



**Universidade do Minho**

Escola de Ciências

Luís Miguel Barros Gonçalves

**Estudo geoarqueológico com Georadar.  
Aplicação aos contextos arqueológicos da  
Pré-História recente à Proto-História do  
NW de Portugal**

Estudo geoarqueológico com Georadar. Aplicação  
aos contextos arqueológicos da Pré-História  
recente à Proto-História do NW de Portugal

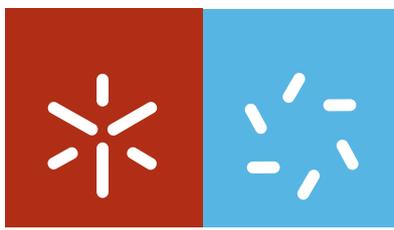
Luís Miguel Barros Gonçalves

UMinho | 2013

Fevereiro de 2013

**FCT**

Fundação para a Ciência e a Tecnologia  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR



**Universidade do Minho**

Escola de Ciências

Luís Miguel Barros Gonçalves

**Estudo geoarqueológico com Georadar.  
Aplicação aos contextos arqueológicos da  
Pré-História recente à Proto-História do  
NW de Portugal**

Tese de Doutoramento em Ciências  
Especialidade de Geologia

Trabalho realizado sob a orientação da  
**Professora Maria Isabel dos Santos Rosa  
Caetano Alves**  
e da  
**Professora Ana Maria dos Santos Bettencourt**

Nome Luís Miguel Barros Gonçalves

Endereço electrónico luisgoncalves@dct.uminho.pt

Título da tese Estudo geoarqueológico com Georadar. Aplicação aos contextos arqueológicos da Pré-História recente à Proto-História do NW de Portugal

Orientadores Professora Maria Isabel dos Santos Rosa Caetano Alves  
Professora Ana Maria dos Santos Bettencourt

Ano de Conclusão 2013

Tese de Doutoramento em Ciências

Especialidade de Geologia

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

Assinatura: \_\_\_\_\_

## Agradecimentos

É com enorme satisfação que, concluída esta demanda, aqui presto os meus sinceros agradecimentos a todos quantos, de forma directa ou indirecta, contribuíram para que eu conseguisse calcorrear esta pista até ao fim.

As minhas primeiras palavras de apreço são dirigidas às orientadoras, Professora Maria Isabel dos Santos Rosa Caetano Alves, do Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho e Professora Ana Maria dos Santos Bettencourt, do Departamento de História do Instituto de Ciências Sociais da Universidade do Minho. Pela orientação prestada, pelo constante acompanhamento do trabalho e todo o incentivo e disponibilidade concedidos o meu muito obrigado.

Ao Centro de Ciências da Terra da Universidade do Minho (DCT-UM), unidade de investigação que integro 2005 e ao seu directo Professor José Brilha, pelo apoio e condições disponibilizadas.

Ao Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho, ao seu director Professor Diamantino Ínsua Pereira, e a todos os colegas e funcionários por todo o apoio e condições disponibilizadas.

Ao Professor Rui Moura da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto pelo apoio dado na fase inicial dos trabalhos desta tese, que em muito contribuiu para entrar no mundo do Georadar e da prospecção geofísica aplicada à arqueologia.

Ao Professor Lawrence Conyers do Departamento de Arqueologia da Universidade de Denver, Colorado, EUA, pela oportunidade de participar no seu curso de GPR aplicado à arqueologia, e pelos conselhos e orientações concedidas.

Ao Doutor Dean Goodman e ao Doutor Alexandre Novo por todo o apoio disponibilizado, pela bibliografia cedida e por todo o esclarecimento das muitas questões relacionadas com o software GPR-Slice.

À FLAD (Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento) pelo apoio financeiro prestado, imprescindível à participação no curso de GPR em Denver.

Aos arqueólogos Álvaro Brito Moreira, António Pereira Dinis, Hugo Aluai Sampaio, José Carlos Martins, Luciano Vilas Boas e Rui Pedro Barbosa, por todo o apoio prestado durante as diversas campanhas de prospecção realizadas no âmbito desta tese, pela bibliografia disponibilizada e por

todas as calorosas discussões que muito contribuíram para a compreensão das diversas problemáticas arqueológicas.

Ao projecto “Espaços naturais, arquitecturas, arte rupestre e deposições da pré-história recente da fachada ocidental do centro-norte português: das acções aos significados (ENARDAS), PTDC/HIS-ARQ/112983/2009” coordenado pela Professora Ana M. S. Bettencourt, pelo apoio concedido durante a realização de algumas das prospeccões realizadas.

Ao Professor Renato Henriques, do Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho, pelo seu apoio e disponibilidade na resolução de problemas informáticos.

Ao Mestre André Vilhena Costa pela possibilidade de testar o Georadar noutros contextos, e por todo o seu apoio, amizade e discussão científica.

Ao Mestre Pedro Garcia pela apoio e bibliografia cedida.

Aos meus pais, Domingos e Fátima, e à minha irmã Ana, pela disponibilidade e pelo apoio.

Quero ainda deixar um sentido abraço ao meu amigo Paulo Pereira, por todo o companheirismo, disponibilidade e amizade que sempre demonstrou. E um abraço ao Manuel Vieira, outro amigo que partilhou comigo o Gabinete durante os primeiros anos do meu doutoramento, pelo auxílio prestado em algumas das prospeccões e todo o incentivo, amizade e disponibilidade.

**Dedico** este trabalho à Joana por todo o amor, carinho e apoio incondicional que sempre me deu.

A ti, o meu profundo e sincero OBRIGADO

Este trabalho insere-se nas linhas de investigação do Centro de Ciências da Terra da Universidade do Minho (CCT/UM) e do Centro de Geologia da Universidade do Porto (CGUP/UM), financiado por Fundos Nacionais através da FCT- Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito do projeto PEst-OE/CTE/UI0039/2011.

## Resumo

Palavras Chave: Georadar; Prospecção arqueológica; Neolítico final; Idade do Bronze; Idade do Ferro; NW de Portugal.

A necessidade de caracterização das estações arqueológicas com recurso a métodos não destrutivos e não intrusivos, dá uma importância de relevo às técnicas de prospecção geofísica e em particular ao Georadar. A prospecção geofísica com Georadar é, na actualidade, uma das metodologias mais utilizadas a nível mundial para o estudo de sítios arqueológicos, possibilitando a definição da estratigrafia do subsolo e a detecção, identificação e mapeamento de estruturas arqueológicas soterradas.

O presente trabalho descreve a aplicação do Georadar ao estudo de estações arqueológicas da Pré-História recente e da Proto-História do NW de Portugal, tendo por objectivos: a definição de uma metodologia prospectiva que se adequa aos contextos arqueológicos em questão; a definição de metodologias de aquisição de dados mais adequadas a sítios arqueológicos de ampla diacronia e de estratigrafia complexa; a definição de metodologias prospectivas que se adequam a sítios arqueológicos com estruturas pétreas e com estruturas percíveis ou escavadas no subsolo.

No âmbito desta tese foram escolhidos seis casos de estudo entre o Neolítico e o período romano, nomeadamente: dólmen da Tojeira (Póvoa de Lanhoso); área contígua aos monumentos sob *tumuli* de Vale de Chãos 1 e 2 (Braga); povoado/necrópole do Pego (Braga); área envolvente às gravuras rupestres de Campelo (Mondim de Basto); povoado do Crastoeiro (Mondim de Basto) e castro do Monte do Padrão (Santo Tirso).

A prospecção geofísica realizada nestes sítios arqueológicos foi efectuada com o equipamento de Georadar SIR3000 da GSSI, e antena de 400 MHz. Foram aplicadas e testadas diferentes metodologias de prospecção, nomeadamente: prospecção com perfis individuais; prospecção em área pseudo 3D, com perfis adquiridos numa direcção e em direcções ortogonais, com espaçamentos de 20 cm e 50 cm entre perfis, e prospecção em área de alta resolução ou verdadeiro 3D, com 5 cm e 10 cm de espaçamento entre perfis.

Após processamento, foram utilizadas e testadas várias metodologias de visualização dos dados, nomeadamente: radargramas individuais; mapas de amplitudes e imagens tridimensionais (volumes de isosuperfícies, blocos diagrama).

Concluiu-se que a metodologia mais adequada à prospecção dos contextos dos sítios arqueológicos das cronologias em questão é a prospecção em área com grelhas ultra densas e/ou com perfis paralelos adquiridos em duas direcções (grelhas XY), tendo sido particularmente apropriada aos sítios arqueológicos com estruturas pétreas e/ou de elevado diacronismo. Nos sítios com estruturas subtis e/ou matérias perecíveis foi especialmente favorável a prospecção com grelhas XY. Para sítios com condições desfavoráveis (topografia irregular, presença de obstáculos, solos condutivos, etc.) o método deverá adequar-se às condições do terreno, podendo em algumas situações optar-se pelo método de perfis individuais ou pela prospecção em área com grelhas pseudo 3D.

Para a visualização, a abordagem mais indicada consistiu na criação de radargramas, mapas de amplitude e imagens tridimensionais (volumes de isosuperfícies, blocos diagrama). Recomenda-se, em situações arqueológicas semelhantes, a análise dos radargramas, como primeiro passo na interpretação, seguida da análise de mapas de amplitudes e de imagens tridimensionais, caso se tenha realizado uma prospecção em área. A correlação dos vários tipos de imagens auxiliará uma melhor interpretação das estruturas e da estratigrafia das estações arqueológicas.

## Abstract

Keywords: GPR; Archaeological survey; Neolithic; Bronze Age; Iron Age; Portugal NW.

The need for characterization of archaeological sites using non-destructive and non-intrusive methods, gives emphasis to the importance of geophysical techniques and in particular from Ground Penetrating Radar (GPR). This geophysical methodology is one of the most used for the study of archaeological sites, enabling the definition of subsurface site stratigraphy and the detection, identification and mapping of buried archaeological features.

This thesis describes the use of GPR in the study of archaeological sites from Neolithic to Iron Age of NW Portugal, and aimed the following objectives: the definition of a prospective methodology that fits the archaeological contexts in question; the definition of data acquisition methodologies best suited to wide diachronic and stratigraphically complex archaeological sites; the definition of methodologies suited to the prospection of archaeological sites with stone structures and/or with perishable and subtle archaeological features .

For this work six archaeological sites, from the Neolithic to the Roman period, were chosen as case studies, naming: the megalithic monument of *Tojeira (Póvoa de Lanhoso)*; surrounding area from the funerary monuments under *tumuli* from Vale de Chãos 1 and 2 (Braga); settlement/necropolis of Pego (Braga); area surrounding the rock engraving site of Campelo (Mondim de Basto); Castro of Crastoeiro (Mondim de Basto) and Castro of Monte do Padrão (Santo Tirso).

The geophysical survey was performed with GSSI SIR3000 GPR equipment, and the 400 MHz antenna. In these studies we applied and tested different prospecting methodologies, including: prospecting with individual recorded profiles; pseudo 3D detailed area survey, with profiles acquired in one direction and orthogonal directions, with spacing of 20 cm and 50 cm between profiles; high resolution detailed area survey or true 3D, with 5 cm and 10 cm spacing between profiles. After data processing several methods of data visualization were created and interpreted, including: individual radargrams; amplitudes slice maps and three-dimensional images (isosurfaces volumes, block diagrams).

It was concluded that the most appropriate survey methodology to the study of these archaeological contexts is the high-resolution detailed area survey and/or detailed area survey with parallel profiles acquired in two directions (XY grids). The high-resolution survey was particularly appropriate to study of archaeological sites with stone structures and/or with high

diachronism. At sites with subtle and/or perishable structures it was the detailed area survey with XY grids that presented the best results. For sites with unfavourable conditions (irregular topography, presence of obstacles, conductive soils, etc.) the survey method should adapt to the ground conditions.

For data visualization, the most appropriate approach involved the generation of radargrams, amplitude slice maps and three-dimensional images (isosurfaces volumes, block diagrams). It is recommended similar archaeological contexts, the radargram analysis as interpretation first step followed by the analysis of amplitude slice maps and of three-dimensional images. The correlation of the various types of images will insure a better interpretation of the features and stratigraphy from archaeological sites.

# Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Índice.....	ix
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. Apresentação do tema e objectivos.....	3
1.2. Estrutura da tese.....	5
<b>CAPÍTULO 2 – O GEORADAR COMO FERRAMENTA GEOARQUEOLÓGICA.....</b>	<b>7</b>
2.1. O Georadar.....	9
2.1.1. História do Georadar.....	10
2.1.2. Breve história do Georadar na arqueologia.....	14
2.1.3. A utilização do Georadar em Portugal.....	21
2.1.4. Panorâmica da aplicação do Georadar na prospecção arqueológica em Portugal.....	23
2.2. Princípios teóricos do Georadar.....	25
2.2.1. Natureza das ondas electromagnéticas.....	26
2.2.2. Propriedades electromagnéticas dos materiais.....	28
2.2.3. Velocidade de propagação das ondas electromagnéticas.....	34
2.2.4. Profundidade de penetração.....	35
2.2.5. Resolução.....	36
2.2.6. Coeficiente de reflexão e transmissão.....	39
2.2.7. Atenuação da energia de Radar.....	41
2.3. Equipamentos e software.....	45
2.3.1. Equipamento.....	45
2.3.2. Tipos de equipamento.....	49
2.3.3. Equipamento utilizado.....	49
2.3.2. Software utilizado.....	54
2.4. Metodologias de prospecção arqueológica com Georadar.....	57
2.4.1. Estudo prévio dos sítios arqueológicos a prospectar.....	57
2.4.2. Estratégias de aquisição de dados de radar.....	58
2.4.3. Posicionamento.....	67
2.5. Processamento dos Dados.....	73

2.5.1. Filtros 1D .....	73
2.5.2. Filtros 2D .....	79
2.5.3. Filtros e processamentos 3D .....	85
2.6. Técnicas de visualização aplicadas à arqueologia .....	87
2.6.1. Radargramas .....	87
2.6.2. Mapas de amplitudes .....	88
2.6.3. Análise de sobreposição .....	91
2.6.4. Cálculo de isosuperfícies.....	93
2.6.5. Correções estáticas.....	95

**CAPÍTULO 3 – CASOS DE ESTUDO.....97**

3.1. Enquadramento dos casos de estudo.....	99
3.1.1. Introdução.....	99
3.1.2. A selecção dos casos de estudo.....	100
3.2. Estação arqueológica do Pego.....	103
3.2.1. Enquadramento contextual arqueológico .....	103
3.2.2. Contexto geológico e geomorfológico.....	107
3.2.3. Aquisição dos dados.....	109
3.2.4. Resultados e interpretações.....	114
3.2.5. Discussão .....	128
3.3. Gravuras rupestres de Campelo.....	130
3.3.1. Enquadramento contextual arqueológico .....	130
3.3.2. Contexto geológico e geomorfológico.....	135
3.3.3. Aquisição dos dados.....	136
3.3.4. Resultados .....	139
3.3.5. Discussão .....	142
3.4. Estação arqueológica do povoado do Crastoeiro.....	143
3.4.1. Enquadramento contextual arqueológico .....	143
3.4.2. Contexto geológico e geomorfológico.....	147
3.4.3. Aquisição dos dados.....	149
3.4.4. Resultados .....	153
3.4.5. Discussão .....	160
3.5. Estação arqueológica do dólmen da Tojeira.....	161
3.5.1. Enquadramento contextual arqueológico .....	161
3.5.2. Contexto geológico e geomorfológico.....	165
3.5.3. Aquisição dos dados.....	166
3.5.4. Resultados .....	168
3.5.5. Discussão .....	175
3.6. Estação arqueológica do Castro do Monte do Padrão .....	178
3.6.1. Enquadramento contextual arqueológico .....	178

3.6.2. Contexto geológico e geomorfológico.....	184
3.6.3. Aquisição dos dados.....	186
3.6.4. Resultados .....	190
3.6.5. Discussão .....	204
3.7. Estação arqueológica de Vale de Chãos .....	204
3.7.1. Enquadramento contextual arqueológico .....	204
3.7.2. Contexto geológico e geomorfológico.....	207
3.7.3. Aquisição dos dados.....	208
3.7.4. Resultados .....	210
3.7.5. Discussão .....	217
<b>CAPÍTULO 4 – SÍNTESE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>219</b>
4.1. Metodologias prospectivas .....	221
4.2. Visualização e interpretação dos dados .....	224
4.2.1. Sítios arqueológicos com estruturas pétreas .....	226
4.2.2. Sítios arqueológicos com estruturas subtis e/ou perecíveis.....	228
<b>CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>231</b>
5.1. Conclusões.....	233
5.2. Questões em aberto .....	234
5.3. Perspectivas futuras .....	235
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>237</b>



Capítulo 1

## **INTRODUÇÃO**



## 1.1. Apresentação do tema e objetivos

A evolução e o aperfeiçoamento da arqueologia implicou, desde cedo, a associação com outras ciências, nomeadamente com a geologia, o que se verificou ainda no séc. XVIII (Rapp & Hill, 1998), embora com importantes repercussões durante o séc. XIX, quando a geologia e a arqueologia do Paleolítico se desenvolveram em paralelo após a publicação da obra *Principles of Geology* de Charles Lyell, entre 1830 e 1833, onde se defendia que o passado havia sido um período longo e geologicamente ininterrupto, durante o qual se poderiam ter desenvolvido muitos acontecimentos (Trigger, 1992). Relevante foi, também a obra *The Geological Evidence of the Antiquity of Man*, do mesmo autor, publicada em 1863, momento em que oficialmente se admite que os seres humanos teriam coexistido com os mamíferos extintos em períodos muito antigos, naturalmente influenciada pela *Origem das Espécies* de Darwin, publicada em 1859. Durante esta época, ciências como a geologia e a paleontologia, estavam na vanguarda da criação de uma nova história do mundo, pelo que a sua associação com a arqueologia do Paleolítico foi determinante para demonstrar a "*grande antiguidade da humanidade e a evolução gradual da civilização europeia desde períodos muito primitivos*" (Trigger, 1992: 102), ao mesmo tempo que estabelecia novos modelos para a análise estratigráfica em arqueologia. Mas, apesar deste vínculo precoce entre a geologia e a arqueologia, a geoarqueologia enquanto sub-disciplina científica apenas surge no século XX, com a publicação do livro *Geoarchaeology: Earth Science and Past*, de Davidson & Shackley (1976), embora o termo já fosse utilizado informalmente muito antes de 1973 (Butzer, 2012). No prefácio que Renfrew escreve para esta obra afirma que a geoarqueologia é uma disciplina que "*emprega a experiência dos geólogos, utilizando o seu interesse pelos solos, sedimentos e geoformas para os focar no estudo dos sítios arqueológicos, e para investigar as circunstâncias que determinaram a sua localização, a sua formação como um depósito e a sua subsequente preservação e evolução. Esta nova disciplina concentra-se principalmente no contexto em que são encontrados os vestígios arqueológicos. E uma vez que a arqueologia, ou pelo menos a arqueologia pré-histórica, recolhem a maioria dos dados a partir da escavação, cada problema arqueológico começa como um problema geoarqueológico*" (Renfrew, 1976: 2, in Davidson & Shackley, 1976)<sup>1</sup>.

Na sua aceção original, geoarqueologia indica, assim, uma ciência inter e multidisciplinar que usa perspectivas teóricas, vocabulários e instrumentos metodológicos variados, provenientes quer das Ciências da Terra quer da arqueologia, e cuja finalidade última é a compreensão das inter-relações existentes entre os grupos humanos do passado e o ambiente à sua volta (Angelucci, 2003).

<sup>1</sup> tradução realizada pelo autor desta tese.

No entanto, existe controvérsia sobre o domínio exacto de abrangência da geoarqueologia, tal como advertem Herz & Garrison (1998) e Pollard (1999). Existe uma visão mais restrita, debruçada essencialmente sobre as problemáticas sedimentológicas e geomorfológicas, tal como apresentado na revista *Geoarchaeology* e em French (2003) ou uma visão mais abrangente patente nas obras de atrás citadas.

No âmbito desta discussão, que poderá ser complementada com a leitura das obras de Hertz & Garrison (1998), Pollard (1999), French (2003), Goldberg & Macphail (2006), Rapp & Hill (2006) e (Butzer, 2012), interessa-nos particularmente a que existe em torno da geofísica e que, basicamente, se subdivide em duas perspetivas: a dos defensores de que esta se deverá incorporar no vasto campo de estudo conhecido como detecção remota e prospecção arqueológica e a que partilha uma visão mais abrangente, considerando a prospecção geofísica como uma ferramenta geoarqueológica, de pleno direito (Pollard, 1999). De acordo com Rapp & Hill (2006: 2) *O rótulo Geoarqueologia tem sido utilizado por um leque alargado de investigadores das Ciências da Terra, de áreas que incluem a estratigrafia, sedimentologia, geomorfologia, pedologia, petrologia, petrografia, geoquímica, geofísica, paleontologia, geologia marinha, geocronologia e climatologia. Praticamente todas as sub-disciplinas da geologia possuem conceitos, métodos e conhecimentos que poderão contribuir para a resolução de questões arqueológicas*<sup>1</sup>.

É nesta última perspectiva que nos situamos ao considerarmos que a prospecção arqueológica através da geofísica em geral, e do Georadar (GPR – Ground Penetrating Radar) em particular, é uma das áreas de inter-relação com as Ciências da Terra, especialmente com a geologia. A prospecção geofísica, por exemplo, facilita a localização e o mapeamento de estruturas arqueológicas soterradas de uma forma que os métodos arqueológicos tradicionais não possibilitam. Por essa razão, nos últimos anos, tem-se observado, que um número crescente de arqueólogos, a nível internacional, tem vindo a utilizar a prospecção com Georadar como procedimento habitual no estudo arqueológico para a detecção e mapeamento dos estruturas arqueológicas existentes no subsolo. Os mapas e imagens gerados por esta metodologia não invasiva, são utilizados como documentos fundamentais na planificação das escavações arqueológicas bem como no planeamento e ordenamento do território, dada a possibilidade de definição de áreas de interesse arqueológico. No entanto, a utilização da prospecção geofísica, em geral, e do Georadar em particular, tarda a ser implementada em Portugal, quer por desconhecimento das suas vantagens por parte dos arqueólogos e das instituições que tutelam a arqueologia, quer por constrangimentos financeiros.

É pois necessário incrementar o uso do Georadar como ferramenta de prospecção geofísica, adoptada sistematicamente no contexto da arqueologia nacional, uma das razões pelo qual consideramos pertinente o desenvolvimento desta tese.

Se os objectivos gerais deste trabalho se relacionam com o aumento do conhecimento das potencialidades do Georadar aplicadas à arqueologia, tendentes ao seu uso mais sistemático em termos nacionais, há outros objectivos que importa nomear:

- a definição de uma metodologia prospectiva com Georadar que se adequa aos contextos arqueológicos do noroeste de Portugal, particularmente aos da Pré-História Recente e da Proto-História;
- a definição de metodologias de aquisição de dados mais adequadas a sítios arqueológicos de ampla diacronia e de estratigrafia complexa;
- a definição de metodologias prospectivas que se adequam a sítios arqueológicos com estruturas pétreas e com estruturas percíveis ou escavadas no subsolo.

Decorrentes dos objectivos anteriores surgem outros mais específicos, nomeadamente os que se relacionam com a adequada densidade de aquisição de dados, com o método de processamento mais adequado e com as metodologias de apresentação e de visualização dos dados que permitam uma correcta interpretação das estruturas arqueológicas.

O estabelecimento de comparações entre os resultados obtidos em contextos arqueológicos com especificidades próprias, possibilitará, também, estabelecer limites sobre a aplicabilidade do método do Georadar.

Para a concretização destes propósitos escolheram-se seis casos de estudo entre o Neolítico e o período romano a saber: dólmen da Tojeira (Póvoa de Lanhoso); área contígua aos monumentos sob *tumuli* de Vale de Chãos 1 e 2 (Braga); povoado/necrópole do Pego (Braga); área envolvente às gravuras rupestres de Campelo (Mondim de Basto); povoado do Crastoeiro (Mondim de Basto) e castro do Monte do Padrão (Santo Tirso).

## 1.2. Estrutura da tese

Esta tese estrutura-se em cinco capítulos, sendo o primeiro, a “Introdução”, relativo às motivações do trabalho e aos objectivos.

O capítulo 2, designado por “O Georadar como ferramenta geoarqueológica”, apresenta o estado da arte relativo ao Georadar, com especial ênfase para a sua aplicação à arqueologia. Reúne, também, a informação teórica sobre o tema, apresentando os princípios do método, equipamentos e software utilizados, metodologias de prospecção, metodologias de processamento e técnicas de visualização. Neste capítulo também serão abordados alguns

aspectos teóricos relativos à propagação das ondas electromagnéticas, à descrição do equipamento de Georadar e seus princípios de funcionamento, aos factores que conduzem à diminuição da intensidade do sinal e às potencialidades e limites do método.

O capítulo 3, denominado “Casos de estudo”, expõe, de forma detalhada, as seis estações arqueológicas do noroeste português, entre o Neolítico e o período romano, que serviram de casos de estudo.

No capítulo 4, intitulado “Síntese e discussão dos resultados”, são apresentados e discutidos de forma resumida e integrada os resultados dos estudos referidos no capítulo 3. Aqui se sintetizam as metodologias prospectivas, a visualização e interpretação dos dados, os sítios arqueológicos com estruturas pétreas e os sítios arqueológicos com estruturas subtis e /ou peregíveis.

O capítulo 5, nomeado “Considerações finais”, refere a conclusão geral do trabalho desta tese, incluindo, também, as questões em aberto e as perspectivas futuras de investigação.

Capítulo 2

**O GEORADAR COMO FERRAMENTA  
GEOARQUEOLÓGICA**



## 2.1. O Georadar

A possibilidade de detectar objectos, ou estruturas, de uma forma remota ou através de superfícies opacas, fascinou a Humanidade durante séculos (Daniels, 2004). A existência de um aparelho, ou uma metodologia, que permita visualizar de uma forma clara o subsolo e o que nele se encontra é uma ideia tão atractiva e fascinante que levou ao empenho de muitos cientistas e engenheiros na tentativa de criar tais aparelhos e metodologias de exploração (Daniels, 2004). Essa possibilidade de ver para além da superfície do solo, ou para dentro de uma parede, é tão fascinante que, para além da comunidade científica, inspirou a imaginação de muitos escritores e argumentistas de filmes de ficção científica.

Por muito fascinante que seja a ideia de um aparelho que consiga fornecer uma resposta completa sobre o que jaz sob os nossos pés, tal equipamento não se encontra ainda disponível. No entanto, as metodologias geofísicas de prospecção (sísmica, electromagnética, resistividade eléctrica, condutividade eléctrica, polarização induzida, magnetometria, gravimetria, radiometria, termometria, etc.), isoladamente ou combinadas entre si, têm-se mostrado extremamente úteis na obtenção de parte das respostas que procuramos. De entre essas metodologias o Georadar têm-se tornado numa opção muito popular, particularmente entre engenheiros e cientistas de uma vasta gama de especialidades, dada as suas múltiplas áreas de aplicação e a sua elevada versatilidade.

Os termos Georadar, Radar de Penetração no solo, GPR (Ground-Penetrating Radar, ou Ground-Probing Radar), Radar de subsolo, radar de penetração na superfície, SPR (Surface Penetrating Radar), referem-se a um grupo de técnicas de prospecção que utiliza radiação electromagnética no intervalo de frequência de rádio, desenvolvidas essencialmente com o intuito de detectar objectos e interfaces localizadas no subsolo ou dentro de uma estrutura opaca (Daniels, 2004).

Basicamente o Georadar consiste numa metodologia de prospecção geofísica, não destrutiva, baseada na propagação pelo solo ou por outro meio dieléctrico (sedimentos, solos, rocha, betão, água, gelo, etc.) de radiação electromagnética comumente designada por ondas electromagnéticas ou ondas de Rádio. O termo GPR (Ground-Penetrating Radar) é o mais utilizado pela comunidade académica, e o que se tornou quase universalmente aceite, sendo usado em quase toda a literatura científica da área escrita em inglês, mas também em textos

académicos escritos em outras línguas. Neste trabalho utilizaremos frequentemente esta sigla bem como o acrónimo Georadar, este amplamente utilizado pela comunidade científica de língua portuguesa.

A técnica do Georadar (metodologias, equipamentos e programas informáticos) evoluiu muito nas últimas décadas, como se resumirá de seguida, evolução esta que se orientou no sentido de servir o seus utilizadores, isto é, o seu desenvolvimento foi impulsionado e condicionado, pelas necessidades práticas de todos quantos utilizam esta metodologia. A filosofia de desenvolvimento dos equipamentos de Georadar (*hardware e software*) encontra-se largamente dependente do tipo de alvo de pesquisa, bem como da sua natureza e da do meio envolvente. São diversas as áreas em que o GPR pode ser utilizado e temos vindo a assistir, particularmente a partir da segunda metade da década de 2000, à consolidação desta tecnologia com o aparecimento de novos *hardwares*, adaptados às necessidades dos utilizadores, mas também de programas informáticos e metodologias de trabalho que permitem tirar grande partido do sistema.

O Georadar encontrou, desde cedo, grandes adeptos da sua utilização na prospecção arqueológica, tendo também esta área observado um grande avanço resultante do desenvolvimento de equipamentos adequados às problemáticas arqueológicas e do desenvolvimento de programas informáticos e metodologias de trabalho especificamente adaptados às necessidades da prospecção em arqueologia. Observou-se também, na prospecção arqueológica com GPR, um aumento substancial da sua utilização, quer como mero equipamento de prospecção quer como ferramenta base de investigação, promovendo um crescimento também grande de publicações, nomeadamente de livros técnicos, artigos científicos e teses de mestrado e de doutoramento.

O Georadar é considerado na actualidade uma poderosa tecnologia que, nas mãos de especialistas, possibilita um método seguro e não invasivo para estudo do subsolo. Ele melhorou significativamente a eficiência do trabalho exploratório que é fundamental em áreas como a geologia ambiental, geologia de engenharia, construção civil, detecção de minas, investigação criminal e forense, prospecção geológica, sedimentologia e estratigrafia, pedologia, geomorfologia aplicada, hidrogeologia, glaciologia e, na área que a este trabalho diz respeito, na prospecção arqueológica.

### 2.1.1. História do Georadar

A utilização de ondas electromagnéticas para fins de detecção remota iniciou-se no dealbar do século XX, através de experiências que mostraram que era possível a transmissão de radiação

electromagnética através do espaço, na forma de um feixe de energia, e a sua recepção quando este era reflectido de volta por um objecto suspenso no ar que estivesse na sua trajetória.

O primeiro uso de ondas electromagnéticas para detecção de objectos soterrados é atribuído a Hulsmeyer, numa patente alemã de 1904, que nos finais da década de 20 desenvolveu o pulso electromagnético na investigação de objectos soterrados (Grangeia & Matias, 2004). Leinback e Lowy em 1910, seguindo os trabalhos de Hulsmeyer, tentaram de uma forma remota detectar a presença de objectos metálicos enterrados no solo através da utilização de um dispositivo de transmissão de ondas contínuas (Clemeña, 1991; Reynolds, 2002). Experiências adicionais foram efectuadas em meados da década de 1920 utilizando pulsos de radar para a investigação de estruturas enterradas como descrito por Hüsenbeck (1926). As primeiras tentativas de utilização do que poderemos designar de Georadar foram efectuadas em 1929, na Áustria, para determinar a espessura de um glaciário tal como descrito por Stern (1929). No início da década de 1930 foram desenvolvidos trabalhos pioneiros no campo da exploração mineira na Suécia (Sundberg, 1931) bem como trabalhos de cartografia estrutural em explorações de hidrocarbonetos, descritos por Sundberg & Hedström (1934).

Esta década de 1930 assistiu também a um grande impulso no desenvolvimento da tecnologia de emissão e recepção de ondas electromagnéticas, quando o seu uso provou ser muito eficaz na detecção de aviões, mostrando o seu importante valor para usos militares. Esta capacidade tornou-se possível pela percepção de que diferentes materiais têm diferentes propriedades reflectivas, no que respeita às ondas electromagnéticas. Ao atravessar o ar a uma velocidade próxima da velocidade da luz, as ondas electromagnéticas sofrem reduzida atenuação na atmosfera, permitindo que objectos, como aviões e barcos, possam ser detectados a quilómetros de distância.

É precisamente nesta década de 1930 que surge o termo RADAR. Este nome é um acrónimo estabelecido em 1934 que deriva de “RAdio Detection ANd Ranging”, designando todos os equipamentos que, através da emissão de ondas de rádio, detectam objectos e determinam a distância a que se encontram (Buder, 1996).

No decorrer da segunda guerra mundial, esta técnica experimentou um novo e importante impulso evolutivo, devido à sua capacidade para detecção de submarinos a partir de aviões e para o planeamento mais pormenorizado de grandes bombardeamentos aéreos como os realizados pelos aliados sobre alvos alemães (Buder, 1998). Durante a década de 1940, particularmente durante o período da grande guerra, esta tecnologia beneficiou também do grande desenvolvimento dos circuitos e sistemas electrónicos, o que possibilitou um aumento do grau de

precisão na detecção de aviões, barcos e até de nuvens. Devido a esse grande salto evolutivo, esta tecnologia estava já bem desenvolvida no final dessa década, o que levou ao desenvolvimento dos modernos sistemas de detecção, designados de RADAR (Buderer, 1998).

Apesar da utilização destes métodos electromagnéticos se ter iniciado essencialmente como instrumento de aplicação militar, o seu potencial junto da sociedade civil e académica foi rapidamente constatado, como anteriormente referido. No entanto, as suas capacidades de penetração no solo foram praticamente esquecidas até ao final da década de 50, quando técnicos da força aérea dos Estados Unidos da América, a bordo de aviões, observaram que as ondas dos seus radares estavam a penetrar as calotes glaciares ao sobrevoarem a Gronelândia. A constatação da potencialidade da sua penetração nas calotes de gelo foi reforçada por um conjunto trágico de enganos que ocorreram quando operadores de radar detectavam o soco rochoso sob as calotes de gelo e interpretavam estas como sendo a superfície do solo, negligenciando os quase 1000 m de espessura de gelo sobre a rocha, levando a que alguns aviões despenhassem contra os glaciares (Conyers, 2004). Estes desastres fizeram com que a comunidade científica recuperasse o trabalho pioneiro de Stern (1929) e recomeçasse a pesquisar novas aplicações para as ondas de RADAR. Experiências realizadas durante os anos 50 mostraram que esta tecnologia podia ser utilizada para transmissão através de materiais sólidos, tais como rochas e solos, tendo sido rapidamente compreendido que a velocidade e a amplitude das ondas de rádio sofriam variações significativas à medida que atravessavam esses materiais, o que conferia ao RADAR a possibilidade de identificar diversas interfaces sub-superficiais, nomeadamente a estratigrafia dos solos (bem como as suas propriedades), o nível dos lençóis freáticos, assim como a possibilidade de detectar objectos enterrados.

Esta nova percepção das propriedades deste tipo de ondas electromagnéticas levaram ao desenvolvimento de sistemas de RADAR especiais, no final dos anos de 1960, que foram designados como Radar de Penetração no Solo (na literatura anglo-saxónica “Ground-Probing” ou “Ground-Penetrating Radar” - GPR) (Fernandes, 2006) vulgarmente designados como Georadar. Em 1967, a NASA (National Aeronautics and Space Administration) construiu um protótipo de Georadar que enviou numa missão não tripulada à lua, numa tentativa de avaliar as condições do solo em locais de futuras alunagens de veículos tripulados (Simmons *et al.*, 1972). Os trabalhos iniciais com Georadar focaram-se essencialmente em estudos geológicos e de solos permanentemente gelados (*permafrost*), e a partir da década de 1960, com o desenvolvimento da técnica de “radio echo sounding”, no estudo de calotes polares, tendo a partir daí ocorrido um aumento significativo da utilização do Georadar para o estudo de características glaciológicas profundas e de várias estruturas geológicas, tais como aquíferos de água doce e salina, estrutura

interna de dunas de deserto, estratigrafia de depósitos sedimentares fluviais, estratigrafia de praias arenosas, etc. (Annan & Davis, 1977).

A viabilidade do Georadar na localização de objectos enterrados ou de cavidades tais como tubagens, canalizações, túneis e galerias de minas teve um reconhecimento imediato na década de 1970 (Fullagar & Livleybrooks, 1994), tendo-se iniciado o seu uso generalizado como ferramenta de prospecção geotécnica. Desenvolveram-se também nesta década várias metodologias para a definição de contactos litológicos (Baker, 1991; Jol & Smith, 1992; Basson *et al.*, 1994; van Heteren *et al.*, 1994; Bristow & Jol, 2003), falhas (Deng *et al.*, 1994), planos de camadas e sistemas de diáclases em maciços rochosos (Cook, 1973; Dolphin *et al.*, 1976; Moffatt & Puskar, 1976; Bjelm, 1980). O Georadar começou também a ser utilizado por pedólogos e hidrogeólogos para estudar a estrutura dos solos (Johnson *et al.*, 1980; Doolittle, 1982; Shih & Doolittle, 1984; Olson & Doolittle, 1985; Collins, 1992; Doolittle & Asmussen, 1992; Doolittle & Collins, 1995; Freeland *et al.*, 1998) bem como para investigar a profundidade e natureza dos lençóis freáticos (Beres & Haeni, 1991; Doolittle & Asmussen, 1992; van Overmeeren, 1994 e 1998). Outros trabalhos mostraram a aplicabilidade do Georadar no estudo e cartografia de sequências sedimentares específicas para a definição de ambientes deposicionais antigos (Bridge *et al.*, 1995; Jol *et al.*, 1996; Bristow *et al.*, 1996; McGearry *et al.*, 1998; van Overmeeren, 1998; Bristow & Jol, 2003; Wilkins & Clement, 2007). Mais recentemente, tem-se estudado a potencialidade de utilização do Georadar para detecção de minas terrestres e munições por explodir (obuses, bombas, *cluster bombs*, etc.), com resultados muito promissores (Bruschini *et al.*, 1998; Daniels, 2004a; Capineri *et al.*, 2008).

Outra área científica que muito beneficiou com o desenvolvimento do Georadar foram as ciências forenses, tendo-se assistido a uma expansão da sua utilização, sendo este equipamento usado por cientistas forenses e agentes da autoridade para detectar e identificar sepulturas, valas comuns, corpos de vítimas de assassinatos, indícios de outros crimes e para a tentar resolver questões legais e disputas judiciais (Strongman, 1992; Ivashov *et al.*, 1998; Nobes, 1999; Davis *et al.*, 2000; Davempport, 2001a, 2001b; Cheethan, 2005; Nuzzo *et al.*, 2008; Billinger, 2009).

Na área da engenharia civil assistiu-se ao desenvolvimento de diversas metodologias de aplicação do Georadar, particularmente para a obtenção de informação de elementos estruturais a que não se poderia aceder sem recurso a metodologias destrutivas, tais como: avaliação da integridade estrutural de estruturas de betão; detecção de vigas de reforço e de vazios (Maierhoffer *et al.*, 2003a; Taffe & Maierhoffer, 2003); delaminação de betão em coberturas (Dérobert *et al.*, 2003; Maierhoffer *et al.*, 2003b); avaliação de vigas de esforço em pontes de betão (Hugensschmidt, 2002; Dérobert *et al.*, 2002; Taffe & Maierhoffer, 2003); avaliação do processo de cura de betões (Maierhofer *et al.*, 1998a; Weise & Schaurich, 2003); avaliação de pavimentos e da espessura das

camadas de betuminoso de estradas (Maser & Richter, 1993; Saarenketo, 1996; Van Leest, 1998; Al-Qadi *et al.*, 2003; Al-Qadi & Lahouar, 2005; Evans *et al.*, 2008; Costa, 2009). O Georadar também tem sido usado para identificação e quantificação do conteúdo em sais e das propriedades dieléctricas de tijolos, alvenarias (Maierhofer *et al.*, 1998a, 1998b, 2001), betão (Robert, 1998; Reppert *et al.*, 2000; Stoutsos *et al.*, 2001), materiais betuminosos (Al-Qadi *et al.*, 2001), e para avaliar a integridade do balastro em vias férreas (Gallagher *et al.*, 1999; Clark *et al.*, 2001; 2004;). Outras utilizações do Georadar incluem a avaliação de danos estruturais causados por sismos em edifícios (Colla *et al.*, 1997; Flint *et al.*, 1999; Binda *et al.*, 2000) e na sua monitorização estrutural (Huston *et al.*, 2000).

Nas duas últimas décadas, particularmente a partir de meados de 1990, tem-se observado o surgimento de novas aplicações do Georadar nomeadamente: na localização e monitorização de infiltrações de contaminantes e de plumas tóxicas no solo (Daniels, 1995; Castro, 2003; Redman, 2009); na identificação de áreas afectadas por derrames petrolíferos em áreas costeiras (Lorenzo *et al.*, 2004, 2004a, 2009); na determinação da humidade dos solos para melhoramento da capacidade produtiva de vinhas e de pomares (Lunt *et al.*, 2005; Jackson, 2008; White, 2009); e na optimização de explorações florestais e determinação da idade e estado de saúde de árvores (Álvarez *et al.*, 2005; Lorenzo *et al.*, 2010).

### 2.1.2. Breve história do Georadar na arqueologia

A história do Georadar aplicado à arqueologia inicia-se com o interesse, desde cedo demonstrado, por parte da comunidade arqueológica na detecção e identificação indirecta de estruturas arqueológicas soterradas. As primeiras experiências realizadas com sucesso na detecção remota de estruturas arqueológicas enterradas surgem com o advento da fotografia aérea no início do século XX, com a utilização de balões, na década de 1900, e de aviões, a partir da década de 1910, particularmente após o começo da I Grande Guerra (Bewley, 1997; Bourgeois & Meganck, 2003).

O desenvolvimento dos métodos de prospecção geofísica, iniciado na primeira metade do século passado, forneceu à arqueologia novas possibilidades de ver o “não-visível” (Campana, 2009). A década de 1930 marca o início da utilização de métodos de prospecção sub-superficial, baseados na resistividade eléctrica, em contexto arqueológico (Bevan, 2000; Hesse, 2000), tendo a comunidade arqueológica rapidamente compreendido o grande potencial inerente à prospecção geofísica aplicada à arqueologia.

Os primeiros sucessos obtidos com a aplicação da geofísica à prospecção arqueológica e o aparecimento, na década de 1960, do Georadar como o conhecemos levou a que, na década de 1970, a comunidade arqueológica começasse testar esta ferramenta e a desenvolver metodologias prospectivas adequadas à sua utilização. De acordo com Conyers (2004) e Gaffney (2008), foi em meados de 1970 que se iniciou a utilização do Georadar com propósitos arqueológicos, tendo sido utilizado para a localização de estruturas arqueológicas enterradas, bem como para a definição da estratigrafia dos solos e sedimentos a elas associados (Conyers & Cameron, 1998).

Uma das primeiras aplicações do Georadar em Arqueologia foi efectuada por Vickers *et al.* (1976) em Chaco Canyon, Novo México (EUA), numa tentativa de localizar paredes de “Kivas” enterradas a profundidades não superiores a 1 metro. Estas primeiras prospecções consistiam na execução de perfis com o equipamento de Georadar, cujos dados obtidos eram gravados em papel e analisados no campo. A partir dessa análise determinaram que algumas das reflexões anómalas representavam a localização de paredes circulares enterradas. Outros trabalhos pioneiros (Vickers & Dolphin, 1975; Kenyon & Bevan, 1977) debruçaram-se sobre a possibilidade de utilizar o Georadar para a obtenção de perfis visuais de anomalias, interpretáveis no campo, em sítios arqueológicos (pré-históricos e históricos) dos Estados Unidos da América, mais precisamente no estado do Novo México e na cidade de Filadélfia.

Os primeiros estudos, atrás descritos, realizados nos Estados Unidos pouco mais eram que uma tentativa rudimentar de identificar anomalias que pudessem indicar a presença de algo passível de ser considerado uma estrutura arqueológica. No entanto, foram um dos passos importantes no início da utilização do Georadar em arqueologia, pois a eles se seguiram um variado conjunto de trabalhos arqueológicos em sítios históricos (Conyers, 2004b). No seguimento destes estudos preliminares, várias prospecções usando Radar foram aplicadas com sucesso na procura de paredes de celeiros enterradas, muros de pedra e armazéns subterrâneos (Bevan & Kenyon, 1975; Kenyon, 1977). Nestes estudos iniciais o que os autores descreviam como “ecos de radar” foi por eles reconhecido como sendo reflexões do sinal de radar geradas pelo topo de paredes enterradas, tendo sido estimada a profundidade a que essas estruturas se localizavam, a partir do cálculo da velocidade de propagação aproximada das ondas de radar, tendo em consideração as características dos solos dos sítios arqueológicos.

Os sucessos iniciais da utilização do Georadar em sítios arqueológicos históricos foram seguidos, nos finais da década de 1970, por trabalhos de prospecção nos sítios arqueológicos pré-históricos de Hala Sultan Tekke, na ilha de Chipre (Fischer *et al.*, 1980), e de Ceren em El Salvador (Sheets *et al.*, 1985). Estes dois trabalhos de prospecção produziram dados em bruto (não processados), impressos em folhas contínuas de papel, semelhantes às dos sismógrafos, que foram

fundamentais para a localização e identificação de variadas estruturas arqueológicas, tais como paredes pétreas enterradas, plataformas e pisos de casas, buracos de poste, entre outras. Estes sucessos iniciais foram principalmente devidos ao facto de os solos, dos sítios arqueológicos estudados, apresentarem uma matriz relativamente homogénea, que se encontrava seca, diminuindo a sua resistividade eléctrica. Tal situação tornava-os “transparentes” à propagação das ondas de radar, permitindo que estas penetrassem a maiores profundidades, produzindo bons registos de reflexão das estruturas arqueológicas enterradas, que se mostraram muito fáceis de interpretar (Conyers, 2004).

A década de 1980 marca o início da popularização do Georadar, como ferramenta de prospecção não invasiva nos estudos de sítios arqueológicos. Este impulso deveu-se à consolidação no mercado dos primeiros equipamentos comerciais de Georadar produzidos por fabricantes como a GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc.) e a OYO Corporation (Novo, 2009), o que possibilitou o aumento da sua aplicação, um pouco por todo o mundo, por investigadores: na Suécia (Ulricksen, 1982); nos Estados Unidos da América (Weymouth & Bevin, 1983); na China (Qiang & Chang, 1985); no Canadá (Vaughan, 1986); no Japão (Imai *et al.*, 1987); no Reino Unido (Stove & Addyman, 1989); no Egipto (El-Baz, 1989); e na Alemanha (Forkmann & Hellfried, 1989).

