para a realização deste trabalho.

- Agradecemos o apoio financeiro da FCT-MEC através de fundos nacionais e, quando aplicável, co-financiado pelo FEDER no âmbito da parceria PT2020, através dos projectos de investigação UID/Multi/00073/2013 do Centro de Geociências e UID/MULTI/00308/2013.

## 2.5.7 Referências bibliográficas – Caso de estudo 5

- BRAMANTI, M., & BOZZI, E. (2001). A procedure to detect flaws inside large sized marble blocks by ultrasound. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 2(1), 1-13.
- CARVALHO, J. M., PRAZERES, C., LISBOA, J. V., & SARDINHA, R. (2012). *Rochas Ornamentais do Maciço Calcário Estremenho: Breve Caracterização dos Recursos, dos Centros de Produção e Delimitação Preliminar da Áreas Potenciais*. Boletim de Minas. 47. pp 5-26.
- EL-GOHARY, M. A. (2013). Evaluation of treated and un-treated Nubia Sandstone using ultrasonic as a non-destructive technique. *Journal of Archaeological Science*, 40(4), pp. 2190-2195.
- ELKARMOTY, M., TINTI, F., KASMAEYAZDI, S., BONDUÀ, S., & BRUNO, R. (2018). 3D modeling of discontinuities using GPR in a commercial size ornamental limestone block. *Construction and Building Materials*, 166, 81-86.
- PROCEQ “PUNDIT LAB/PUNDIT LAB+.” (2010) Instrumento Ultrassônico.” *Instruções Operacionais*, 31 pp.
- REY, J., MARTINEZ, J., MONTIEL, V., CANADAS, F., & RUIZ, N. (2017). Characterization of the sedimentary fabrics in ornamental rocks by using GPR. *Near Surface Geophysics*, 15(5), 457-465.
- SANDMEIER, K. J. (2017). *REFLEXW Manual Version 8.5 Windows™ XP/7/8/10 – program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. Sandmeier geophysical research*. Germany. 617 pp.

CASOS DE ESTUDO COM UTILIZAÇÃO DE GPR  
Reconhecimento e caracterização de estruturas geológicas, arqueológicas e estruturas  
subterrâneas





## **CAPÍTULO 3 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES GERAIS**

### **3.1 Conclusões gerais**

Cada caso estudado teve as suas próprias conclusões, referidas em cada um deles. Apesar disso, resultaram daqui conclusões mais gerais e abrangentes. Ao longo de todo o trabalho percebeu-se que, tal como todos os métodos geofísicos, o Radar de Penetração de Solo tem as suas vantagens e desvantagens, e por via disso não é um método “milagroso” como por vezes se julga.

Assim, para tirar o maior e melhor partido deste método, é importante ter noção das suas virtudes, mas acima de tudo das suas limitações. À primeira impressão parece-nos ser um método muito simples e de fácil utilização, muito devido à versatilidade que adquiriu (equipamentos menores, mais leves, com possibilidade de fazer interpretações *in situ* durante a aquisição), mas a realidade não é bem esta. Por ser um método muito influenciável por factores externos (presença de água no meio que se pretende estudar, diferenças nas litologias, etc) o técnico / investigador tem de ter noção destes problemas e a sensibilidade suficiente para saber tirar o melhor partido deste equipamento e método, sem comprometer os seus dados, ou sem cair no erro de querer obter mais informação do que aquela que é possível. O mesmo acontece no tratamento e processamento dos dados, em que temos que saber tirar o melhor partido dos dados adquiridos, sem comprometer a informação original, de modo a não criar modelos errados, e por conseguinte, interpretações incorrectas.

### **3.2 Recomendações gerais**

Apesar de ser um equipamento completamente novo para o Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra e a comunidade desta unidade orgânica ainda não estar muito familiarizada com este, em pouco tempo e através deste trabalho conseguiram-se criar alguns artigos científicos, realizar trabalhos técnicos e promover parcerias com outras entidades, estes de grande interesse científico, acabando por desta

forma aproximar o DCT - UC ao público em geral, e a outras entidades. Assim, chegado o término deste trabalho e percebendo que a utilização responsável deste método tem muitas mais-valias e um enorme potencial nas mais variadas áreas, acredita-se que futuramente poderão surgir muito mais oportunidades para o uso deste equipamento/método e assim contribuir para um maior conhecimento e produção científica em geral.