De entre os referidos trabalhos destaca-se o de Vaughan (1986), realizado entre 1982 e 1983, que teve por objectivo a identificação dos vestígios de uma aldeia baleeira basca do século XVI, num sítio arqueológico histórico localizado em Red Bay, Labrador, Canadá. Este estudo revestiu-se de particular importância por se ter concretizado sobre um terreno com condições consideradas, até à época, impróprias para prospecções arqueológicas com Georadar. Os solos prospectados apresentavam estratigrafia bastante complexa, constituída por níveis de seixos de praia de grande dimensão, encontrando-se o solo saturado em água. Estas condições adversas à propagação das ondas electromagnéticas geravam registos de radar bastante complexos e de difícil interpretação, mesmo assim foi possível identificar a localização de várias estruturas arqueológicas (sepulturas e fundações de edifícios) que se encontravam a cerca de 2 m de profundidade, estruturas estas mais tarde confirmados pelas escavações arqueológicas. Este estudo foi notável e inovador porque mostrou ser possível detectar estruturas arqueológicas em solos com condições adversas e porque se procedeu também à realização de testes para avaliação da velocidade de propagação das ondas de radar no solo, tendo como objectivo a determinação da profundidade exacta a que se encontravam as prováveis estruturas arqueológicas. Permitiu também concluir que os artefactos de osso contidos nas sepulturas não possuíam contraste suficiente com o meio envolvente para

serem detectados, mas o solo perturbado de algumas sepulturas manifestava um padrão de reflexão anómalo bem distinguível.

De entre os estudos realizados nos anos de 1980 cabe também destacar os realizados no Japão, em meados dessa década, que tiveram como objectivo a localização de casas do século VI, montes funerários e níveis culturais ou arqueológicos (Imai *et al.*, 1987). Estes estudos foram bem sucedidos na localização e identificação de antigas casas “fosso” com pisos de argila do século VI, que se encontravam enterradas por até dois metros de solos e cinzas vulcânicas. A interface dos pisos das casas, constituídos por argila batida com os níveis de cinzas vulcânicas, produziu um conjunto de reflexões bem distintas que foram rapidamente identificadas nos perfis de Georadar. A maior parte da área do sítio arqueológico, descoberto pela cartografia realizada com o Georadar, foi posteriormente escavado tendo em vista a confirmação dos resultados obtidos. Foram identificados três níveis estratigráficos distintos, consistindo em horizontes de solo, enterrados sob as cinzas, que continham variados artefactos líticos pertencentes a diferentes períodos de ocupação. Esta conclusão importante permitiu a cartografia destes níveis e dos vestígios arqueológicos associados em locais do sítio arqueológico que não tinha sido ainda escavado.

Os sucessos obtidos por estes trabalhos na identificação de estruturas arqueológicas, reforçados pela confirmação dos mesmos através das escavações arqueológicas subsequentes, foram importantíssimos na definição das primeiras metodologias de trabalho aplicadas à arqueologia, contribuindo para o início da consolidação do Georadar como importante ferramenta de prospecção neste tipo de investigação.

Ao longo do final da década de 1980 e do início da de 1990, o Georadar continuou a ser utilizado com sucesso num vasto número de diferentes contextos arqueológicos, mas na grande maioria dos casos estes estudos consistiam no que se poderia designar por exercícios de “Anomaly-hunting” (Conyers, 2004b). Até esta altura, os perfis de Georadar não eram processados, ou eram apenas parcialmente processados, sendo analisados quer em registos de papel quer no visor do computador à medida que eram adquiridos. Estas limitações levavam a que apenas os locais onde se observavam reflexões interessantes, com potencial interesse arqueológico, eram efectivamente escavadas. Infelizmente, a impossibilidade de distinguir reflexões geradas por características geológicas do terreno das geradas por estruturas arqueológicas contribuiu para que, segundo Conyers (2004), a comunidade arqueológica ficasse com a impressão que o Georadar era uma metodologia pouco precisa.

Até ao início da década de 1990 a maioria das prospecções bem sucedidas de Georadar aplicados à arqueologia foram aqueles utilizados no mapeamento de casas e montes funerários no Japão, já referidos anteriormente. Estes sucessos foram seguidos por pesquisas adicionais de Georadar no Japão, realizados pela equipa de Goodman (Goodman & Nishimura, 1993; Goodman, 1994, 1996; Goodman *et al.*, 1995 e 1998). Grandes passos foram dados nestes estudos e que muito beneficiaram dos avanços tecnológicos verificados na área informática, particularmente na velocidade e capacidade de processamento dos processadores dos computadores, bem como do desenvolvimento de programas de *software*, alguns dos quais desenvolvidos pelo próprio Goodman especificamente para tratamento de dados arqueológicos de Georadar.

O início da década de 1990 é marcado pela consolidação da tecnologia dos sistemas de Georadar, observando-se o desenvolvimento e a comercialização de uma nova geração de equipamentos comerciais por parte de diversas empresas um pouco por todo o mundo (GSSI, nos Estados Unidos da América; MALA, na Suécia; Sensors & Software, no Canadá; IDS, em Itália; ERA, no Reino Unido). Estes novos sistemas possibilitavam a gravação dos dados de radar em formato digital e o armazenamento de grande quantidade de informação que poderia ser posteriormente processada e analisada. É também no início desta década que os computadores pessoais se tornam mais acessíveis, com melhores e maiores capacidades de processamento, permitindo analisar os dados de Georadar de formas nunca antes possíveis, pelo menos não com os habituais orçamentos existentes na arqueologia (Conyers, 2004). Todo este desenvolvimento tecnológico produziu um aumento exponencial da utilização do Georadar em todo o tipo de aplicações, com um particular enfoque na arqueologia. Esta tendência encontra-se patente no aumento do número de trabalhos publicados e no surgimento de diversos encontros científicos que desde então se tem realizado com uma periodicidade bienal, dos quais se destaca o *International Conference on Ground Penetrating Radar*, o *International Conference on Archaeological Prospection* e o *International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar*. Há a referir também o surgimento de algumas revistas científicas que em muito contribuíram para a divulgação dos trabalhos de Georadar, particularmente a revista *Journal of Archaeological Prospection*, cuja publicação teve início em 1994.

A par do desenvolvimento tecnológico dos equipamentos assistimos, na década de 1990, ao desenvolvimento de técnicas e metodologias de aquisição e processamento de dados de Georadar. Deste período cabe destacar os trabalhos pioneiros de Dean Goodman, já atrás referido, e seus colaboradores (Goodman, 1996; Conyers & Goodman, 1997; Goodman *et al.*, 1998), que se destacam pelo desenvolvimento de modelos bidimensionais de visualização dos dados de radar (mapas de amplitudes), e de reconstruções tridimensionais das estruturas arqueológicas enterradas. Um dos exemplos do grande potencial destas novas metodologias está

patente no trabalho de Godman *et al.* (1995), onde é apresentado o resultado de prospecções com Georadar em sítios arqueológicos japoneses, tendo permitido descobrir e cartografar uma grande variedade de estruturas enterradas, nomeadamente fornos de cerâmica, montes funerários rodeados por fossos e sepulturas individuais de pedra. Nestes trabalhos pioneiros de Goodman, uma grande variedade de condições de enterramentos foram identificadas, condições essas que haviam sido simuladas em modelos informáticos previamente à aquisição dos dados no terreno, tendo por objectivo a determinação do equipamentos mais adequados a utilizar neste contexto e quais os melhores parâmetros de aquisição de dados (Conyers, 2004).

Um dos grandes avanços na utilização do Georadar aplicado à arqueologia, verificado nas décadas de 1980-90, relaciona-se com a percepção de que as reflexões de radar, medidas em tempo, poderiam ser correlacionadas com a profundidade real após determinação da velocidade das ondas de radar no solo (Vaughan, 1986; Imai *et al.*, 1987). A identificação de reflexões que correspondiam a horizontes estratigráficos de interesse arqueológico foi também utilizada, de um modo limitado, para cartografar níveis estratigráficos com estas relacionadas e para realizar reconstruções de paleotopografia (Imai *et al.*, 1987; Conyers 1995; Conyers & Spetzler, 2002). Mais recentemente, a utilização da simulação computacional bidimensional e de técnicas tridimensionais de processamento de informação (Goodman *et al.*, 1995, 1998, 2004; Conyers *et al.*, 2002), mostrou que é possível identificar estruturas arqueológicas a partir de dados de Georadar que não apresentem reflexões imediatamente visíveis. A utilização destas e de outras metodologias de processamento e visualização aumentou consideravelmente, nos últimos anos, a utilidade e velocidade da prospecção e cartografia arqueológica realizada com equipamentos geofísicos, nomeadamente com o Georadar (Conyers, 2004).

Muitos investigadores, que utilizam o Georadar nos sítios arqueológicos que estudam, preocupam-se essencialmente na identificação de anomalias sub-superficiais que possam representar estruturas de interesse (Butler *et al.*, 1994; Tyson, 1994; Sternberg & McGill, 1995; Valdês & Kaplan, 2000). Apesar de esta forma de utilização do Georadar ser bastante válida para a detecção das estruturas arqueológicas, os trabalhos de Conyers (2004b), Goodman *et al.* (2009), Novo (2009), entre outros, mostraram que as reflexões de radar adquiridas em estudos deste tipo podem ser amplificadas recorrendo a um conjunto de métodos de processamento computacional e a novas formas de interpretação e de visualização dos dados. Estes autores mostraram que, com um pouco de esforço adicional, os mais recentes desenvolvimentos da tecnologia informática permitem a construção de mapas de amplitudes que podem ser interpretados de modo a disponibilizarem mais informação sobre os sítios do que era possível há poucos anos atrás.

No futuro, a capacidade e importância do Georadar tenderá a aumentar, não apenas na sua capacidade para cartografar estruturas arqueológicas enterradas, mas também na possibilidade de reconstrução de paisagens antigas e na percepção das interações das populações humanas com o meio (Conyers, 2004b). O pós-processamento e a amplificação dos dados de reflexão de radar por meios informáticos é uma prática que se diversificou entre a comunidade científica arqueológica a partir do final da década de 1990 e inícios de 2000, à medida que esta se foi familiarizando com os meios informáticos de *hardware* e *software* disponíveis. Pesquisas do início da década de 2000 demonstraram e avaliaram quantitativamente a qualidade da informação gerada por antenas de diferentes frequências, por variações no espaçamento dos perfis de Georadar, pela variação da densidade de reflexões ao longo dos perfis e pelo tipo de processamento utilizado para apresentação dos resultados (Neubauer *et al.*, 2002).

Poderemos afirmar, à luz de todos os trabalhos realizados e dos resultados de diversas conferências e congressos organizados nas duas últimas décadas, particularmente nos encontros bienais IWAGPR (International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar – realizado desde 2001) e ICGPR (International Conference on Ground Penetrating Radar – realizado desde 1988), mas também de outros congressos mais generalistas, que o Georadar constitui, por mérito próprio, uma metodologia de pesquisa arqueológica. Como afirma Conyers (2010), o Georadar por conseguir cartografar um sítio arqueológico em mapas horizontais (a diferentes profundidades) sem danificar as estruturas, abre diversas e importantes possibilidades de estudo e preservação do património arqueológico e cultural.

Novos paradigmas surgem agora ligados à utilização do Georadar, mostrando diferentes perspectivas na sua utilização pela comunidade geoarqueológica. As pesquisas geofísicas no domínio arqueológico contribuem como fonte primária de informação para o estudo das comunidades humanas do passado, deixando de ser apenas a base preliminar de estudo prospectivo para uma escavação arqueológica tradicional (Kvamme, 2003). Conyers & Leckebusch (2010) referem que o avanço tecnológico recente, quer em meios físicos (antenas, unidades de controlo e posicionamento geográfico) quer em meios virtuais (programas de *software* com capacidades de processamento tridimensional), permite o salto da tradicional recolha e interpretação de dados, meramente identificativa da potencialidade arqueológica, para uma aplicação destas técnicas na investigação histórica e antropológica das estações. Outra das novas perspectivas advém do avanço verificado nas técnicas de aquisição e processamento dos dados de Georadar que permitem, não só a localização espacial a três dimensões das estruturas arqueológicas, mas também de potencialmente determinar a natureza específica dos materiais enterrados, tais como rochas, tijolos ou estruturas em terra.

### 2.1.3. A utilização do Georadar em Portugal

Não é fácil seguir a história da utilização do Georadar em Portugal, uma vez que existem relativamente poucos trabalhos publicados entre nós. De qualquer modo não é propósito deste estudo descrever exaustivamente a utilização do GPR em terras lusas sendo, apenas, nosso objectivo construir uma breve retrospectiva histórica da aplicação desta metodologia de prospecção geofísica, mencionando-se alguns dos trabalhos que se conhecem neste campo.

No início da década de 1990 o Georadar é já uma tecnologia bem consolidada a nível mundial, quando dá os primeiros passos no nosso país. Segundo Costa (2009) os primeiros estudos efectuados com GPR em Portugal foram realizados pelo LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) sendo a referência mais antiga a do trabalho de Rodrigues (1991) e Rodrigues *et al.* (1991). Ainda associado ao LNEC salientam-se os trabalhos realizados pela equipa da Doutora Marília Oliveira (Rodrigues *et al.*, 1991; Sousa *et al.*, 2000; Sousa *et al.*, 2002; Oliveira *et al.*, 2003; Fernandes *et al.*, 2008; Costa, 2009) em diversas investigações, particularmente com a aplicação do Georadar em contexto rodoviário. A comunicação mais antiga, segundo Costa (2009) a nível do Georadar, associada a estes dois investigadores do LNEC, é precisamente sobre a aplicação deste método no contexto rodoviário, relacionado com a caracterização geotécnica, a nível da detecção de cavidades cársticas no lanço da auto-estrada A1 – Torres Novas / Fátima. Presentemente, o LNEC dispõe de equipamentos de Georadar específicos para utilização em pavimentos rodoviários (Fontul, 2004), plataformas ferroviárias (Fortunato, 2005, 2006) e no domínio da geologia de engenharia e geotecnia (Pedrosa, 2009), disponibilizando serviços nesta área à comunidade.

É também nesta década de 1990 que se observa o início da utilização no meio académico nacional desta técnica. Os passos pioneiros foram dados no Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro, já com longa tradição de utilização de metodologias de prospecção geofísica, em aplicações que vão da arqueologia (Matias *et al.*, 1995) ao ambiente (Matias *et al.*, 2000), passando pela hidrologia até aos recursos geológicos (Moura & Matias, 1999).

Só na década de 2000 é que a utilização do Georadar se começa a diversificar pela restante comunidade académica do país. Presentemente diversas instituições académicas nacionais utilizam o GPR, realizando investigação científica nas mais diversas áreas das geociências, da engenharia civil e das ciências forenses, nomeadamente: o Instituto Politécnico de Tomar (Franco *et al.*, 2012); o Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (Fernandes, 2006); o Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho (Gonçalves *et al.*, 2008); o Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de

Coimbra (Costa, 2009); o Gabinete de Arqueologia da Reitoria da Universidade de Coimbra (Hermosilha *et al.*, 2008; Filipe & Morgado, 2011); o Departamento de Engenharia de Minas e Geoambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Cavalheiro & Carvalho, 2009a, 2009b); o Centro de Geofísica da Universidade de Évora (Lourenço *et al.*, 2009); e o Centro de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (Teixeira *et al.*, 2004; Ramos *et al.*, 2011).

Para além do meio académico observou-se também, no crepúsculo do século XX, ao início da utilização do GPR no meio empresarial através prestação de serviços de prospecção em diferentes segmentos de aplicação. Segundo Costa (2009) a Geosurveys foi a empresa pioneira, estando em actividade desde 1999. Esta empresa está sediada em Aveiro, estando especializada nas áreas da prospecção geofísica e geológica, reunindo uma vasta experiência, no que ao GPR diz respeito, no domínio da geotecnia, arqueologia, detecção de estruturas enterradas, inspecção de estruturas de engenharia, questões ambientais e investigação forense (Almeida *et al.*, 2006; Benta *et al.*, 2008; Cruz *et al.*, 2008; Hermosilha *et al.*, 2008).

Na primeira década do século XXI surgem empresas como a Tecnowave, sediada em Braga, a Geo-NDT, com sede em Vila do Conde, e a Sinergeo, com sede em Vila Verde. A primeira é uma empresa de consultoria em engenharia civil, em actividade desde 2006, especializada na inspecção e diagnóstico de estruturas (Cruz *et al.*, 2006; Fernandes, 2006; Topczewski *et al.*, 2006; Fernandes *et al.*, 2008), a segunda, em actividade desde 2007, presta serviços de inspecção com GPR no domínio da geotecnia e da inspecção de pavimentos rodoviários (Costa & Correia, 2008; Costa, 2009; Costa, 2009a). Por último, a Sinergeo, em actividade desde 2006, é uma empresa de consultoria nas áreas da geologia, hidrogeologia, geofísica e geotecnia, que tem utilizado o Georadar nos domínios da arqueologia e da pedologia (Azevedo *et al.*, 2012), neste último domínio tem vindo a desenvolver metodologias para a determinação da taxa de humidade do solo em vinhas.

Segundo Costa (2009) o fornecimento deste tipo de serviços não se esgota nestas empresas, existindo a participação de profissionais liberais e de empresas que recorrem ao aluguer deste tipo de equipamentos com intuito de prestar serviços nos diversos domínios de aplicação do Georadar. A título de exemplo, e no que ao domínio da arqueologia diz respeito, as empresas Dryas e a Era-Arqueologia, recorrem frequentemente a serviços externos de prospecção geofísica com Georadar de modo a dar resposta às suas necessidades.

#### 2.1.4. Panorâmica da aplicação do Georadar na prospecção arqueológica em Portugal

A aplicação na prospecção arqueológica dos métodos geofísicos, em geral, e do Georadar, em particular, encontra-se nos dias de hoje em fase de consolidação, estando no entanto ainda aquém das suas reais potencialidades, se comparado com a realidade observada na generalidade dos países europeus. Poderemos afirmar que o início desta década está marcado pela normalização da aplicação das diversas metodologias geofísicas na prospecção arqueológica, com especial destaque para o Georadar, começando a ser habitual a sua inclusão nos pré requisitos dos cadernos de encargos de concursos para prospecção arqueológica. No entanto, quer seja por desconhecimento das suas potencialidades quer seja por desconfiança da validade dos métodos ou, por falta de verbas, observa-se ainda uma certa resistência à utilização da prospecção geofísica e em especial, do Georadar.

Provavelmente, as primeiras contribuições científicas da aplicação do Georadar à prospecção arqueológica deveram-se ao Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro, tendo ocorrido em meados da década de 1990 com a prospecção geofísica levada a cabo na Casa do Infante, na cidade do Porto (Matias *et al.*, 1995) e nos estudos geoarqueológicos dos depósitos quaternários do Vale do Côa (Almeida, 1997).

Este começo tímido da década de 1990, no qual a aplicação do GPR à arqueologia se deveu essencialmente a investigadores da Universidade de Aveiro, é seguido de um aumento progressivo da sua aplicação nos primeiros anos do século XXI. É precisamente na transição de século, entre 1999 e 2001, que observamos o início progressivo da consolidação do Georadar como metodologia prospectiva, com as diversas campanhas arqueológicas para salvaguarda do património das áreas a serem submergidas pela albufeira de Alqueva. Destas, destaca-se a prospecção, em 2000, do sítio arqueológico do Castelo da Lousa, em Mourão (Alarcão *et al.*, 2010), e em 2001 a prospecção do sítio arqueológico da Barca do Xerez de Baixo, em Reguengos de Monsaraz (Araújo & Almeida, 2003).

As campanhas de 2002 em Castro Marim, realizadas pela equipada de Lawrence Conyers da Universidade de Denver na senda de um porto fenício (Conyers, 2004; Wachsmann, *et al.*, 2009), marcam a primeira metade da década de 2000. A estas seguem-se as inovadoras prospecções em Ançã e S. Martinho de Árvore (Grangeia & Matias, 2004) e na vila romana de Tourega, entre os anos 2004 e 2005 (Berard & Maillol, 2008).

A partir de 2005 até ao presente assistiu-se a um aumento substancial da utilização do GPR na arqueologia nacional, destacando-se as prospecções de 2006 na Mesa do Castelinho (Fabião & Guerra, 2008, 2009), no largo de D. Diniz e pátio da Universidade de Coimbra (Hermosilha *et al.*,

2008; Filipe & Morgado, 2011), na estação arqueológica do Pego (Gonçalves *et al.*, 2008, 2012), no museu Machado de Castro em Coimbra (Granjeira *et al.*, 2011) e no Complexo Mineiro de Três Minas (Martins *et al.*, 2011) .

Desde o ano de 2005 têm-se também assistido à realização de interessantes projectos multidisciplinares na área da arqueologia que incluem como elemento de destaque a prospecção geofísica, na qual a prospecção com Georadar é integrada e correlacionada com outras metodologias geofísicas. Destes projectos existem três que merecem especial destaque: o projecto da Fábrica de vidro do Covo (Cavalheiro & Carvalho, 2009a; Garcia, 2009; Tavares *et al.*, 2011), no qual se integraram dados de prospecção geoquímica, com prospecção geofísica (Georadar e Magnetometria); o Complexo arqueológico dos Perdigões (Márquez *et al.*, 2011; Romero *et al.*, 2011) no qual, desde 1996, se tem vindo a integrar técnicas de arqueologia tradicional com metodologias de detecção remota (fotografia aérea), prospecção geoquímica e prospecção geofísica (Georadar, resistividade eléctrica e magnetometria); por fim, o projecto Radio-past, centrado na cidade romana de Ammaia, em Marvão, tem desde 2008 cartografado extensivamente todas as estruturas arqueológicas através de métodos indirectos (prospecção geofísica e fotografia aérea), pontualmente validados e integrados com métodos arqueológicos tradicionais (Corsi *et al.*, 2008; Verdonck *et al.*, 2008; Verhegge, *et al.*, 2010; Vermeulen *et al.*, 2011;). Para tal toda a área da antiga cidade romana tem vindo a ser prospectada com meios geofísicos, nomeadamente através do Georadar, da magnetometria, da resistividade eléctrica.

## 2.2. Princípios teóricos do Georadar

O conhecimento da fundamentação teórica e das limitações do método do Georadar são essenciais para se poder utilizar eficazmente esta técnica durante a fase de aquisição dos dados, bem como durante o processamento dos mesmos (Porsani, 1999). Os fundamentos do método de Georadar estão estritamente ligados à teoria de propagação de ondas electromagnéticas, ou seja, às equações de Maxwell. Estas equações são utilizadas para estudar a estrutura interna da Terra, a partir das suas propriedades eléctricas e magnéticas, descrevendo o comportamento do campo electromagnético em qualquer meio. No entanto, elas não nos fornecem nenhuma informação sobre as propriedades eléctricas dos materiais por onde os campos eléctricos e magnéticos actuam. Dessa forma, é necessário introduzir as relações constitutivas do meio, que relacionam o campo eléctrico externo, aplicado ao campo interno pelas propriedades eléctrica e magnética dos materiais (Souza, 2005).

O princípio básico subjacente à metodologia do Georadar é o de que se forem propagados impulsos electromagnéticos em direcção ao solo, a partir de uma antena localizada à superfície, uma parte desses mesmos impulsos, ou ondas, serão parcialmente reflectidos, dependendo essa reflexão do grau de heterogeneidade do terreno ou do tipo de estruturas que nele se possam encontrar. O tempo que decorre entre a emissão do sinal e a sua recepção indica a profundidade a que se encontra o objecto ou estrutura responsável por essa mesma reflexão. Se essa reflexão for apresentada em sequências temporais, com cores diversas dependentes da força do sinal, o resultado será visualmente semelhante ao de um corte estratigráfico da zona prospectada (Nishimura, 2001).

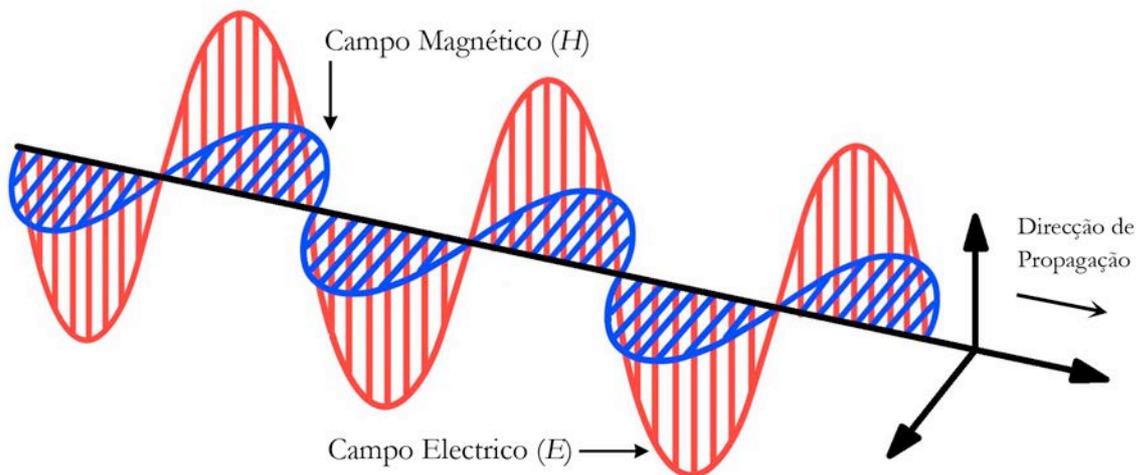
A fundamentação teórica do Georadar reside na teoria electromagnética (EM) (Annan, 2009) sendo a sua compreensão, bem como a da interacção destas ondas com os diferentes meios que atravessam, de relevante importância para uma correcta utilização deste equipamento e para uma correcta interpretação dos dados obtidos. A história deste campo das ciências inicia-se há cerca de dois séculos e foi abordada por vários autores, nomeadamente por Jackson (1962) e Smythe (1989). As bases da teoria que subjaz ao Georadar serão aqui resumidamente apresentadas e servem para compreender os fundamentos da sua técnica.

### 2.2.1. Natureza das ondas electromagnéticas

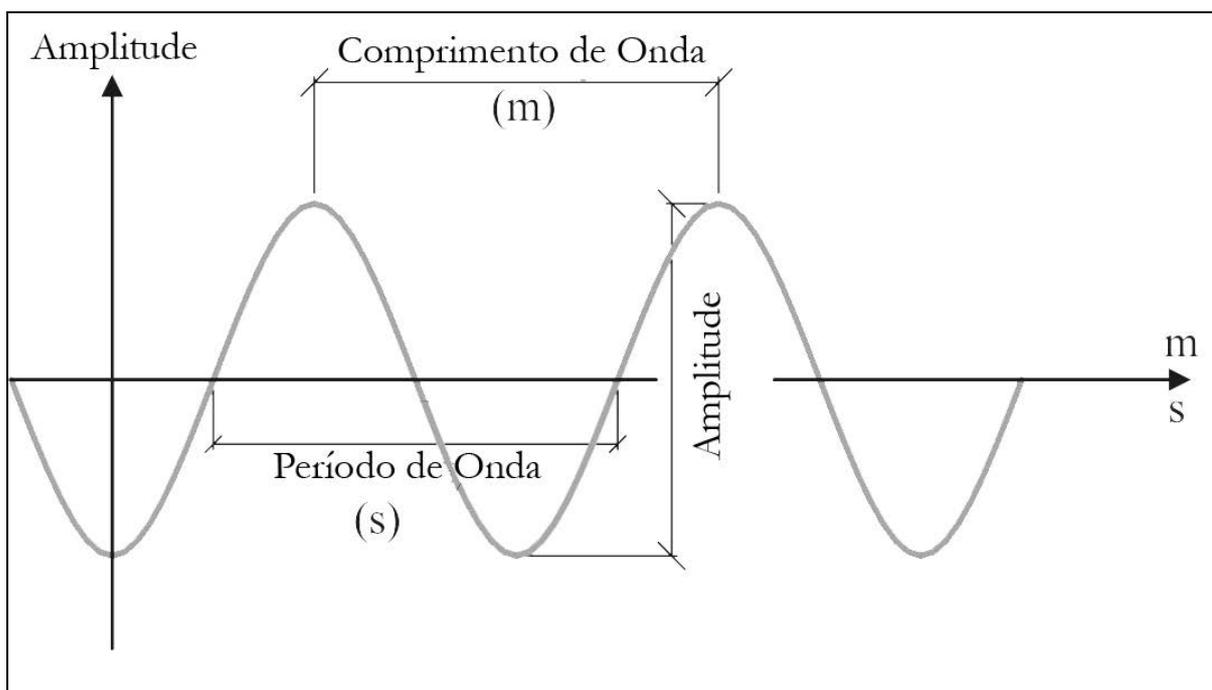
O campo electromagnético e a sua natureza foi inicialmente descrito pelo físico escocês James Clark Maxwell em 1864, que, através de quatro equações fundamentais, conhecidas como as equações de Maxwell, definiu os princípios básicos do electromagnetismo.

A propagação da energia electromagnética faz-se através de ondas electromagnéticas. Estas são de natureza transversal, constituídas por duas entidades oscilantes, interdependentes e perpendiculares entre si: o campo eléctrico,  $E$ ; e o campo magnético,  $H$ . Não é possível observar directamente o campo eléctrico e o campo magnético, a não ser através de uma representação artificial, como a apresentada na figura 2.1. Estes campos evoluem no espaço como uma onda, num plano perpendicular à direcção de propagação.

As ondas electromagnéticas possuem a particularidade de se propagarem à velocidade da luz  $c$  ( $\approx 2,99792458 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ) através do espaço sem necessitarem de matéria sólida (propagação no vácuo). A radiação electromagnética caracteriza-se pelas mesmas propriedades inerentes ao movimento de qualquer onda periódica: frequência ( $f$ ); período de onda ( $1/f$ ); comprimento de onda ( $\lambda$ ) e amplitude ( $\gamma$ ), como representado na figura 2.2.



**Figura 2.1** - Onda electromagnética no espaço com os campos eléctrico ( $E$ ) e magnético ( $H$ ) polarizados (imagem adaptada de Conyers, 2004).



**Figura 2.2** - Componentes principais de uma onda eletromagnética (adaptado de Fernandes, 2006).

A sua velocidade, no vácuo, pode ser determinada a partir da frequência e do comprimento de onda, através da seguinte expressão:

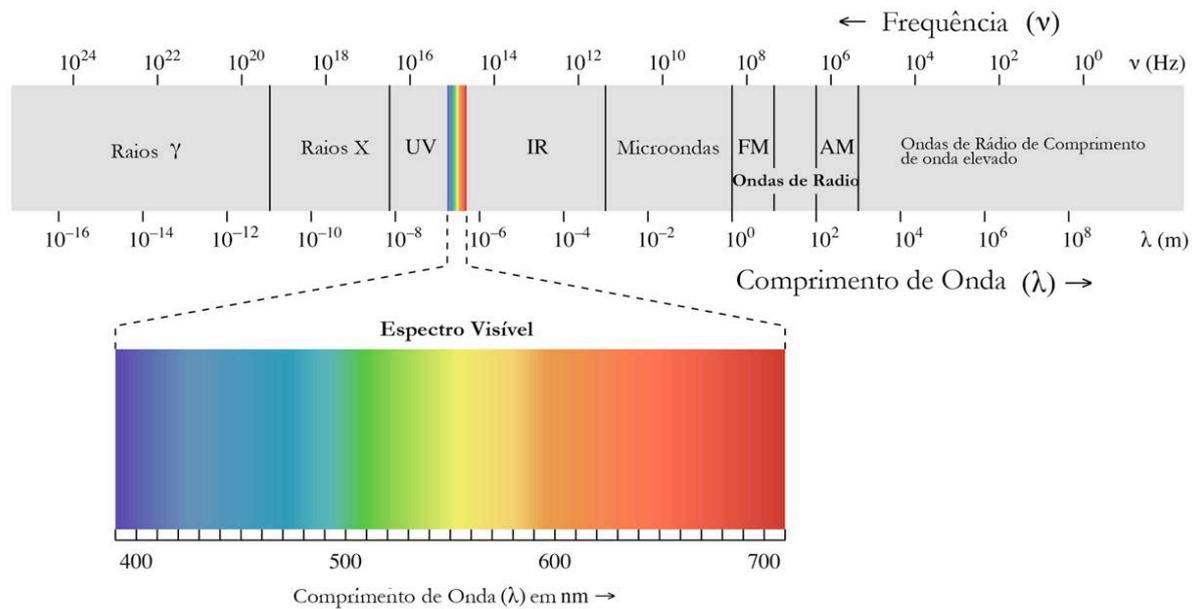
$$c = f \cdot \lambda$$

No entanto a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo é diferente da que estas apresentam quando atravessam matéria sólida. Essa velocidade é denominada de  $w$  e é representada pela seguinte relação:

$$w = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

em que a constante  $\epsilon_0$  representa a permissividade do espaço livre ( $8.854 \times 10^{-12}$  F/m) e  $\mu_0$  a permeabilidade magnética do espaço livre ( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m). F/m (Farad por metro) e H/m (Henry por metro) representam as unidades SI para medir, respectivamente, a permissividade e a permeabilidade magnética (Costa, 2009).

O intervalo da frequência da radiação eletromagnética é bastante amplo, abrangendo frequências a baixo dos 10 Hz (micro pulsações atmosféricas), passando pelas frequências de radar ( $10^8 - 10^{11}$  Hz), até frequências de  $10^{16}$  Hz (Raios-X e Raios Gama). A figura 2.3 apresenta o espectro eletromagnético, no qual a frequência e o comprimento de onda definem os vários tipos de radiação eletromagnética.



**Figura 2.3** – Espectro eletromagnético (adaptado de Costa, 2009).

As bandas de frequência comumente utilizadas pelos sistemas de Georadar posicionam-se entre os 1 MHz de frequência central de algumas antenas utilizadas em glaciologia (Arcone, 2009) e os 2,5 GHz de frequência central de antenas utilizadas em inspeções de estruturas (Saarenketo, 2009), sendo por vezes utilizadas antenas de frequências mais altas (ex: 4 a 12 GHz) em equipamentos especialmente projectados para detecção de minas anti-pessoal (Yarovoy, 2009).

### 2.2.2. Propriedades eletromagnéticas dos materiais

A utilização da técnica do Georadar torna-se possível devido à existência de propriedades eléctricas e magnéticas favoráveis, que caracterizam um grande número de materiais naturais e artificiais, permitindo desta forma a propagação das ondas eletromagnéticas. Ao nível atómico, estas propriedades resultam da interacção existente entre os electrões da matéria e os campos eléctrico e magnético da onda eletromagnética gerada pelos sistemas de radar.

As propriedades eletromagnéticas, ou dieléctricas, de um meio material incluem a condutividade eléctrica ( $\sigma^*$ ), a permeabilidade magnética ( $\mu$ ) e a permitividade relativa ( $\epsilon^*$ ) (Clark, 2004). Estas propriedades constituem parâmetros fundamentais e podem influenciar a forma como as ondas de radar se propagam, reflectem e atenuam, ao atravessar diferentes materiais.

### 2.2.2.1. Condutividade eléctrica

Um dos factores que afecta a profundidade de penetração e amplitude das ondas de radar no solo é a dispersão e atenuação de energia de radar (Conyers, 2004). Esta atenuação e dispersão ocorre porque a maioria dos solos apresenta, geralmente, alguma grau de condutividade eléctrica, o que provoca a dissipação e absorção das ondas electromagnéticas à medida que estas se propagam pelo solo.

A condutividade eléctrica ( $\sigma$ ) descreve o carácter eléctrico de um material, mais especificamente, a capacidade que este possui de conduzir uma corrente eléctrica, consistindo numa medida que expressa a facilidade de movimentação de electrões (ou transporte de carga) num dado material que se encontra sob a influência de um campo eléctrico externo (Saarenketo, 1998). Este parâmetro é recíproco da resistividade eléctrica ( $\rho$ ), ou seja, são inversamente proporcionais como se constata na fórmula:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}.$$

A corrente eléctrica propaga-se nas rochas e minerais através de três modos de condução: óhmico; electrolítico e dieléctrico. A condução óhmica requer a presença de electrões livres, tais como os presentes em materiais metálicos. A condução electrolítica requer a presença de iões que transportem a carga eléctrica, tais como os que se encontram dissolvido em águas subterrâneas ou marinhas. A condução dieléctrica ocorre em sedimentos, solos ou rochas altamente resistivos, e requer que os átomos, dos materiais atravessados, polarizem ligeiramente de modo a gerar correntes de deslocamento (Baker *et al.*, 2007).

É a condução electrolítica, em geral, o processo dominante em materiais húmidos ou saturados (i.e., sobre ou sob o nível freático, respectivamente). A condução electrolítica depende da porosidade e da condutividade dos fluidos dos poros, como demonstrado pela lei de Archie (Baker *et al.*, 2007), segundo a fórmula,

$$\sigma = a\phi^m S^n \sigma_w + \sigma_c [S/m]$$

em que:

$m$  - expoente de cimentação, com valores constantes (1,3 – 2,5), usualmente 2 para sedimentos não consolidados;

$a$  - constante empírica, usualmente 1 para sedimentos não consolidados;

$S$  - saturação fraccional do volume dos poros;

$n$  - constante empírica ( $\sim 2$ );

$\sigma_w$  - condutividade dos fluidos dos poros (S/m);

$\sigma_c$  - condutividade de superfície dos sedimentos da matriz (S/m).

A condutividade eléctrica está essencialmente dependente da composição dos materiais, da porosidade do meio e da condutividade dos fluidos presentes nos poros. A condutividade eléctrica dos principais minerais que formam os solos é bastante baixa ( $\sigma < 10^{-4}$  S/m) (Santamarina *et al.*, 2005), como se pode observar na tabela 2.1, sendo estes geralmente considerados isolantes. No entanto, alguns minerais, também comuns nos solos, tais como os minerais metálicos (ex: hematite, pirite, etc.) e alguns minerais de argila apresentam condutividades elevadas, particularmente quando em presença de água. Estes materiais electricamente condutivos dissipam rapidamente a energia de radar, impedindo uma adequada transmissão das ondas electromagnéticas no solo (Conyers & Cameron, 1998). A presença destes materiais bem como a de argilas saturadas em água, particularmente argilas expansivas, pode impedir uma propagação adequada da energia de radar em profundidade (Leckebusch, 2003), comprometendo a utilização do método do Georadar.

### 2.2.2.2. Permeabilidade magnética

Na generalidade das situações, os efeitos magnéticos dos materiais (i.e., os fenómenos diamagnéticos, paramagnéticos e supermagnéticos) possuem uma influência muito reduzida sobre a propagação das ondas de radar (Olhoeft, 1998). Os efeitos magnéticos só se tornam importantes quando, no solo, existem minerais ferromagnéticos (ex: ferro, níquel, seus óxidos e sulfuretos) em percentagens superiores a 5% do seu volume (Roth *et al.*, 1990).

Nos materiais geológicos os minerais ferromagnéticos apenas são observados em quantidades apreciáveis em algumas rochas ígneas e em solos e sedimentos ricos em ferro (Lacroix, 2009). Em materiais subsuperficiais comuns, a quantidade destes minerais é usualmente inferior a 2% do seu volume, sendo a sua importância considerada negligenciável (Cassidy, 2009a). Como resultado, a permeabilidade magnética ( $\mu$ ) da maioria dos materiais sub-superficiais é normalmente simplificada para o valor de espaço livre  $\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6}$  H/m (Lacroix, 2009). Dado os baixos valores de permeabilidade magnética da maioria dos materiais, utiliza-se alternativamente a permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ), podendo esta ser determinada da seguinte forma:

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

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

**Tabela 2.1** - Características dieléctricas de materiais comuns (adaptada de: Moura & Matias, 1999; Conyers, 2004; Baker *et al.*, 2007).

Material	Permitividade dieléctrica relativa ( $\epsilon_r$ )	Condutividade eléctrica ( $\sigma$ ) (mS/m)	Velocidade de propagação (V) (cm/ns)
Ar	1	0	30
Água destilada	80	0,01	3,3
Água doce	80	0,5	3,3
Água salgada	80	$3 \times 10^4$	1
Gelo	3 – 4	0,01	16
Areias secas	3 – 5	0,01	15
Areias saturadas	20 – 30	0,1 – 1,0	6
Calcário	4 – 8	0,5 – 2	12
Granito	4 – 6	0,01 – 1	13
Xistos argilosos	5 – 15	1 – 100	9
Argilas	5 – 40	2 – 1000	5 – 13
Solos arenosos secos	4 – 6	0,1 – 100	12 – 15
Solos arenosos saturados	15 – 30	10 – 100	5 – 8
Solos limosos secos	4 – 6	0,1 – 1	7 – 9
Solos limosos saturados	10 – 20	10 – 100	5 – 8
Solos argilosos secos	4 – 6	0,1 – 10	12 – 15
Solos argilosos saturados	10 – 15	100 – 1000	8 – 9
Betão	5 – 8	0,01 – 2	15

### 2.2.2.3. Permitividade eléctrica

A permitividade ( $\epsilon$ ) é uma propriedade eléctrica que descreve a capacidade, que um dado material possui, de armazenar e libertar energia electromagnética sob a forma de cargas eléctricas reportando, classicamente, para a capacidade de armazenamento dos capacitores (Cassidy, 2009b). Alternativamente, a permitividade poderá ser definida como uma medida do grau de permeabilidade do material ao campo eléctrico em que está imerso (Hecht, 2002).

A permitividade eléctrica ( $\epsilon$ ) é geralmente apresentada sob a forma adimensional da permitividade eléctrica relativa ( $\epsilon_r$ ), comumente designada de permitividade dieléctrica relativa (RDP – Relative Dielectric Permittivity), a qual se descreve nos seguintes termos:

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

em que  $\epsilon_0$  representa a permissividade do espaço livre ( $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  F/m).

Os materiais são normalmente caracterizados pela sua permissividade dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ), considerando-se como dielétricos todos aqueles que permitam a propagação de um campo electromagnético. Os materiais dielétricos são definidos como maus condutores eléctricos, mas são eficientes na condução de campos electrostáticos.

A permissividade dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ), como antes referido, considera as propriedades eléctricas e magnéticas dos materiais naturais ou artificiais, consistindo basicamente numa medida da capacidade que um determinado material possui para armazenar e transmitir a carga energética de um determinado campo electromagnético (von Hippel, 1954; Wensink, 1993; ASTM International, 2003). O valor da permissividade relativa ( $\epsilon_r$ ) determina-se, usualmente, de uma forma empírica a partir de medições realizadas no terreno, mas também pode ser medido em laboratório, embora as condições naturais nem sempre possam ser replicadas (Conyers, 2004).

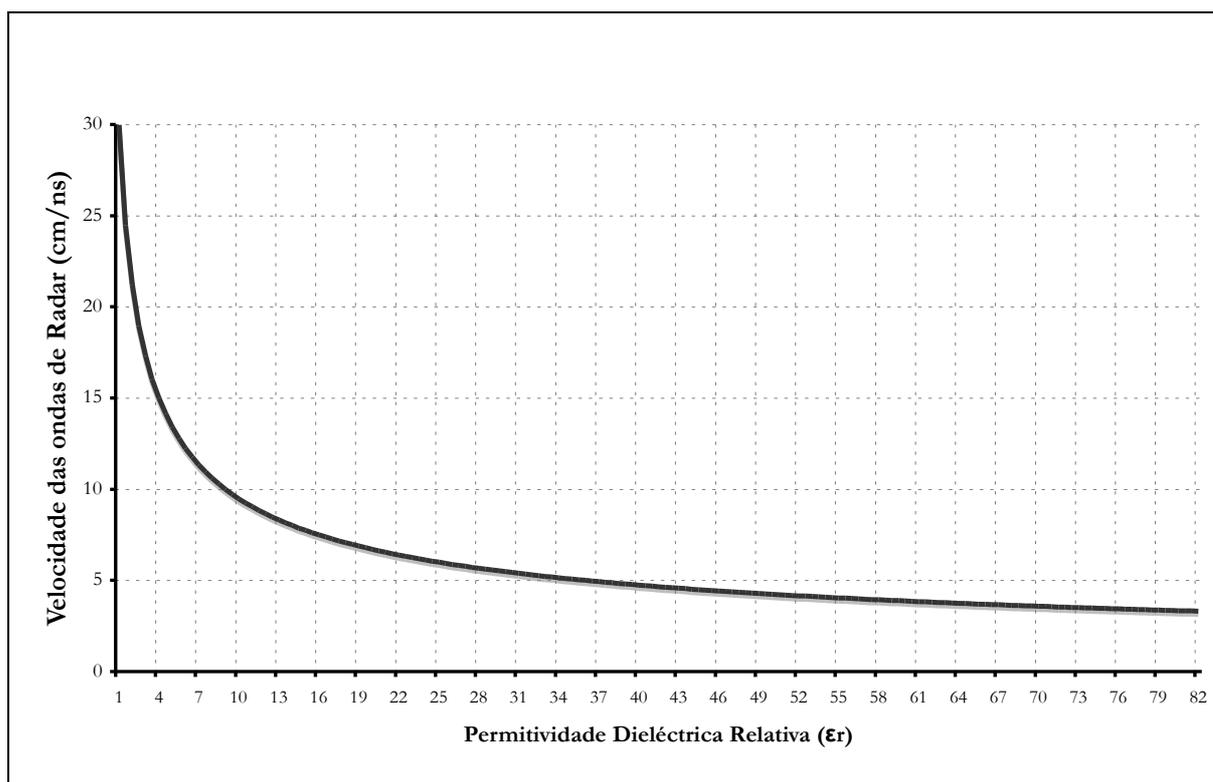
De um modo geral, as características dielétricas de um material condicionam a propagação das ondas electromagnéticas no seu seio, estando a permissividade dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) relacionada com a velocidade de propagação da energia electromagnética.

A velocidade de propagação das ondas de Radar é inversamente proporcional ao valor da permissividade relativa ( $\epsilon_r$ ) verificando-se que, tal como se pode observar na figura 2.4, quanto maior for o seu valor menor será a velocidade de propagação das ondas electromagnéticas.

A permissividade dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) permite também medir a capacidade de transmissão em profundidade das ondas de Radar, possibilitando assim a avaliação da velocidade de propagação da energia no solo, bem como a sua intensidade (Daniels, 2004). Regra geral e em grande parte das aplicações arqueológicas do Georadar, os valores de  $\epsilon_r$  e os valores de velocidade das ondas de radar no solo são utilizados de forma idêntica, visto ser bastante difícil medir, ou prever, muitas das outras variáveis usadas no complexo cálculo da permissividade dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ), variáveis estas que também influenciam o comportamento das ondas de radar (Conyers, 2004).

Na grande maioria dos estudos de Georadar aplicados à arqueologia a permissividade eléctrica ( $\epsilon_r$ ), frequentemente apresentada na forma da sua sigla anglo-saxónica RDP, é utilizada como um meio para a determinação da velocidade de propagação das ondas de radar no solo. Exemplificando, o valor de  $\epsilon_r$  da água doce é bastante elevado ( $\approx 80$ ), mas a energia de radar pode facilmente ser transmitida através desse meio sem sofrer atenuação, apenas sendo

transmitida a uma velocidade muito reduzida ( $\approx 3,3$  cm/s). Uma camada de turfa, que é composta essencialmente por matéria orgânica e água doce, também apresenta valores de  $\epsilon_r$  muito elevados, mas permitirá também a penetração das ondas electromagnéticas a profundidades consideráveis, verificando-se apenas que essa velocidade é muito mais reduzida que a observada noutros tipos de materiais, tais como areias saturadas ou rochas (Worsfold *et al.*, 1986; Clarke *et al.*, 1999).