Sendo assim, espera-se que a utilização deste equipamento GPR durante os estudos tratados neste trabalho tenha servido para se criar uma aproximação à utilização do método geofísico referido, e recomenda-se que se continue a usar este método para melhor o compreender, e ao mesmo tempo dotar a comunidade científica e académica do DCT - UC da experiência e técnica necessária para saber fazer uma correcta utilização deste, de modo a poderem-se realizar mais estudos afim de promover um maior conhecimento e compreensão do planeta em que vivemos.

### **3.3 Síntese autocrítica e reflectiva do trabalho realizado**

Ao longo do ano em que se levou a cabo este trabalho, penso que em regra geral posso fazer uma apreciação bastante positiva quer do trabalho que realizei, quer da forma como tudo foi coordenado com todas as pessoas com quem colaborei durante este mesmo ano, e quer também nas oportunidades que me foram proporcionadas para o meu crescimento enquanto pessoa e geólogo.

Como seria de esperar, nem sempre foi fácil, principalmente por estar a usar algo completamente novo, em que por vezes em certas alturas muitas dúvidas surgiam e me faziam sentir algum arrependimento por ter seguido este caminho. Mas com todo o apoio e companheirismo de muitas pessoas que conheci ao longo deste trabalho, tudo se tornou mais fácil e finalmente cheguei a este ponto.

Penso que foi conseguido o que se pretendia, quer da minha parte para comigo mesmo, quer da minha parte para com a comunidade com quem colaborei. Desta forma, sinto que foi um trabalho que deu bons frutos e que me preparou para um futuro que aí virá.

## CAPÍTULO 4 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANNAN, A. P. (1973). Radio interferometry depth sounding: Part I—Theoretical discussion. *Geophysics*, 38(3), 557-580.

ANNAN, A. P. (2002). GPR—History, trends, and future developments. *Subsurface sensing technologies and applications*, 3(4), 253-270.

ELTESTA, U. A. B. (2003). *Ground penetrating radars. Principles, Applications and Design*, 2003.

HRUSKA, J., ČERMÁK, J., & ŠUSTEK, S. (1999). Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. *Tree Physiology*, 19(2), 125-130.

JOL, H. M. (Ed.). (2008). *Ground penetrating radar theory and applications*. elsevier.

LOURENÇO, V., CALDEIRA, B., ROCHA, J., BEZZEGHOUD, M., & BORGES, J. F. (2012). Aplicação do Radar de Penetração no Solo (GPR) na detecção de estruturas no âmbito nas Ciências Forenses. *Gazeta da Física*, 34(3-4), 8-13.

SENSORS AND SOFTWARE INC. (2005). *PulseEKKO PRODUCT MANUAL*, Sensors and Software Inc., Mississauga, Ontario, Canadá.

<http://scantech.ie/scantech-about-gpr.html>, acessado em 27 de Maio de 2018

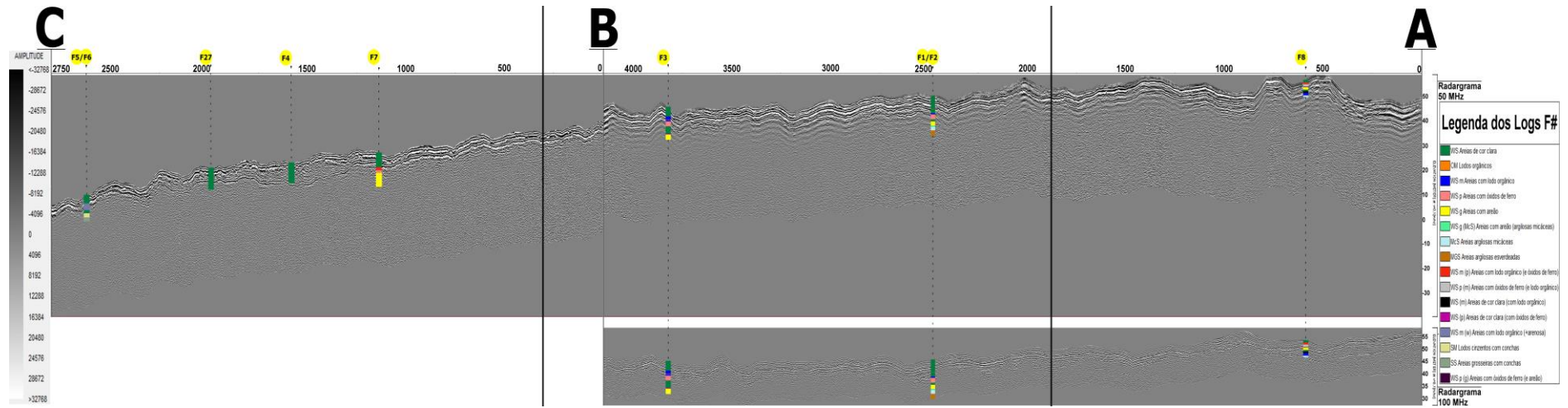
<https://www.geophysical.com/whatisgpr>, acessado em 27 de Maio de 2018