**Figura 2.4** – Gráfico da relação entre a Velocidade das ondas de Radar e a Permittividade Dielétrica Relativa. O valor da permissividade relativa é inversamente proporcional à velocidade de propagação das ondas de Radar (adaptado de Conyers, 2004).

É bastante importante, durante a realização de um estudo arqueológico com Georadar, compreender o valor da permissividade eléctrica ( $\epsilon_r$ ) dos materiais do subsolo do sítio a ser prospectado, uma vez que este nos fornece uma correlação imediata com a velocidade de propagação das ondas de Radar, possibilitando a conversão dos tempos de “viagem” da energia electromagnética reflectida em valores de profundidade. É, no entanto, difícil conseguir determinar no terreno o valor de  $\epsilon_r$  dos materiais do solo, mas poderá ser estimado através da utilização de um conjunto de procedimentos de campo, que posteriormente serão aqui discutidos.

A permitividade dieléctrica relativa ( $\epsilon_r$ ) do ar, que apresenta atenuação electromagnética negligenciável, é aproximadamente 1,0003 (Dobrin, 1976), sendo usualmente arredondada para 1. A maioria dos solos e sedimentos encontrados em sítios arqueológicos apresentam valores de  $\epsilon_r$  que variam entre 3 e 25 (tabela 2.1). Quando totalmente secos, a maioria dos materiais naturais apresenta um valor de  $\epsilon_r$  baixo, dentro de um curto intervalo de valores (normalmente entre 3 e 5). No entanto, basta uma pequena percentagem de água presente no meio para a permitividade eléctrica ( $\epsilon_r$ ) aumentar (em meio natural esta é quase sempre a condição, mesmo em ambiente desértico), algumas vezes quase exponencialmente (Conyers, 2004a).

### 2.2.3. Velocidade de propagação das ondas electromagnéticas

A propagação das ondas electromagnéticas no ar e no vazio, é igual à velocidade da luz no mesmo meio. Contudo, quando a sua propagação ocorre através de materiais sólidos ou líquidos a velocidade ( $v$ ) será consideravelmente menor sendo expressa pela equação:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\left(\frac{\epsilon_r \mu_r}{2}\right) [(1 + P^2) + 1]}}$$

na qual  $P$  corresponde ao factor de perda:

$$P = \frac{\sigma}{\omega \epsilon}$$

onde,  $\sigma$  corresponde à condutividade eléctrica,  $\omega$  à frequência angular e  $\epsilon$  à permitividade eléctrica.

Esta expressão pode ser simplificada quando as ondas de rádio se propagam através de um material com características “low-loss”, ou seja, em materiais nos quais se verifica uma reduzida perda de energia das ondas propagantes, para frequências habituais de radar, tais como materiais rochosos e a maioria dos solos quando secos. Isto significa que a condutividade eléctrica do material ( $\sigma$ ) é consideravelmente baixa, mesmo praticamente nula (Neal, 2004). Consequentemente o factor de perda ( $P$ ) é considerado nulo (Fernandes, 2006). Para além deste factor, a permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ) é um valor adimensional, definido como a razão entre a permeabilidade magnética ( $\mu$ ) e a constante de permeabilidade magnética no espaço livre ( $\mu_0$ ). Em materiais não magnéticos,  $\mu_r$  é igual a 1. Assim sendo, nestes materiais a velocidade de

propagação das ondas electromagnéticas pode ser obtida pela seguinte expressão simplificada, adaptada de Luís (2005):

$$v_m = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

#### 2.2.4. Profundidade de penetração

A profundidade de penetração das ondas de radar no solo é um importante factor a considerar quando se realiza uma prospecção com Georadar. Dela poderá depender, a par da resolução do sinal, a detecção e a identificação de estruturas arqueológicas enterradas. Assim sendo, uma correcta escolha de equipamentos e a compreensão da natureza dos materiais a serem atravessados pelo sinal de radar, poderá marcar a diferença no sucesso de uma campanha prospectiva.

A profundidade de penetração do sinal de radar está dependente de vários factores, nomeadamente: da frequência da antena e do respectivo comprimento de onda do sinal; das propriedades eléctricas dos materiais (condutividade eléctrica e permitividade dieléctrica relativa); e das características dos locais a estudar.

A frequência da antena de radar é o primeiro factor a ter em conta quando consideramos a profundidade de penetração, uma vez que o valor da frequência com que é emitido o sinal é inversamente proporcional à profundidade que este pode penetrar num solo (tabela 2.2). Assim sendo, o sinal gerado por antenas de elevada frequência (ex: 1000 MHz) atinge menores profundidades do que o sinal gerado por antenas de baixa frequência (ex: 100 MHz). A utilização de antenas de menor frequência permite aumentar a profundidade de penetração do sinal, uma vez que a atenuação da energia aumenta com a frequência, no entanto, reduzindo a frequência diminuímos também a resolução do sinal.

As características dieléctricas dos materiais são também um importante factor condicionante da profundidade de penetração das ondas de radar, frequentemente mais importante que a frequência das antenas. Os materiais, naturais ou artificiais, provocam uma atenuação significativa no sinal de radar que aumenta exponencialmente com a profundidade. Esta atenuação é determinada pelas propriedades dieléctricas dos materiais, sendo particularmente importante o contributo da condutividade eléctrica. Os materiais mais condutivos (tabela 2.1) contribuem para a dispersão e absorção da componente eléctrica da onda electromagnética enfraquecendo de tal modo o sinal que este se torna indetectável.

**Tabela 2.2** – Profundidade de penetração e resolução do sinal de Radar para diferentes frequências de antena (adaptado de Fernandes, 2006 e Franco, 2010).

Frequência central das antenas	Profundidade de penetração*	Resolução qualitativa
100 MHz	15 m	Baixa
200 MHz	10 m	Baixa a média
270 MHz	6 m	Média
400 MHz	4 m	Média a alta
900 MHz	1 m	Alta
1000 MHz	0,5 m	Alta

\* - profundidade máxima de penetração das ondas de Radar para solos arenosos secos.

Por último, a capacidade de penetração da energia electromagnética poderá ser condicionada pelas características físicas dos materiais prospectados. Na grande maioria dos materiais a energia do sinal também sofre atenuação por perdas relacionadas com a sua dispersão, provocada pela variabilidade e heterogeneidade dos mesmos. As variações granulométricas e/ou mineralógicas, bem como a geometria das interfaces ou de outros reflectores poderão provocar a dispersão total ou parcial das ondas, comprometendo a profundidade de penetração do sinal de radar.

### 2.2.5. Resolução

O propósito primordial da utilização do Georadar, no que à prospecção arqueológica diz respeito, prende-se com a detecção de estruturas e/ou objectos soterrados. Para se poder efectuar essa detecção há que considerar se a frequência do sinal de radar do equipamento utilizado consegue resolver os objectos enterrados.

A resolução do sinal, segundo Annan (2009), indica-nos o limite de confiança na determinação da posição de um dado alvo bem como dos seus atributos geométricos (ex: forma, tamanho e espessura). Basicamente, a resolução é função do comprimento de onda da energia de radar propagada e da geometria dos objectos/estruturas sob estudo (Conyers, 2004), estando dependente da frequência central da antena utilizada, sendo tanto maior quanto maior for o valor da frequência.

A resolução do sinal de Georadar consiste em dois componentes, um longitudinal e outro lateral. A resolução longitudinal, ou vertical (distância ou profundidade), é uma medida da capacidade de diferenciação entre dois sinais adjacentes entre si no tempo. De uma forma simples, a resolução vertical é dependente, como referido, da frequência. Por sua vez, Conyers (2004) refere ainda

que, para além da frequência, a capacidade de detectar (resolver) um dado objecto está dependente do comprimento de onda, referindo que estes possuem resolução se a sua dimensão for maior que 1/4 do comprimento de onda da radiação incidente.

O comprimento de onda ( $\lambda$ ) pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

onde  $V$  é a velocidade de propagação das ondas de Radar e  $f$  a frequência do sinal.

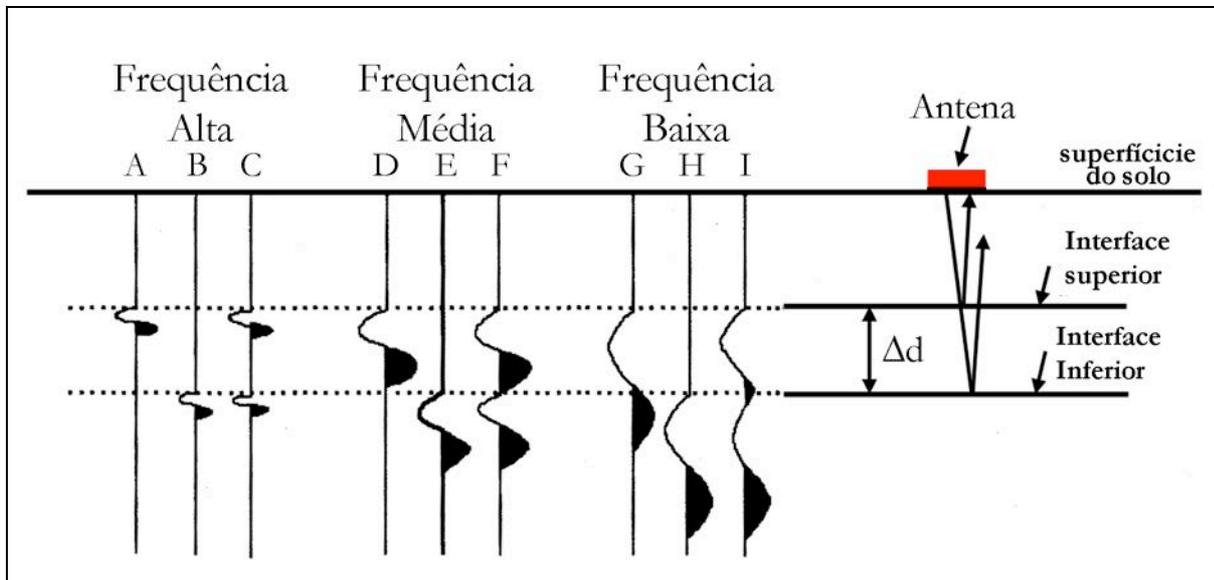
A partir desta equação é possível determinar o comprimento de onda, conhecendo a frequência e a velocidade, e desse modo a resolução do sinal. No entanto, há a considerar que ao atravessar o solo, a energia de radar vai sofrer uma diminuição da frequência e subsequente aumento do comprimento de onda propagante (Jol & Bristol, 2003). Por exemplo, uma antena de 400 MHz de frequência central gera energia com comprimento de onda de 75 cm no ar (Conyers, 2004), ao atravessar o solo, a frequência dessa energia diminui para 300 MHz com comprimento de onda de 100 cm. Associado a este fenómeno, há que ter em consideração que as características dieléctricas dos materiais atravessados pelas ondas de radar vão também provocar modificações na velocidade das ondas e, logicamente, no comprimento de onda (ver tabela 2.3), o que influenciará a resolução do sinal.

**Tabela 2.3** – Comprimento de onda (em metros) das ondas de Radar de acordo com a permissividade eléctrica relativa ( $\epsilon_r$ ) do meio e a frequência central da antena. Exemplo das antenas de 200 MHz e 400 MHz de frequência central (adaptado de Conyers, 2004).

Frequência	Permissividade eléctrica relativa ( $\epsilon_r$ )						
	1	5	10	15	20	50	80
<b>200 MHz</b>	1,499	0,670	0,474	0,387	0,335	0,212	0,168
<b>400 MHz</b>	0,750	0,335	0,237	0,194	0,168	0,106	0,084

Para além da capacidade de identificar objectos, a resolução vertical relaciona-se com a capacidade de distinguir, ou resolver, superfícies horizontais ou sub-horizontais paralelas. Para conseguir distinguir estas estruturas (ex: o tecto e muro de uma camada de solo) as suas superfícies deverão encontrar-se separadas por uma distância superior à do comprimento de onda da energia de radar que se propaga através delas (Davis & Annan, 1989). Se as duas reflexões geradas não se encontrarem separadas por essa distância, as ondas reflectidas serão dispersadas por interferências destrutivas e construtivas e, tal como se pode observar na figura 2.5, se o

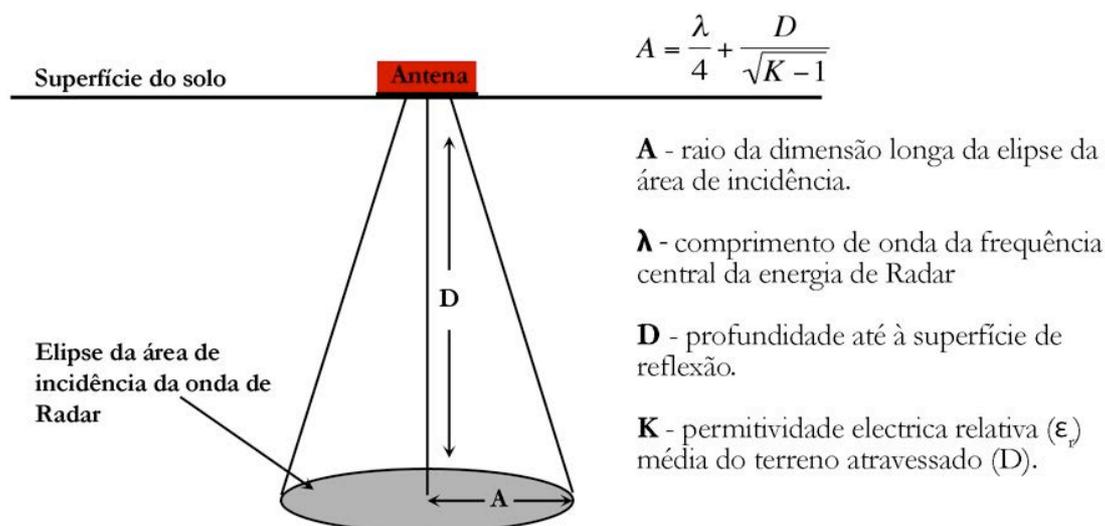
comprimento de onda for superior ao referido espaçamento as duas estruturas poderão ser visualizadas como sendo apenas uma.



**Figura 2.5** – A resolução vertical de interfaces encontra-se dependente da frequência da energia emitida e da distância entre as duas superfícies planares ( $\Delta d$ ). Para frequências mais elevadas, a energia gerada possui comprimento de onda suficientemente baixo para poder identificar as duas superfícies. Para frequências médias, o comprimento de onda quase não consegue resolver as duas interfaces e, para frequências baixas, o elevado comprimento de onda resolverá as duas interfaces como sendo apenas uma (adaptado de Conyers, 2004).

A resolução lateral, também designada de horizontal, descreve a capacidade de detectar e distinguir dois objectos localizados a profundidades idênticas. A resolução horizontal, segundo Daniels (2004), é inversamente proporcional a  $\sqrt{\alpha}$ , sendo  $\alpha$  o coeficiente de atenuação, e pode ser determinada pelo fenómeno de difracção observado durante a reflexão do sinal. Consequentemente, esta resolução dependerá da profundidade do reflector, do comprimento de onda durante o percurso percorrido, da frequência central e da abertura da antena.

Conyers (2004) considera também importante para a resolução horizontal a determinação da área de incidência da onda de radar (*Radar wave footprint*). Segundo este autor, o modo de determinar se um dado objecto é resolvido pela onda de Radar passa pela determinação da área de incidência que a onda tem sobre o objecto a estudar. Basicamente, um alvo para ser detectado deverá ter uma área igual ou ligeiramente inferior à área de incidência da energia de Radar (figura 2.6).



**Figura 2.6** – Dispersão cônica da energia de Radar no solo. A dimensão aproximada da área de incidência da radiação electromagnética no solo, a uma dada profundidade, poderá ser estimada a partir da frequência da antena e da permitividade relativa média do solo percolado (adaptado de Conyers, 2004).

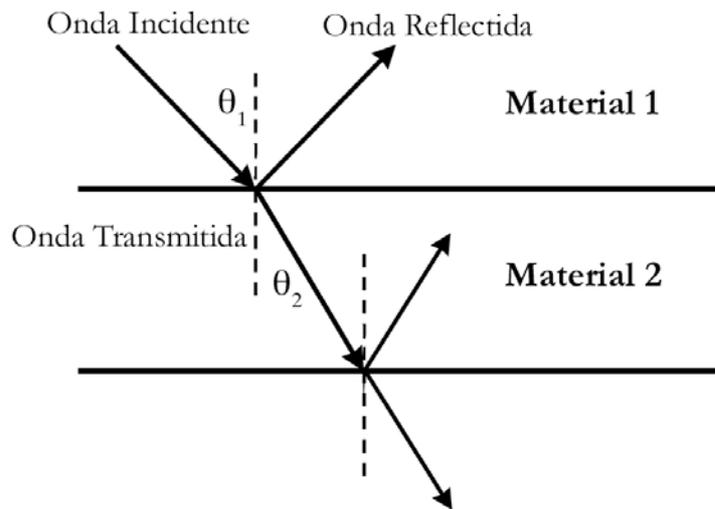
### 2.2.6. Coeficiente de reflexão e transmissão

O principal objectivo da maioria das prospecções arqueológicas com Georadar é o de diferenciar e cartografar as interfaces subsuperficiais, de forma a conseguir identificar as estruturas (antrópicas ou naturais) localizadas no subsolo.

A metodologia de prospecção com Georadar depende, normalmente, da detecção dos sinais de radar reflectidos ou dispersados pelo meio que atravessam (Annan, 2009). A propagação das ondas electromagnéticas, emitidas através de um dado meio, é modificada de acordo com as propriedades intrínsecas do mesmo em que essas ondas se propagam. Essa propagação será também condicionada, por aspectos relacionados com a geometria, posição e configuração das estruturas atravessadas (Costa, 2009), pois sempre que a energia de Radar atravessa um contacto entre dois materiais com diferentes propriedades físicas e/ou químicas, a velocidade das ondas modificar-se-á e alguma da energia será reflectida de volta à superfície (Conyers, 2004).

Cada material, natural ou artificial, possui um conjunto de características próprias que afectam a velocidade de propagação da energia electromagnética e, nessa medida, afectam a intensidade das ondas reflectidas. Estas características correspondem às propriedades electromagnéticas dos materiais, nomeadamente à condutividade eléctrica, permeabilidade magnética e permitividade eléctrica. De acordo com estas propriedades, segundo Conyers (2004), um determinado meio poderá ser totalmente permeável à transmissão das ondas de Radar, sendo atravessado por estas sem dificuldade ou, pelo contrario, poderá absorver, reflectir e/ou atenuar a radiação

electromagnética em tal grau que serão total ou parcialmente impermeáveis à transmissão da energia emitida pelo Georadar (Reynolds, 2002; Daniels, 2004). A título de exemplo, um meio muito condutivo, como a água do mar, provocará a dispersão da energia de radar, o aço ou outros metais reflectirão as ondas electromagnéticas e uma camada de argilas expansivas saturada em água atenuará consideravelmente o sinal de Radar.



**Figura 2.7** – Representação da reflexão e transmissão das ondas electromagnéticas, para um meio com duas interfaces, de acordo com a Lei de Snell (adaptado de Fernandes, 2006 e Costa, 2009).

Quando as ondas de radar percorrem o solo, durante uma prospecção, é possível constatar a ocorrência de diferentes reflexões nas interfaces existentes entre meios com propriedades dieléctricas distintas. Quando uma onda electromagnética atinge a interface que separa dois meios com propriedades electromagnéticas distintas, a energia incidente será parcialmente reflectida, parcialmente refractada e transmitida, dependendo do contraste da permitividade eléctrica relativa existente entre os dois meios. As estruturas planares fornecem um modelo simples para compreender este processo, tal como esquematizado na figura 2.7, tendo a sua explicação teórica origem nas leis da óptica (Costa, 2009). Os ângulos da transmissão e reflexão são definidos através da lei de Snell, que se expressa pela seguinte equação, quando consideramos a velocidade das ondas de radar,

$$v_2 \sin \theta_1 = v_1 \sin \theta_2$$

ou pela equação seguinte, quando se considera a permitividade relativa de cada um dos materiais,

$$\sqrt{\epsilon_{r1}} \sin \theta_1 = \sqrt{\epsilon_{r2}} \sin \theta_2.$$

A proporção da energia reflectida é dada pelo valor do coeficiente de amplitude de reflexão ( $R$ ), o qual pode ser determinado de duas formas: a primeira, através do contraste existente entre os valores da permitividade eléctrica relativa ( $\epsilon_r$ ) dos materiais adjacentes; a segunda através da razão entre a intensidade da energia reflectida e a intensidade da energia incidente. A amplitude de reflexão ( $R$ ) é uma medida adimensional, cujos valores se situam entre -1 e 1, podendo estes ser obtidos pela expressão (Daniels, 2007):

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r2}} - \sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$

A energia electromagnética que é refractada pela interface e transmitida através das camadas subjacentes é definida pelo coeficiente de transmissão ( $T$ ), que é determinado a partir do coeficiente de reflexão ( $R$ ) por meio da seguinte expressão (Clemeña, 1991 e McCavitt, 1993):

$$T = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$

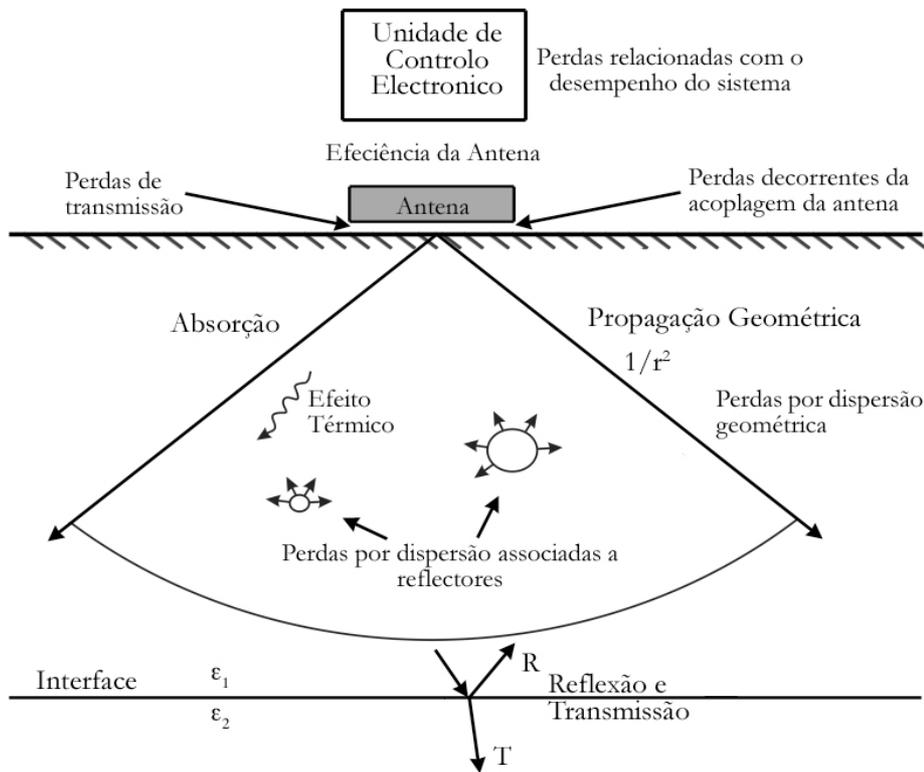
Estas expressões são válidas assumindo-se a hipótese de não ocorrerem perdas significativas do sinal, para as quais  $R + T = 1$ . Onde  $\epsilon_{r1}$  e  $\epsilon_{r2}$  correspondem ao valor de permitividade eléctrica relativa das camadas 1 e 2, respectivamente, e considerando que a camada 2 é mais profunda que a camada 1 (figura 2.7).

### 2.2.7. Atenuação da energia de Radar

Os sinais gerados pelos sistemas de Georadar são invariavelmente transmitidos através de meios heterogéneos, do ponto de vista das suas propriedades eléctricas e magnéticas (Annan, 2009). Estes meios induzem atenuação e dispersão da energia de Radar transmitida (figura 2.8), condicionando a capacidade de penetração e a amplitude das ondas electromagnéticas. Segundo Cassidy (2009a) a atenuação e a dispersão do sinal é de tal ordem que, para a generalidade dos meios, o sinal registado pelos sistemas de radar é cerca de 100 a 150 dB inferior ao sinal emitido.

Diversos factores contribuem para a atenuação do sinal de Radar, sendo o mais significativo relacionado com a perda material, que origina a conversão da energia do campo eléctrico em energia térmica (dissipação óhmica). Segundo Milson & Eriksen (2011) o decaimento exponencial do sinal é governado por uma constante de atenuação que, na maioria dos materiais, é aproximadamente proporcional à frequência, à condutividade e à permeabilidade magnética quando esta diverge significativamente do valor do espaço livre. Daqui se depreende que, quanto maior for a condutividade do meio maior será a atenuação do sinal de Radar logo, menor a

capacidade de penetração nesse meio. Observa-se também que a atenuação será mais intensa nas frequências mais elevadas, uma vez que a aproximada variação linear da constante de atenuação com a frequência, verificada ao longo do intervalo de frequências de um pulso de Radar implica que a forma desse pulso se modificará com o tempo de viagem (Milson & Eriksen, 2011).



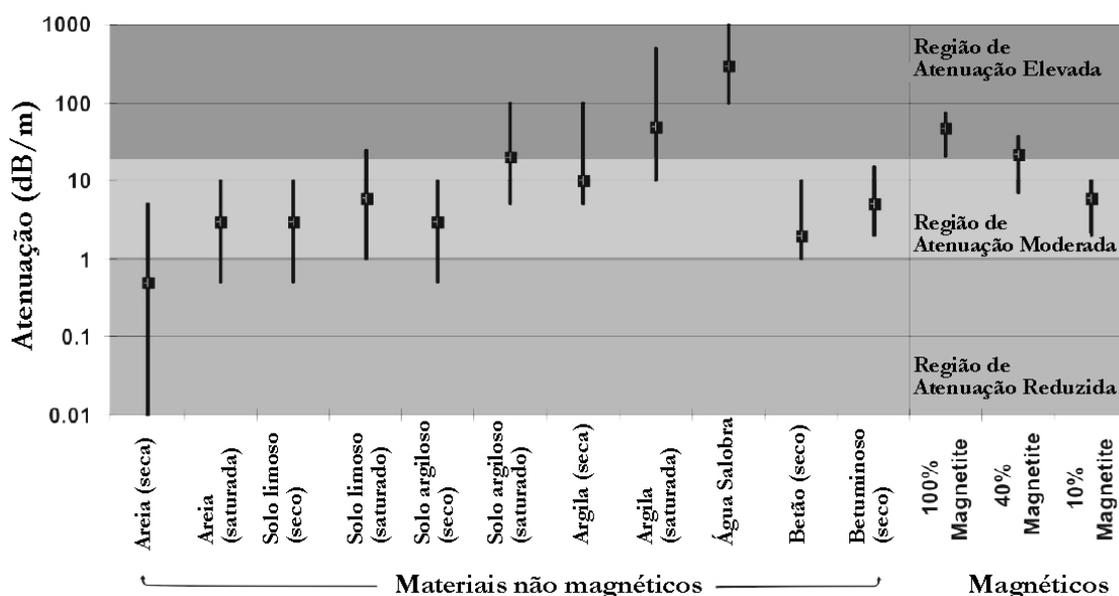
**Figura 2.8** – Factores que contribuem para a diminuição da intensidade do sinal de Radar (adaptado de Fernandes, 2006).

A atenuação da energia do sinal electromagnético também dependerá, como se depreende, da natureza dos materiais atravessados, sendo uma função complexa das propriedades magnéticas e eléctricas do meio através do qual estas se propagam. Efectivamente, as características dos materiais ditarão diferentes valores do coeficiente de atenuação das ondas electromagnéticas (figura 2.9). O coeficiente de atenuação ( $\alpha$ ) é geralmente expresso em décibéis por metro (dB/m) ou em nepers por metro (Np/m), descrito pela seguinte equação:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu_0 \epsilon}{2} \left( \left( 1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2} \right)^{1/2} - 1 \right)},$$

sendo este coeficiente função da condutividade eléctrica ( $\sigma$ ), da permitividade ( $\epsilon$ ) e da permeabilidade magnética ( $\mu$ ) do material sob investigação através do qual a energia de Radar se

está a propagar. Esta é válida para materiais não magnéticos em que  $\mu_1=1$ , em que  $\mu_0$  corresponde à permeabilidade magnética do espaço livre e  $\omega$  à frequência angular ( $\omega = 2\pi f$ ). Verifica-se, efectivamente, que a atenuação ( $\alpha$ ) também depende da frequência do sinal, verificando-se que uma maior atenuação do sinal será expectável quando se utilizam sistemas de Georadar com elevado frequência (Costa, 2009).

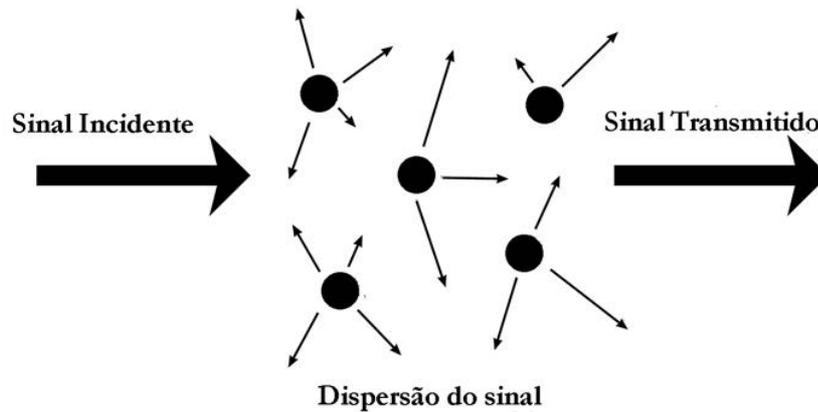


**Figura 2.9** – Valores de atenuação (em dB/m) do sinal de Radar, para um conjunto de materiais comuns, ao longo de uma gama de frequências entre os 200 MHz e os 1200 MHz. As barras no esquema ilustram todo o intervalo de atenuação, já os quadrados representam a média de atenuação das ondas electromagnéticas para os referidos materiais (adaptado de Cassidy, 2009a).

Mais frequentemente, a energia electromagnética pode sofrer atenuação por dispersão geométrica do sinal de radar emitido. Este é transmitido como um feixe de forma cónica com um ângulo de 30° a 45° (figura 2.8). À medida que o sinal se afasta da fonte, espalha-se por uma maior área, provocando uma redução da densidade da energia. Esta redução aumenta a uma taxa de  $1/r^2$ , em que  $r$  corresponde à distância percorrida pelo sinal e ao raio da radiação, assumindo-se um padrão esférico de difusão. Este mecanismo de atenuação aumenta com a profundidade do sinal mas, geralmente, em medições superficiais essa atenuação apresenta valor desprezável (Costa, 2009).

Outro dos factores bastante significativo para a perda de energia electromagnética é a dispersão que, segundo Milson & Eriksen (2011), poderá ser mais importante que a dissipação *óhmica* para frequências superiores a 1000 MHz. A dispersão (figura 2.10) ocorre quando o sinal de Radar atinge um objecto reflector, cuja dimensão é da mesma ordem de grandeza do comprimento de

onda da energia de Radar e a dispersão Rayleigh, proporcional à quarta potência da frequência, ocorre para objectos mais pequenos que o comprimento de onda.



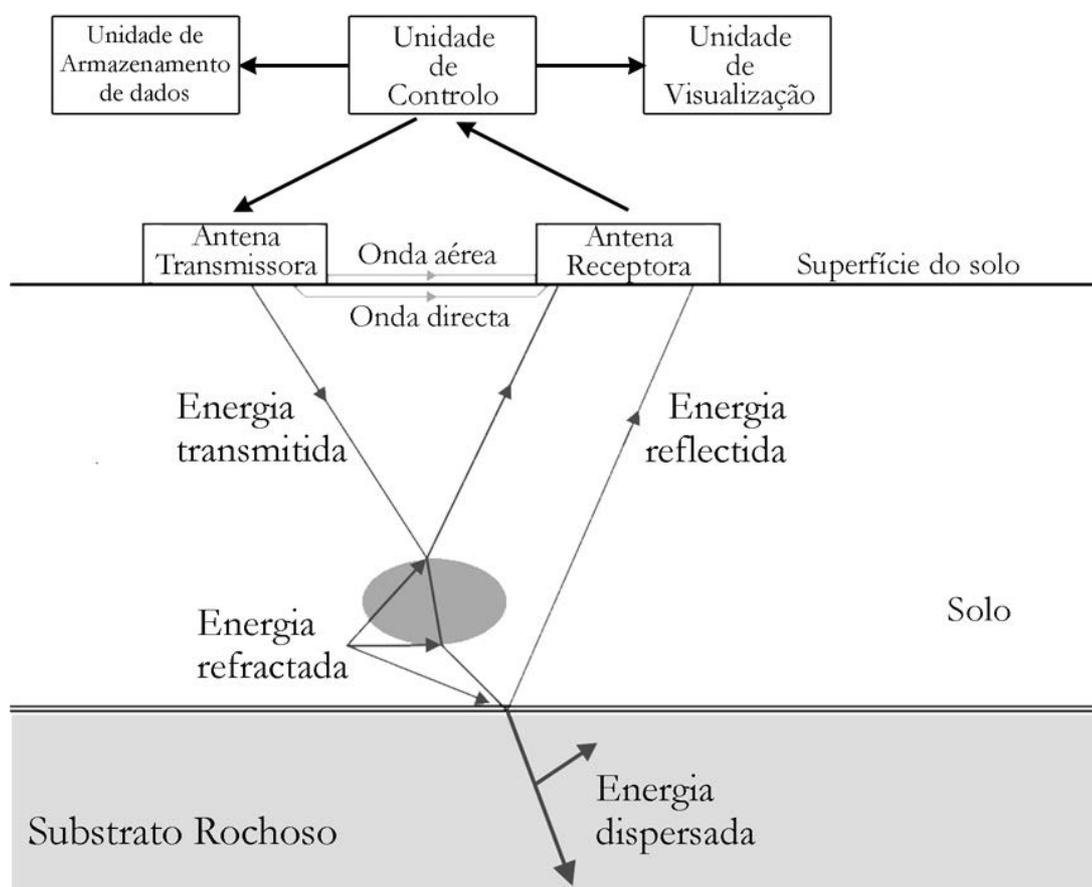
**Figura 2.10** – Exemplo esquemático da dispersão do sinal de Radar, induzida pelas heterogeneidades das propriedades electromagnéticas dos materiais, que provoca atenuação do sinal transmitido (adaptado de Annan, 2009).

Por último, a atenuação e perda de energia poderá também estar relacionada com o equipamento de Georadar e sua eficiência, ocorrendo essencialmente a dois níveis: um relacionado com a eficiência dos componentes electrónicos do sistema (ex: antenas, baterias, unidades de controlo, cabos, etc.) e outro relacionado com a acoplagem da antena ao solo. Relativamente ao primeiro, o bom funcionamento dos seus componentes e a utilização dos mesmos de acordo com as especificações definidas pelo fabricante, é bastante importante para evitar perdas durante a geração e emissão do sinal. Relativamente ao segundo, um incorrecto acoplamento da antena ao solo fará com que parte da energia emitida não seja transmitida ao meio a investigar, ocorrendo perda aérea do sinal.

## 2.3. Equipamentos e software

### 2.3.1. Equipamento

A grande maioria dos sistemas de Georadar utilizados em arqueologia são equipamentos de uso comum, produzidos para serem utilizados em diferentes áreas de investigação e prospecção (geologia, engenharia civil, glaciologia, ciências forenses, arqueologia, etc.), sendo constituídos por um leque de elementos gerais como os ilustrados na figura 2.11.



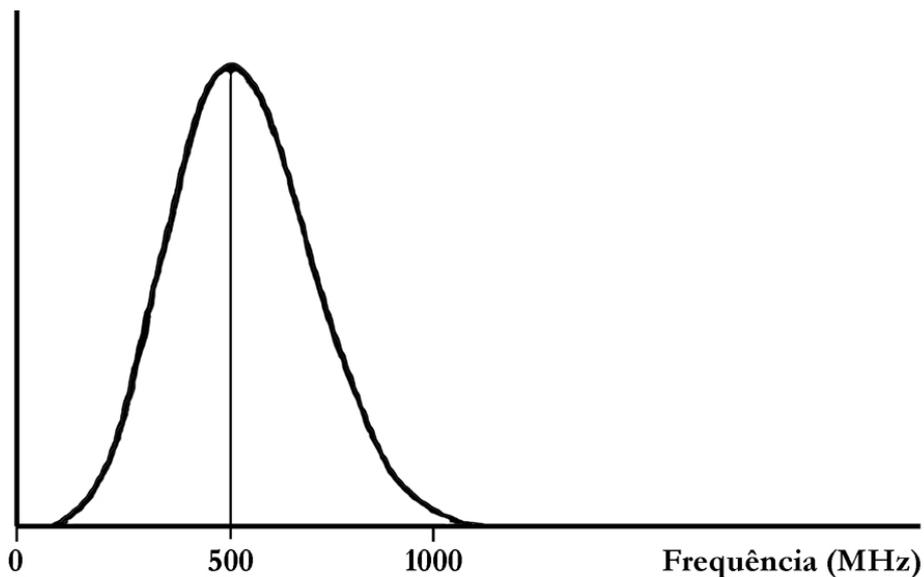
**Figura 2.11** – Descrição esquemática dos componentes e modo de operação de um sistema de Georadar de uso comum (adaptado de Fernandes, 2006 e Costa, 2009).

Basicamente, um sistema de GPR é composto por: uma antena, que contém um emissor e um receptor; uma unidade de controlo electrónico; uma consola de dados; uma unidade de visualização; uma fonte de energia e cabos de ligação entre a antena e as várias unidades que o constituem. Diferentes configurações destes componentes são oferecidas pelos diversos

fabricantes, como se pode observar na tabela 2.4, adequando-se às diferentes áreas de aplicação do Georadar.

### 2.3.1.1. Antenas

As antenas de Georadar são equipamentos electrónicos complexos projectados especificamente para otimizar a interacção com o terreno (podendo estar ou não em contacto com a superfície a investigar). Praticamente todos os sistemas de GPR disponíveis no mercado dispõem de um vasto leque de antenas, geralmente bi-estáticas, de frequência central definida (ex: 200 MHz), cobrindo uma relativamente larga banda de frequências, que poderão ir dos 10 MHz (ou inferior) até aos 6000 MHz (Annan & Cosway, 1994; English Heritage, 2008; Jol, 2009; Lacroix, 2009; Novo, 2009), havendo também no mercado antenas de frequência central variável. Estas antenas são, geralmente, intercambiáveis podendo escolher-se a antena mais adequada à tarefa a realizar.



**Figura 2.12** – Distribuição teórica da frequência da antena de Georadar de frequência central de 500 MHz. A sua distribuição apresenta forma de sino, variando aproximadamente uma oitava à volta da frequência central, entre 250 MHz e 1000 MHz (adaptado de Conyers, 2004).

Estes sistemas utilizam normalmente antenas dipolares que geralmente possuem largura de banda de duas oitavas, isto é, as frequências emitidas por uma antena encontram-se num intervalo limitado entre metade e o dobro da frequência central dessa antena (Conyers, 2004). Por exemplo, uma antena de 500 MHz de frequência central, gera energia de radar com comprimentos de onda que varia entre 250 MHz e 1000 Mhz. A distribuição da frequência,

teórica, de uma antena de 500 MHz, apresenta forma de sino partindo de um ponto correspondente à frequência central, como se pode observar na figura 2.12.

Um dos factores variáveis mais importante para o sucesso de uma prospecção com Georadar é a escolha da antena com a frequência adequada à profundidade necessária e à resolução dos alvos de interesse (Huggenberger *et al.*, 1994; Smith & Jol, 1995; Jol, 2009). Apesar de este parâmetro não possuir uma influência directa na propagação das ondas electromagnéticas, a resolução e a profundidade de penetração são parcialmente controladas pela frequência da energia de radar transmitidas pelas antenas seleccionadas (Conyers & Cameron, 1998; Lacroix, 2009). É um factor importante a ter em consideração, porque a frequência de uma antena dita a dimensão mínima que um objecto, ou estrutura, pode ter para ser detectado, bem como a profundidade máxima que a energia de radar atingirá.

#### **2.3.1.2. Unidade de controlo electrónico**

A unidade de controlo electrónico corresponde, basicamente, ao cérebro dos sistemas de Georadar. É esta unidade a responsável pelo controlo da emissão do sinal da antena e pelo registo do sinal captado pela mesma, controlando o tempo de emissão e de chegada das ondas electromagnéticas.

As unidades modernas transformam o sinal de rádio analógico, emitido e captado pela antena, em sinal digital, permitindo deste modo um pós-processamento mais eficiente. Algumas unidades existentes permitem também a introdução de ganhos no sinal de rádio, antes da digitalização do mesmo, possibilitando o melhoramento da discriminação das reflexões registadas. É também esta unidade de controlo que determina a potência de emissão do sinal, existindo sistemas em que este parâmetro pode ser controlado. Por questões legais relacionadas com a emissão de sinais de rádio e respectivo licenciamento, tendo em vista a não interferência dos equipamentos de Georadar com o espectro de rádio civil e militar, a maioria dos sistemas apresenta uma potência de emissão fixa, limitada a um mínimo definido pela legislação em vigor dos países onde são produzidos, ou para onde são exportados.

#### **2.3.1.3. Consola de dados**

A consola dos dados consiste na parte do equipamento a partir da qual o operador consegue controlar todos os parâmetros de aquisição dos dados. A função da consola é a de introduzir os parâmetros de aquisição dos dados de radar na unidade de controlo electrónico, a de visualizar o

sinal de rádio registado pela antena em tempo real e a de gravar a informação digital de uma forma segura.

A generalidade dos fabricantes de sistemas de GPR possui consolas próprias, constituídas por um ecrã para visualização das operações de controlo e dos sinais digitais de radar em tempo real, permitindo muitas delas a visualização da informação gravada bem como a concretização de alguns processamentos de dados. Alguns sistemas permitem que se utilize um computador portátil comercial como consola, sendo neste instalado o software que possibilita o controlo das operações e registo dos dados. Muitos sistemas recentes estão também preparados para, a partir da consola, acoplar uma unidade de GPS e, ou um sistema coordenado com uma estação total, permitindo o registo simultâneo dos dados de radar, sua localização precisa e a topografia do local prospectado.

#### **2.3.1.4. Fonte de energia**

Os sistemas de Georadar necessitam de um fornecimento de energia para poderem operar adequadamente durante uma jornada de trabalho. Esta energia é geralmente fornecida por baterias de 12 voltes ou fornecida pelas viaturas onde alguns destes sistemas podem ser instalados. Alguns sistemas operam com baterias tradicionais de chumbo e ácido, o que lhes confere uma grande autonomia, mas são muito pesadas e existe sempre o risco de fuga de ácido. Muitos dos sistemas portáteis actuais utilizam baterias à base de lítio, que permitem uma considerável autonomia associada a um peso muito mais reduzido.

#### **2.3.1.5. Sistemas integrados**

Na última década, vários fabricantes passaram a disponibilizar sistemas integrados de GPR, desenhados para serem operados por uma única pessoa, com todos os componentes montados num carrinho leve, compacto e de fácil manobrabilidade (ver figura 2.13). São sistemas portáteis que podem ser utilizados em locais mais confinados, bem como em espaços grandes, sem cabos e sistemas pesados a necessitarem de ser movidos a cada mudança de perfil ou, quando há necessidade de realizar um perfil mais longo, providenciando desta forma uma aquisição de dados muito mais rápida. Alguns destes sistemas conseguiram diminuir consideravelmente o número de unidades a transportar, integrando a unidade de controlo electrónico com a consola de dados, incorporando internamente as baterias. A maioria destes sistemas possui também integrada no carrinho um odómetro, ligado a uma das rodas, que automaticamente dispara o sinal da antena, a

intervalos regulares definidos pelo operador, permitindo um mais preciso posicionamento dos traços de radar nos perfis.

### 2.3.2. Tipos de equipamento

Existem vários fabricantes de equipamentos de Georadar, adequados à prospecção arqueológica, disponibilizando cada um deles diferentes configurações dos componentes atrás referidos.

A tabela 2.4 apresenta a relação dos principais construtores de sistemas de Georadar, bem como os principais modelos de equipamentos existentes no mercado, no entanto, as unidades mais utilizadas, e provavelmente as mais fiáveis, são as produzidas pela norte americana GSSI (Geophysical Survey Systems Inc., localizada em Salem, New Hampshire), a Canadiana Sensors & Software (localizada em Mississauga, Ontário) e a europeia Malå Geoscience (localizada em Malå, Suécia). Nos últimos anos a Italiana IDS tem-se destacado na produção de equipamentos multicanal especialmente desenhados para a execução de prospecção em grandes áreas, vindo a rivalizar neste sector com as companhias atrás referenciadas.

### 2.3.3. Equipamento utilizado

O sistema de Georadar (figura 2.13) utilizado na concretização dos estudos de prospecção geofísica, realizados no âmbito desta tese de doutoramento, foi o TerraSIRch SIR System-3000, ou simplesmente SIR-3000 (SIR – Subsurface Interface Radar), produzido pela Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI), equipado com duas antenas blindadas da GSSI de 400 MHz e de 200 MHz de frequência central. Todo o sistema é propriedade do Centro de Ciências da Terra da Universidade do Minho.

O SIR-3000 da GSSI (figura 2.14) é um equipamento de Georadar, leve e portátil, de canal único, que pode ser utilizado em diversas aplicações. As suas funções são de unidade de controlo electrónico para a aquisição de dados, gerando, sincronizando e registando os impulsos de radar, podendo também pré-processar alguns dos dados. Possui um ecrã onde é possível definir todos os parâmetros de aquisição e visualizar os dados, durante e após a recolha dos mesmos. A tabela 2.5 apresenta as especificações técnicas disponibilizadas pelo fabricante para este sistema de Georadar.

**Tabela 2.4** – Lista dos principais fabricantes de equipamentos de Georadar e respectivos modelos de equipamentos produzidos (adaptado de English Heritage, 2008. Dados dos fabricantes de 2012).

Fabricante	Modelos	Localização e URL	Tipo
USRadar (anteriormente ERA Technology)	Seeker SPRscan	New Jersey, EUA. www.usradar.com	Sistema simples ou montado num carro, com gama de antenas intercambiáveis de 100, 200, 250, 500, 1000 e 2000 MHz
GSSI	Sir-20 Sir-30 Sir-3000 Terravision	North Salem, New Hampshire, EUA. www.geophysical.com	Sistemas simples e multi-canal com vasta gama de antenas intercambiáveis, desde 16 MHz até 2.6 GHz, adaptadas para uso em carrinho (cart), “borehole” (furo) e “air-launched”. Sistema Multi-canal de 14 antenas de 400 MHz emparelhadas (Terravision).
IDS	Detector-duo RIS-One RIS-Plus RIS Hi Bright RIS MF Hi-Mod Stream EM Stream X	Pisa, Itália. www.idscopy.com	Sistemas simples e multi-canal (8) com vasta gama de antenas intercambiáveis, desde 80 MHz até 2000 MHz, e unidades de multifrequência. O Sistema RIS MF Hi-Mod é composto por 4 antenas de multi-frequência (200-600 MHz). O sistema StreamX e stream EM são sistemas multicanal de 8 a 24 antenas com frequência de 200 MHz (StreamX200) e 600 MHz (StreamX600).
MALÅ Geoscience	ProEx X3M Easy Locator Mira RTA	Malå, Suécia. www.malags.com	Sistemas compacto com uma vasta gama de antenas intercambiáveis, desde 25 MHz até 1,6 GHz, adaptadas para uso em carrinho (cart), “borehole” (furo) e “air-launched”. Sistema Multi-canal (31 canais) de até 31 antenas emparelhadas de 200 MHz e/ou 400 MHz (MIRA sistem).
Sensors & Software	Pulse Ekko PRO NogginPlus	Mississauga, Ontário, Canadá. www.sensoft.ca	Sistemas simples e multi-canal com vasta gama de antenas intercambiáveis, desde 12,5 MHz até 1000 MHz, adaptadas para uso em carrinho (cart) e “borehole” (furo). Sistema Multicanal NogginPlus preparado para várias antenas emparelhadas de 250, 500 e 1000 MHz.
3d-Radar	Geoscope	Trondheim, Noruega. www.3d-radar.com	Sistema digital de frequência escalonada, operando com frequências compreendidas entre os 30 MHz e os 2,0 GHz. Antenas integradas de multi-canal (1 a 63 canais) para aquisição de alta resolução.
Utsi electronics	GroundVue 1 a 5	Cambridge, reino Unido. www.utsielelectronics.c o.uk	Sistemas simples e de multi-canal (4), com vasta gama de antenas intercambiáveis de 10 MHz até 6,0 GHz, adaptadas para uso em carrinho (cart).
Radar Systems Inc	Zond-12e	Riga, Letónia. www.radsys.lv	Sistema de duplo-canal com vasta gama de antenas intercambiáveis de acoplamento ao solo de 100 MHz até 2,0 GHz, e duas antenas “air-launched” de frequência central definida (750 MHz) ou frequência variável (38-75-150 MHz).
RadarTeam	Cobra	Boden, Suécia. www.radarteam.se	Sistema simples e de multi-canal, com gama de antenas intercambiáveis com frequências entre 100 e 900 MHz. Fabricam também antenas de alta média e baixa frequência (60 MHz a 2,0 Ghz) compatíveis com os sistemas da GSSI.



**Figura 2.13** – Equipamento de Georadar utilizado nesta dissertação, produzido pela GSSI: as antenas de 200 MHz e 400 MHz; SIR-3000; *survey wheel* com odômetro; *cart* com odômetro; cabos de ligação.

**Tabela 2.5** – Especificações técnicas do SIR-3000 da GSSI.

Sistema	
Antenas	Compatível com as antenas da GSSI constantes na tabela 2.6.
N.º de Canais	1
Armazenamento da informação	Memória Interna de 1GB Porta <i>Compact Flash</i> – admite cartões <i>compact flash</i> – ou compatíveis – até 2 GB de capacidade.
Ecrã	TFT de 8.4”, com resolução de 800x600 e 64000 cores. Modo de apresentação – <i>Linescan</i> e <i>O-scope</i> .
Processador	32-bit Intel StrongArm Risc processor, de 206 MHz.
Aquisição de Dados	
Formato dos ficheiros	RADAN (.dzt)
Taxa de amostragem (exemplos) (scan/sec.) e (sample/scan)	220 traços/s a 256 amostras/traço 120 traços/s a 512 amostras/traço
Tamanho da amostra ( <i>sample size</i> )	8-bit ou 16-bit (definido pelo utilizador)
Intervalo entre traços ( <i>scan interval</i> )	Definido pelo utilizador
Número amostras por traço	256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192 (definido pelo utilizador)
Modo de aquisição de dados	Contínuo, distância, manual
Janela de Tempo ( <i>Time range</i> )	0 – 8000 nanossegundos (definido pelo utilizador)
Ganhos	Manuais ou automáticos, 1-5 pontos (-20 a +80 dB)
Filtros	Verticais: <i>Low-Pass</i> e <i>High-Pass</i> IIR e FIR Horizontais: <i>Staking</i> , remoção de <i>Background</i>
Mecânica	
Dimensões (cm)	31,5 x 22 x 10,5 cm
Peso	4,1 Kg (com bateria)
Condições de funcionamento	
Temperatura	-10 °C até 40 °C
Frequência do Pulso emitido	100 kHz
Bateria	Lítio, 10,8 V DC, interna, amovível.



**Figura 2.14** – Sir-3000, da GSSI. Este equipamento serve as funções de unidade de controlo electrónico, unidade de armazenamento de dados e unidade de visualização.



**Figura 2.15** – Antenas de 200 MHz (esquerda) e 400 MHz (direita) da GSSI.

Este sistema, preparado para trabalhar com um diversificado leque de antenas da GSSI (tabela 2.6), pode ser utilizado em quase todo o tipo de trabalhos de prospecção sub-superficial, desde a detecção de condutas e de vazios, inspeção de estruturas de betão e alvenaria, prospecção geológica e geotécnica, estudos ambientais, detecção de minas anti-pessoal e anti-tanque, até aos trabalhos de prospecção arqueológica.

Nos trabalhos de campo realizados utilizaram-se duas antenas blindadas da GSSI, com frequência central de 400 MHz, modelo 5103A, e de 200 MHz, modelo 5106A (figura 2.15) cujas especificações são apresentadas na tabela 2.7. A antena mais utilizada foi a de 400 MHz pois esta possibilita um bom compromisso entre a resolução do sinal e a profundidade de penetração.

**Tabela 2.6** – Antenas produzidas pela GSSI compatíveis com o sistema SIR-300 e respectivas profundidades de penetração e aplicações técnicas (dados do fabricante de 2012).

Frequência	Profundidade de Penetração *	Aplicações
2600 MHz	0,4 m	Inspeção de estruturas de betão e alvenaria
2000 MHz Palm	0,4 m	Inspeção de estruturas de betão e alvenaria
1600 MHz	0,5 m	Inspeção de estruturas de betão e alvenaria
1000 MHz	0,6 m	Inspeção de estruturas de betão e alvenaria
900 MHz	0 - 1 m	Arqueologia; inspeção de betão; detecção de vazios
400 MHz	0 - 4 m	Arqueologia; ambiente; detecção de serviços (tubos água, gás, etc.)
270 MHz	0 - 6 m	Arqueologia; geotecnia; ambiente; detecção de serviços
200 MHz	0 - 9 m	Arqueologia; geotecnia; ambiente; detecção de serviços
100 MHz	2 - 15 m	Arqueologia; geotecnia; ambiente; minas
16-80 MHz	0 - 50 m	Geotecnia; ambiente
<b>Antenas Aéreas</b>		
2,0 GHz	0 - 0,75 m	Avaliação de estradas e medição espessura de pavimentos rodoviários
1,0 GHz	0 - 0,9 m	Avaliação de estradas e pontes

\* - profundidade de penetração em condições normais.

**Tabela 2.7** – Especificações gerais das antenas de 400 MHz e 200 MHz da GSSI.

<b>Antena 400 MHz</b>	
Fabricante	GSSI
Modelo	5103A
Profundidade máxima	4 m (para $\epsilon_r = 5$ )
Dimensões	30 x 30 x 17 cm
Peso	5 kg
<b>Antena 200 MHz</b>	
Fabricante	GSSI
Modelo	5106A
Profundidade máxima	8 m (para $\epsilon_r = 5$ )
Dimensões	60 x 60 x 30 cm
Peso	20,5 kg



**Figura 2.16** – *Survey Cart* modelo 623, da GSSI, equipado com o SIR-3000 e antena de 400 MHz.

A aquisição dos dados de Georadar no campo foi facilitada por meio do uso de um carrinho produzido pela GSSI (*Survey cart* modelo 623) (figura 2.16), estando este preparado para integrar a unidade de controlo SIR-3000 e a antena de 400 MHz foi também possível adaptar o seu uso à antena de 200MHz. Este carro possui acoplado a uma das rodas traseiras um odómetro electrónico. Este odómetro pode ser ligado ao SIR-3000 permitindo registar a distância percorrida pelo carro durante a aquisição dos dados, permitindo a recolha destes no modo de distância (*survey wheel*), no qual é possível definir a densidade de aquisição de dados por unidade de distância percorrida no terreno, o que possibilita deste modo a localização relativamente precisa de todas as reflexões registadas pelo equipamento.

### 2.3.2. Software utilizado

O processamento dos dados, registados durante uma campanha de prospecção com Georadar, é o processo mais importante – depois de uma correcta aquisição do mesmos – para se conseguir concretizar uma adequada interpretação das reflexões registadas. Para este efeito é necessário utilizar software específico para processamento e visualização dos dados de radar, existindo um leque bastante alargado de programas – livres e comerciais – à disposição dos utilizadores deste tipo de equipamentos.

A generalidade dos programas informáticos disponíveis são desenvolvidos pelas próprias empresas que produzem sistemas de Georadar, existindo alguns programas produzidos por universidades, empresas e grupos de programadores de software livre.

A maioria dos programas são comerciais, variando o seu custo de aquisição entre os 1000 € e os 10000 € (preços de 2012). Existe, no entanto, um pequeno grupo de programas de distribuição livre, alguns dos quais do tipo *open-source*, podendo ser alterados pelos utilizadores de forma a se poderem adequar às suas necessidades. Estes programas livres possuem, no entanto, bastantes limitações em termos de capacidade de processamento e visualização dos dados.

No âmbito do presente trabalho de investigação foram utilizados vários programas para processar e visualizar os dados de Georadar adquiridos nas várias estações arqueológicas prospectadas. Os programas em são: GPR-process; GPR-Slice; ReflexW e Reflex 2Dquick.

#### **2.3.2.1. GPR-process**

Trata-se de um pequeno programa *freeware*, desenvolvido por Lawrence Conyers (*Anthropology Department*, University of Denver) e Jeffrey Lucius (U.S.G.S. – Denver), que processa e integra as reflexões de perfis de radar em grelhas e, a partir desta, interpola os valores das amplitudes das referidas reflexões gerando mapas de amplitudes (*time slices*) que são exportados num ficheiro de texto (.txt), o qual poderá ser posteriormente importado por um programa de criação de mapas, onde os referidos mapas de amplitudes poderão ser criados e processados. Este programa é relativamente fácil de utilizar e a informação por ele criada permite facilmente mapear e interpretar as reflexões de estruturas arqueológicas. No entanto, não permite realizar nenhum tipo de visualização (necessita sempre, para o efeito, de programas específicos auxiliares) nem permite processar e filtrar os dados brutos de radar, sendo necessária a utilização de programas específicos como o ReflexW para o fazer.

#### **2.3.2.2. Reflex**

O conjunto de programas Reflex (ReflexW e Reflex2Dquick), desenvolvidos pelo Dr. Karl-Josef Sandmeier, são destinados ao processamento e visualização de dados de Georadar e de prospecção Sísmica. São bastante utilizados no meio académico, mas também em muitas empresas, devido à grande capacidade de processamento e tratamento dos dados que possuem, quer pela capacidade de apresentação quer pela visualização da informação gerada. O seu relativamente baixo custo de aquisição ( $\approx$  1500 €) e a compatibilidade com praticamente todo o

tipo de formatos de ficheiros de radar existentes, fazem destes programas contribuem também para a sua popularidade.

O Reflex 2DQuick é o mais simples dos dois programas, permitindo uma rápida importação, processamento e visualização dos perfis de radar. Permite realizar um conjunto de processamento de dados, embora limitado na possibilidade de definição de alguns parâmetros, e possibilitando também a determinação, com relativa precisão, da velocidade das ondas de radar no solo. Dispõem de um alargado conjunto de opções de visualização e exportação dos dados pós-processados. Resumindo, trata-se de um pequeno software bastante útil para uma primeira visualização dos dados de radar e, caso não seja necessário proceder a um processamento mais exaustivo, uma boa opção para o tratamento e visualização dos perfis de Georadar.

O ReflexW é um programa bastante potente, desenhado para processar dados de Georadar e Sísmica, que está estruturado num sistema modular. Possui 3 módulos integrados, dos quais um de processamento e visualização 2D, outro de processamento 3D e um terceiro módulo de simulação. O módulo 2D consegue operar com grande quantidade de ficheiros em simultâneo e possui um vasto leque de processamentos (1D e 2D) e filtros, cujas variáveis são possíveis de controlar, podendo definir-se uma sequência de processamento que pode posteriormente ser aplicada, de forma automática, a toda uma sequência de ficheiros. Tal como no 2DQuick, este programa tem um conjunto alargado de visualizações dos dados. O módulo 3D, está preparado para, a partir dos perfis processados no módulo 2D, gerar um cubo de dados interpolando os valores das amplitudes, criando modelos de visualização 3D e mapas de amplitudes.

### **2.3.2.3. GPR-Slice**

Programado por Dean Goodman (Geophysical Archaeometry Laboratory – Califórnia, USA), este software foi inicialmente escrito para a prospecção arqueológica com Georadar, sendo um dos melhores programas existentes no mercado para este fim. Actualmente, dada a sua enorme versatilidade, é utilizado numa vasta gama de aplicações que vão muito além da arqueologia o que em parte se deve ao dialogo constante existente entre o programador e os utilizadores.

O GPR-Slice é o programa mais adequado para a visualização e processamento 3D, bem como para a execução de mapas de amplitudes. Permite, construir grelhas de dados a partir dos perfis adquiridos no terreno, criar mapas de amplitudes e volumes 3D, processar e filtrar toda a informação importada e/ou gerada e fornece diversos modos de visualização, que possibilitam uma melhor interpretação da informação arqueológica disponibilizada pelas reflexões de radar.

## 2.4. Metodologias de prospecção arqueológica com Georadar

A detecção e identificação de estruturas arqueológicas soterradas é o principal objectivo da generalidade dos trabalhos de prospecção arqueológica efectuada com Georadar, estando o sucesso desses estudos dependente da utilização de uma adequada metodologia de aquisição de dados. Da escolha metodológica dependerá, portanto, a possibilidade de detecção das estruturas arqueológicas, mas também a aquisição de informações relativas à estrutura e geometria dos vestígios arqueológicos, permitindo o seu mapeamento e interpretação e contribuindo para o planeamento das escavações e/ou para definição de planos de ordenamento do território, entre outros. Uma correcta aquisição de dados, posterior identificação de estruturas e respectivo mapeamento poderá possibilitar, segundo Conyers (2010), a abertura de novos paradigmas na investigação com Georadar, nomeadamente a possibilidade de realização de interpretações antropológicas/arqueológicas sem a necessidade de recorrer a uma intervenção arqueológica clássica.

### 2.4.1. Estudo prévio dos sítios arqueológicos a prospectar

Para se poder definir correctamente uma metodologia de prospecção arqueológica com Georadar é fundamental proceder primeiro à realização de um estudo prévio do sítio arqueológico a investigar. A informação obtida será fundamental para a definição da estratégia de prospecção mais adequada.

O primeiro passo deste estudo consiste na obtenção de toda a informação disponível sobre o historial da estação (tipo de estruturas espectáveis, natureza das estruturas, cronologias, diacronias possíveis, etc.) pois, a título de exemplo, a abordagem prospectiva num povoado ou necrópole da Idade do Bronze será diferente da abordagem a ter num povoado fortificado da Idade do Ferro. A inexistência de informações sobre a área a prospectar terá também influência no método a adoptar.

O segundo passo consistirá, sempre que possível, num reconhecimento prévio do terreno. Neste reconhecimento dever-se-á observar as características gerais do sítio arqueológico, como por exemplo, a sua extensão, a geologia do local, o tipo e as condições do solo, a morfologia do terreno, a presença de obstáculos (pedras, árvores, buracos, etc.), o tipo de vegetação presente e proximidade a emissores de sinais de rádio (antenas de operadoras móveis, retransmissores de rádio, bases militares, aeroportos, etc.).

A importância das dimensões do sítio arqueológico prende-se com a necessidade de prever o tempo necessário para a aquisição dos dados. As características geológicas e pedológicas do local poderão condicionar a escolha da frequência da antena a utilizar, devendo essas características ser também equacionadas na fase de processamento e interpretação dos dados. A morfologia do terreno poderá dificultar, quer a aquisição quer a interpretação dos dados, condicionando a forma de aquisição dos mesmos. A presença de obstáculos terá de ser tida em consideração quando da definição e implementação das grelhas de prospecção, podendo em certas situações inviabilizar a própria campanha de prospecção. O tipo/presença de vegetação poderá ser importante, dada a necessidade de se ter um bom acoplamento entre a antena e o solo. A situação ideal será a existência de vegetação herbácea, caso esta esteja demasiado crescida, ou exista um coberto vegetal arbustivo, esta deverá ser cortada para se poder efectuar a prospecção. Finalmente, é de grande importância conhecer-se a existência de fontes emisoras de sinais de rádio nas proximidades, pois estas poderão interferir com as antenas de radar, dificultando ou mesmo impossibilitando uma correcta aquisição de dados.

#### 2.4.2. Estratégias de aquisição de dados de radar

Os procedimentos padrão de prospecção mais utilizados baseiam-se nas designadas metodologias pseudo 3D, caracterizadas pela aquisição de perfis de radar, paralelos entre si, sobre uma grelha pré definida, com espaçamento entre os 0,25 m e 1 m (0,5 m é o espaçamento mais comum – Novo, 2009), a utilização de antenas com frequências entre 200-500 MHz e o processamento dos dados com interpolações para preencher os vazios de informação nos espaços entre os perfis. Tais metodologias, aliadas à subsequente aplicação de técnicas de processamento e visualização 3D, são na actualidade as mais comumente utilizadas em prospecção arqueológica com GPR (Leckebusch, 2003; Goodman *et al.*, 2006). No entanto, dependendo das condições físicas (topografia, geologia, etc.) do sítio arqueológico a prospectar, do conhecimento prévio que se possui da estação ou das limitações do equipamento que se possui, outras abordagens metodológicas poderão ser equacionadas.

Existem três metodologias principais de aquisição de dados de Georadar, que serão apresentadas de seguida: prospecção preliminar de reconhecimento; prospecção com perfis individuais e prospecção em área. Estas metodologias encontram-se bem descritas nos trabalhos de Conyers (2004), Daniels (2004), English Heritage (2008), Goodman *et al.* (2009) e Novo (2009), entre outros.

#### **2.4.2.1. Prospecção preliminar de reconhecimento**

O método mais simples e expedito de prospecção com Georadar consiste na realização de varrimentos sobre uma dada área que se pretenda estudar, procedendo-se à interpretação imediata dos dados. Este método é possível dada a capacidade que os sistemas de Georadar actuais possuem de visualização, em tempo real, das reflexões das ondas de radar, apresentadas sob a forma de radargrama no monitor da unidade de controlo do equipamento.

Esta abordagem é comumente aplicada para detectar a posição correcta de estruturas arqueológicas conhecidas ou que se suspeitem existir, durante intervenções arqueológicas de emergência. É também usual a sua utilização para confirmar a existência de estruturas evidenciadas por outros métodos de prospecção geofísica ou para verificar a continuidade lateral de uma estrutura exposta, por uma sondagem arqueológica tradicional.

Este método é também aplicado para se obter um conhecimento do subsolo de uma estação, antes da realização de uma prospecção em área, permitindo verificar a exequibilidade de utilização do radar naquele tipo de terreno, a frequência da antena mais adequada ao local e as definições de aquisição a utilizar.

Como referido, este método é bastante expedito, mas apenas poderá fornecer algumas informações sobre a estação, nomeadamente de estruturas que produzam reflexões facilmente identificáveis nos radargramas, sem necessidade de realizar o processamento dos dados. Em muitas situações as estruturas presentes não fornecem reflexões óbvias, podendo ser necessário proceder a um complexo processamento dos dados para se poder visualizar e interpretar a informação presente nos radargramas. Nestes casos outras metodologias de aquisição deverão ser implementadas.

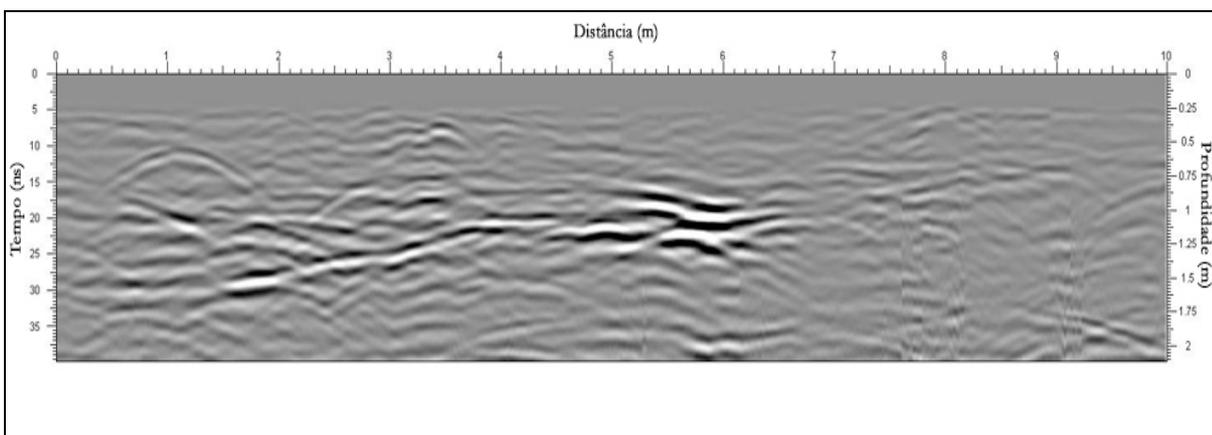
#### **2.4.2.2. Prospecção com perfis individuais**

A prospecção arqueologia com Georadar poderá também ser efectuada com a execução de perfis individuais. Esta metodologia é usualmente utilizada em diversas situações, nomeadamente: quando se pretende certificar a presença de determinadas estruturas arqueológicas identificadas por outras técnicas geofísicas; quando se pretende definir a estratigrafia de uma estação; para determinar a profundidade de uma determinada estrutura conhecida; ou ainda quando na área a prospectar não é possível, devido à morfologia do terreno ou a obstáculos presentes, executar uma prospecção em área com uma sequência de perfis paralelos (figuras 2.17 e 2.18).

Basicamente este método consiste na aquisição de um perfil linear de radar, entre dois pontos previamente definidos, e segundo uma direcção que intersecte perpendicularmente (sempre que possível) as estruturas arqueológicas. Caso seja exequível é sempre aconselhável a realização de vários perfis com direcções distintas.



**Figura 2.17** – Localização de perfis individuais efectuados no Castro de Crastoeiro (Mondim de Basto). Optou-se, neste local, pela utilização desta metodologia devido à existência de múltiplos obstáculos no terreno.

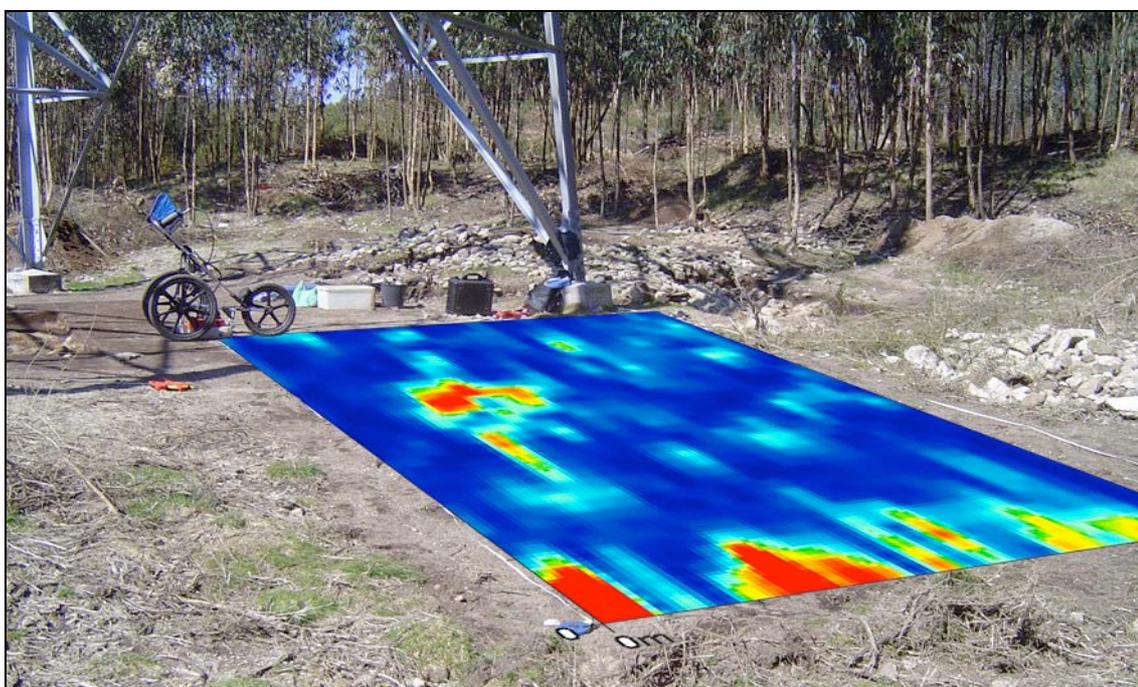


**Figura 2.18** – Exemplo de um perfil individual, efectuado no Povoado do Crastoeiro, onde é possível observar diversas reflexões, algumas das quais com potencial interesse arqueológico

### 2.4.2.3. Prospecção em área

A prospecção em área é a metodologia de prospecção com Georadar mais utilizada em arqueologia, permitindo obter informação arqueológica detalhada de toda a área prospectada. Basicamente este método consiste na aquisição de perfis de radar, segundo uma grelha pré definida, com um espaçamento regular numa ou em mais direcções.

Dentro da prospecção em área existem duas estratégias principais de aquisição de dados, designadamente o método de prospecção em grelhas pseudo-3D (*pseudo-3D grids*) e o método de prospecção em grelhas ultra-densas ou 3D real (*ultra-dense grids* ou *true-3D*).



**Figura 2.19** – Exemplo de um mapa de amplitudes gerado a partir de uma grelha pseudo-3D, ajustada ao terreno prospectado (estação arqueológica de Vale de Chãos – Pedralva, Braga). O espaçamento definido para esta prospecção realizada com antena de 400 MHz foi de 20 cm entre perfis, ligeiramente superior ao estipulado pela condição de Niquist.

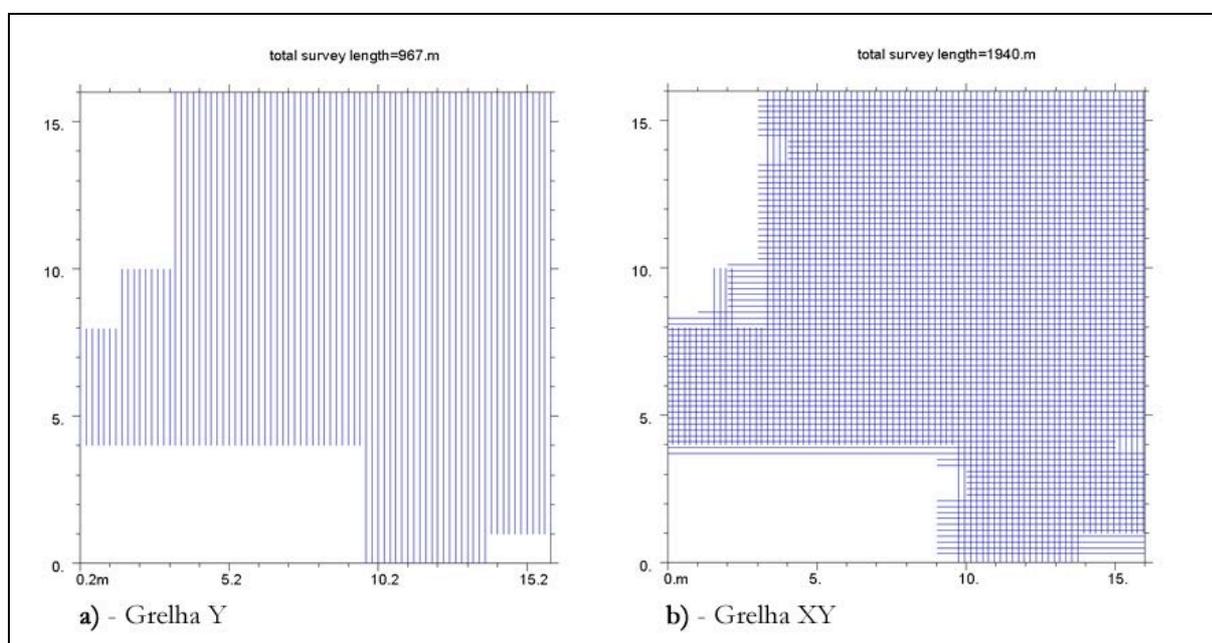
### Grelhas pseudo-3D

A estratégia de aquisição de dados em questão consiste, basicamente, na definição de uma grelha de prospecção na área a estudar (ver figura 2.19), com uma geometria adaptada à morfologia do terreno e seus obstáculos, sobre a qual serão adquiridos perfis de radar com um determinado espaçamento e direcção. O termo pseudo-3D advém de nesta estratégia prospectiva o espaçamento entre perfis ser superior ao estipulado pela condição de Niquist (Novo, 2009), levando a que existam áreas entre os perfis que não são cobertas pela onda de radar, sendo

necessário recorrer à interpolação dos dados para suprir a ausência de informação dessas zonas. De seguida discutir-se-á as duas abordagens comumente utilizadas quando se aplica esta estratégia.

### Perfis paralelos numa direcção

Como referido anteriormente, o método de prospecção padrão em arqueologia é baseado nas metodologias pseudo-3D, que se caracterizam pela aquisição, numa dada direcção, de perfis paralelos equidistantes entre si (figura 2.20 a). Esta metodologia, descrita pela primeira vez por Doolittle & Miller (1991), permite obter uma visão em planta (2D – mapas de amplitudes – ver figura 2.19) ou em volume (3D) das estruturas arqueológicas enterradas, após adequado processamento. Este tipo de estratégia é bastante útil para detectar estruturas lineares com alguma dimensão (valados, muralhas, fundações de edifícios, etc.), e é frequentemente utilizada como primeira abordagem para a obtenção de imagens pseudo-3D das estações arqueológicas tendo em vista a escolha de sítios mais promissores para a realização de uma prospecção mais pormenorizada. Poderá também a utilização desta estratégia fornecer boas imagens quando se prospectam áreas relativamente pequenas e se pretende detectar alvos relativamente grandes.



**Figura 2.20** – Exemplo de duas grelhas de prospecção. a) A imagem corresponde a uma grelha com perfis paralelos numa direcção (Y). b) A imagem apresenta uma grelha com perfis em duas direcções (XY).

Esta metodologia possui, no entanto, algumas desvantagens, que advêm do espaçamento relativamente grande existente entre os perfis (usualmente 0,5 m), o que pode acarretar uma considerável perda de informação, bem como da realização da prospecção em apenas uma direcção, o que poderá levar à não detecção, ou incorrecta interpretação, de estruturas lineares paralelas à direcção dos perfis.

### **Perfis paralelos em duas direcções (grelhas X-Y)**

Como referido no ponto anterior, a aquisição de dados de radar, com espaçamento grande entre perfis, e apenas com uma direcção de aquisição, poderá causar a não identificação, e até uma incorrecta interpretação, de estruturas lineares paralelas à direcção de aquisição. Nessas situações, considerando que a orientação e tipologia das estruturas arqueológicas são normalmente desconhecidas, torna-se também necessário a aquisição (figura 2.20) de perfis perpendiculares (direcção X) à direcção inicial (direcção Y), tal como definido por Aitken & Stewart (2006) e Lualdi *et al.* (2003 e 2006).

A execução dos perfis em duas direcções normais entre si possibilitará uma maior probabilidade de detecção e mapeamento das estruturas arqueológicas, viabilizando a utilização de espaçamentos ligeiramente maiores entre perfis (ex. 0,5 m). No entanto, é necessária uma precisa localização e implementação dos perfis no terreno, de modo a garantir uma correcta justaposição entre a grelha X e a Y.

Este método possui algumas desvantagens: a justaposição entre as duas grelhas, se incorrecta, irá produzir erros grosseiros; é mais demorada a fase de estruturação da grelha no campo, bem como a introdução da posição precisa de todos os perfis no software de processamento, e aumenta bastante o tempo de aquisição dos dados em campo.

Considerando esta metodologia e o tempo necessário para a sua execução, quando o tipo e orientação das estruturas arqueológicas sejam desconhecidas, segundo Novo (2009) poder-se-á, em alternativa, aplicar a aquisição de dados na mesma direcção, mas com uma maior densidade de perfis (espaçamento entre perfis  $\leq 20$  cm).

### **Grelhas ultra-densas**

A utilização de grelhas ultra densas de aquisição de dados de Georadar, também designadas de “verdadeiro 3D” ou “registo de alta resolução”, baseia-se no teorema de amostragem espacial de Nyquist, e tem vindo a ser utilizado com sucesso na obtenção de imagens 3D, não interpoladas,

de geometrias subsuperficiais homogéneas tais como: estratigrafia de dunas, raízes de árvores, fracturas de rochas e estruturas arqueológicas (Grasmueck *et al.*, 2004a, 2004b, 2005; Novo *et al.*, 2008a, 2008b; Novo, 2009). Estes autores demonstraram que é possível obter imagens 3D de alta resolução se o espaçamento entre perfis for reduzido a um quarto do comprimento de onda, no material atravessado.

Esta metodologia visa colmatar o problema que surge quando o espaçamento entre perfis é muito grande, verificando-se nessas situações a existência de áreas não cobertas pelas ondas de radar, sendo essa situação designada pelo termo anglo-saxónico *aliasing*.

O *aliasing* ocorre quando o ritmo de amostragem do sinal não é suficientemente elevado, perdendo-se informação entre amostras, sendo necessário interpolar os valores intermédios. Um efeito semelhante pode ocorrer quando o comprimento de onda aparente é inferior a duas vezes a distância entre duas medições de sinal consecutivas. De acordo com a condição de Nyquist ou o teorema de amostragem de Shannon, podemos afirmar que uma amostragem adequada (*unaliased*) de cada coordenada do comprimento de onda ocorre se a seguinte equação for verdadeira.

$$\Delta X_m \leq \frac{V_{\min}}{4f_{\max}}$$

sendo:  $X_m$  – coordenada do ponto médio;  $V_{\min}$  – velocidade mínima da fase;  $f_{\max}$  – frequência máxima.

Como o comprimento de onda é definido pela expressão

$$\lambda = \frac{v}{f},$$

a amostragem segundo a condição Nyquist é de um quarto do comprimento de onda no material atravessado

$$\Delta X_m \leq \frac{\lambda}{4}.$$

Se o comprimento de onda contínuo for amostrado de acordo com a última equação então, o efeito de *aliasing*, temporal ou espacial, não ocorrerá. Por outro lado, se o espaçamento de aquisição for maior que o intervalo de amostragem Nyquist, os dados não conseguirão definir correctamente as caudas de difracção e os reflectores que apresentem uma inclinação elevada (normalmente  $> 45^\circ$ ). O resultado da migração dos dados, durante a fase de processamento, dependerá da qualidade da amostragem, assim sendo, teoricamente e segundo Novo (2009), a

melhor resolução possível só poderá ser alcançada com uma cuidada e precisa aquisição dos dados de radar a serem migrados. Vermeer (2002) conclui, relativamente a esta questão, que apenas a informação amostrada adequadamente (sem *aliasing*), poderá conduzir a uma correcta resposta no processamento de migração.

Resumidamente esta metodologia baseia-se na aquisição de perfis de radar, suficientemente próximos, de modo a amostrar todo o espectro disponível, sem existir perdas de informação. No entanto, esta metodologia é bastante onerosa em termos do tempo que é necessário gastar para adquirir tamanha quantidade de perfis. Um compromisso terá que ser muitas vezes assumido entre a qualidade final do trabalho, os resultados obtidos e o tempo de aquisição (dependente, obviamente da densidade de aquisição). Para compensar os efeitos da sub-amostragem, foram desenvolvidas algumas poderosas técnicas de interpolação de dados. Estas técnicas, tais como o *kriging* e o Inverso da Distância, conseguem interpolar os dados nos espaços em branco para “além de Nyquist” (Novo, 2009), compensando o efeito de sub-amostragem. Deverá obviamente ser considerado que, quanto menor o espaçamento, menor os erros associados à interpolação dos dados.

**Tabela 2.8** – Espaçamentos mais restritivos para grelhas ultra-densas, determinados de acordo com a condição de Nyquist, para velocidades das ondas de 6 a 12 cm/ns (adaptado de Novo, 2009).

Frequência	200 MHz	400 MHz
Espaçamento entre perfis ( $\lambda/4$ )	7-18 cm	4-8 cm

A implementação de uma aquisição ultra-densa de perfis de radar é de inquestionável importância, sendo as imagens geradas a partir de tais dados de elevada qualidade. No entanto, a sua implementação em áreas acima de 1000 m<sup>2</sup>, ou mesmo áreas mais pequenas, quando se utilizam sistemas de GPR tradicionais (mono antena) tal como o SIR-3000 da GSSI, é bastante demorada, acrescentando um aumento de custos e dificuldade à prospecção. A solução para cobrir vastas áreas com esta metodologia tem vindo recentemente a vivenciar um forte avanço tecnológico (Trinks *et al.*, 2008), nos últimos anos tem vindo a ser utilizados sistemas multicanal avançados, aos quais é associado um atrelado de antenas (*multi antennae arrays*). Basicamente, estes atrelados consistem numa caixa com múltiplas antenas (alguns sistemas podem ter até 30) de 400 MHz, 500 ou 600 MHz, espaçadas de 8 a 12 cm, que permitem cobrir até 2000 m<sup>2</sup> de terreno em apenas 1 hora (com um sistema tradicional essa área demoraria cerca de 2 a 4 dias a ser prospectada), mantendo o espaçamento entre perfis constante. Estes sistemas multi-antena estão a tornar-se no tipo de antena padrão utilizado em prospecção arqueológica de grandes áreas,

tendo apenas como desvantagem o seu enorme preço (ex: o sistema Mira da Mala, o primeiro sistema comercial deste tipo de antenas, custa  $\approx 150.000\text{€}$  - preço 2012, uma antena simples da mesma empresa custa  $\approx 7000\text{€}$ ).

#### 2.4.2.4. Densidade de aquisição de perfis de Radar

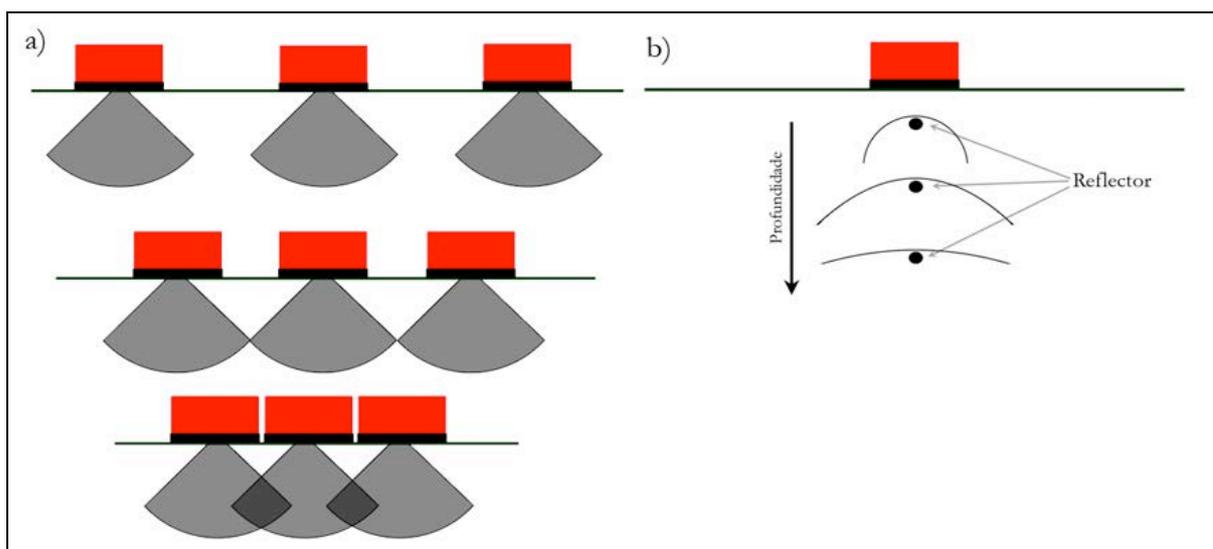
Quão densa deverá ser uma prospecção arqueológica com Georadar? Esta é a questão que deverá ser postulada antes do início de qualquer trabalho prospectivo, emergindo ela da necessidade de se manter o esforço de aquisição de dados em níveis razoáveis, particularmente quando se utiliza um sistema convencional de GPR. Vários autores discutiram esta problemática, nomeadamente Conyers (2004), Goodman *et al.*, (2009) e Novo (2009) e, obviamente, uma das respostas que surge é *o mais denso possível*, i.e., com vista a se conseguir obter a melhor imagem possível das estruturas do subsolo o espaçamento entre perfis deverá ser o mais estreito possível.

Mas o que é o mais denso possível? Em teoria, o mais denso possível corresponde a uma distância entre perfis definida pelo teorema de Nyquist (como se pode observar na tabela 2.8), no entanto, para responder a esta pertinente e recorrente questão, alguns autores como Lualdi *et al.* (2003) propuseram que se suaviza-se a condição de Nyquist tomando em consideração a profundidade espectável do alvo e o tamanho real da pegada ou área de incidência da radiação emitida pela antena a uma determinada profundidade.

Na prática, o critério de Nyquist poderá ser relaxado dependendo do propósito da prospecção (Novo, 2009). Quando as estruturas arqueológicas se encontram a uma maior profundidade poder-se-á perfeitamente aplicar um maior espaçamento entre perfis, sem compromisso da qualidade final da imagem (ver figura 2.21a), no entanto a detecção de estruturas mais superficiais e mais finas, ou pequenas, poderão necessitar de um espaçamento menor entre perfis (Jol, 2009), assim, deste modo um adequado mapeamento 3D de estruturas arqueológicas desconhecidas requererá uma aquisição ultra-densa.

Por outro lado, os hiperbolóides ou hipérbolos de reflexão são mais achatados (ver figura 2.21b) quando os objectos reflectores se encontram a profundidades maiores, devendo-se este fenómeno à abertura progressiva da frente da onda de radar à medida que esta se afasta da antena (Lualdi *et al.*, 2003). Assim sendo, as curvas de difracção obtidas a partir destes reflectores são mais suaves. Consequentemente, o critério de Nyquist poderá também ser relaxado quando a área de interesse arqueológico se localizar a maiores profundidades.

Outro factor a considerar, na definição da densidade de aquisição, é a existência de técnicas informáticas de processamento e interpolação de dados de radar para as áreas sub-amostradas. Estas técnicas (ex: krigging e inverso da distância, etc.), já referidas anteriormente, permitem definir um compromisso entre qualidade da imagem gerada e densidade de aquisição. Conyers (2004) aborda esta problemática e considera que a utilização de uma correcta interpolação dos dados poderá permitir, por exemplo, a utilização de espaçamento entre perfis de apenas 0,5 m, com antena de 400 MHz. No entanto, Novo (2009) considera que o efeito da interpolação anómala de dados é demasiado elevado, com este tipo de espaçamento, para se conseguirem obter imagens satisfatórias, especialmente quando se pretende detectar estruturas subtis. Concomitantemente, a definição da densidade de aquisição deverá ser adaptada a cada caso, sendo necessário considerar o conhecimento que se possui da estação, o tipo de estruturas conhecidas ou espectáveis, a dimensão da área a prospectar, o tempo e os fundos disponíveis para concretizar o trabalho prospectivo.



**Figura 2.21 – a)** Esquema da relação entre áreas amostradas e o espaçamento entre perfis. Objectos soterrados próximos da superfície cuja área seja inferior à da metade do espaçamento entre as antenas necessitam de um menor espaçamento entre perfis para serem correctamente detectados. Um espaçamento menor entre perfis (imagem do fundo) garante um correcto mapeamento 3D de estruturas superficiais e/ou estruturas subtis (imagem adaptada de Goodman *et al.*, 2009). **b)** Hipérbolas de reflectores isolados, localizados a profundidades maiores, são mais suaves e abertas e podem ser detectadas quando os critérios de Nyquist são relaxados (imagem adaptada de Novo, 2009).

### 2.4.3. Posicionamento

Outro aspecto importante a considerar durante a prospecção com Georadar é o posicionamento dos dados. Alguns autores, como Slob *et al.* (2003), sublinham a grande importância de um

posicionamento preciso de todos os dados adquiridos pelo Georadar para se poder realizar uma correcta detecção e caracterização das estruturas enterradas, particularmente quando a prospecção é realizada em área e/ou o objectivo é a visualização 3D.

Basicamente, o posicionamento dos dados de GPR obtêm-se a partir do conhecimento da posição exacta do ponto inicial e final do perfil ou perfis de radar executados. É importantíssimo conhecer-se a posição exacta, no terreno, das reflexões observadas, para se poder cartografar correctamente as estruturas a elas associadas e para um correcto planeamento de uma escavação. No entanto, não são só os primeiros e últimos pontos dos perfis que necessitam de ser correctamente posicionados. Todos os traços de radar necessitam de ser referenciados com precisão, com vista não só à localização exacta das reflexões, mas também tendo por objectivo um correcto ajuste e/ou interpolação dos dados entre os perfis adquiridos. Um posicionamento preciso de perfis permitirá a criação de imagens de grande qualidade, o que facilitará sobremaneira a sua interpretação.

A precisão do posicionamento dos traços de radar é determinada, segundo Ortyl e Balut (2006), por dois importantes factores. O primeiro prende-se com a geometria dos perfis e das grelhas de prospecção, que dependem em grande medida das condições do terreno. O segundo relaciona-se com a precisão na determinação da distância percorrida pela antena, o que depende da forma de disparo do traços de radar durante a aquisição de um perfil. O accionamento do sinal de radar poderá basear-se em medições no modo contínuo (os traços são accionados com base na distância percorrida ou em intervalos de tempo) ou em medições no modo estático (cada traço é accionado manualmente). O modo contínuo é o mais eficiente e, por esse motivo, o mais utilizado em arqueologia, o modo estático é mais lento, pouco utilizado, mas garante um bom acoplamento da antena ao solo (Pipan *et al.*, 1999).

O primeiro passo para o posicionamento consiste na definição das coordenadas (relativas ou absolutas) das grelhas e dos perfis de radar. As coordenadas relativas poderão ser definidas pelo operador, considerando sempre o ponto 0 (zero) o canto inferior esquerdo da grelha, ou utilizando-se o sistema de coordenadas da estação arqueológica em estudo. As coordenadas absolutas corresponderão às coordenadas do sistema de referência global ou ao sistemas de coordenadas nacional convencionado para o país onde se realiza a prospecção.