<https://www.sensoft.ca>, acessado em 11 de Setembro de 2018

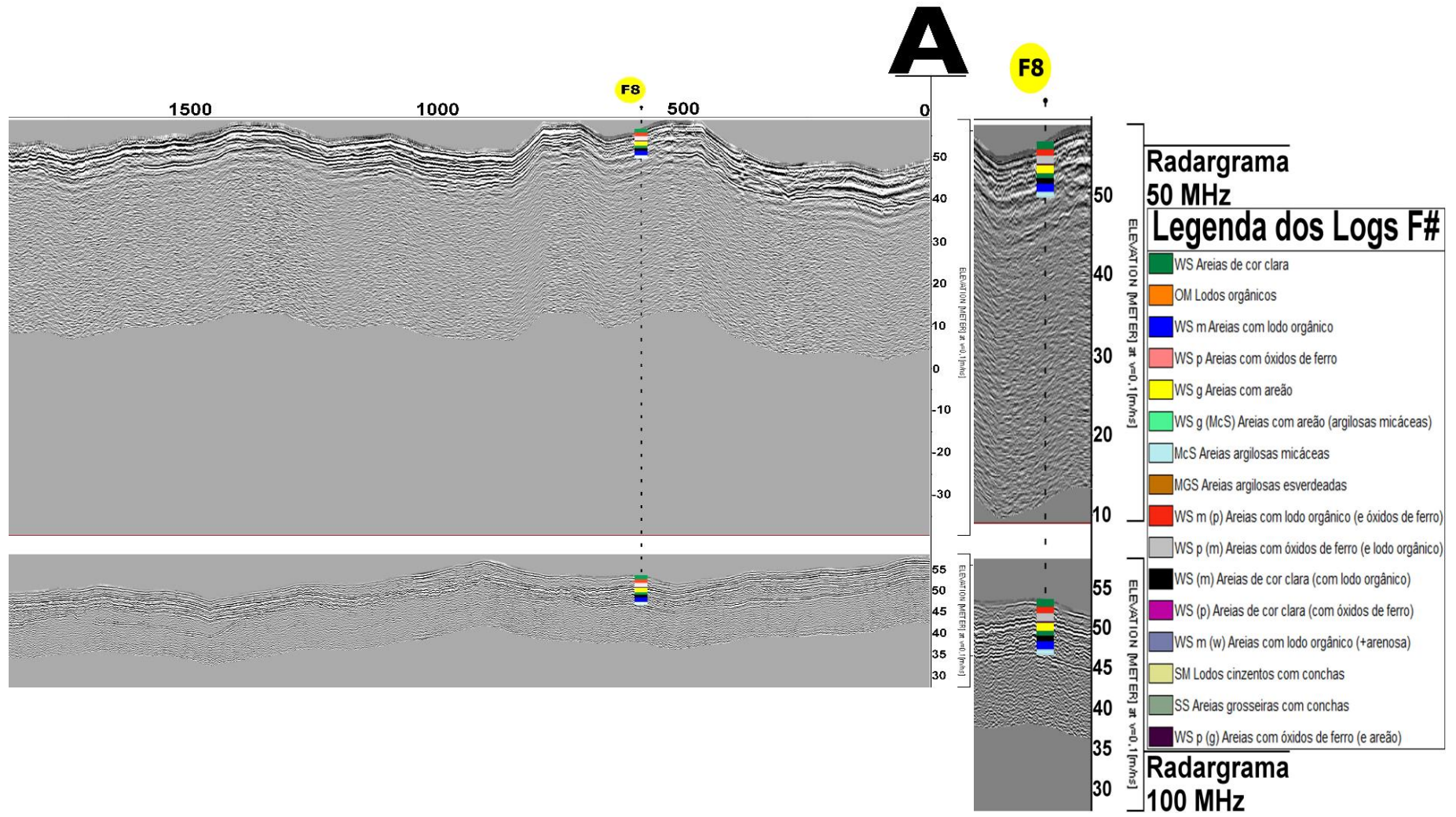


## ANEXOS

ANEXO I – Radargrama de 50 MHz e 100 MHz.