O segundo passo consiste na escolha da metodologia de posicionamento dos perfis de radar, podendo este ser conseguido através da utilização de diversos equipamentos, nomeadamente de: odómetro (geralmente integrado nos equipamentos de radar); sistema de posicionamento global (GPS); equipamento de topografia (estação total).

### 2.4.3.1. Odómetro

O odómetro (ver figura 2.22), ou roda com odómetro (*survey wheel*), consiste num dispositivo fornecido pela maioria dos fabricantes de equipamentos de Georadar cujo propósito consiste na medição do tamanho dos perfis, quando a aquisição é baseada em intervalos regulares de distância. Os equipamentos disponibilizados pela GSSI utilizam um codificador, mecanicamente ligado a uma roda, que envia à unidade de controlo um número fixo de pulsos eléctricos por revolução da roda, esta por sua vez usa estes pulsos para activar a antena a espaços regulares definidos pelo operador (ex: a cada 2 cm percorridos). Cada odómetro necessita de ser calibrado, antes de se efectuar a prospecção, de modo a que a unidade controlo consiga converter o número de pulsos electrónicos na distância efectivamente percorrida pela roda. Esta calibração torna-se necessária porque poderão ser utilizadas rodas com diâmetros distintos, além disso porque o tipo de terreno poderá influenciar a rotação das mesmas (microtopografia, humidade, vegetação, são alguns factores que condicionam a precisão da medição da distância percorrida pela roda).



**Figura 2.22** – Roda com odómetro (*survey wheel*) associada a antena de 270 MHz da GSSI (o equipamento da imagem é propriedade do professor Lawrence Conyers da Universidade de Denver).

A roda com odómetro é o equipamento mais utilizada de activação do sinal de radar e de posicionamento dos traços. Este facto deve-se a algumas das suas vantagens face a outros equipamentos, tais como o seu baixo preço, a sua fácil utilização e a sua relativamente fiável

precisão. No entanto, existem algumas desvantagens associadas à sua utilização, uma vez que a precisão do posicionamento poderá ser condicionada por factores como os que de seguida se exemplificam: saltos que a roda pode dar, devido a obstáculos no percurso; deslizamento da roda sobre uma superfície escorregadia; aumento do diâmetro da roda por acumulação de lama, etc. Outro problema associado ao posicionamento com odómetro advém de se poderem observar desvios horizontais aleatórios (da posição correcta dos traços) devidos ao atraso existente entre a emissão do pulso electrónico, gerado pelo codificador, a efectiva activação e o registo do sinal de radar pela unidade de controlo. Este atraso no disparo do sinal é mais acentuado em terrenos irregulares, quando se introduzem parâmetros de aquisição incorrectos e quando a velocidade de deslocação da antena é demasiado elevada. O efeito visual associado a este problema é designado de ruído *jitter* horizontal, e poderá ser mitigado através de uma aquisição mais lenta dos perfis de radar, ou totalmente atenuado (sem perda de resolução) com a utilização de um sistema de navegação mais preciso (GPS diferencial ou estação total).

#### 2.4.3.2. GPS

A integração do Georadar com sistemas de posicionamento global (GPS) fornece uma localização preciso dos dados de radar, num sistema de coordenadas global, sendo a sua utilização na prospecção arqueológica referida e discutida por vários autores (Leckebush, 2005a; Urbini *et al.*, 2007; Goodman *et al.*, 2009; Novo, 2009).

A vantagem da utilização do GPS como método de posicionamento prende-se com a sua elevada precisão, particularmente quando se utiliza um equipamento de GPS-Diferencial (teoricamente 1-2 cm de precisão). Isto permite um posicionamento preciso dos perfis e grelhas de radar num sistema de informação geográfica (SIG) e a localização precisa dos traços de radar possibilita um processamento 2D e/ou 3D dos dados de radar bastante exacto, gerando imagens de elevada qualidade. Outra das vantagens advém de a utilização do GPS poder permitir a aquisição de perfis de um modo aleatório, sem necessidade de ficar “preso” a uma grelha definida, o que possibilita uma maior velocidade de aquisição de dados.

A maioria dos sistemas de Georadar disponíveis no mercado possibilitam a ligação destes aos sistemas de GPS existentes, associando em tempo real os dados de GPS aos traços de radar. No entanto, o SIR-3000 da GSSI não está preparado para essa ligação directa, necessitando de um Data-logger, para posteriormente se poder integrar os dados de GPS com os de GPR.

O método de aquisição em campo dos dados de GPS recorrendo a dois receptores (uma estação base e uma unidade móvel) é o mais utilizado e o que, segundo alguns autores como Novo

(2009), é o mais adequado a aplicações de GPR devido à autonomia deste método e à sua elevada precisão em tempo real. Nesta metodologia, a unidade móvel de GPS é montada sobre a antena de Georadar (ver figura 2.23), estando ligada por sinal de rádio à estação base. É importante garantir, durante a aquisição dos dados, a estabilidade da antena de GPS para garantir uma maior precisão do posicionamento, devendo-se para tal posicionar a antena de GPS de forma a evitar a sua oscilação durante a prospecção.



**Figura 2.23** – Equipamento de Georadar da GSSI com antena de GPS diferencial da Trimble acoplada (equipamento do Centro de Ciências da terra da universidade do minho).

A utilização do GPS, como referido, apresenta inúmeras vantagens mas existem também algumas desvantagens, nomeadamente o preço elevado de um sistema de GPS-Diferencial ( $\approx 10.000$  €) mais o software necessário para o pós-processamento da informação gerada. Este sistema não é possível de utilizar em espaços cobertos e o seu uso em áreas com pouca cobertura de satélite diminui bastante a sua precisão.

#### 2.4.3.3. Estação total

A Estação Total robotizada, ou taqueómetro, é um dos sistemas mais exactos de posicionamento, com precisões na casa do centímetro, que tem vindo a ser integrado em trabalhos de prospecção

com Georadar. Vários autores como Lehmann & Green (1999), Leckbusch (2005b), Gustafsson & Alkarp (2007), Goodman *et al.* (2009), Verdonck & Vermeulen (2011), entre outros, apresentam trabalhos com a utilização desta metodologia, onde se evidencia a seu enorme potencial, particularmente na prospecção efectuada com atrelados de antenas em sistemas multicanal (ver figura 2.24).



**Figura 2.24** – Sistema multicanal e multiantena associado a um sistema de posicionamento por estação total (o equipamento da imagem é propriedade da empresa Geosurveys).

Estes sistemas robotizados permitem a aquisição automática contínua das coordenadas dos traços de radar, com frequências de aquisição bastante elevadas, e a integração e visualização em tempo real do posicionamento, através de software específico. Estes sistemas possuem um mecanismo de busca automática, que segue um prisma especial colocado sobre a antena de Georadar, registando automaticamente a posição da mesma e enviando via rádio essa informação para o computador de controlo da aquisição dos dados de GPR, onde a informação topográfica será integrada com os perfis adquiridos.

Esta metodologia apresenta enormes vantagens relativamente ao posicionamento com GPS, pois é mais precisa, pode ser utilizada em espaços interiores ou com pouca cobertura de satélite e é mais fácil de utilizar pois não necessita de pós-processamentos. No entanto, tal como nos sistemas de GPS, esta metodologia é bastante onerosa, apresentando uma gama de preços semelhante.

## 2.5. Processamento dos Dados

As reflexões de radar, registadas durante a aquisição de dados, apresentam frequentemente perturbações no sinal geralmente descritas como ruído, reverberações, reflexões fantasma, neve ou interferências. Estas perturbações, presentes no sinal de radar registado após uma prospecção, podem dificultar, se não mesmo impossibilitar, uma correcta interpretação dos dados. A sua origem é variada, podendo dever-se a problemas relacionados com o equipamento (hardware), com o software de aquisição, com a natureza do terreno, interferências externas (ex: antenas de telemóvel, sinais de rádio), reflexões anómalas, obstáculos, entre outros.

O processamento dos dados a partir da aplicação de filtros específicos permitirá eliminar ou reduzir as perturbações presentes no sinal, bem como amplificar partes do sinal que possam conter reflexões relevantes. Para tal existem vários filtros que podem ser utilizados no processamento do sinal de radar, encontrando-se os mesmos bem documentados na bibliografia de referência (Daniels, 2004, Cassidy, 2009a). Neste capítulo descrever-se-ão os filtros, 1D, 2D e 3D, que foram utilizados para processar os dados adquiridos no âmbito deste trabalho de investigação.

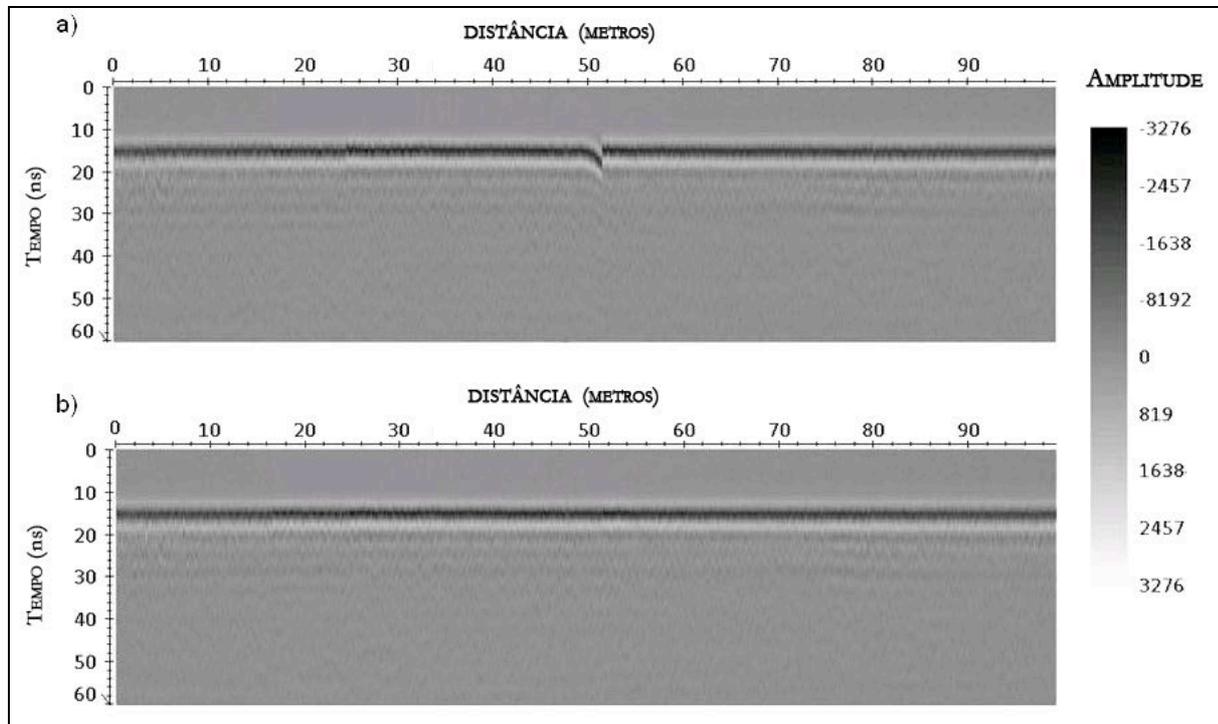
### 2.5.1. Filtros 1D

Os filtros 1D, os mais básicos utilizados no processamento de dados de radar, caracterizam-se por operar individualmente ao longo do sinal registado em cada traço de perfil. Estes poderão actuar de um modo universal, ao longo de todos os traços de uma secção de perfil ou sobre um determinado conjunto seleccionado de traços. Destes, utilizaram-se no âmbito desta dissertação os seguintes filtros: ajustamento de tempo-zero; filtros de frequência; dewow e ganhos.

#### 2.5.1.1. Ajustamento do tempo-zero

O tempo-zero, no vocabulário de Georadar, representa o tempo de chegada da primeira onda da reflexão da interface ar/solo, assinalando a localização da superfície do terreno. Fenómenos como instabilidade electrónica, deriva térmica, diferenças no comprimento do cabo e variações na distância da antena à superfície do terreno podem provocar saltos no tempo de chegada da primeira onda, usualmente referida como ponto de tempo-zero (Nobes, 1999; Olhoef, 2000; Cassidy, 2009b). Estes fenómenos (ver figura 2.25) tem um efeito na posição da interface ar/solo,

observável no perfil de radar, na sequência temporal de eventos posteriores (registrados em profundidade) e no grau de paridade ao longo de traços ou perfis adjacentes.



**Figura 2.25** – Observa-se no radargrama a) deriva do sinal por diferenças do tempo-zero. O radargrama b) apresenta essa deriva corrigida depois do ajuste do tempo-zero (adaptado de Novo, 2009).

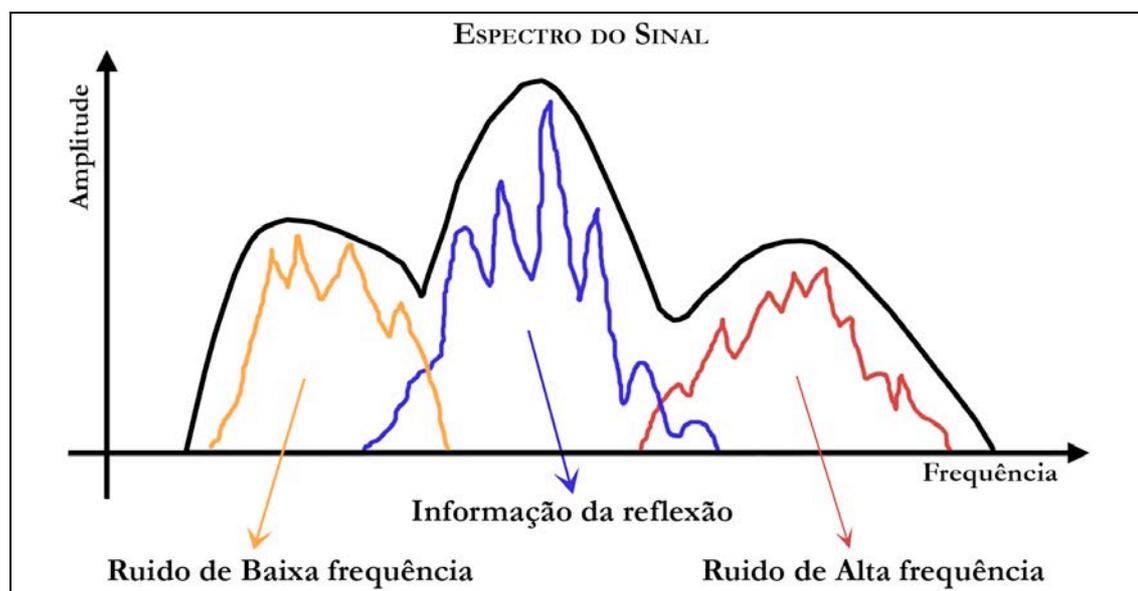
Ao verificar-se a ocorrência destes saltos, registrados nos traços dos radargramas, é necessário antes de se efectuarem outros processamentos proceder-se ao seu ajuste para uma posição de tempo-zero comum. Esse ajuste é usualmente concretizado seguindo alguns critérios particulares (ex: considerando a primeira onda negativa do traço), normalmente efectuado automaticamente pelo software de processamento utilizado. Em condições normais, estes ajustes tendem a corrigir os traços/perfis, no entanto, há que certificar se todos os traços/perfis corrigidos estão consistentes. Essa verificação é particularmente importante quando se pretende correlacionar reflexões ao longo de vários perfis paralelos.

### 2.5.1.2. Filtros de frequência

Os filtros de frequência, segundo autores como Conyers (2004) e Novo (2009), são dos mais importantes no processamento digital de sinal de radar. Estes filtros são frequentemente aplicados, de acordo com Cassidy (2009b), para remover ruídos com origem nos sistemas de

controlo e ruídos culturais (i.e., induzidos pelo Homem). O principal objectivo dos filtros aplicados é o melhoramento da qualidade visual dos dados de radar, por exemplo na remoção de picos de alta frequência provenientes de transmissões de rádio (Olhoeft, 2000). É também útil a sua utilização na extracção de aspectos particulares contidos nos dados, tais como reflexões de superfícies planas, difracções e reverberações, de forma a permitir uma correcta interpretação da informação presente nos radargramas.

Na maioria dos casos, a energia das reflexões de radar localiza-se num intervalo de frequências particular, enquanto que a maior parte das interferências e do ruído de fundo, se registam em domínios de frequência diferentes. Essa particularidade permite distinguir o ruído da informação válida contida nos dados, dentro do domínio da frequência (figura 2.26), possibilitando a sua remoção.



**Figura 2.26** - Espectro típico do sinal de um traço de georadar onde é possível observar ruído intenso de alta e baixa frequência (adaptado de Novo, 2009).

Para uma correcta utilização dos filtros de frequência é necessário compreender as modificações que a sua aplicação irá introduzir nos perfis de radar, de modo a evitar a exclusão de informação importante presente nos dados. Será então necessário ter algum cuidado na sua aplicação e comparar sempre os dados processados com os originais, para certificar a coerência dos mesmos.

Existem diversos filtros de frequência que poderão ser aplicados durante o processamento, nomeadamente os filtros: *high-pass*, *low-pass*, *band-pass* e *notch-filter*. O filtro *band-pass* corresponde a um dispositivo que permite a passagem de frequências dentro de um determinado intervalo e

atenua, ou elimina, as frequências fora desse intervalo (ver figura 2.27). Por exemplo, dentro de um dado espectro de radar, quando definidas como frequências limite (ou de corte) os 100 MHz e os 400 MHz, todo o sinal superior à frequência mais alta e inferior à baixa será eliminado ou atenuado (ver figura 2.27). Os filtros *high-pass* e *low-pass* funcionam de forma idêntica ao filtro anterior. Com a utilização do filtro *high-pass* as frequências mais baixas que as da frequência de corte são eliminadas, no caso do filtro *low-pass* são eliminadas as frequências mais altas que as da frequência de corte. O *notch-filter*, por seu lado, é utilizado para remover uma frequência específica (ex: um pico de frequência anômalo) registado dentro do intervalo de frequência de cada traço.

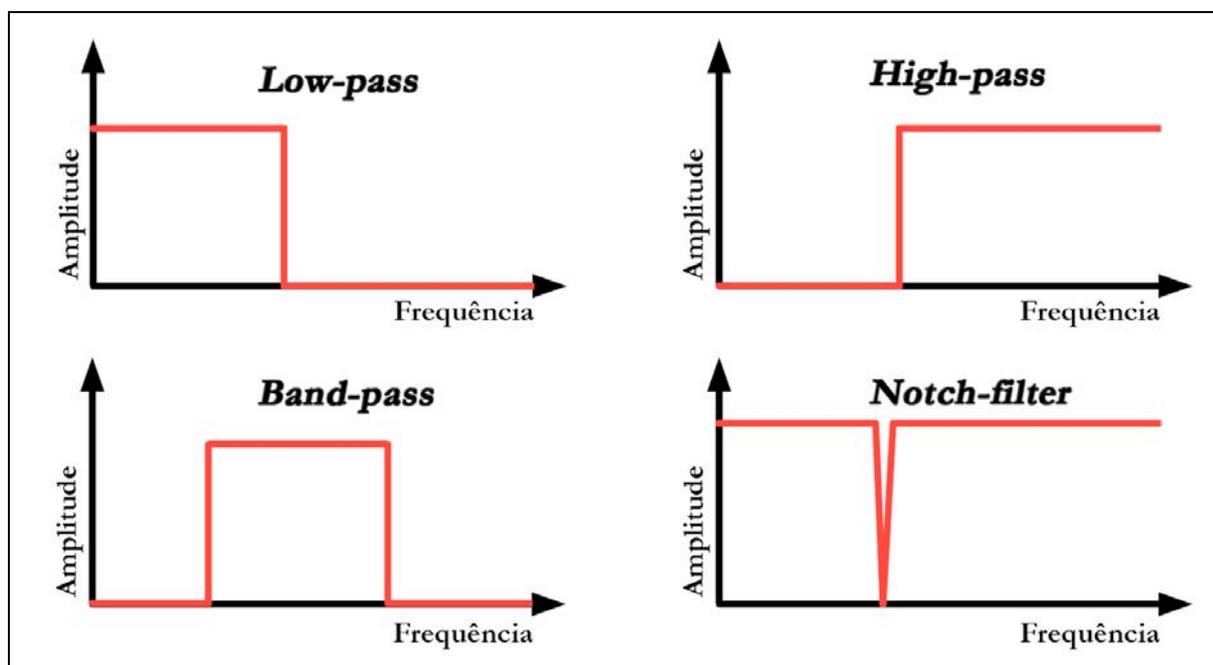
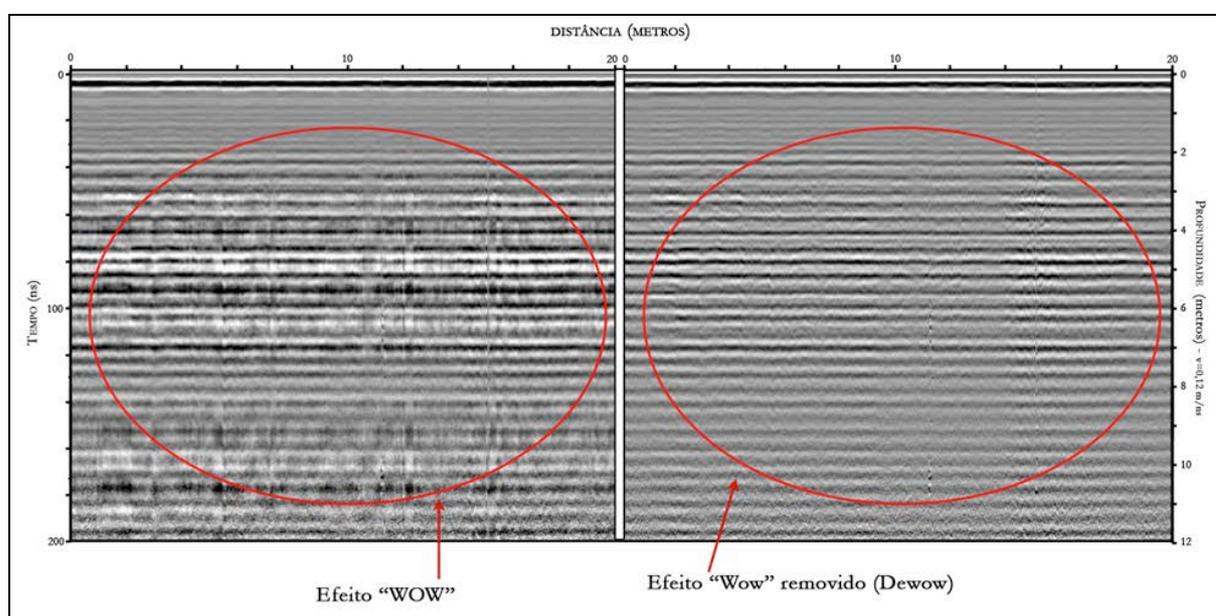


Figura 2.27 - Diferentes tipos de filtros de frequência (adaptado de Novo, 2009).

### 2.5.1.3. *Dewow*

Um aspecto único presente nos dados de Georadar advém da proximidade existente, dentro da antena, entre o receptor e o emissor (Annan, 2009). Os campos indutivos e electrostáticos que envolvem a antena transmissora contêm energia de baixa frequência, que varia pouco ao longo do tempo e que decai rapidamente com a distância. Esta energia induz interferência no sinal de radar registado pelo sistema, verificando-se alteração do nível médio do sinal de um valor de amplitude zero para um valor de amplitude diferente (figura 2.28). Este fenómeno é comumente referido de *wow* de linha de base.

O efeito *wow* observado nos dados de radar pode ser suprimido com a aplicação, no sinal detectado, de um filtro temporal de subtração de média. Este processo é designado de *dewow*. O processo de *dewow* opera no domínio temporal, actuando em cada traço de dados individualmente. Ele calcula a média ponderada dos valores de amplitude do sinal de radar, subtraindo posteriormente essa média a cada valor do traço de radar, resultando este processo na remoção dos componentes de baixa frequência registados nos dados. A eliminação deste componente é um pré-requisito necessário para a implementação dos subsequentes processamentos de dados. De outro modo os resultados finais poderiam diferir significativamente do esperado (Sandmeier, 2007), uma vez que o componente de baixa frequência registado tende a mascarar as reflexões de baixa amplitude (Lacroix, 2009).



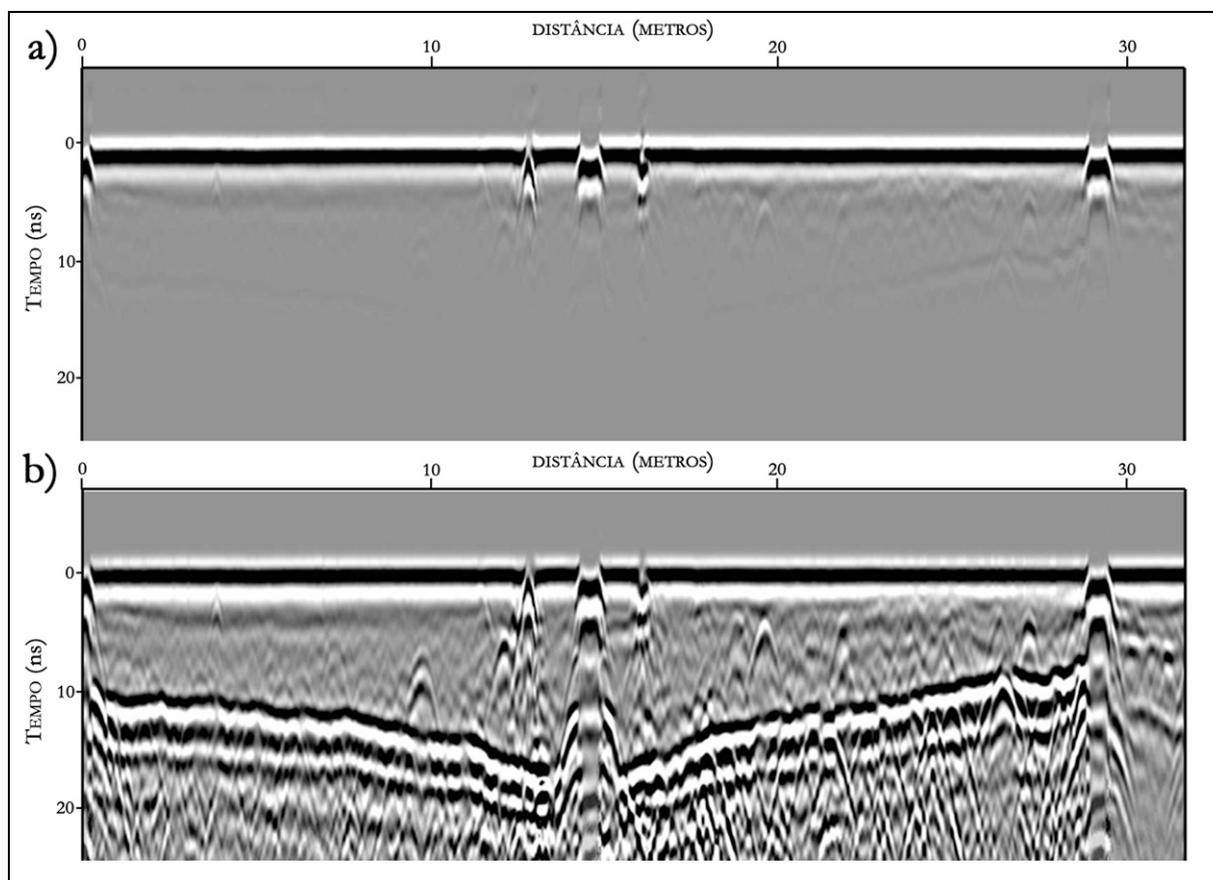
**Figura 2.28** – Exemplo de um radargrama apresentando o efeito “wow” e o mesmo radargrama após remoção do referido efeito (*Dewow*).

#### 2.5.1.4. Ganhos

A forma de processamento conhecida por ganhos, ou ganho, consiste basicamente na amplificação do sinal de radar recebido, através da multiplicação dos valores das amplitudes das ondas electromagnéticas (utilizando algoritmos matemáticos específicos) ou por introdução manual dos valores dos ganhos. A introdução de ganhos no sinal de radar melhora a forma visual do perfil de radar, permitindo observar ou destacar reflexões atenuadas e reduzir as amplitudes de reflexões exageradas.

O objectivo principal deste processamento é diminuir os efeitos de atenuação do sinal de radar recebido, particularmente o sinal mais tardio reflectido de profundidades maiores (Cassidy, 2009b). Esta atenuação deve-se, essencialmente, a perdas resultantes da dispersão geométrica da onda electromagnética e da redução de amplitude provocada, por exemplo, pela presença de materiais atenuadores tais como certo tipo de argilas. De considerar que a atenuação é o principal factor limitador dos estudos com Georadar em meios dieléctricos dissipadores (Novo, 2009).

Com a amplificação do sinal de radar, através da introdução de ganhos, é possível destacar as reflexões interessantes nas janelas de tempo pretendidas (figura 2.29). É também possível reduzir ou homogeneizar as amplitudes de reflexões demasiado elevadas.



**Figura 2.29** – Aspecto de um radargrama por processar (a) e com a adição de ganhos (b). Observa-se a amplificação das reflexões geradas por uma estrutura linear correspondente a uma conduta de drenagem em alvenaria.

Os ganhos podem ser aplicados durante a aquisição dos dados ou aplicados mais tarde, em laboratório, na fase de processamento. Alguns sistemas de radar gravam sempre os dados sem ganhos durante a fase de aquisição, sendo necessário posterior processamento para melhorar a

visualização dos radargramas. Outros sistemas, tais como os da GSSI, particularmente o SIR-3000, gravam por defeito os dados com ganhos automáticos, sendo possível alterar estas especificações, retirando ganhos ou definindo-os manualmente. Contudo, é necessário ter em consideração que ao aplicar o ganho aos dados estes serão alterados e que, quer as reflexões importantes quer o ruído, serão simultaneamente amplificados de modo indiscriminado. Terá que se ter este pormenor em atenção, para não correr o risco de comprometer os dados recolhidos no campo, e de interpretar de modo errado a informação obtida. Novo (2009) propõe, para evitar essa situação, que os ganhos sejam apenas introduzidos no processamento laboratorial e sempre após o ajustamento do tempo-zero e da componente DC, de modo a evitar o que o autor considera um ganho desigual dos dados.

### 2.5.2. Filtros 2D

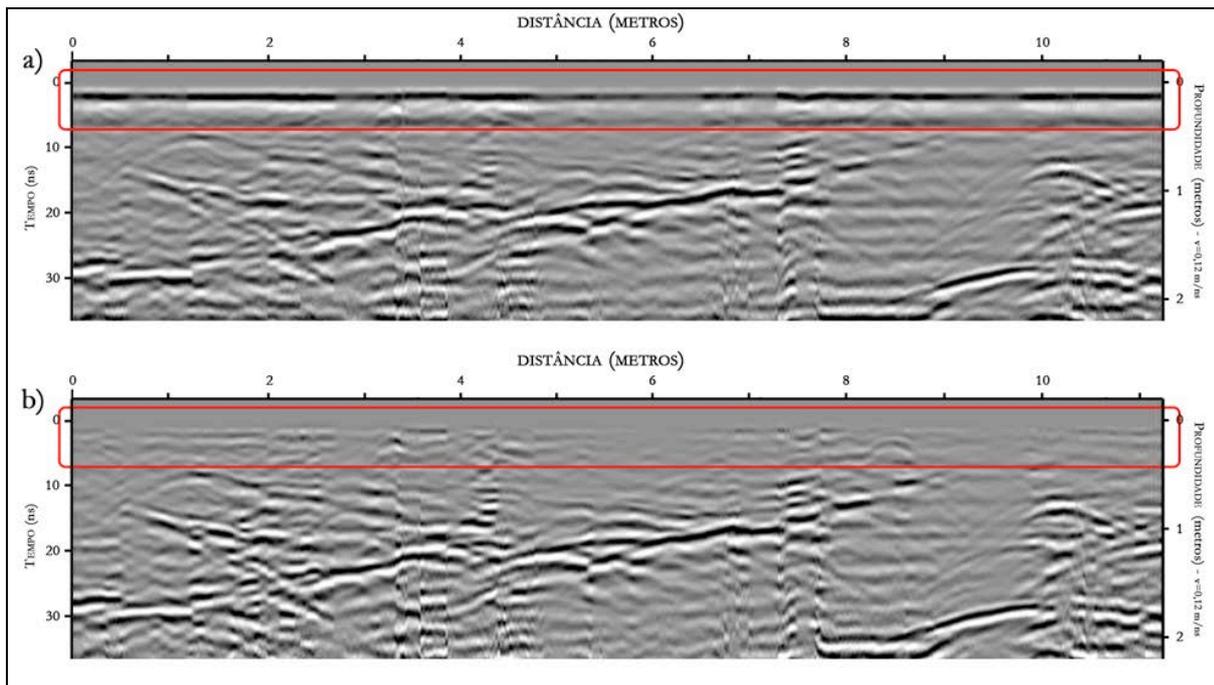
Os filtros 2D actuam sobre traços adjacentes ao longo dos perfis de radar, podendo ser aplicados em intervalos específicos de traços, ou ao longo de todo o perfil. Estes filtros são normalmente aplicados para realçar ou suprimir determinadas particularidades presentes nos perfis de radar.

#### 2.5.2.1. Remoção de *Background/ Subtract Mean*

O principal objectivo deste tipo de filtros é o de remover ruídos de baixa frequência que, normalmente, aparecem nos perfis sob a forma bandas horizontais contínuas que se prolongam ao longo de todo o perfil ou, em alguns casos, em partes dele (figura 2.30). Este tipo de ruído pode dever-se a fontes de interferência presentes na área prospectada tais como, cabos, peças de metal próximas, linhas eléctricas, vedações, muros, etc. Apesar de as antenas de radar se encontrarem blindadas, estas perturbações no sinal de radar são bastante frequentes sendo necessário subsequente remoção das mesmas.

Estes ruídos, e no caso particular das antenas utilizadas no âmbito desta tese, podem também dever-se a um mau acoplamento entre a antena e o solo. A ocorrência das bandas horizontais (*background noise*) é bastante frequente nos radargramas de antenas de 400 MHz e 200 MHz, devido a problemas de reverberação do transmissor (dentro da antena) gerando desta forma uma reduzida eficiência no acoplamento.

Estes filtros de sinal poderão também ser utilizados para salientar reflexões específicas não contínuas, no entanto, se não forem utilizados com cuidado, reflexões contínuas importantes poderão ser afectadas, eliminando-se desta forma informação importante presente nos radargramas.



**Figura 2.30** – Exemplo de radargrama apresentando ruídos de baixa frequência (a) e o seu aspecto após a aplicação dos filtros *subtract mean* e *background removal* (b), observando-se a remoção das bandas de ruído horizontais.

Essencialmente, aplicam-se dois tipos de processamento de sinal para a remoção dos ruídos atrás descritos: o *subtract mean* e o *background removal*.

*Subtract mean*: Este filtro calcula a média de amplitudes de um número definido de traços do radargrama e subtrai esse valor a cada um dos traços ao longo de todo o perfil. Geralmente, o valor de traço médio é calculado a partir de todos os traços do perfil (média total) ou a partir de um número específico de traços (média ponderada). A forma de utilização deste filtro dependerá das características específicas do ruído presente no perfil (ex: continuidade ou estabilidade das bandas horizontais).

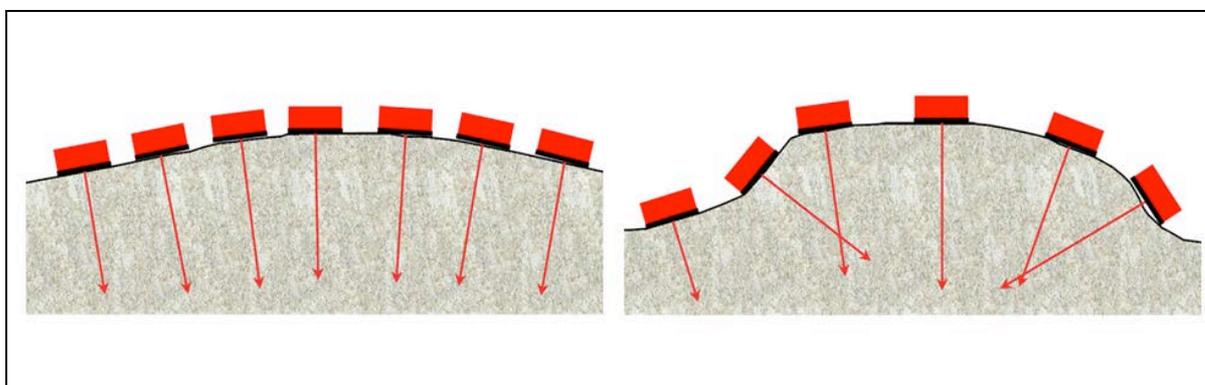
*Background removal*: Este filtro actua de uma forma muito similar à do anteriormente descrito, calculando também a média de todos os traços numa secção e subtraindo-a a cada traço individual. No entanto, este depende bastante do tipo de software utilizado, sendo mais difícil de configurar (Novo, 2009). A sua aplicação induz a remoção do ruído de fundo registado nos radargramas, bem como o efeito de reverberação das antenas. Sendo o referido filtro bastante útil para eliminar as bandas horizontais de ruído é, no entanto, mais problemático que outros tipos de processamentos, uma vez que pode remover reflexões lineares horizontais importantes por não fazer uma distinção entre estas e as bandas de ruído. Para minimizar este inconveniente torna-se

necessário comparar os radargramas - antes e após o processamento – de modo a certificar que nenhuma informação importante foi eliminada.

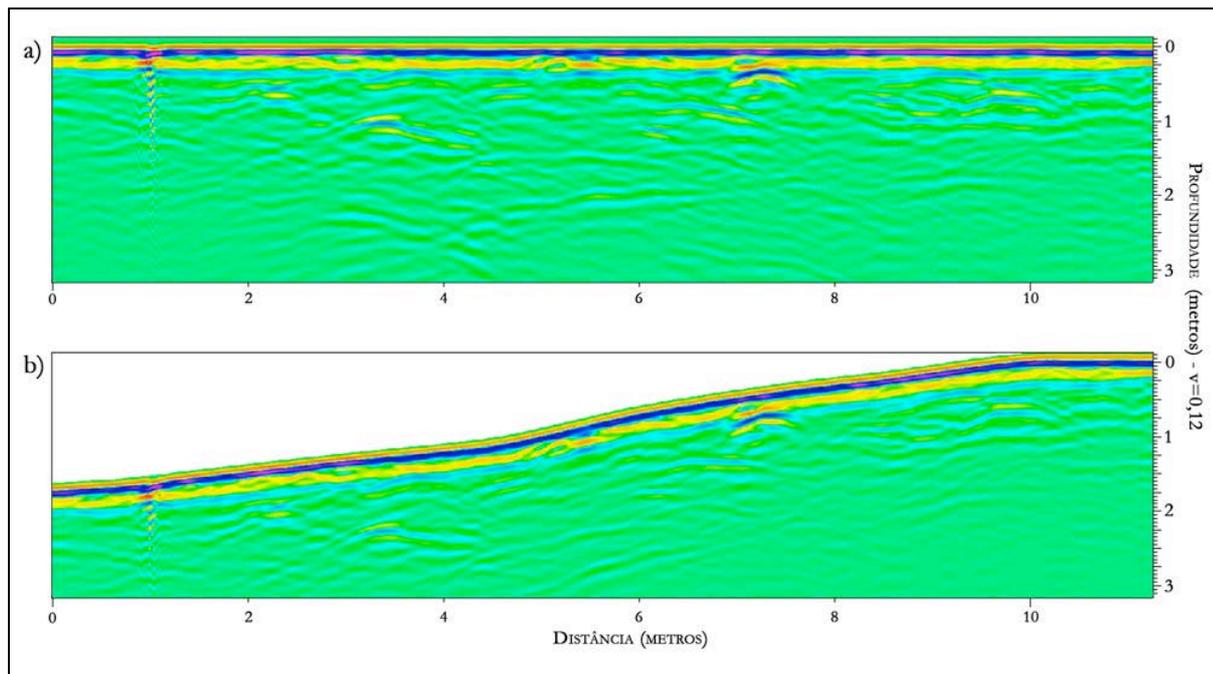
### 2.5.2.2. Correção topográfica

Sempre que a aquisição de dados de radar for efectuada num local cuja superfície não seja plana e/ou horizontal, será necessário realizar algum tipo de correção topográfica (Cassidy, 2009b), de modo a posicionar os dados de radar na sua correcta posição espacial. Esta necessidade advém do facto de reflexões que não estão directamente sob a antena (mas antes numa direcção perpendicular à sua base) são registados como se efectivamente se situassem sob ela. Os estudos de Leckebusch & Rychener (2007) e de Goodman *et al.* (2009) mostraram que a correção estática dos dados, equacionando a topografia do terreno e o *tilt* da antena (desvio em relação à posição horizontal da antena) (figura 2.31), são necessários para melhorar a sua precisão na geração de imagens das estruturas presentes no subsolo, nos locais em que a topografia do terreno seja acidentada. Esta correção é de vital importância quando se pretende concretizar um estudo 3D ou pseudo-3D, onde a correlação exacta entre perfis e/ou mapas de amplitudes é fundamental, permitindo deste modo uma interpretação mais realista das reflexões registadas.

Para se efectuar a correção da elevação do terreno é essencial realizar, ou possuir, um levantamento topográfico (efectuado através de GPS, teodolito, estação total, entre outros) com um grau de precisão adequado. A informação altimétrica, contida num ficheiro ASCII, com as coordenadas x, y e z, é introduzida no software de Georadar, a partir do qual são efectuadas as correções. Alguns softwares permitem que a topografia seja desenhada manualmente, desde que a precisão necessária no projecto em questão não seja muito elevada.



**Figura 2.31** – Representação esquemática das diferenças, com relação à vertical, do registo das ondas de radar quando a área a prospectar não corresponde a um plano horizontal, mas antes possui um relevo suave (esquema da esquerda) ou com transições abruptas (esquema da direita).



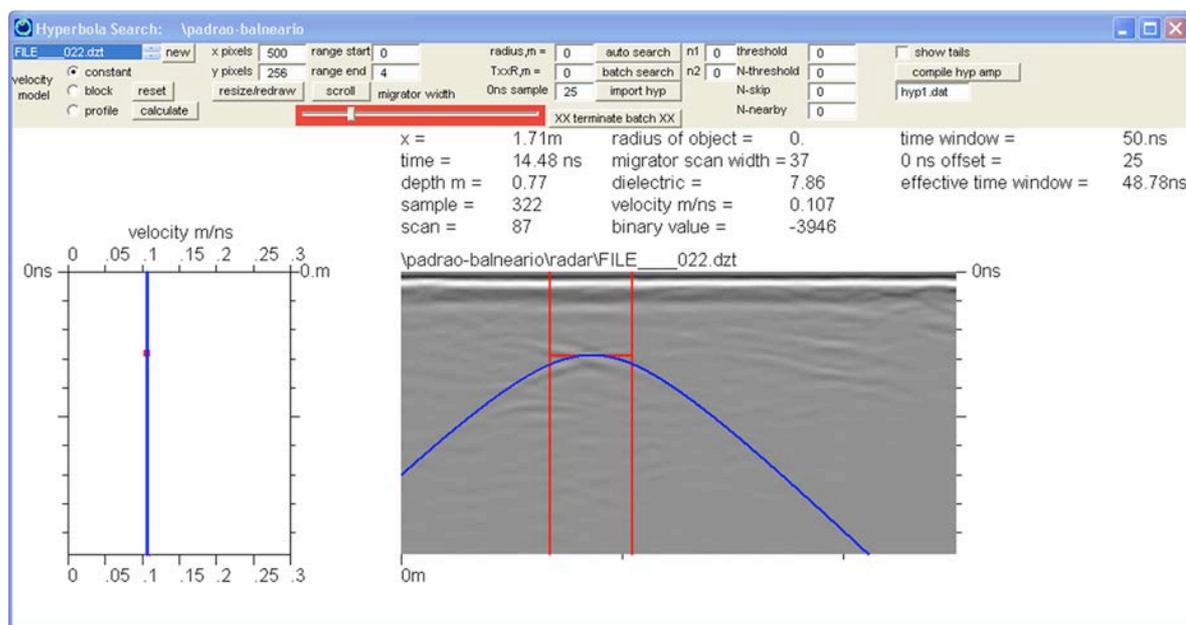
**Figura 2.32** – Aspecto de um radargrama original (a) e após correcção topográfica (b). Observa-se algumas mudanças significativas na geometria das reflexões.

### 2.5.2.3. Análise de velocidade

Os passos de processamento descritos anteriormente actuam apenas no domínio do tempo, não tendo sido os dados das reflexões directamente relacionados com a profundidade a que estas foram geradas. Para se poder converter os radargramas de uma escala de tempo (normalmente numa escala de ns) para uma escala de profundidades, o que é imprescindível para se proceder a uma interpretação realista dos dados, é necessário realizar-se uma estimativa exacta da velocidade média das ondas de radar no solo. A determinação da velocidade das ondas poderá ser efectuada através das metodologias de CMP e/ou de ajuste de hipérbolas.

A técnica de CMP (*Common MidPoint*), descrita nos trabalhos de vários autores (Conyers, 2004; Daniels, 2004; Annam, 2009), determina a velocidade das ondas de radar no solo através da variação do espaçamento entre duas antenas (uma emissora e outra receptora) e da medição da variação tempo de chegada das ondas de radar registadas. Esta técnica é bastante eficaz na determinação das velocidades das ondas, não estando dependente da existência de hipérbolas de reflexão nos perfis. No entanto, é uma técnica morosa, de análise complexa e que necessita de um sistema de Radar multicanal, ou de um cabo que permita conectar duas antenas, para além de necessitar de duas antenas de igual frequência (uma como receptora e outra como emissora de sinal).

A técnica de ajuste de hipérbolas é a mais comumente utilizada na determinação da velocidade de ondas de radar, podendo ser aplicada em qualquer perfil que contenha hipérbolas de reflexão ou de difracção. Para se efectuar o cálculo da velocidade procede-se ao ajuste gráfico, nos perfis de radar, de uma função hiperbólica de velocidade às formas das hipérbolas que se observam nos dados, tal como se pode observar na figura 2.33.

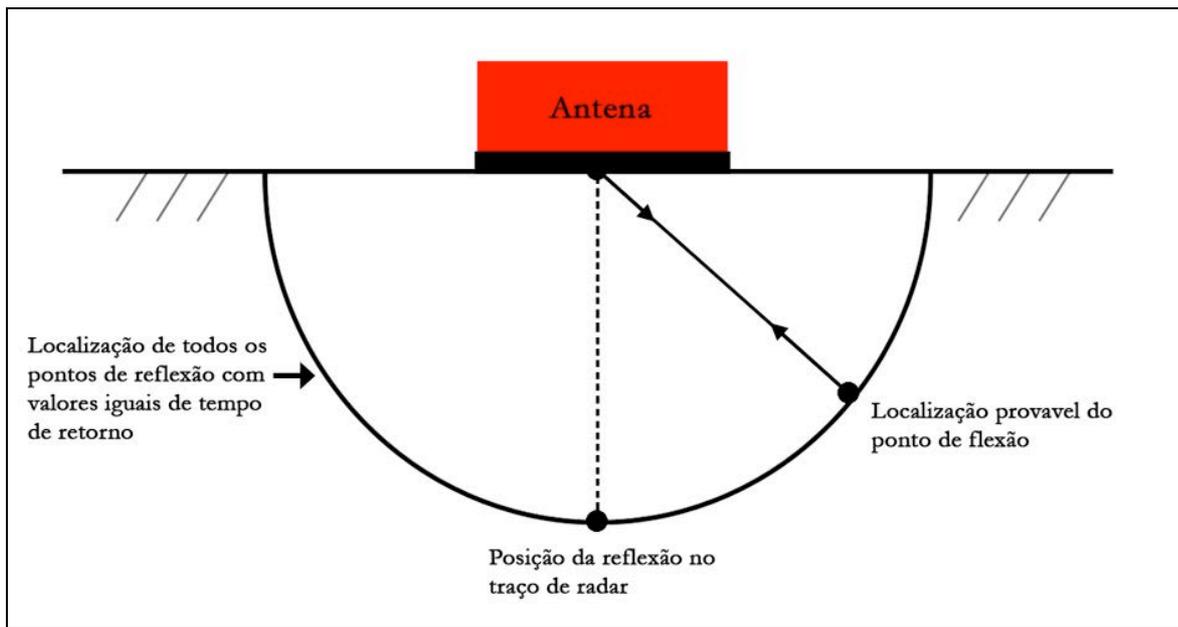


**Figura 2.33** – Determinação da velocidade das ondas de radar, através do método de ajuste de hipérbolas, utilizando o software GPR-Slice.

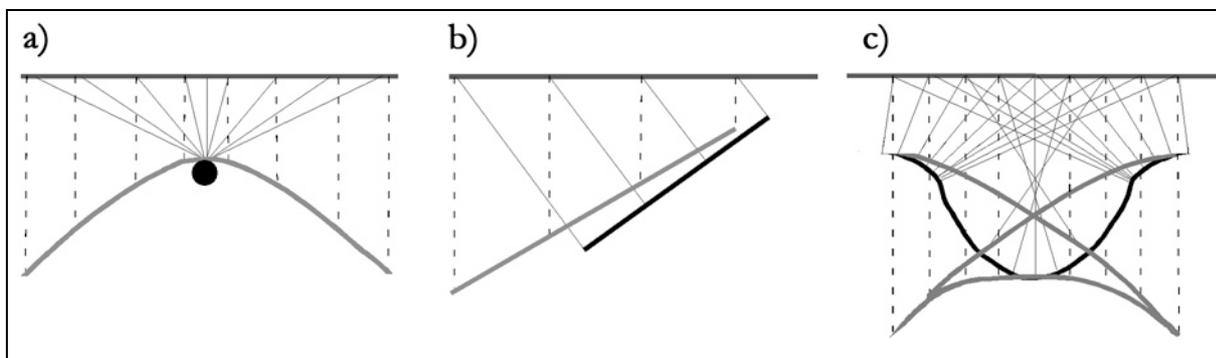
#### 2.5.2.4. Migração

O principal objectivo da aplicação deste filtro é o de colocar todas as reflexões registadas nos radargramas na sua posição real, tanto vertical como horizontal (Novo, 2009). É também utilizada para melhorar a resolução das secções de radar e para desenvolver imagens mais realistas do subsolo prospectado.

Num radargrama, todas as reflexões registadas numa dada posição da antena são apresentadas como se os reflectores se situassem exactamente sob a antena. No entanto, as ondas de radar são enviadas em direcções variadas podendo a antena registar energia reflectida por qualquer superfície perpendicular à frente da onda e não apenas a energia devolvida por reflectores paralelos à superfície do terreno (figura 2.34). Este efeito gera um padrão hiperbólico de reflexão (figura 2.3.5a) estando também associado a distorções geométricas, nas quais uma dada estrutura apresentará nos radargramas geometrias diferentes das reais (figura 2.35).



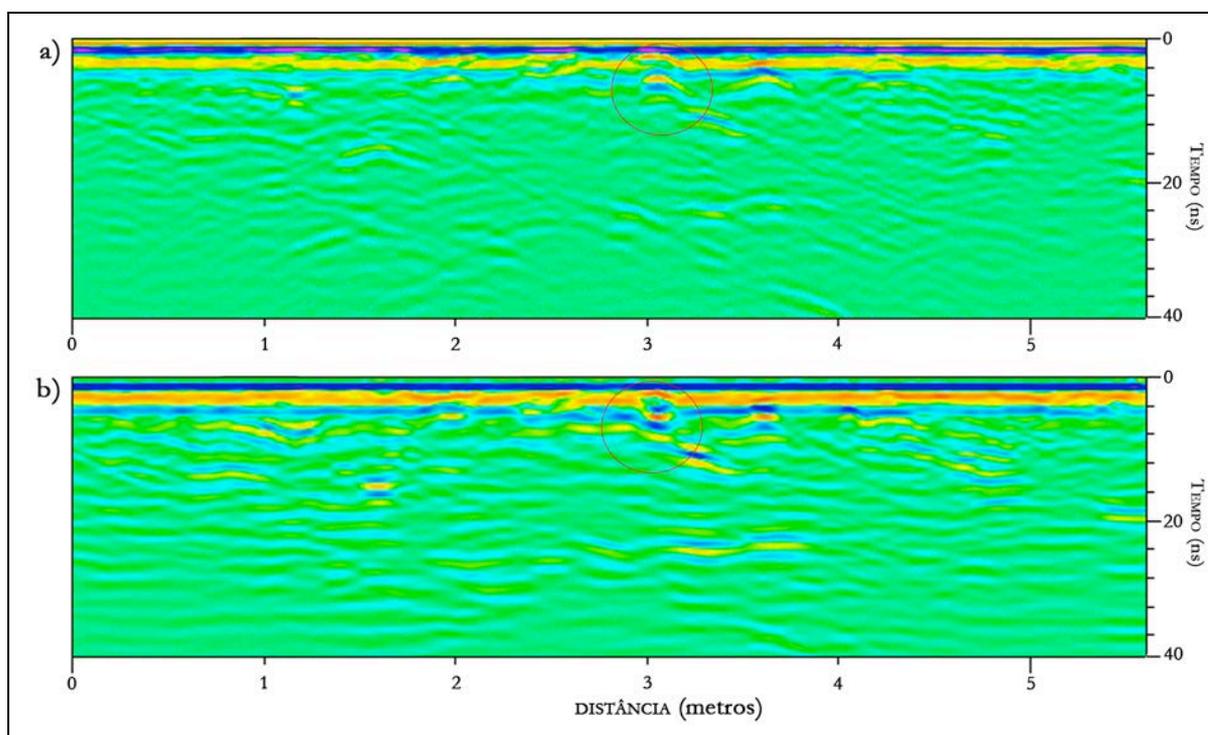
**Figura 2.34** – A imagem esquematiza a posição registada de uma reflexão face à sua possível origem. O semicírculo (frente da onda de radar) indica a área onde se localizam todas as potenciais reflexões. O raio do semicírculo depende do tempo de propagação do pulso de radar (adaptado de Novo, 2009).



**Figura 2.35** – Distorções geométricas comuns nos radargramas. Em cada caso, as linhas finas contínuas representam os percursos reais das reflexões (para antenas com receptor e emissor quase coincidentes) e as linhas tracejadas mostram a posição nos traços de radar onde as reflexões vão ser registadas. As linhas cinzentas grossas representam a imagem gerada a partir das reflexões dos objectos desenhados a preto: a) Padrão de refração originado por um reflector pontual (ex: seixo); b) redução da inclinação e deslocamento lateral de um reflector inclinado (ex: camada inclinada); c) “laço” de uma sinforma apertada. (adaptado de Milson & Eriksen, 2011).

Basicamente o processo de migração consiste num processamento que induz o “colapso” das caudas da hipérbole sobre o mesmo ponto, tentando devolver a reflexão à posição do reflector de modo a reconstruir a geometria da estrutura soterrada (figura 2.36).

Para se proceder a uma execução adequada da migração das reflexões é necessário determinar com precisão a velocidade das ondas de radar. No entanto, como discutido anteriormente, a determinação exacta da velocidade das ondas é difícil devido à presença no subsolo de materiais com características dieléctricas distintas. Este facto leva a que durante o processo de migração seja usual testar diferentes velocidades com vista a se poder obter os melhores resultados visuais possíveis. Contudo, alguns softwares mais avançados permitem introduzir variações horizontais e/ou verticais de velocidade, o que habilita a execução de uma migração mais precisa em todos os radargramas. Se a velocidade utilizada no processo de migração for mais elevada que a real, os dados apresentar-se-ão sobre-migrados, por outro lado, se a velocidade for mais baixa, os dados ficarão sub-migrados. Portanto, quanto mais preciso for o valor da velocidade, melhor será o resultado final da migração.



**Figura 2.36** – Comparação de um radargrama antes da migração (a) e após a migração (b), podendo observar-se, na zona assinalada pelo círculo, a concentração da energia das hipérbolas num ponto correspondente à posição original da reflexão.

### 2.5.3. Filtros e processamentos 3D

Os filtros e processamentos 3D são aplicados a dados de radar que se encontram organizados tridimensionalmente num cubo de informação composto por traços adjacentes. Estes irão considerar não só a informação contida em cada traço ou perfil 2D, mas também a variação, no

espaço, das amplitudes registadas. Alguns dos processamentos tridimensionais actuam no domínio visual dos dados, isto é, actuam sobre a informação após interpolação das amplitudes de traços adjacentes os quais serão posteriormente discutidos. Aqui será brevemente abordada a migração 3D.

A migração 3D é recomendada, segundo Grasmueck *et al.* (2005), para a criação de imagens de alta resolução quando o objectivo do estudo consiste na definição de geometrias tridimensionais complexas presentes no subsolo (ex: fracturas, estruturas sedimentares, estruturas arqueológicas subtis, etc.). No entanto Novo (2009) considera que a migração 2D gera imagens com resolução suficiente adequada para a identificação de estruturas arqueológicas mais evidentes (ex: muros de alvenaria, fundações de edifícios, etc.).

A migração 3D deverá ser aplicada, preferencialmente, quando se procede à aquisição densa de dados (perfis adquiridos com espaçamento reduzido), com o objectivo de focar todas as difracções e reflexões com o propósito de obter resoluções de imagens sub-centimétricas quer em direcções verticais quer nas horizontais.

Tal como na migração 2D, também é necessário determinar a velocidade das ondas de radar no solo. A velocidade óptima poderá ser obtida, segundo Sandemeier (2007), pela análise dos hiperbolóides de difracção, onde o hiperbolóide calculado poderá ser optimizado às hipérboles de difracção existentes através da variação contínua interactiva da velocidade.

## 2.6. Técnicas de visualização aplicadas à arqueologia

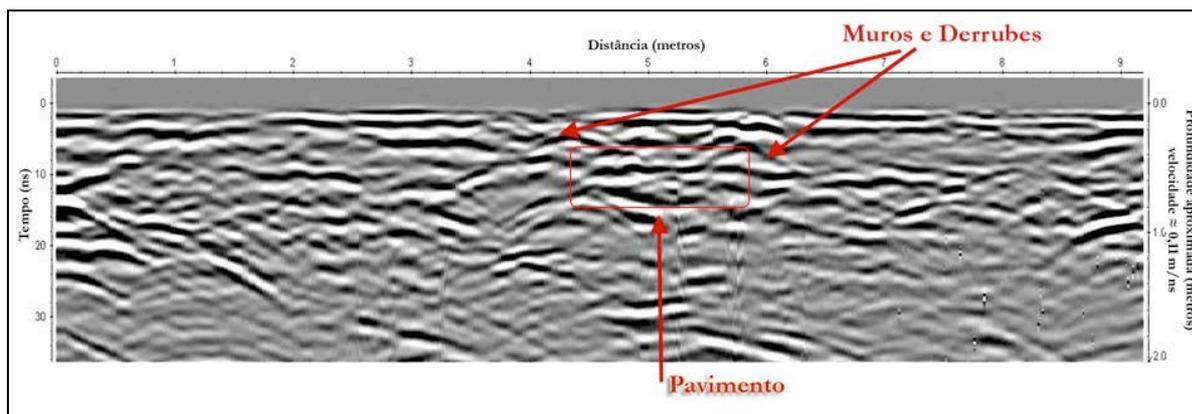
O principal objectivo da generalidade das prospecções arqueogeofísicas, particularmente as realizadas com Georadar, é a identificação do tamanho, forma, profundidade e localização de estruturas arqueológicas enterradas. A perseguição do referido objectivo leva à necessidade de conseguir visualizar os dados geofísicos adquiridos no terreno, sendo para tal necessário gerar imagens que possam ser analisadas e interpretadas.

No que concerne ao Georadar poder-se-ão utilizar várias metodologias para, a partir dos dados geofísicos recolhidos em campo, conseguir gerar imagens que permitam visualizar e interpretar as reflexões de estruturas arqueológicas que possam existir no local prospectado. A visualização da informação geofísica, e o processamento que a ela leva, segue actualmente diversas tendências que estão associadas, por um lado, a determinados grupos de trabalho e, por outro, aos meios técnicos e financeiros disponíveis. A tendência mais comum é a de apresentar os dados, após processamento, sob a forma de radargramas (2D) associados a mapas de amplitudes (processamento pseudo-3D). Uma outra tendência, hoje cada vez mais comum e cuja discussão se pode encontrar nos trabalhos de Novo *et al.* (2008a) e Novo (2009), é a do processamento 3D de alta resolução, associado à aquisição de dados em grelhas ultra densas.

De entre essas metodologias foram utilizadas neste trabalho as que de seguida se enumeram: interpretação de perfis 2D (radargramas); mapas de amplitudes; análise por sobreposição; volumes de isosuperfícies; correcções estáticas e integração de metodologias de visualização.

### 2.6.1. Radargramas

A forma mais expedita de interpretar os dados recolhidos durante a prospecção consiste na visualização dos radargramas (perfis 2D), procedendo-se à interpretação de reflexões importantes observadas (figura 2.37). Esta metodologia poderá permitir a identificação de algumas estruturas arqueológicas, bem como a sua profundidade. É também bastante útil na definição da estratigrafia das áreas estudadas. Através desta análise e comparando e correlacionando radargramas adjacentes é possível mapear as estruturas interpretadas, sendo este no entanto um processo bastante moroso e falível.



**Figura 2.37** – Exemplo de visualização e interpretação realizada a partir de um radargrama. Neste perfil, obtido na estação arqueológica do Castro de Crastoeiro, interpretou-se a presença de uma habitação circular, a partir da interpretação dos derrubes da mesma e do seu pavimento.

Existem bastantes desvantagens na utilização desta técnica, dado que esta não permitirá identificar correctamente a geometria das estruturas identificadas, assim como muitas estruturas poderão não ser observadas, nomeadamente estruturas mais subtis (buracos de poste, valados, fossas silo, etc.) ou estruturas lineares (ex: muros), que sejam intersectadas perpendicularmente à sua direcção.

No entanto, existem determinadas situações em que apenas se poderá utilizar esta metodologia. É o caso das prospecções efectuadas em locais onde não é possível realizar perfis paralelos, dada a limitação de espaço, o que impossibilita a realização de mapas de amplitudes e de interpolações tridimensionais.

### 2.6.2. Mapas de amplitudes

Os mapas de amplitude, também designados como “fatias” ou secções de tempo (*time slices*), constituem uma das formas básicas de visualização dos dados de radar, enquadrando-se esta metodologia dentro das técnicas de visualização tridimensionais, mais precisamente nas técnicas pseudo-3D (Goodman *et al.*, 2009; Novo *et al.*, 2010).

Para ser possível a visualização 3D dos dados de radar, todos os radargramas processados são associados de modo a gerar um cubo, ou volume, de dados (Novo, 2009). Para se poder obter este volume tridimensional os radargramas são adquiridos em linhas paralelas, no entanto, caso se utilize um sistema de posicionamento preciso (ex: gps diferencial) e se apliquem os algoritmos de interpolação adequados, esta técnica de aquisição poderá ser dispensada. Uma vez gerado o cubo de dados, este poderá ser seccionado em qualquer direcção (plano) pretendida, originando imagens designadas de “fatias”, cortes, secções, mapas de amplitudes ou *C-scans* (figuras 2.38 e 2.39).

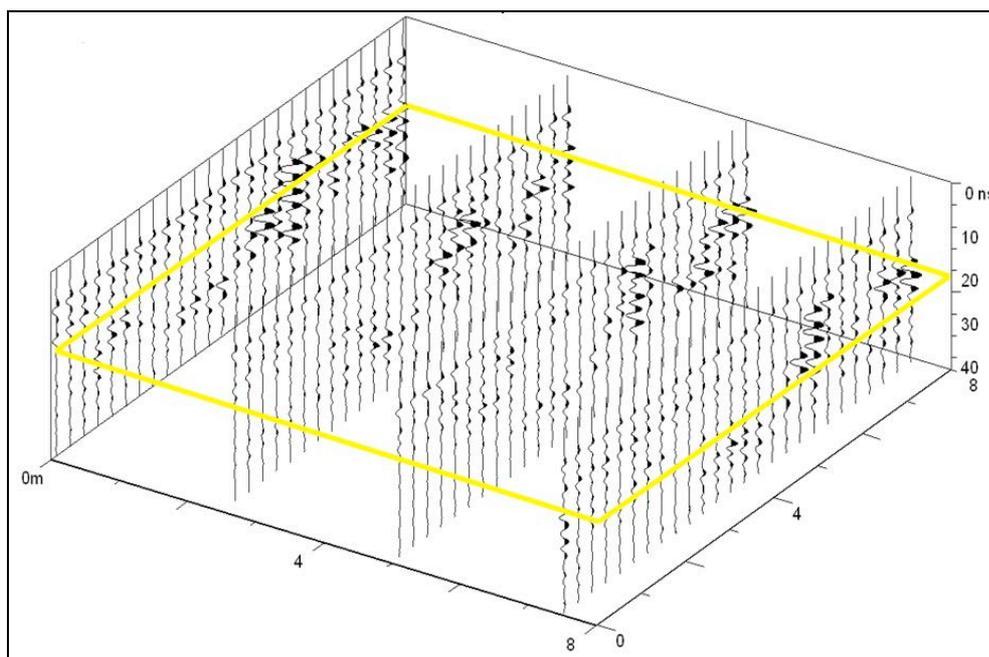


Figura 2.38 – Esquema da formação de uma secção de tempo, ou mapa de amplitudes (adaptado de Novo, 2009 e de Goodman, 2011).

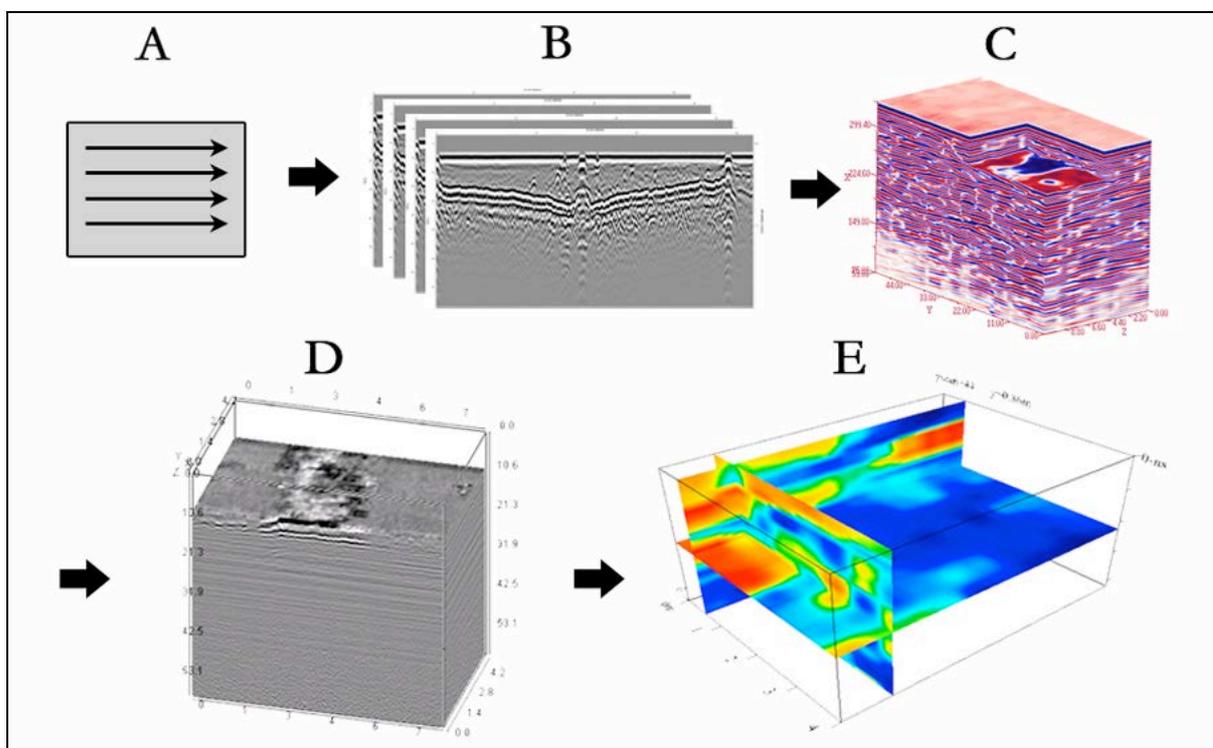
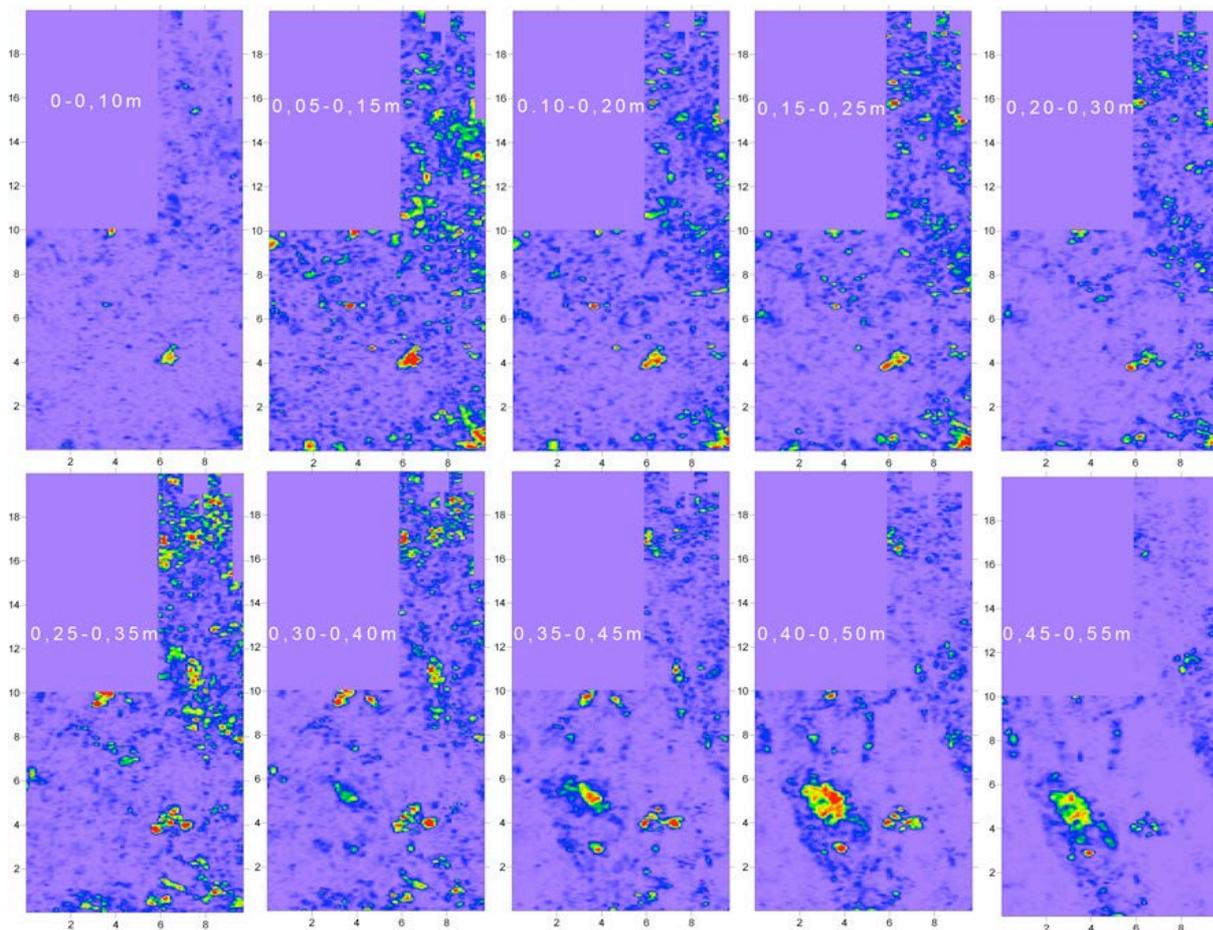


Figura 2.39 – Esquemática do processo de geração de mapas de amplitudes: A – prospecção em área com perfis paralelos pouco espaçados; B – radargramas; C – visualização de um modelo 3D de radar; D – modelo tridimensional sectionado a 11ns; E – secções de amplitudes segundo X, Y e Z de um modelo 3D (adaptado de Novo 2009).

Estas secções representam mapas de amplitudes das reflexões registadas ao longo da área prospectada num determinado intervalo de tempo (ver figura 2.40). As secções horizontais são, normalmente, as mais utilizadas em prospecção arqueológica porque elas conseguem mostrar o tamanho, a forma, a localização e a profundidade das estruturas arqueológicas soterradas. Estas permitem também evidenciar estruturas subtis que não são distinguíveis, ou interpretáveis, nos radargramas. Os mapas de amplitudes podem ser gerados, a partir dos volumes de dados 3D, através da interpolação, calculando a média espacial, do quadrado da amplitude da onda de radar ou utilizando a amplitude absoluta das reflexões. Os dados são interpolados, gerando-se dessa forma uma matriz XYZ, através da aplicação de diferentes tipos de algoritmos tais como: o inverso da distancia, a média linear, *kriging*, etc.



**Figura 2.40** – Sequência de mapas de amplitudes, gerados a intervalos de tempo regulares, convertidos em valores de profundidade.

A criação de animações a partir dos mapas de amplitudes constitui o último passo da visualização tridimensional mais simples. A elaboração de ficheiros de imagem (jpg, bmp, etc.) e a sua

visualização contínua, numa sequência animada, permite uma visualização pormenorizada das reflexões presentes nos mapas, bem como uma pronta comparação das diferenças existentes entre eles, tornando-se este método bastante expedito para a correcta interpretação arqueológica dos mesmos.

### 2.6.3. Análise de sobreposição

É frequente observar-se, em diversas estações arqueológicas, que as estruturas soterradas não se encontram localizadas à mesma profundidade, podendo este facto dever-se a diferentes estados de conservação das referidas estruturas, por estas pertencerem a diferentes períodos ou por corresponderem a estruturas que apresentam um determinado declive. Este fenómeno poderá mascarar, ou mesmo esconder, partes de estruturas lineares contínuas – independentemente da sua espessura - quando se observam mapas de amplitudes, gerados a partir das reflexões de radar resultantes dessas mesmas estruturas, levando a uma interpretação errónea da informação registada.

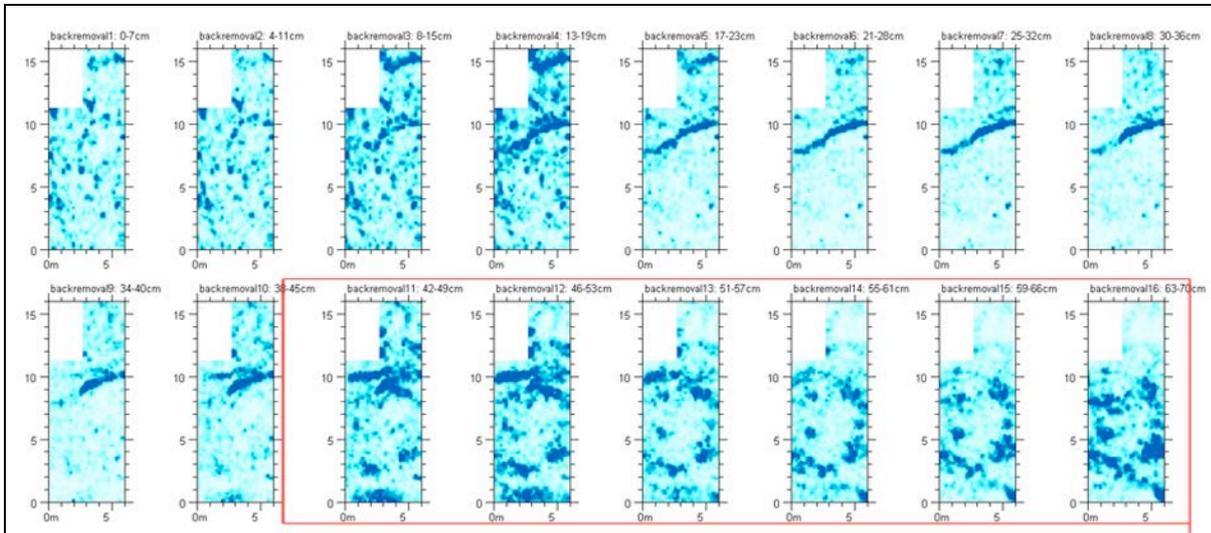
Para ultrapassar este problema é recomendada, segundo Goodman *et al.* (2009) e Novo (2009), uma visualização pormenorizada dos mapas de amplitudes para todas as profundidades, de forma a compreender a correcta geometria das estruturas. No entanto, segundo os referidos autores, a metodologia desenvolvida por Goodman *et al.* (2006), designada por Análise de Sobreposição (*Overlay Analysis*), será a mais adequada a solucionar este tipo de problemática.

O método de Análise de Sobreposição foi desenvolvido com o propósito de sintetizar, num único mapa compósito de amplitudes, as reflexões localizadas no registo de radar a diferentes profundidades. Basicamente, a metodologia consiste na selecção das reflexões mais intensas presentes nos diversos mapas de amplitudes (ver figuras 2.41 e 2.42), às quais são atribuídas códigos de cores, sendo estas posteriormente sobrepostas formando uma única imagem compósita (figura 2.43).

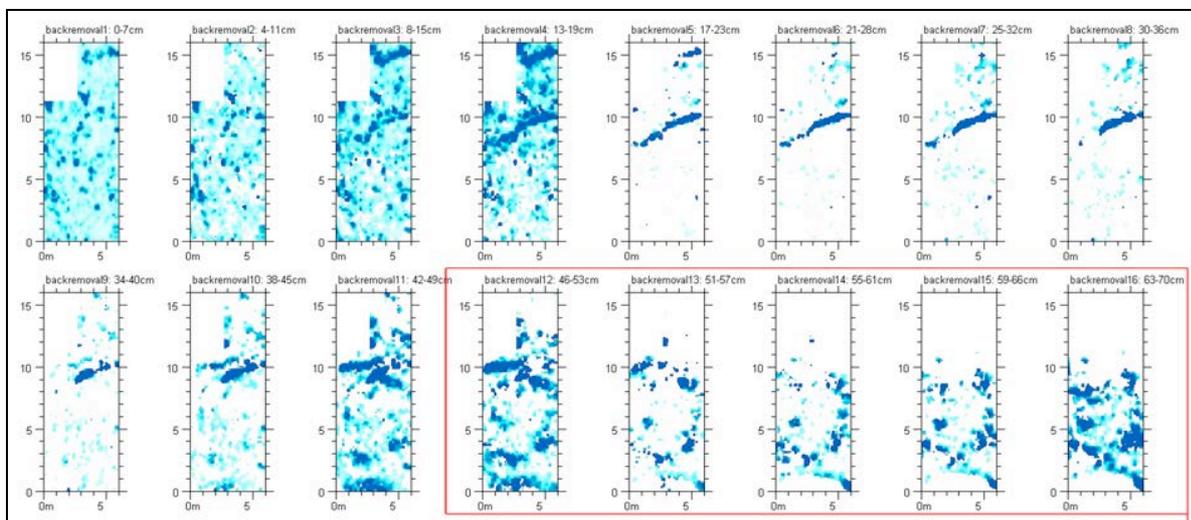
Esta técnica de visualização permite a associação de estruturas enterradas a diferentes profundidades, possibilitando uma visão mais abrangente da sua geometria, auxiliando bastante o processo de interpretação arqueológica dos dados de radar.

Como exemplo desta técnica, as imagens acima referidas (figuras 2.41 a 2.43) geradas a partir de uma prospecção pseudo-3D no Castro de Crastoeiro (Mondim de Basto), apresentam a sequência de trabalho da análise de sobreposição. Primeiro, um grupo de mapas de amplitude sequenciais são analisados, seleccionando-se as imagens com reflexões de maior interesse arqueológico

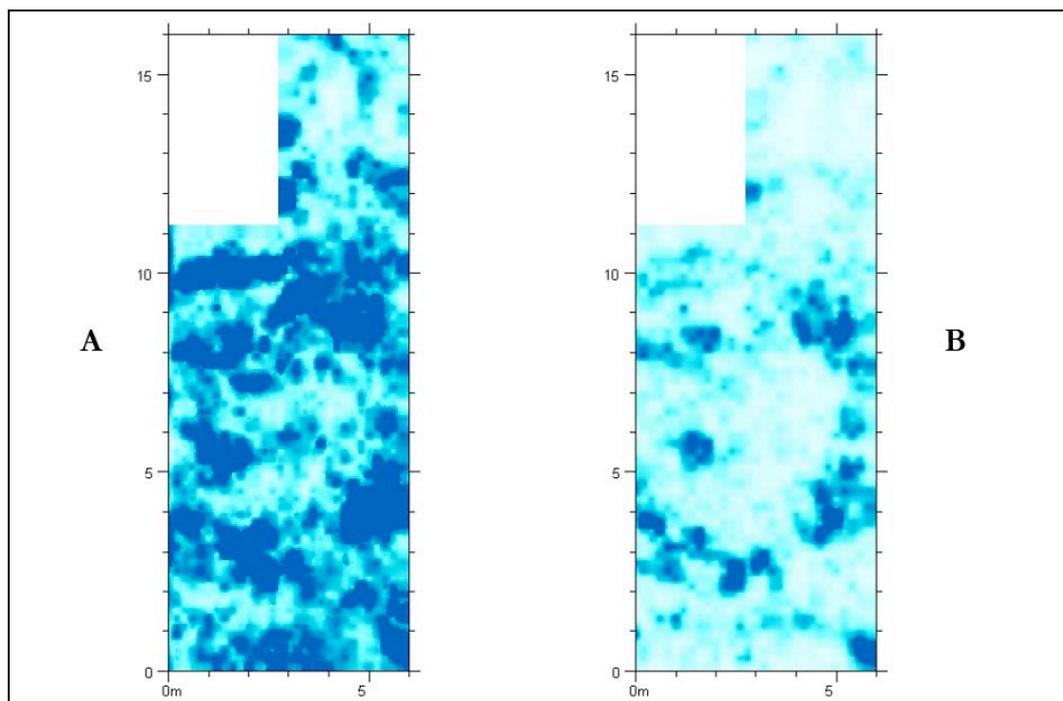
(figura 2.41). Posteriormente, o reflector mais forte a cada profundidade é adicionado à imagem, removendo-se as reflexões mais fracas (figura 2.42). Por último, todas essas reflexões mais fortes, são sobrepostas numa única imagem (figura 2.43).



**Figura 2.41** – Grupo de mapas de amplitudes consecutivos resultantes de uma prospecção pseudo-3D efectuada no Castro de Crastoeiro (Mondim de Basto). Apresenta-se também os mapas seleccionados para a realização da análise de sobreposição.



**Figura 2.42** – Grupo de mapas de amplitudes apresentando apenas as reflexões de amplitudes mais fortes, com a selecção dos mapas destinados à análise de sobreposição.



**Figura 2.43** – Mapa de amplitudes (A) resultante da análise de sobreposição das reflexões com amplitudes mais fortes dos mapas assinalados na figura 2.41. Observa-se que o mapa A apresenta, de uma forma mais nítida uma reflexão circular que na imagem B aparece bastante mais esbatida.

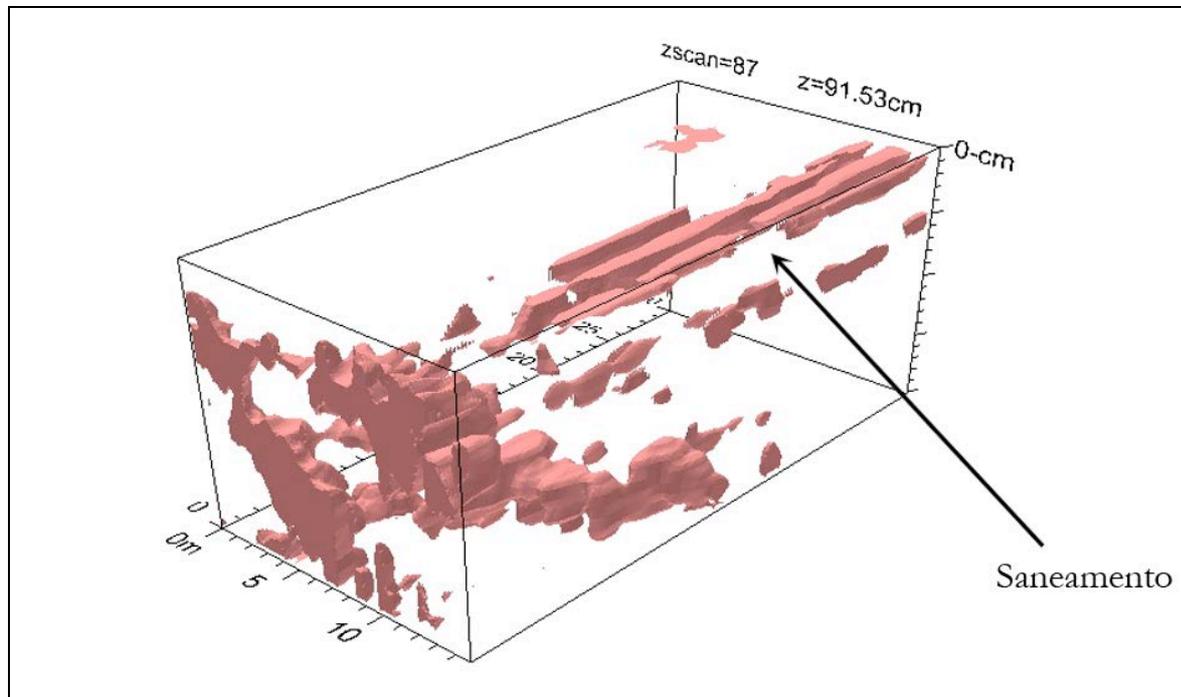
A utilização desta metodologia deverá no entanto, segundo Novo (2009), ser utilizada com cuidado de modo a evitar a geração de imagens irreais que possam levar à realização de interpretações erradas. É também necessário acautelar a possível ocultação de reflexões mais subtis que poderá ocorrer pela sobreposição das reflexões mais intensas. Por último, se a análise de sobreposição não for usada com algum cuidado, poderão produzir-se mapas demasiado confusos, de difícil ou impossível interpretação.

#### 2.6.4. Cálculo de isosuperfícies

Esta técnica de visualização consiste na apresentação de superfícies de igual amplitude num volume tridimensional, sendo o efeito 3D obtido através da aplicação de sombras conferindo deste modo um contraste visual às referidas superfícies. A aplicação desta técnica gera um conjunto de volumes que poderão representar as estruturas arqueológicas e/ou estratigráficas presentes no subsolo (ver figura 2.43).

Esta técnica de cálculo de isosuperfícies foi utilizada, pela primeira vez, em estudos arqueológicos por Goodman *et al.* (1998), tendo sido posteriormente empregue, com resultados notáveis por outros autores, nomeadamente por Leckbusch & Peikert (2001) e Nuzzo *et al.* (2002).

Actualmente autores como Novo (2009) consideram esta metodologia 3D como uma das mais eficazes na interpretação arqueológica de dados de GPR.



**Figura 2.43** – Bloco diagrama apresentando volumes de isosuperfícies resultantes de uma prospecção experimental com GPR realizada no interior do Campus de Gualtar da Universidade do Minho.

Para se obterem as isosuperfícies o software utilizado calcula o número máximo de superfícies dentro do volume 3D, apresentando posteriormente todas as superfícies com valor de amplitude entre 0 (reflector mais fraco) e o máximo valor de amplitude (reflector mais forte). No entanto, o intervalo de amplitudes apresentadas no volume é crucial para se poderem obter bons resultados na visualização das estruturas, de forma a se evitar uma saturação do volume. É comumente aceite por autores como Novo (2009) e Goodman (2011) a utilização de valores de amplitudes máximas filtrados a 60-70% da sua intensidade, no entanto, cada caso de estudo necessita de ser correctamente testado para se poderem obter os melhores resultados sem correr o risco de se sobressaturar a imagem ou, de se perder informação relevante.

Esta técnica de visualização apresenta grande potencial em termos de interpretação arqueológica, e futura apresentação dos resultados, porque adiciona uma dimensão volumétrica aos dados geofísicos. Embora algumas vezes a semelhança dos volumes gerados com as estruturas reais seja impressionante, deve salientar-se que o Georadar não é um aparelho de raios-X. As imagens geradas por meio desta técnica não são imagens de objectos reais, mas tão somente valores de

amplitudes. No entanto, esta metodologia facilita bastante a interpretação dos resultados e a apresentação dos mesmos a não especialistas.

#### **2.6.5. Correções estáticas**

Independentemente do tipo de processo de visualização 3D implementado, a correção da topografia e da inclinação da antena são imprescindíveis em sítios arqueológicos que apresentem topografia irregular. Esta metodologia visa, portanto, corrigir e introduzir a topografia nos volumes tridimensionais de dados do Georadar, aplicados obviamente nos casos em que tal seja necessário. A informação topográfica disponível permite elaborar um modelo digital do terreno que, de acordo com o software utilizado, poderá ser conjugado ao modelo 3D de dados de GPR. Para tal, o modelo digital deverá ter as mesmas dimensões que a grelha de dados de GPR, de modo a não ocorrerem erros de interpolação, e o levantamento topográfico que o originou deverá ser o mais preciso possível de modo a evitar interpolações erróneas nos espaços sem dados.

A partir do volume 3D corrigido topograficamente, é então possível proceder à execução de mapas de amplitudes e de volumes de isosuperfícies que apresentem as reflexões de radar na posição correcta.



Capítulo 3

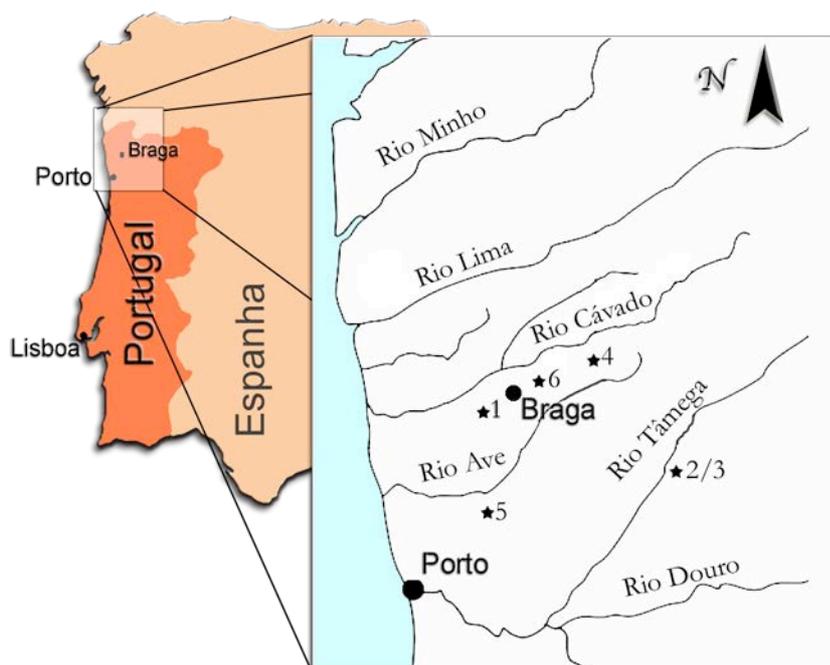
## **CASOS DE ESTUDO**



### 3.1. Enquadramento dos casos de estudo

#### 3.1.1. Introdução

Foram seis os estudos de prospecção geofísica aplicada à arqueologia realizados com o Georadar que serviram de base a este trabalho de dissertação (figura 3.1). Estes foram realizados em diversas estações arqueológicas do noroeste português em contextos cronológicos entre o Neolítico e o período romano a saber: povoado / necrópole do Pego (Braga); santuário rupestre de Campelo (Mondim de Basto); povoado do Crastoeiro (Mondim de Basto); dólmen da Tojeira (Póvoa de Lanhoso); castro do Monte do Padrão (Santo Tirso) e monumentos sob *tumuli* de Vale de Chãos (Braga). Diversos outros estudos foram realizados durante o decorrer deste projecto de tese, sendo aqui apresentados os mais relevantes e os que proporcionaram problemáticas ou desafios mais interessantes.



**Figura 3.1** – Localização das estações arqueológicas. 1) Povoado / necrópole do Pego. 2) Santuário Rupestre de Campelo. 3) Povoado do Crastoeiro. 4) Dólmen da Tojeira. 5) Castro do Monte do Padrão. 6) Monumentos sob *tumuli* de Vale de Chãos.

A apresentação dos casos de estudo obedece à ordem pelo qual os trabalhos de prospecção foram realizados. Para cada um deles, após a sua localização administrativa descrição

arqueológica e contextualização física, foram definidos os objectivos, as metodologias, os resultados e os limites da prospecção geofísica por Georadar.

### 3.1.2. A selecção dos casos de estudo

Nas últimas décadas a prospecção geofísica com Georadar tornou-se numa das metodologias mais utilizadas a nível mundial para o estudo de sítios arqueológicos, fornecendo informação importantíssima para a detecção e identificação de estruturas arqueológicas soterradas. Infelizmente, a sua utilização no nosso país não tem sido sistemática, tal como já foi referido no capítulo anterior, e quando se realizam, raras vezes os resultados são publicados ou discutidos entre pares e entre especialistas e arqueólogos, por forma a cruzar a informação e a aferir os resultados.

No que se refere à prospecção com Georadar aplicada a contextos da pré-história recente e da proto-história do noroeste peninsular, existe pouquíssima informação quer para o norte de Portugal quer para a Galiza, pelo que os casos seleccionados, abarcando diversidade cronológica e especificidades arqueológicas, pareceram um bom ponto de partida para estabelecer comparações em termos de resultados e limites sobre a aplicabilidade do método.