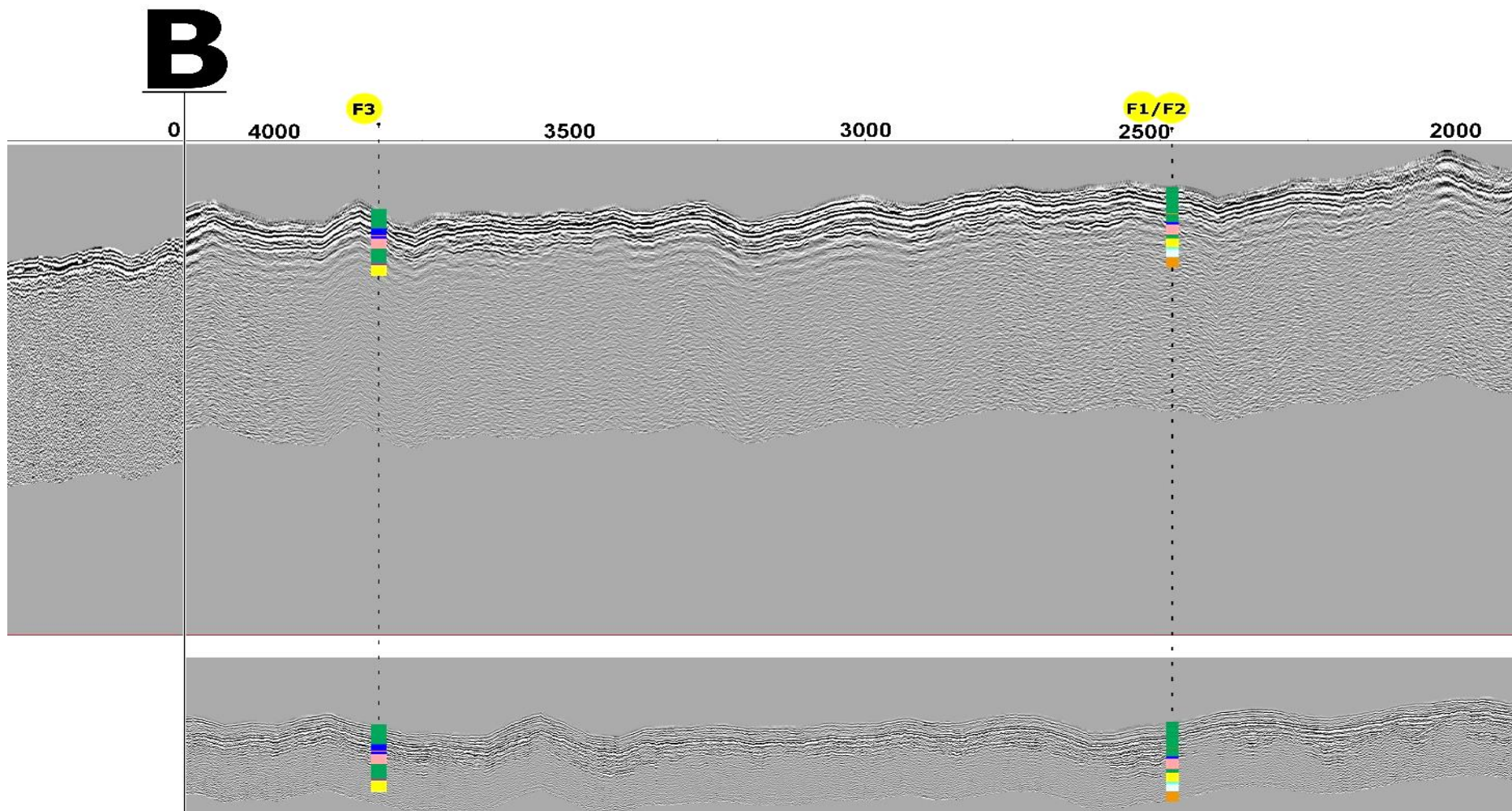


ANEXO II – Divisão I do radargrama





ANEXO III – Divisão II do radargrama



ANEXO IV – Divisão III do radargrama