Normalmente a utilização do Georadar é aconselhada sempre que exista um grande contraste da permitividade relativa das estruturas arqueológicas e do solo ou substrato envolvente. Esse elevado contraste é observado quando estamos perante estruturas em pedra, tais como muralhas, fundações de edifícios, etc. Para este tipo de prospecção de estruturas pétreas, existe todo um acervo bibliográfico de casos de sucesso da aplicação do Georadar. Seria exaustivo descrever aqui a totalidade destes trabalhos, mas as publicações de Conyers (2004 e 2012), de Daniels (2004) e Goodman *et al.* (2009), aludem a muitos desses trabalhos.

No norte de Portugal pareceu pertinente estudar dois tipos de sítios com construções pétreas, embora diferentes entre si: os monumentos megalíticos do Neolítico, de que é exemplo o dólmen da Tojeira e os povoados da Idade do Ferro do Crastoeiro e do Monte do Padrão, embora este último tenha continuidade de ocupação para a época romana e medieval. Nestes contextos proto-históricos do noroeste ocorrem, frequentemente, as primeiras estruturas habitacionais pétreas, geralmente de planta circular, evoluindo estas para plantas ortogonais na transição para o mundo romano e para plantas rectangulares em plena romanização. Uma das características destes povoados da Idade do Ferro é a sua ampla diacronia, apresentando muitos fases diferentes de ocupação ou mesmo uma ocupação continuada. Estes locais são bastante mais complexos do ponto de vista da arqueogeofísica, e no que ao Georadar diz respeito, particularmente se o tipo

de diacronismo for muito amplo. Nestes contextos podemos encontrar sobreposições de estruturas de épocas distintas, por exemplo a sobreposição de edifícios romanos e/ou medievais a estruturas da Idade do Ferro. Por vezes, as estruturas pétreas da Idade do Ferro sobrepõem-se a estruturas em argila ou em negativo da própria Idade do Ferro ou da Idade do Bronze. Nestas situações poderá ser difícil a identificação das estruturas mais antigas ou, caso estas não estejam sobrepostas, mas ocorram lado a lado ou isoladamente, a metodologia empregada poderá não ser a mais adequada à identificação de um dos tipos de estruturas. Foi tendo em conta todas estas vicissitudes que se escolheram os casos de estudo do Crastoeiro e do Monte do Padrão.

As prospecções com Georadar de estruturas subtis ou construídas com materiais perecíveis são menos frequentes (Lück & Eisenreich, 1999; David *et al.*, 2004; Verdonck *et al.*, 2009) uma vez que são bastante mais difíceis de detectar, dado seu reduzido contraste de permitividade relativa com o meio envolvente, especialmente se forem de dimensões reduzidas. No entanto, existe um pequeno historial de êxitos na descoberta e identificação de estruturas arqueológicas enterradas em contextos similares aos conhecidos para a maioria das estações pré-históricas do noroeste Português, historial esse referido nos trabalhos de Conyers (2004), Whiting & Orvald (2004), Conyers & Osburn (2006), Weaver (2006), Goodman *et al.* (2009), Verdonck *et al.* (2009) entre outros. Estes trabalhos apresentam resultados notáveis na prospecção deste tipo de estruturas, embora não definam uma metodologia padrão de aquisição de dados, verificando-se que cada caso de estudo tem uma abordagem diferenciada.

Assim, torna-se imperativo escolher como casos de estudo algumas estações arqueológicas passíveis de terem este tipo de estruturas no noroeste de Portugal, tendo em vista a definição de metodologias adequadas a este contexto. A opção recaiu sobre: um povoado / necrópole da Idade do Bronze (o Pego); sobre uma área contígua a gravuras rupestres (Campelo) para determinar a existência de estruturas antrópicas as quais podem permitir a compreensão das actividades desenvolvidas em seu redor e sobre a área contígua a dois monumentos sob *tumuli* da Idade do Bronze mas onde se sabia existirem estruturas em negativo de época Neolítica (Vale de Chãos).

Os contextos de povoados da Idade do Bronze caracterizam-se, normalmente, pela ausência de estruturas pétreas (com algumas excepções de lareiras, alinhamentos, raras muralhas), sendo comuns estruturas construídas com materiais perecíveis e em negativo. Das primeiras podemos encontrar fundos de cabana em argila ou terra compactada, em positivo, e buracos de poste, em negativo. Por vezes estas estruturas associam-se a pequenos valados. Os buracos de poste também se podem encontrar em áreas de outras estruturas em negativo, como fossas, ou delimitando fossos, neste último caso, indiciando paliçadas. Em alguns povoados da Idade do

Bronze ocorrem necrópoles em sepulturas planas, de inumação, cortadas no subsolo, ou em fossa (Bettencourt, 2009).

A estação arqueológica do Pego é um excelente exemplo do paradigma dos sítios arqueológicos da Idade do Bronze do noroeste pois, como pode ser constatado no trabalho de Sampaio *et al.* (2008), nela podemos observar quase todo o tipo de estruturas que geralmente estão associadas a estações desta cronologia. Estas características tornavam esta estação num óptimo campo de estudo para a implementação de metodologias prospectivas com Georadar que pudessem ser, posteriormente, aplicadas a outros sítios arqueológicos da mesma cronologia.

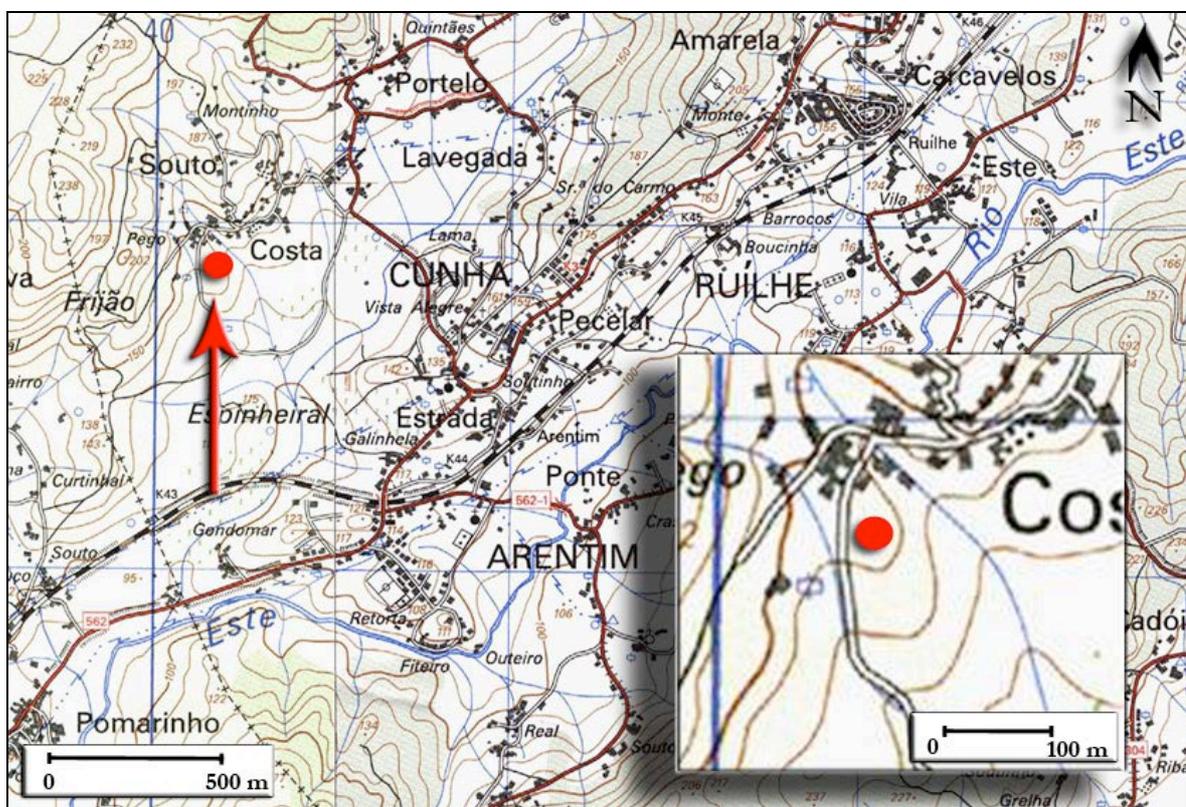
Em suma, os estudos aqui apresentados representam uma tentativa de definição de uma metodologia prospectiva que se adequa aos contextos arqueológicos do noroeste de Portugal, particularmente aos contextos da pré-história recente e da proto-história, bem como aos contextos arqueológico de elevado diacronismo.

### 3.2. Estação arqueológica do Pego

Descreve-se de seguida o trabalho de prospecção arqueogeofísica com Georadar na estação arqueológica do Pego. Este estudo iniciou-se em Setembro de 2007, prolongando-se por mais duas campanhas em Julho de 2008 e Junho de 2009, e realizou-se no âmbito de uma colaboração com o arqueólogo Hugo Aluai Sampaio, responsável pela escavação deste local no enquadramento do seu projecto de doutoramento intitulado “A Idade do Bronze no vale do Ave”.

#### 3.2.1. Enquadramento contextual arqueológico

A estação arqueológica do Pego situa-se no lugar do Souto, pertencente à freguesia de Cunha, concelho e distrito de Braga, nas coordenadas geográficas de  $41^{\circ} 29' 41''$  N de latitude,  $8^{\circ} 30' 10''$  W de longitude, e a 140/150 metros de altitude (figura 3.2).



**Figura 3.2** - Localização da estação arqueológica do Pego, assinalada com o ponto vermelho (extracto da Carta Militar 1:25000, folha 69, série M888, IGEOE, 1997).

Os primeiros vestígios arqueológicos foram identificadas, no início da década de 2000 no contexto de trabalhos de acompanhamento arqueológico para a REFER (Rede Ferroviária Nacional, E.P.), realizados pelo arqueólogo Rui Barbosa, da empresa *Palimpsesto*, durante a fase de remodelação do ramal de Braga da linha do Minho (Sampaio *et al.*, 2008).

As primeiras sondagens arqueológicas de avaliação decorreram em Outubro de 2003 e tiveram por principal objectivo a identificação do perímetro do recinto arqueológico. A escavação foi executada pela empresa de arqueologia *Archeo'Estudos, Investigação Arqueológica Lda.*, sob a direcção científica da arqueóloga Sandra Salazar Ralha (2004), tendo a consultadoria científica estado a cargo da Professora Ana M. S. Bettencourt. Esses trabalhos permitiram definir, aproximadamente, a área a preservar, tendo para tal sido abertos 4 sectores (I, II, III e IV) em diferentes locais da colina. As escavações realizadas nos sectores III e IV (plataformas baixas a sudeste e a este-sudeste da colina, respectivamente) permitiram evidenciar materiais descontextualizados que seriam resultantes de escorrimentos das plataformas superiores. As escavações realizadas no sector II (início da vertente sul), nas quais foram abertos cerca de 20 m<sup>2</sup>, evidenciaram várias estruturas em negativo.

Entre os anos de 2004 e 2009 a estação arqueológica sofreu várias intervenções, incidindo estas nos sectores II (início da vertente sul) e V (plataforma superior), tendo sido escavados, até Julho de 2009, cerca de 600 m<sup>2</sup>, primeiro por Ana M. S. Bettencourt e, posteriormente, por Hugo Sampaio, em diversos projectos de investigação.

A presença humana no local remonta, indiscutivelmente, à Idade do Bronze Médio, embora o local tenha sido frequentado durante o Bronze Final, até mais precisamente, ao período entre os inícios do século VIII e meados do século VI a. C. Este enquadramento cronológico foi obtido por meio de datações por radiocarbono, estando em concordância com o acervo cerâmico resgatado da estação (Sampaio & Bettencourt, 2011). Foi ainda possível identificar, embora de forma pouco significativa, vestígios relativos a contextos, provavelmente, da Idade Moderna (Sampaio *et al.*, 2008).

Nas escavações sobressai a quase inexistência de níveis de ocupação/abandono da Idade do Bronze, ausência esta que poderá ser explicada pela erosão ocorrida após o abandono do sítio arqueológico. Com algumas excepções, identificam-se, quase só, estruturas em negativo, escavadas no granito meteorizado (saibro granítico). As várias campanhas de escavação expuseram a vala de fundação de uma paliçada (figura 3.3b) que circunscrevia todo o povoado que ocuparia uma área superior a 1000 m<sup>2</sup>. No interior desta estrutura, foram encontrados vários recipientes cerâmicos (figura 3.4), bem como fragmentos de diversos moldes de machados de

talão o que atesta a manufactura de objectos em bronze neste local (Sampaio *et al.*, 2008; Sampaio & Bettencourt, 2011).



**Figura 3.3** – a) Área de valados, buracos de poste e fossas (fotografia de Ana M. S. Bettencourt). b) Aspecto, no sector V, da vala de fundação de uma paliçada que circunscreve todo o recinto. c) Pormenor da escavação, em Junho de 2006, da vala de fundação e zona norte do sector V.

No interior do recinto circunscrito pela vala de fundação da paliçada, foram escavadas outros tipos de estruturas, que segundo Sampaio *et al.* (2008) evidenciam uma organização interna deste local em áreas especializadas, mais precisamente, uma necrópole na vertente sul da colina e uma possível zona residencial ou destinada a diversas actividades quotidianas, na plataforma superior. Nesta, designada por sector V, foram identificadas várias estruturas em negativo, nomeadamente diversos valados, de pequena dimensão, vários buracos de poste e cerca de duas dezenas de fossas (figura 3.3a).

Os valados e os buracos de poste indiciam fundações de estruturas em madeira e ramos, entre outros materiais perecíveis, possivelmente de uma cabana. As fossas, abertas no saibro e, por vezes, na camada de ocupação, apresentam diversas formas, profundidades e alçados. Algumas delas, pela forma fechada na parte superior, profundidade superior a 1 m e vestígios de argila no

seu revestimento foram interpretadas por Sampaio *et al.* (2008), de acordo com as características definidas por Buxó (1997), como estruturas de armazenamento ou fossas-silo.



**Figura 3.4** – a) Molde de machado de talão. b), e) e g) Alguns exemplares de vasos encontrados na vala de fundação. c), d) e f) Vasos encontrados em diversas sepulturas planas existentes no Pego (fotografias do Museu D. Diogo de Sousa).

No sector II, ocupando parte da vertente sul e sudoeste da colina, ocorrem diversas sepulturas formando uma necrópole (figura 3.5). Foram identificadas doze sepulturas planas, orientadas de nordeste para sudoeste, abertas no saibro granítico e apresentando diversas dimensões e contornos (entre o sub-rectangular e o trapezoidal). O enchimento destas sepulturas é feito, essencialmente, com o saibro granítico resultante da sua escavação, tornando-as difíceis de distinguir do meio onde estão escavadas, distinção apenas possível por apresentarem uma heterogeneidade distinta do saibro original e uma coloração mais acastanhada, provavelmente resultante da desintegração dos corpos aí depositados (Sampaio *et al.*, 2008). Em quase todas as sepulturas foram encontrados vasos cerâmicos de largo bordo horizontal (forma 13a de Bettencourt, 1999).



**Figura 3.5** – a) Aspecto da necrópole, localizada no sector II (fotografia de Ana M. S. Bettencourt); b) pormenor de uma sepultura, observando-se a presença de um vaso numa das suas extremidades.

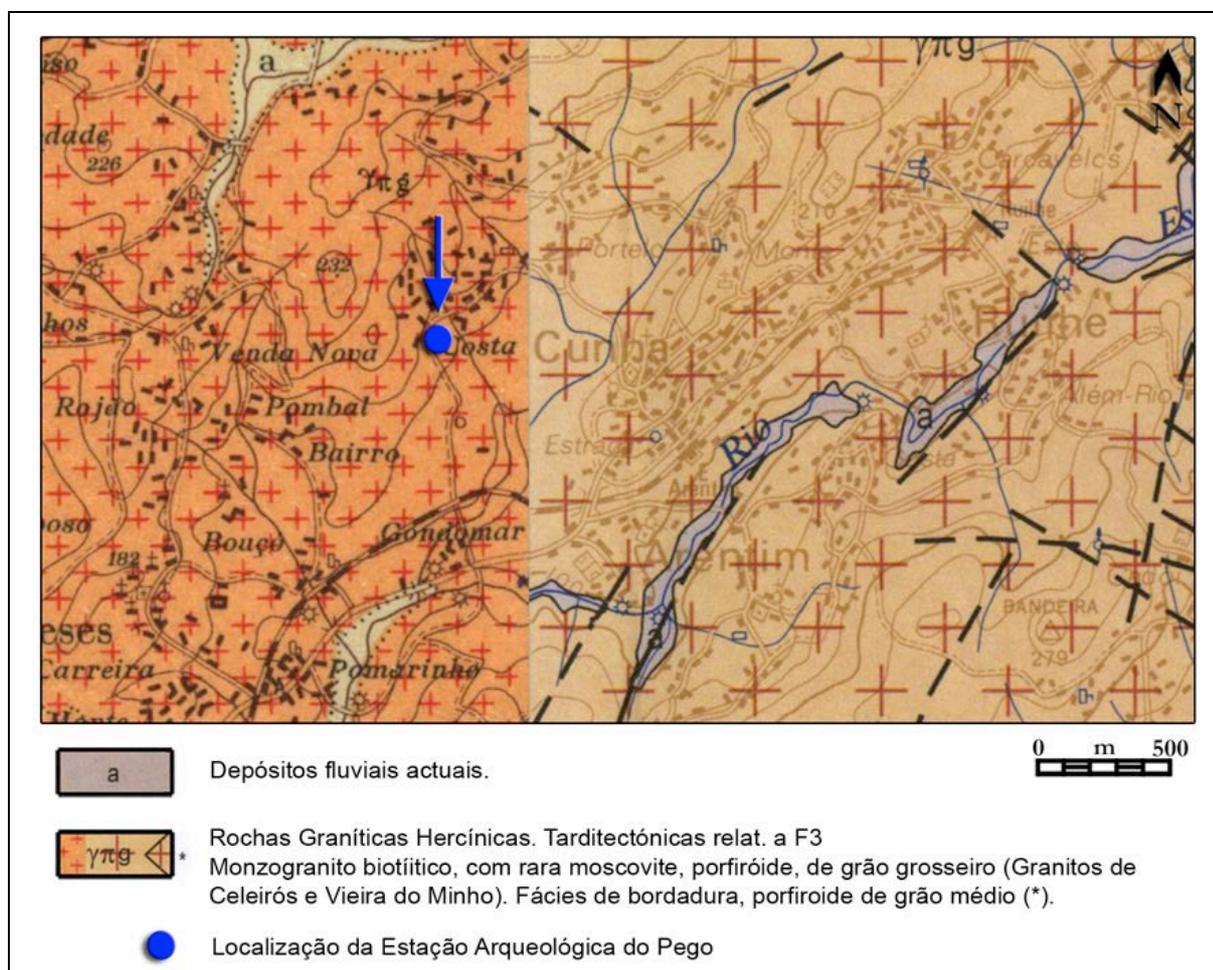
### 3.2.2. Contexto geológico e geomorfológico

O substrato rochoso da estação arqueológica do Pego é constituído por granitóides hercínicos, tarditectónicos, relativamente a F3, do Complexo Granítico de Celeirós (figura 3.6), mais precisamente por monzogranitos biotíticos, com rara moscovite, porfiróides, de grão grosseiro (Granitos de Celeirós – Pereira *et al.*, 1992). Este granito é aflorante, na estação do Pego, apresentando-se muito meteorizado à superfície, por vezes arenizado (saibro), observando-se pontualmente a presença de bolas residuais de granito não alterado. É no granito meteorizado que se encontram a maioria das estruturas em negativo identificadas durante as campanhas arqueológicas.

Observando o enquadramento geológico da estação na região, verificamos que esta se encontra numa zona central tendo em consideração o acesso a determinados recursos minerais. A identificação de diversos moldes de fundição em argila, referidos por Sampaio *et al.* (2008) e Sampaio & Bettencourt (2011), atestam que neste local se manufacturam de objectos em bronze.

A produção de bronze implica a utilização de estanho e cobre como matérias primas. Analisando as cartas geológicas 1:50.000 da região, nomeadamente as cartas 5C de Barcelos (Teixeira & Medeiros, 1969), 5D de Braga (Ferreira *et al.*, 2000), 9A da Póvoa de Varzim (Teixeira & Medeiros, 1965) e 9B de Guimarães (Andrade & Noronha, 1986), verifica-se que as populações deste local tinham à sua disposição, num raio de 15 km, várias fontes de matéria prima onde teria

seja possível a extracção do estanho. Destacam-se as mineralizações de estanho (essencialmente cassiterite) das imediações do Monte das Pedras Negras (concelho de Famalicão), associadas a filões de quartzo, localizadas a cerca de 10 km a sudoeste do Pego e consideradas por Sampaio e Bettencourt (2011) como as de exploração mais acessível dada a facilidade de acesso pelos corredores naturais formados pelos vales; da freguesia de Faria (concelho de Barcelos), em depósitos aluvionares quaternários, localizadas a cerca de 12 km a oeste do Povoado; da freguesia de Adaúfe (concelho de Braga), a cerca de 13 km a leste associadas a uma zona de cizalhamento e as mineralizações de Cabreiros e Mire de Tibães (concelho de Braga), localizadas a 6-7 km do Pego, associadas a filões aplíticos e pegmatíticos.



**Figura 3.6** – Enquadramento geológico do Povoado do Pego (extracto das Cartas Geológicas, 1:50000, 5C de Barcelos, 1969 e 5D de Braga – 2ª edição, 2000).

A existência de mineralizações de cobre é desconhecida na região, tal como se pode constatar na cartografia geológica disponível (referida anteriormente). O cobre chegava ao Pego, muito provavelmente, por intercâmbio supra-regional vindo de zonas mais distantes. A observação

atenta da localização do povoado permite verificar que este se encontra numa posição estratégica, próximo do rio Este e junto ao interflúvio que separa a sua bacia hidrográfica da bacia do rio Cávado, locais de passagem que ligam o interior ao litoral. Foi através destes corredores que poderá ter sido efectuado o transporte do cobre, provavelmente de locais como a região de Jales, em Vila Pouca de Aguiar, ou da região de Oliveira de Azeméis (filão metalífero das Beiras).

Do ponto de vista geomorfológico verifica-se que o povoado do Pego ocupa uma pequena colina sobranceira ao vale do ribeiro da Levegada, afluente do rio Este, integrado na bacia do Ave. Este é um vale com orientação NE-SW, de fundo plano e largo e altitude média entre os 110 m e os 140 m, encontrando-se delimitado por um conjunto de relevos residuais graníticos, apresentando altitudes que variam entre 210 m e os 270 m.

A colina onde se situa o povoado do Pego, corresponde a um esporão aplanado, limitado por dois cursos de água, localizado na encosta voltada a nascente de um relevo residual, na margem direita do sector jusante do ribeiro da Levegada. O povoado encontra-se entre os 140 m e os 150 m de altitude, sendo possível a partir deste ponto observar quase todo o vale do ribeiro, localizado 30 m abaixo, bem como parte do vale do rio Este. A elevação onde se situa o povoado, faz parte de um relevo que atinge uma altitude de 220 m a 240 m na linha de fecho, demarcando esta a portela para a bacia hidrográfica do rio Cávado.

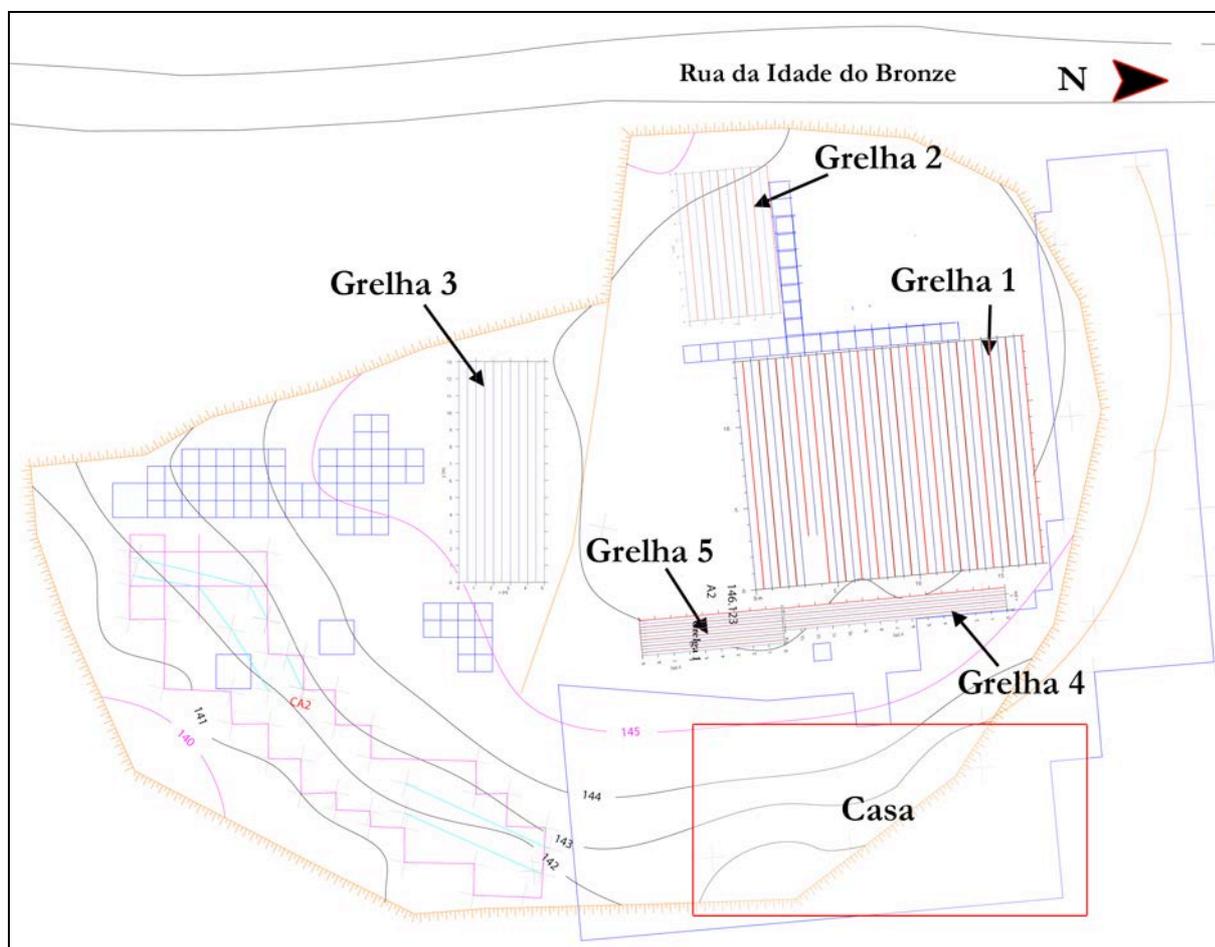
### 3.2.3. Aquisição dos dados

Desde a primeira campanha que a prospecção geofísica visava dois objectivos fundamentais: a detecção de estruturas arqueológicas em negativo e a definição da estratigrafia do local. Estes consistiam basicamente na obtenção de informação acerca da localização, profundidade e dimensões de potenciais estruturas arqueológicas, com o intuito de providenciar dados interpretáveis aos arqueólogos que permitissem a identificação das estruturas presentes nas áreas ainda não intervencionadas, tendo em vista o direccionamento das campanhas de escavação a áreas com maior potencial arqueológico. No entanto, um conjunto mais vasto de pertinentes questões foram surgindo com a preparação da primeira campanha de prospecção, nomeadamente: qual a metodologia a implementar; qual a direcção mais indicada para a aquisição dos perfis de radar; qual a densidade de aquisição; que antena utilizar; quais as definições de aquisição de dados a introduzir na unidade de controlo.

Estas questões enquadram-se no contexto de um conjunto mais vasto de objectivos, discutidos anteriormente, mas no caso da estação arqueológica do Pego as suas soluções pretendem resolver

uma questão mais premente: qual a metodologia mais adequada à prospecção de estações arqueológicas desta cronologia e com este tipo de estruturas.

Para a concretização das campanhas de prospecção na estação arqueológica do Pego foi necessário, primeiramente, proceder à escolha das áreas a estudar, tendo sido definidas três áreas de prospecção (figura 3.7): uma localizada no sector II, correspondente à zona da necrópole (grelha 3) (figura 3.8); as outras duas localizadas no sector V, na presumível zona habitacional (grelhas 1, 2, 4 e 5) (figuras 3.9 e 3.10). Estas áreas foram escolhidas tendo em consideração a potencialidade arqueológica dos locais, a morfologia do terreno (tratam-se de áreas planas) e a ausência de obstáculos.



**Figura 3.7** – Localização das grelhas de prospecção no interior da estação arqueológica do Pego. (base topográfica da Câmara Municipal de Braga)

Seguidamente, tornou-se necessário definir a metodologia de prospecção a aplicar no local. A escolha da metodologia adequada, como referido anteriormente no capítulo 2, é crucial para o sucesso da prospecção. Para essa escolha foi considerada toda a informação relevante da estação

arqueológica a estudar, nomeadamente o facto da existência de estruturas arqueológicas subtis e de difícil detecção. Não existindo trabalhos anteriores com Georadar em sítios arqueológicos desta cronologia e tipologia que permitissem auxiliar na definição de uma metodologia prospectiva, recorreu-se às metodologias expressas nos trabalhos de Conyers & Cameron (1998), Conyers (2004, 2006), Conyers & Osburn (2006), Ernenwein (2006), Grealty (2006) e Weaver (2006), efectuados em estações arqueológicas com estruturas similares. Para a definição metodológica foram também importantes as orientações do Professor Lawrence Conyers durante o curso “GPR Class for Archaeological Mapping” que o autor desta tese frequentou em Maio de 2007, na Universidade de Denver (Colorado, EUA).



**Figura 3.8** – Aspecto da área da necrópole, localizada no sector II, onde se implementou a grelha 3 de prospecção com Georadar.

Para a primeira campanha de prospecção, a abordagem inicial consistiu na escolha da antena a utilizar. Com este propósito realizaram-se alguns testes no terreno com as antenas 200 MHz e 400 MHz. Optou-se pela antena de 400 MHz para a realização da prospecção por esta ser a mais adequada a este tipo de estudo, visto ser possível obter um bom compromisso entre a profundidade de penetração do sinal e a sua resolução, possibilitando uma boa definição das potenciais estruturas arqueológicas soterradas.



**Figura 3.9** - Aspecto da área do sector V, visto de sul, onde se implementou a grelha 2 de prospecção com Georadar.



**Figura 3.10** – Aspecto da área do sector V, visto de noroeste, onde se implementou a grelha 1 de prospecção com Georadar. Ao fundo, junto à casa localiza-se a área de implantação das grelhas 4 e 5.

Posteriormente, e em cada uma das três áreas selecionadas, escolheu-se o método de prospecção em área, com a definição de três grelhas ortogonais pseudo 3D, uma em cada área, as quais passaremos a designar de grelha 1, 2 e 3. As duas primeiras grelhas localizaram-se no sector V da estação e a grelha 3, no sector II. A prospecção pseudo 3D em cada uma das referidas grelhas foi composta por perfis de radar paralelos entre si, espaçados de 50 cm, adquiridos numa direcção (y), em zig-zag, e no modo *survey wheel*, seguindo o esquema apresentado na figura 3.7. No total foram prospectados cerca de 420 m<sup>2</sup> de terreno distribuídos da seguinte forma: 252 m<sup>2</sup> na grelha 1, com um total de 36 perfis correspondentes a cerca de 500 m de prospecção; 54 m<sup>2</sup> na grelha 2, com um total de 14 perfis correspondentes a 126 m de prospecção e 84 m<sup>2</sup> na grelha 3, com um total de 12 perfis correspondentes a cerca de 170 m de prospecção. Para cada prospecção definiram-se os seguintes parâmetros para a aquisição dos dados: 50 traços de reflexão por metro; 512 amostras por traço; janela de aquisição de 40 ns para a grelha 2 e 3 e de 80 ns para a grelha 1.

A segunda campanha de prospecção, decorrida em Julho de 2008, seguiu-se à participação na conferência GPR2008 (12<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar), decorrida em Birmingham, Reino Unido, em Junho de 2008. Durante este encontro científico, onde foram apresentados os resultados da primeira campanha de prospecção (Gonçalves *et al.*, 2008), foi possível verificar que, a partir de uma abordagem diferente a nível da aquisição e do processamento dos dados, seria possível melhorar as imagens obtidas a partir da prospecção, como posteriormente se discutirá.

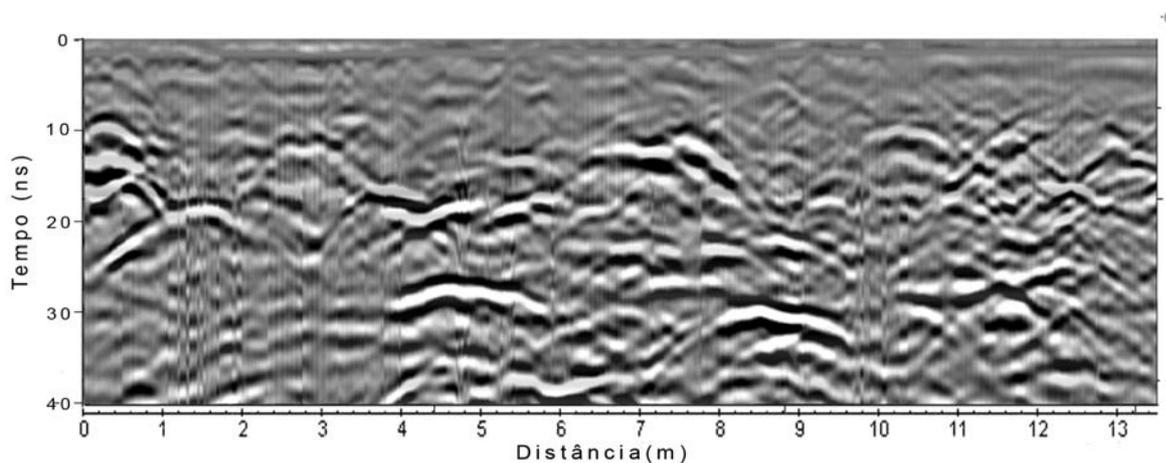
Nesta segunda campanha, foram prospectadas duas áreas localizadas no sector V, onde se definiram duas grelhas pseudo-3D (grelhas 4 e 5). Com base nas discussões científicas e nos trabalhos apresentados em Birmingham, particularmente o trabalho de Novo *et al.* (2008), a prospecção realizou-se com espaçamento de 20 cm entre perfis, em zig-zag, no modo de *survey-wheel*. Os parâmetros de aquisição foram iguais aos utilizados na primeira campanha para as grelhas 2 e 3.

Na terceira campanha, decorrida em Junho de 2009, voltou-se a prospectar a área da grelha 2 com uma nova abordagem. Alguns autores como Novo (2009) sugerem que apenas a utilização de grelhas ultra densas, ou verdadeiro 3D, possibilitam uma verdadeira imagem do subsolo prospectado. Nesta campanha, e de modo a verificar o proposto por este autor num contexto substancialmente diferente (os trabalhos de Novo incidiram sobre estações do mundo Romano), aplicou-se a metodologia das grelhas ultra densas na zona da grelha 2. Nesta prospecção, o espaçamento entre perfis foi reduzido para 5 cm, de modo a se adequar ao teorema de amostragem espacial de Nyquist, e a sua aquisição foi realizada sempre na mesma direcção, com

1024 amostras por traço, mantendo-se os restantes parâmetros inalterados. No total foram adquiridos 75 perfis, correspondendo a aproximadamente 670 m de prospecção.

### 3.2.4. Resultados e interpretações

As prospecções atrás descritas geraram um vasto conjunto de dados que, grelha a grelha, foram processados de forma a gerar imagens interpretáveis das potenciais estruturas arqueológicas presentes no local. Uma primeira observação dos radargramas em bruto (i.e., sem processamento), de todas as campanhas, evidenciou uma boa penetração de sinal e uma grande diversidade de reflectores (figura 3.11).



**Figura 3.11** – Aspecto de um radargrama em bruto da grelha 3, onde é possível observar uma grande diversidade de reflectores.

A velocidade de penetração do sinal de radar foi determinada por métodos directos, a partir de um reflector localizado a profundidade conhecida, e pelo método de ajuste de hipérbolas, tendo-se obtido uma velocidade de 0,12 a 0,14 m/ns. Este intervalo de velocidades, consideravelmente elevado, foi constante ao longo das três campanhas de prospecção, sendo explicado pelas condições geológicas do terreno e pela data de aquisição dos dados. Como referido, o subsolo do sítio arqueológico do Pego é constituído, essencialmente, por solos e coluviões graníticos e por granito meteorizado (saibro). As campanhas de prospecção coincidiram sempre com um período de estiagem grande, quase sempre superior a um mês, encontrando-se o terreno consideravelmente seco. Desta forma, os intervalos de velocidades de propagação das ondas de radar enquadram-se dentro dos apresentados na tabela 2.1 para este tipo de materiais.

O processamento dos dados da primeira campanha foi efectuado, numa primeira fase, com o programa ReflexW, tendo sido adoptado o seguinte fluxo de processamento: correcção do tempo

zero; *demon*; filtro *band-pass*; remoção do *background*; *subtract mean*. Numa segunda fase, todos os radargramas foram sujeitos a filtros de frequência com três intervalos distintos: frequências baixas (200-350 MHz); médias (500-650 MHz) e altas (650-800 MHz). Posteriormente, os dados foram processados com o programa GPR-process, tendo sido gerados volumes de dados pseudo 3D, através de interpolação do valor de amplitudes entre perfis num raio de 50 cm, pelo método *kriging*. Os volumes pseudo 3D foram seguidamente seccionados para geração de mapas de amplitudes, a intervalos de 2 ns de profundidade, e espessura de 24 cm com 50% de sobreposição.

O principal objectivo da prospecção realizada, como referido, foi o de detectar e cartografar reflexões do sinal de radar que pudessem indiciar a presença de estruturas arqueológicas similares às encontradas nas escavações arqueológicas precedentes atrás descritas.

A análise inicial da informação adquirida (radargramas e mapas de amplitudes gerados), embora apresentasse reflexões de interesse, mostrou-se particularmente difícil de concretizar. Este facto deveu-se às características dos vestígios arqueológicos e à inexistência de prospecções com Georadar em estações arqueológicas destas cronologias que pudessem ser utilizadas como termo de comparação, tal como já referido no ponto 3.2.3 deste trabalho.

A aplicação de filtros de frequência, em três intervalos distintos, foi utilizada para tentar identificar estruturas de pequena dimensão, que só conseguem ser detectadas a frequências mais altas, e que poderiam ser obscurecidas por reflexões de ondas de mais baixa frequência. Os mapas de amplitudes gerados a partir destes dados mostraram que os mapas resultantes da informação filtrada a frequências baixas (200-350 MHz) são praticamente iguais aos mapas gerados a partir dos dados não filtrados. Os mapas gerados a partir dos filtros de frequência média (500-650 MHz) mostraram-se similares aos gerados a partir dos filtros de frequência alta.

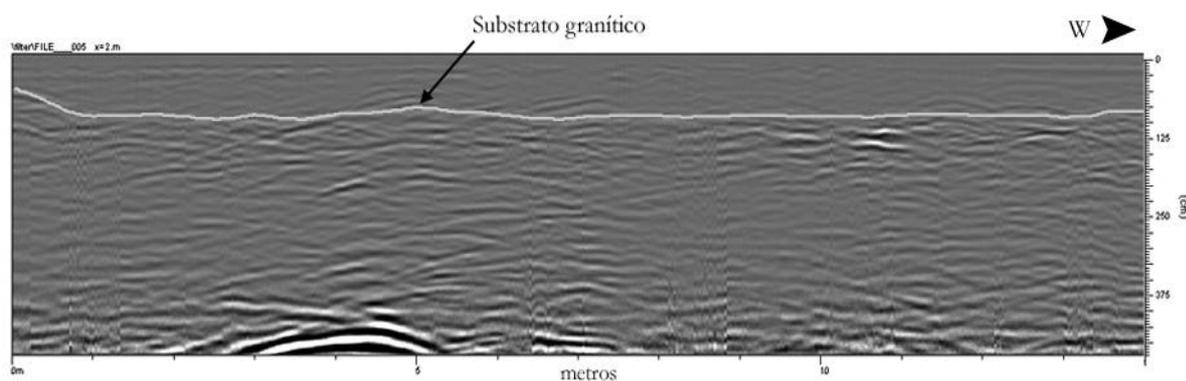
Numa fase posterior à realização destas campanhas, e tendo já como ferramenta de trabalho o programa GPR-Slice, procedeu-se ao reprocessamento de todos os dados seguindo o mesmo fluxo de trabalho. A análise dos resultados mostrou que, no que à geração dos mapas de amplitude diz respeito, não existem diferenças de nota, face aos mapas obtidos anteriormente. A vantagem significativa da utilização deste software prende-se com a velocidade do processamento e, essencialmente, com o facto de ser possível com um único programa realizar em poucas horas o que antes poderia demorar dias a processar com três programas distintos.

A utilização do GPR-slice permitiu também ir um pouco mais além no processamento e visualização dos dados, o que reforçou as interpretações já realizadas, ajudando também a criar imagens que apresentam de uma forma mais compreensiva as reflexões das prováveis estruturas

arqueológicas. Para tal utilizaram-se algumas das ferramentas disponíveis neste programa, nomeadamente o módulo de análise de sobreposição e o módulo de visualização 3D, que permite criar volumes de isosuperfícies e a integração de imagens 3D com imagens 2D (mapas de amplitudes e radargramas).

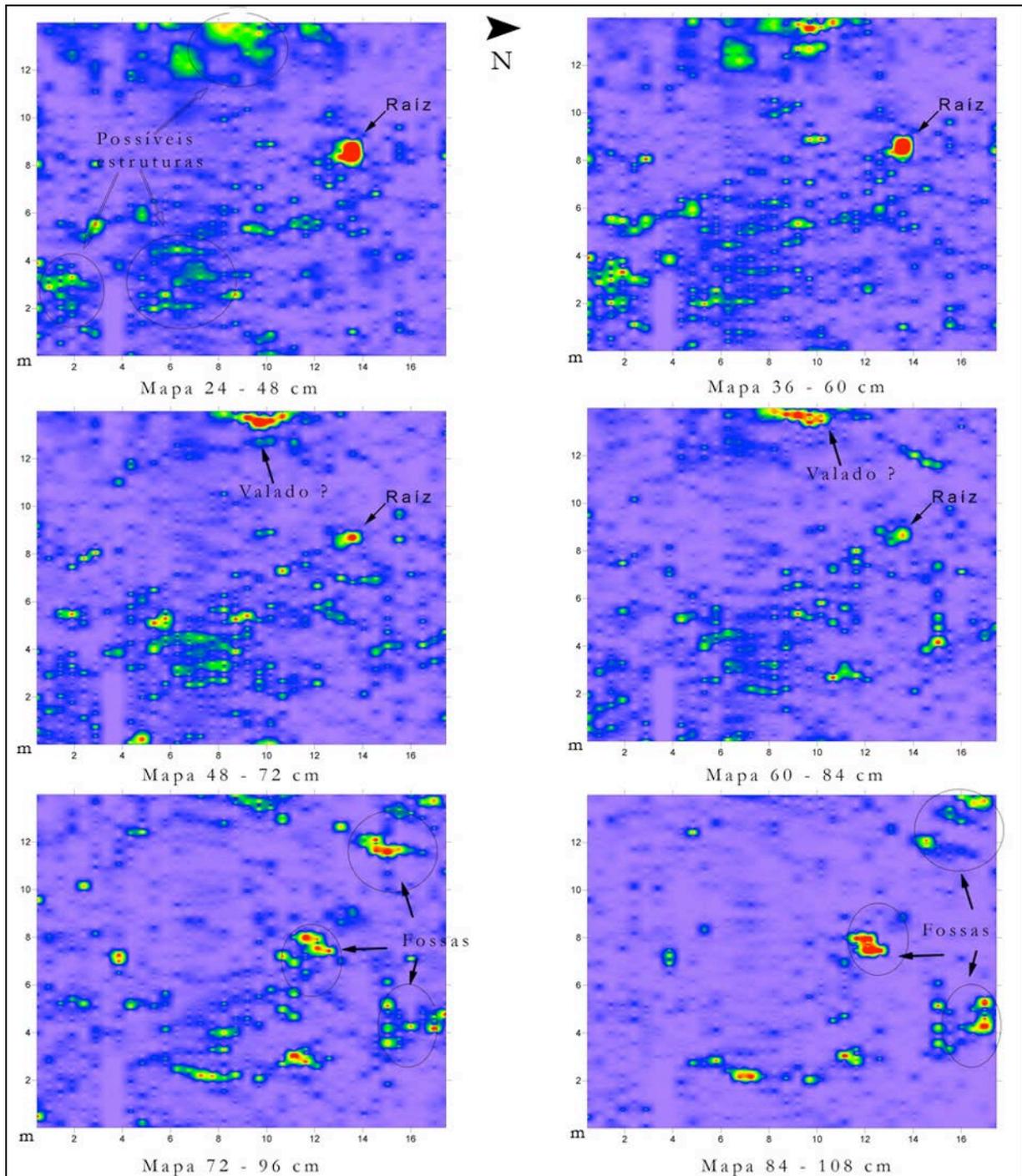
### Grelha 1

A análise inicial dos radargramas (figura 3.12), após determinação da velocidade das ondas de radar, permitiu verificar que a profundidade do substrato granítico varia entre os 20 cm e os 1,5 m. Esta é uma informação importante, uma vez que as características deste sítio arqueológico nos indicam que os vestígios antrópicos correspondem essencialmente a estruturas em negativo, escavadas no granito meteorizado, não sendo previsível encontrar qualquer tipo de estrutura nos materiais sobrejacentes.



**Figura 3.12** – Pormenor de um radargrama da grelha 1, onde foi identificada a posição do substrato granítico.

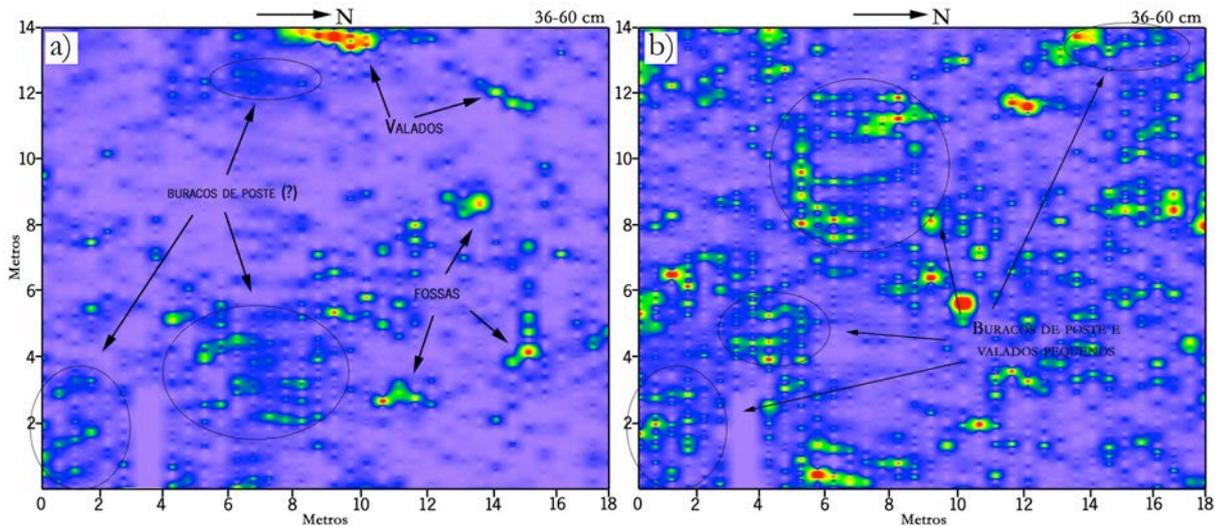
Da observação dos mapas de amplitudes (figura 3.13), gerados a partir dos volumes pseudo 3D da primeira fase de processamento, constata-se a presença de diversas reflexões observáveis a diferentes profundidades. Apesar da dificuldade de interpretação, dada a inexistência de padrões facilmente reconhecíveis, foi possível interpretar algumas reflexões lineares como pertencentes a possíveis valados. Estes encontram-se essencialmente em níveis mais superficiais, desde os 24 aos 84 cm de profundidade. Também se interpretou a presença de possíveis fossas, associadas a reflexões cuja forma (diâmetro e profundidade) são consistentes com este tipo de estruturas. Algumas das reflexões mais pequenas, presentes nos mapas de amplitudes mais superficiais, são interpretadas como podendo corresponder a buracos de poste.



**Figura 3.13** – Sequência de mapas de amplitude para diversas profundidades, onde se identificou a presença de reflexões possivelmente pertencentes a buracos de poste, valados e fossas. De referir que, as reflexões associadas a possíveis fossas vão sendo observadas a profundidades diferentes, na mesma posição, o que é concordante com a geometria deste tipo de estruturas.

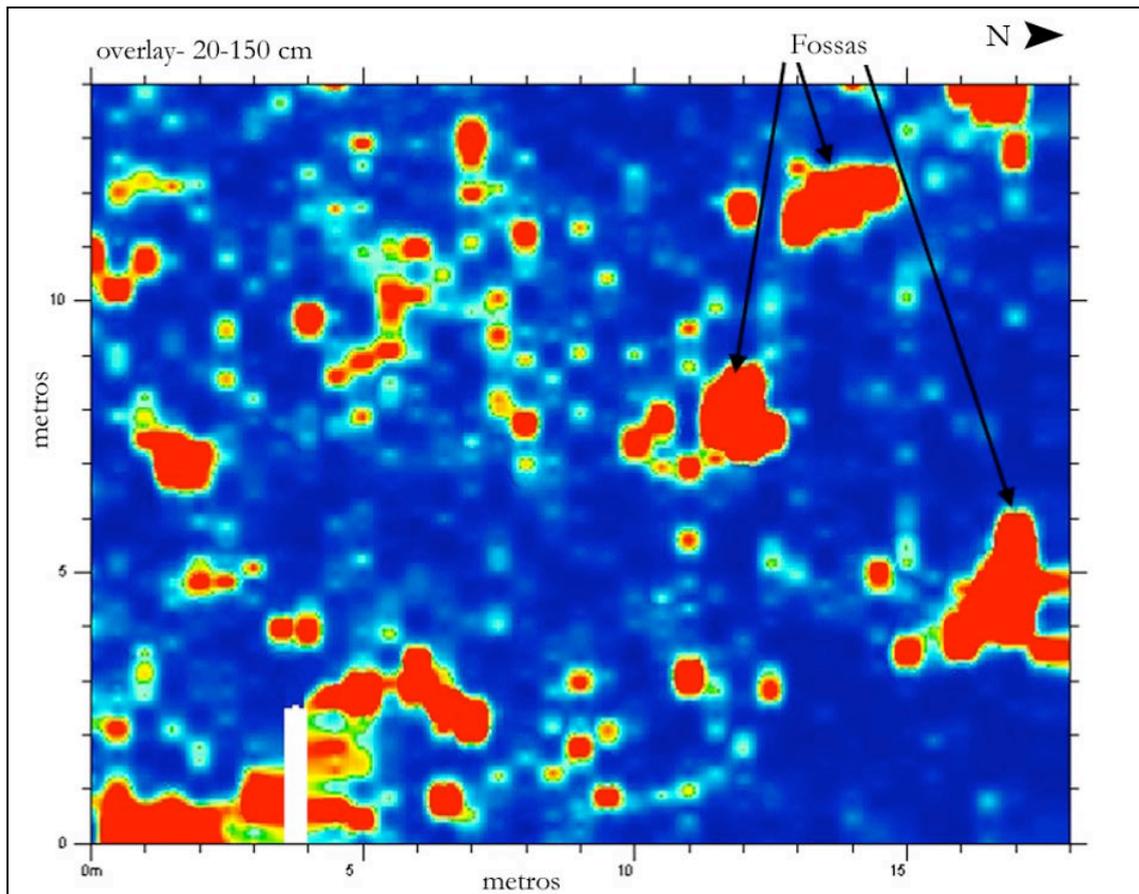
Para esta grelha, os mapas de amplitudes gerados a partir dos volumes de dados filtrados a intervalos de frequência mais altas (500-650 e 650-800 MHz) evidenciaram algumas diferenças fundamentais relativamente aos dados anteriores. Estas diferenças advêm de as reflexões maior amplitude de onda, associadas às frequências mais baixas, terem sido filtradas, observando-se

apenas as reflexões de amplitude mais baixa, o que possibilita a resolução de estruturas de menores dimensões. Nestes mapas foram identificados diversos padrões de reflexão (figura 3.14), consistentes com a presença de pequenos valados e de buracos de poste, que não haviam sido observados nos mapas anteriores.

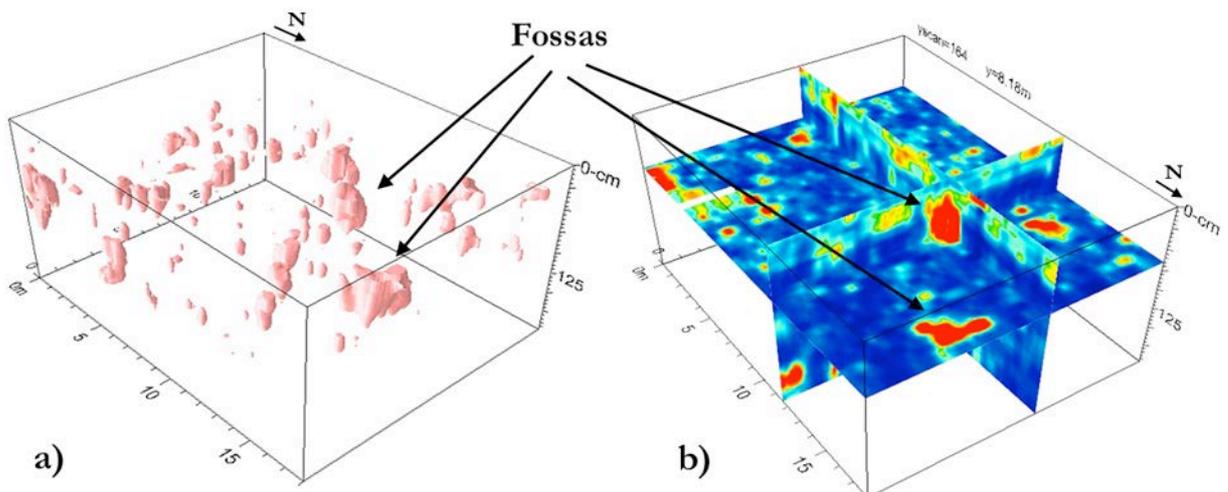


**Figura 3.14** – a) Mapa de amplitude para profundidade de 36-60 cm, onde se identificou a presença de reflexões possivelmente pertencentes a buracos de poste, valados e fossas ~~site~~. b) Mapa de amplitude para a mesma profundidade, elaborado a partir dos dados processados com filtro de frequências (500-650 MHz). Neste mapa evidenciam-se diferenças fundamentais relativamente ao anterior, sendo observáveis reflexões de possíveis pequenos valados e buracos de poste.

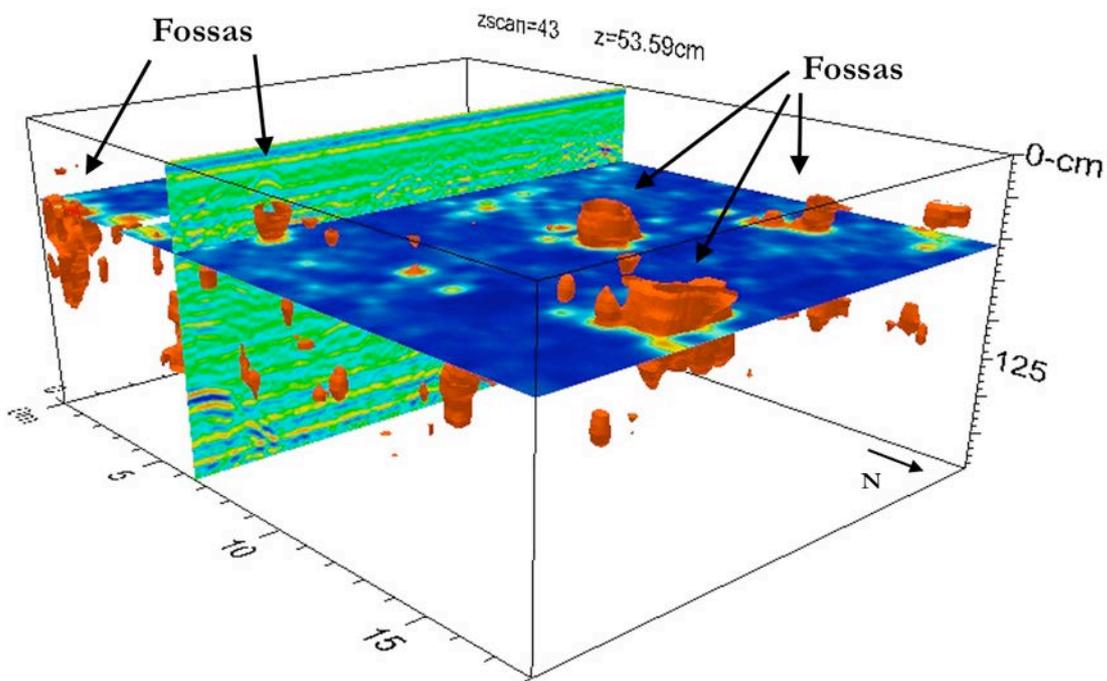
O reprocessamento dos dados com o GPR-slice, permitiu reforçar as interpretações anteriores, particularmente com a geração de mapas de amplitudes criados pelo módulo da análise de sobreposição (figura 3.15). Estes mapas, como referido no capítulo 2, resultam da sobreposição de reflexões mais fortes presentes a diferentes profundidades, no caso da grelha 1, a imagem gerada apresenta de uma forma nítida reflexões que, pela geometria e posição, são interpretadas como pertencendo a fossas, reforçando as interpretações anteriores. O recurso a este programa permitiu também gerar um modelo tridimensional dos dados apresentando as reflexões mais importantes sobre a forma de isosuperfícies (figura 3.16). Para além deste tratamento, foi possível gerar imagens integradas dos modelos tridimensionais de isosuperfícies, com os mapas de amplitudes e os radargramas (figura 3.17), o que possibilita uma visualização espacial dos dados permitindo uma mais fácil interpretação e visualização das potenciais reflexões e estruturas antrópicas.



**Figura 3.15** – Mapa de amplitudes da grelha 1 gerado a partir da análise de sobreposição das reflexões mais importantes entre os 20 e os 150 cm de profundidade. A imagem gerada apresenta algumas reflexões interpretadas como estruturas em fossas, já assinaladas nas imagens 3.2.12 e 3.2.13, observando-se do seu lado esquerdo algumas reflexões que poderão estar associadas a buracos de poste.



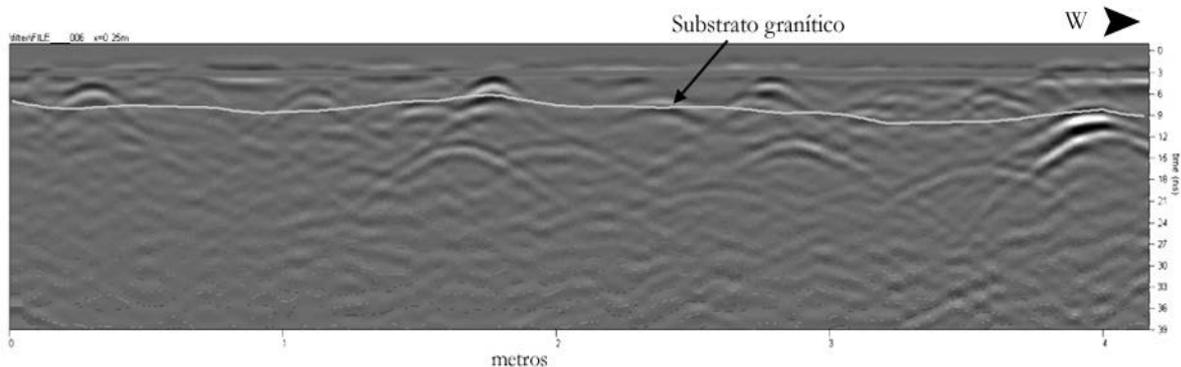
**Figura 3.16** – a) Imagem tridimensional gerada pelo cálculo de isosuperfícies. Os volumes representados correspondem às reflexões mais importantes detectadas na prospecção, correspondendo a possíveis fossas silo. b) Esta imagem integra, no mesmo padrão de cores, um mapa de amplitude (z), e duas secções de amplitudes (x e y). Observam-se reflexões associadas aos volumes de a), interpretadas como possíveis fossas silo.



**Figura 3.17** – Bloco diagrama integrando três métodos de visualização dos dados de GPR. É apresentado um mapa de amplitudes, correspondente à profundidade de 50-54 cm, um radargrama e volumes de isosuperfícies gerados a partir das amplitudes mais intensas. A integração destes três métodos permite observar com maior pormenor algumas das reflexões que foram interpretadas como possíveis fossas. [sitos](#)

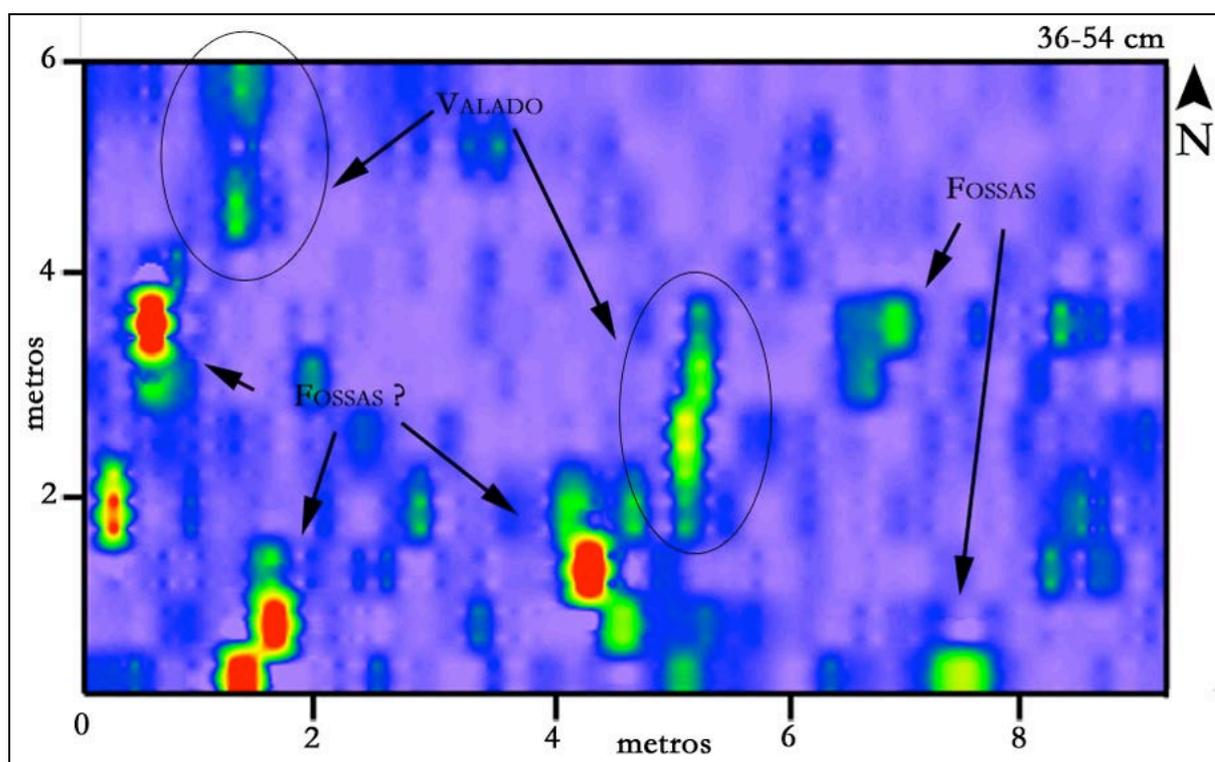
### Grelha 2

A análise inicial da informação contida nos radargramas correspondentes aos perfis adquiridos nesta grelha (figura 3.18) permitiu determinar a profundidade do substrato granítico. Verificou-se então que a fronteira entre este e os materiais sobrejacentes varia entre os 40 cm e os quase 1 m de profundidade, sendo esta maior no lado oeste da grelha (lado direito dos perfis).



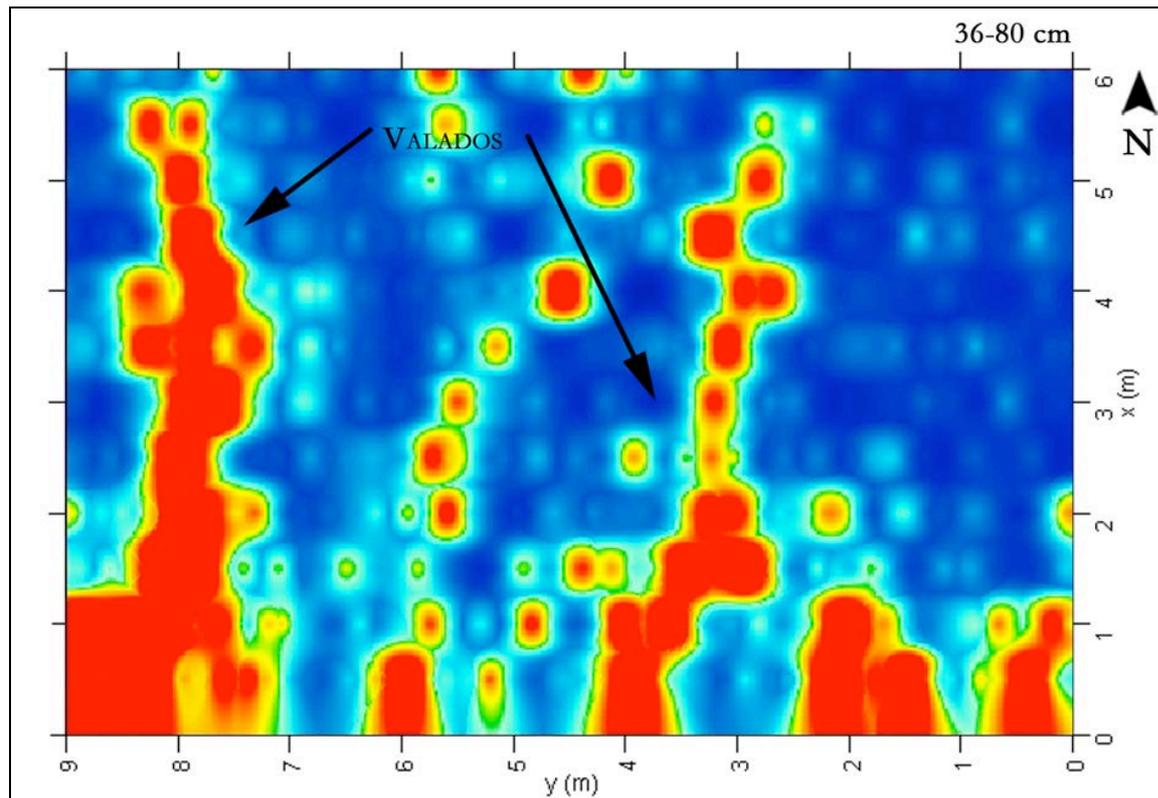
**Figura 3.18** – Pormenor de um radargrama da grelha 2, onde foi delimitada a posição do substrato granítico.

A observação dos mapas de amplitudes, gerados a partir dos volumes pseudo 3D da primeira fase de processamento, permitiu verificar a presença de diversas reflexões de interesse arqueológico (figura 3.19). Estas apresentam-se organizadas segundo padrões lineares que são interpretáveis como pertencendo a pequenos valados. Foi também observada a ocorrência nestes mapas de algumas reflexões circulares, as quais foram interpretadas como pertencendo a possíveis estruturas em fossa, uma vez que a sua geometria (diâmetro e profundidade) são consistentes com a geometrias deste tipo de estruturas arqueológicas.



**Figura 3.19** - Mapa de amplitude para profundidade de 36-54cm, onde se identificou a presença de reflexões possivelmente pertencentes a valados pequenos e a possíveis estruturas em fossa.

Estes dados foram posteriormente reprocessados com o programa GPR-Slice e os resultados da geração de mapas de amplitudes, criados pelo módulo da análise de sobreposição, comparados com os anteriores. Na figura 3.20 pode observar-se a imagem resultante da sobreposição das amplitudes mais intensas registadas nos mapas de amplitudes do intervalo de profundidade 36-80 cm. Nestas observam-se algumas reflexões lineares que poderão corresponder a pequenos valados e também algumas reflexões circulares que poderão estar associadas quer a fossas ~~silo~~ quer a variações no substrato.

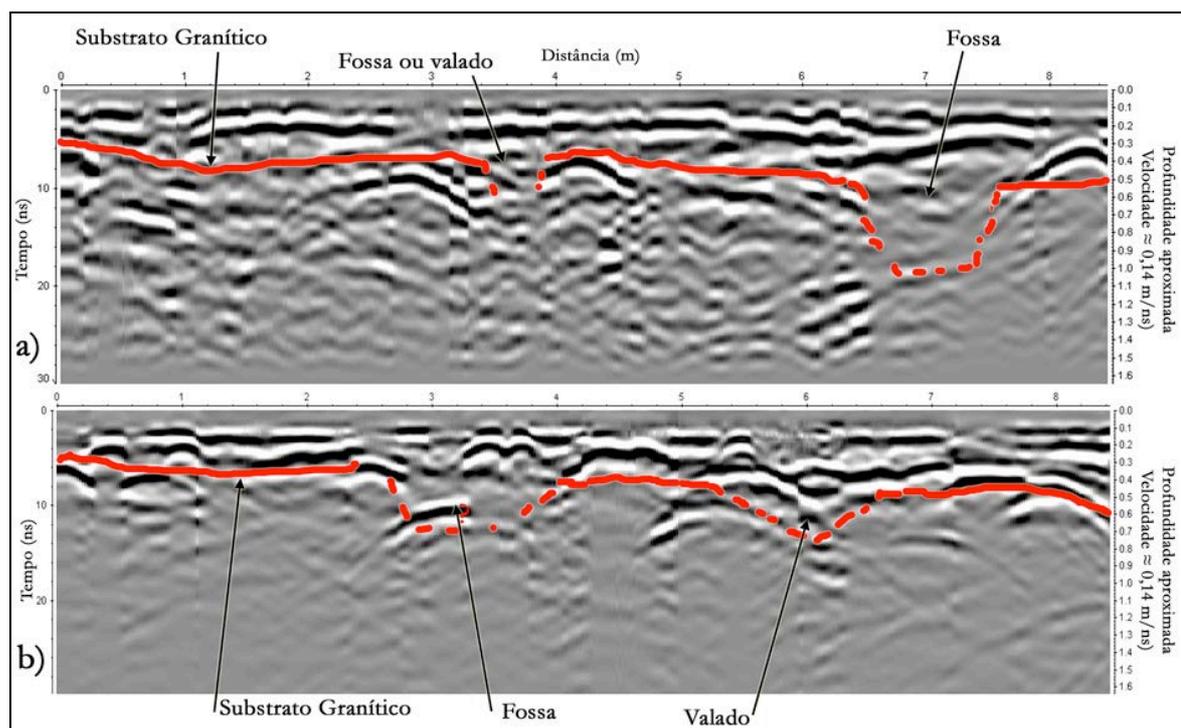


**Figura 3.20** - Mapa de amplitudes da grelha 2 gerado a partir da análise de sobreposição das reflexões mais importantes entre os 20 cm e os 80 cm de profundidade. A imagem gerada apresenta algumas reflexões interpretadas como valados, e outras com padrões circulares que poderão corresponder a estruturas em fossa.

Os mapas de amplitudes gerados a partir dos volumes de dados filtrados a intervalos de frequência mais altas (500-650 e 650-800 MHz) não evidenciaram nenhum tipo de padrão de reflexões que pudesse ser associado a estruturas arqueológicas nesta grelha.

A área da grelha 2 voltou a ser prospectada em Junho de 2009, no que atrás se designou de terceira campanha de prospecção. Como referido, esta campanha consistiu numa prospecção de alta resolução dado o reduzido espaçamento entre perfis (5 cm). O tratamento dos dados foi também realizado com o programa ReflexW, recebendo o mesmo fluxo de processamento que os dados da primeira campanha. Posteriormente, os dados foram processados com o programa GPR-process, tendo sido gerados volumes de dados de alta resolução (verdadeiro 3D), através de interpolação do valor de amplitudes entre perfis num raio de 5 cm, pelo método *krigging*. Os volumes 3D foram seguidamente seccionados para geração de mapas de amplitudes, a intervalos de 1 ns de profundidade, com espessura de 12 cm e 20% de sobreposição.

A análise cuidada dos radargramas processados (figura 3.21) permitiu identificar a posição do substrato granítico, no qual se interpretou a presença de cortes que corresponderão a uma fossa e a valados.

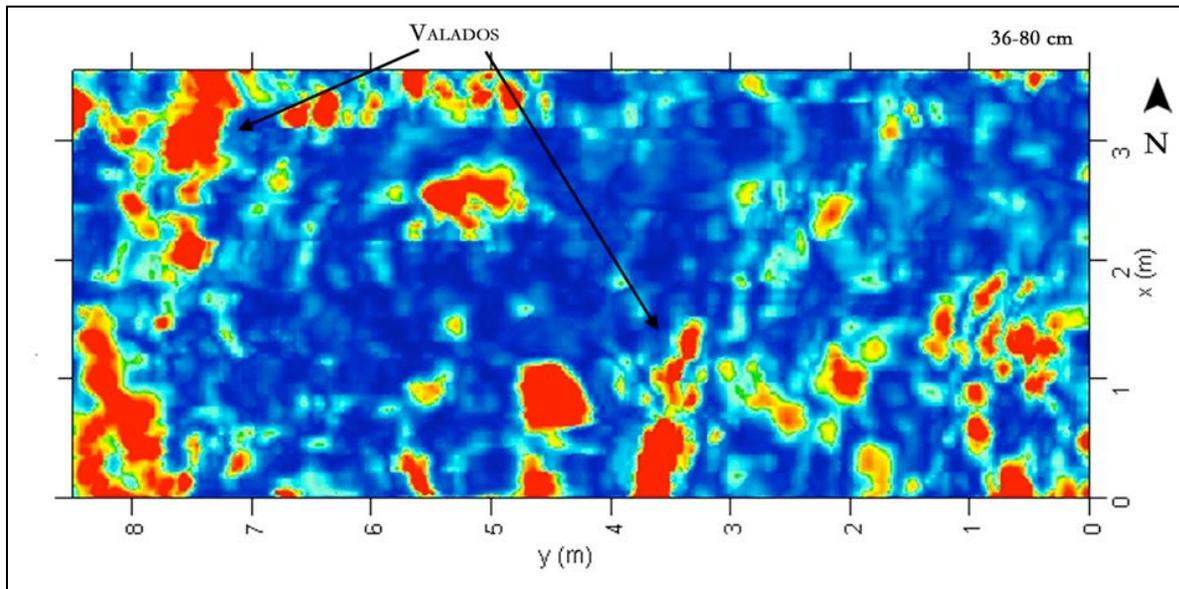


**Figura 3.21** – Pormenor de dois radargramas da grelha ultra densa: a) perfil 60, adquirido aos 3 m da grelha; b) perfil 20 adquirido aos 1 m. Nestes é identificada a posição do substrato granítico, observando-se intersecções na sua superfície interpretadas como valados e fossas.

Os mapas de amplitudes obtidos (figura 3.22) apresentam uma elevada qualidade de imagem quando comparados com os mapas realizados durante a primeira campanha. Esta qualidade advém de dois factores: um relativo ao reduzido espaçamento entre perfis e de, praticamente, não ser necessário interpolar o espaço entre os perfis; o outro pelo facto de os perfis terem sido adquiridos sempre na mesma direcção, o que reduz substancialmente o ruído *jitter*. Quanto às imagens, observaram-se algumas diferenças significativas, relativamente às imagens da primeira campanha. Como o espaçamento entre perfis foi reduzido, quase não havendo interpolação dos dados, as reflexões presentes representam de uma forma mais rigorosa a geometria das estruturas presentes no terreno, quer estas sejam geológicas ou arqueológicas. Sendo o subsolo bastante heterogéneo a interpretação realizada foi cautelosa e não livre de erros, uma vez que certo tipo de estruturas arqueológicas poderão ser facilmente confundidas com aspectos da geologia do local. A análise dos mapas de amplitudes permitiu verificar a existência de alguns reflectores, comuns aos observados anteriormente, que são interpretados como pertencendo a possíveis valados.

Parte da área da grelha 2, aproximadamente 20 m<sup>2</sup> do canto noroeste, foi escavada em 2009 o que permitiu aferir da validade das interpretações realizadas. Nesta escavação (figura 3.23) verificou-se que a interpretação do valado com orientação N-S estava correcta, no entanto o valado E-W, talvez por ser sub-paralelo aos perfis, não foi identificado quer nos perfis quer nos mapas de

amplitudes. A fossa descoberta na escavação foi apenas visualizada nos radargramas, talvez por esta estar associada ao valado N-S. Na escavação descobriu-se um segundo valado N-S (ponto 4, figura 3.23) o qual não aparece nos mapas de amplitudes, embora seja identificado nos perfis, o que se deverá ao facto de o valado estar preenchido com o mesmo material da camada sobrejacente e, de a sua forma ser relativamente aberta o que provocará alguma dispersão do sinal, observando-se reflexões mais intensas nos bordos do valado do que no seu interior.



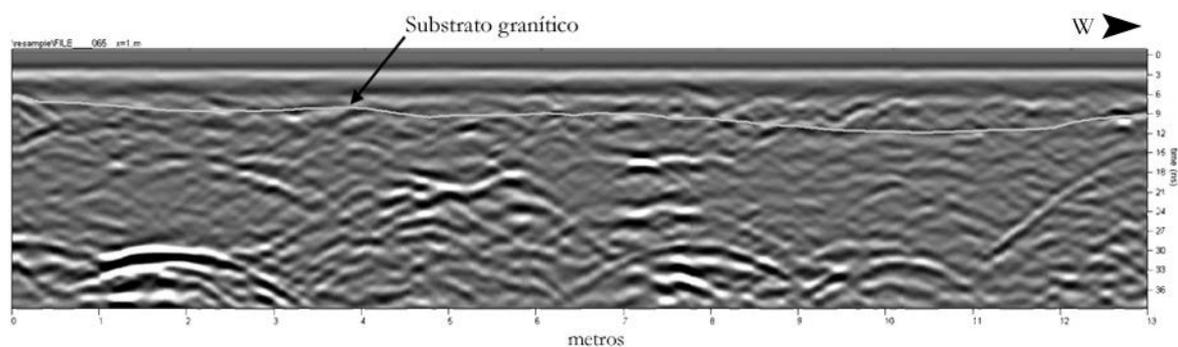
**Figura 3.22** - Mapa de amplitudes da grelha 2 gerados a partir dos dados de alta resolução que apresentam as reflexões mais importantes criadas a partir da análise de sobreposição entre os 36 cm e os 80 cm de profundidade. A imagem gerada apresenta algumas reflexões interpretadas como valados, observam-se algumas reflexões com padrões circulares que poderão corresponder a estruturas em fossa.



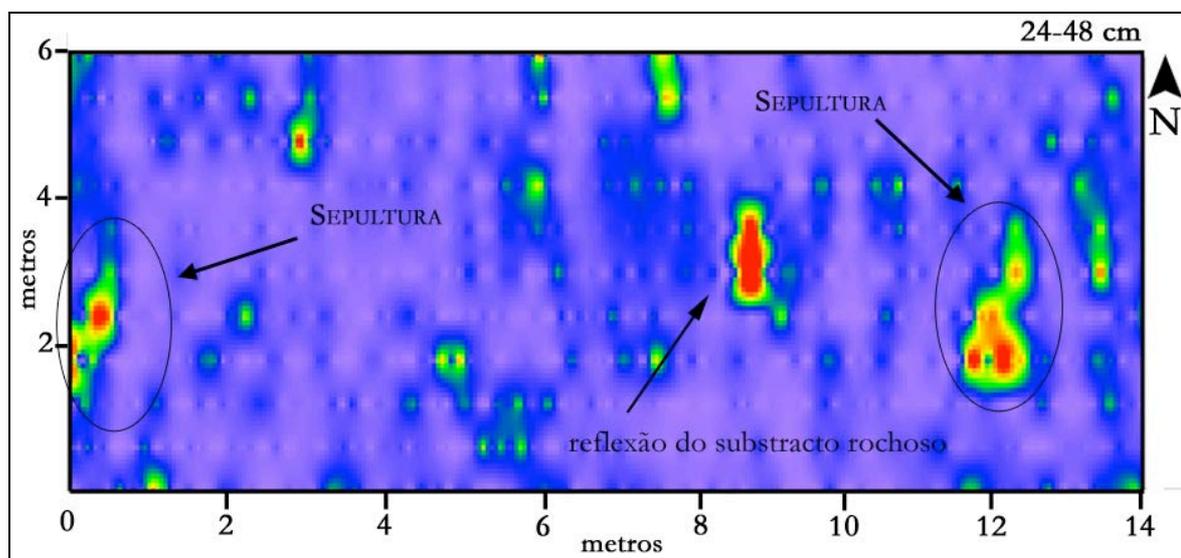
**Figura 3.23** – Aspecto da escavação da área noroeste da grelha 2. Observam-se diversas estruturas arqueológicas nomeadamente: um pequeno valado de direcção N-S (1), associada a uma fossa com  $\approx$  1m de área; um valado com direcção E-W (2) e um segundo valado com direcção N-S (4).

### Grelha 3

Para a grelha 3, localizada no sector 2, tal como nas grelhas anteriores a visualização dos radargramas (figura 3.24) permitiu determinar que a profundidade a que ocorre o substrato granítico varia entre os 10 cm e um máximo de 60 cm. A análise dos mapas de amplitudes (figura 3.25), gerados a partir dos volumes pseudo 3D da primeira fase de processamento, permitiu observar dois padrões de reflexão bastante interessantes. Estas reflexões poderão corresponder a duas sepulturas uma vez que as suas orientações (NE-SW) e dimensão (cerca de 2 m por 1 m) são idênticas às das sepulturas identificadas nas áreas escavadas no sector 2. Esta constatação permite enquadrar esta área prospectada na zona da necrópole.



**Figura 3.24** - Pormenor de um radargrama da grelha 3, onde foi identificado a posição do substrato granítico.



**Figura 3.25** - Mapa de amplitude para profundidade de 24-48cm, onde se identificou a presença de reflexões possivelmente pertencentes a sepulturas.

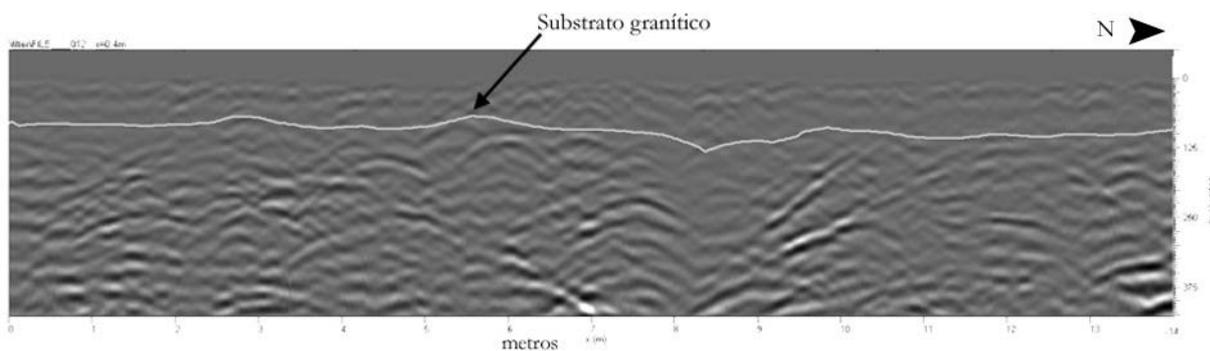
Nesta grelha, e tal como o observado na grelha 2, os mapas de amplitudes gerados a partir dos volumes de dados filtrados a intervalos de frequência mais altas (500-650 e 650-800 MHz) não evidenciaram nenhum tipo de padrão de reflexões interpretáveis que pudesse ser associado a qualquer tipo de estruturas arqueológicas. Resumidamente, nos mapas gerados após este processamento as reflexões interpretadas anteriormente como pertencendo a sepulturas simplesmente desapareceram.

Para esta grelha recorreu-se também ao reprocessamento dos dados com o GPR-slice, os quais foram tratados com os mesmos parâmetros utilizados anteriormente. As imagens geradas vieram reforçar as interpretações realizadas.

Esta área não foi, ainda, escavada pelo que não foi possível aferir os dados da prospecção geofísica.

#### Grelhas 4 e 5

As grelhas 4 e 5, foram prospectadas em Julho de 2008 durante a segunda campanha de prospecção, numa área da estação arqueológica a ser intervencionada nesse mesmo mês, abrangendo duas zonas contíguas entre si. A interpretação dos radargramas permitiu situar a profundidade do substrato granítico (figura 3.26), ocorrendo este entre 10 cm e 50 cm, com uma geometria bastante irregular, e alternando entre zonas menos meteorizadas e zonas de meteorização mais intensa (saibro).



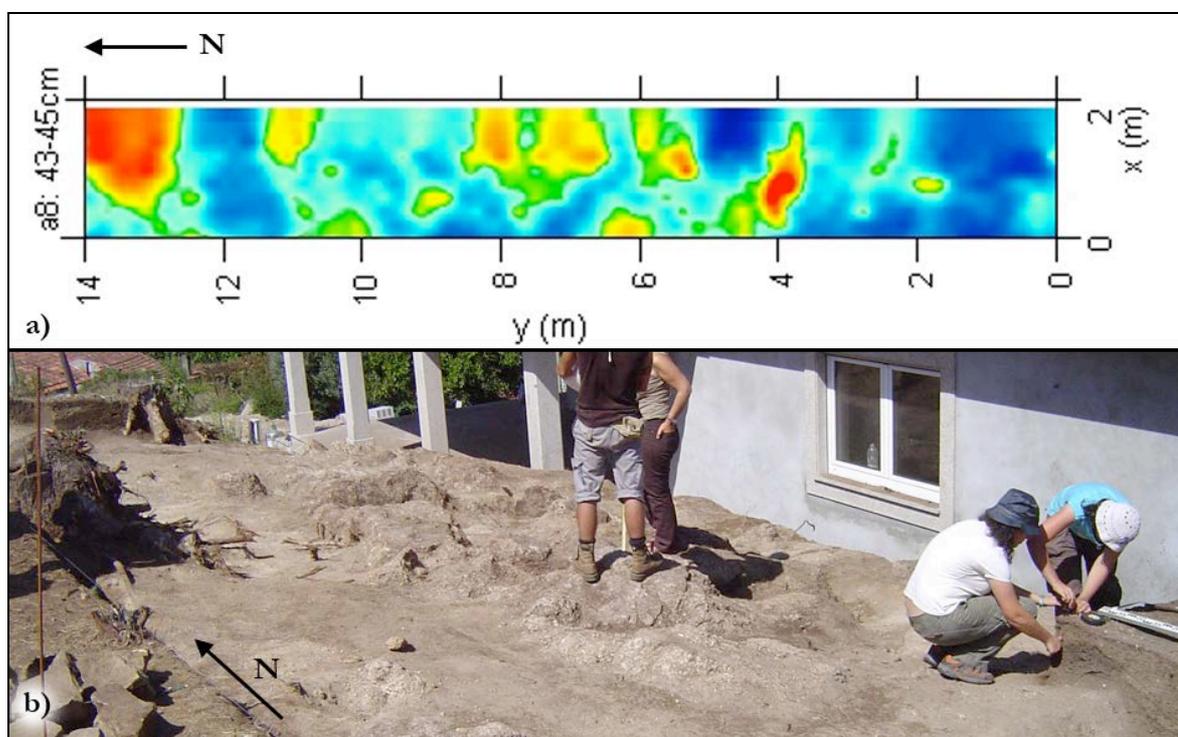
**Figura 3.26** - Pormenor de um radargrama da grelha 4, onde foi identificado a posição do substrato granítico.

Os dados de radar adquiridos foram tratados no ReflexW com o mesmo fluxo de processamento que o utilizado para os dados da primeira campanha, não tendo sido utilizado o processamento com filtros de frequência. Posteriormente, os dados foram processados com o programa GPR-

process, tendo sido gerados volumes de dados pseudo 3D, através de interpolação do valor de amplitudes entre perfis num raio de 20 cm, pelo método *krigging*. Os volumes pseudo 3D foram seguidamente seccionados para geração de mapas de amplitudes, a intervalos de 2 ns de profundidade, e espessura de 24 cm com 50% de sobreposição.

Os mapas de amplitudes resultantes apresentaram algumas reflexões intrigantes e de difícil interpretação, uma vez que evidenciavam padrões demasiado regulares para serem pertencentes a estruturas da Idade do Bronze (figura 3.27). Após a comparação dos padrões de reflexão com algumas áreas já escavadas onde se observava bem o substrato, foi possível interpretar os padrões observados como pertencentes ao substrato granítico. Este apresenta algumas zonas mais salientes, alinhadas com as suas fracturas, que no radar deram origem a reflexões semelhantes às de certas estruturas arqueológicas (ex: muros pétreos). Para além destas reflexões não foi possível identificar nenhum tipo de reflexão que pudesse ser associada a estruturas arqueológicas, o que veio a ser comprovado pela escavação subsequente.

A informação da grelha 5 é em tudo semelhante aos dados interpretados na grelha 4 pelo que apenas são aqui apresentados exemplos desta última.



**Figura 3.27** – a) exemplo de um dos mapas de amplitudes gerado a partir dos dados da grelha 4. As reflexões presentes estão associadas às irregularidades presentes no contacto entre o substrato granítico e os materiais sobrejacentes, as quais podem ser observadas em b), bem como devido a variações do grau de meteorização do substrato granítico. b) Área da grelha 4 durante a fase de escavação arqueológica, onde é possível observar as irregularidades do substrato granítico.

### 3.2.5. Discussão

Os resultados obtidos a partir da prospecção geoarqueológica com Georadar evidenciaram o potencial desta técnica aplicada à prospecção de sítios arqueológicos com estruturas em negativo, como é o caso dos povoados da Idade do Bronze do noroeste de Portugal. No entanto, há que analisar atentamente e discutir quer os resultados obtidos quer as metodologias aplicadas, bem como as condições de aquisição dos dados.

A prospecção com GPR permitiu identificar e cartografar estruturas arqueológicas presentes na estação arqueológica do Pego, apesar da dificuldade já expectável inerente às características físicas dessas estruturas e da geologia local (Gonçalves *et al.*, 2008).

Autores como Goodman & Conyers (1997) e Conyers (2004) têm advertido para a dificuldade que existe na identificação de estruturas arqueológicas cujas características dieléctricas pouco ou nada diferem do meio onde se encontram localizadas. Este é, precisamente, o caso do Pego onde, como já foi referido, os vestígios arqueológicos consistem em estruturas em negativo (valados, buracos de poste, fossas, sepulturas planas), escavadas no granito arenizado que, com excepção das fossas e de alguns valados, foram preenchidas com os mesmos materiais resultantes da sua escavação. No entanto, mesmo essas estruturas, como é o caso das sepulturas, apresentam um preenchimento que contém uma maior percentagem de matéria orgânica e uma porosidade maior o que, em teoria, lhes confere um maior contraste dieléctrico.

Há também a considerar as condições do terreno existentes durante as campanhas de prospecção. Como descrito anteriormente, o terreno encontrava-se completamente seco durante as três campanhas, o que contribuiu, por um lado para uma grande capacidade de penetração das ondas de radar no subsolo, mas por outro lado contribuiu para o baixo contraste entre os materiais o que faz diminuir a capacidade de detecção das estruturas arqueológicas. Infelizmente não houve oportunidade de conduzir uma prospecção sob outras condições de terreno, pois seria de supor que os materiais de preenchimento das estruturas em negativo apresentassem um maior contraste dieléctrico quando húmidos ou saturados em água, o que poderia evidenciar melhor algumas das estruturas e inclusive permitir a identificação de outras.

Em suma, a abordagem metodológica de aquisição de dados mostrou ser adequada ao contexto da estação. A utilização de uma prospecção em área pelo método de grelhas pseudo 3D, com espaçamento entre perfis de 50 cm provou ser eficaz, no entanto, as imagens geradas possuem uma grande interpolação de dados criando reflexões não reais o que poderá levar a interpretações erróneas. A prospecção de alta densidade, aplicada na grelha 24 em 2009, permitiu a geração de imagens mais próximas da realidade, com o mínimo de interpolação. Este método apresenta o

inconveniente de ser muito moroso, embora a densidade de aquisição garanta que todas as potenciais estruturas são iluminadas pela onda de radar e proporcione uma melhor definição de imagem.

Quanto aos métodos de processamento dos dados, o fluxo de tratamento utilizado mostrou ser bastante adequado às características da estação e às condições do terreno. Na geração de mapas de amplitudes, a utilização de imagens de alta resolução a partir das grelhas ultra densas resultou numa melhor resolução das imagens, tal como anteriormente discutido. Dada a relativa complexidade das estruturas arqueológicas do Pego, as correlações laterais entre perfis são de enorme importância, sendo de evitar a utilização de uma metodologia que conduza a uma grande interpolação de dados.

A utilização de metodologias diversas de visualização de dados, nomeadamente a utilização de mapas de amplitudes finamente espaçados, de mapas de amplitudes com análise de sobreposição e também a utilização de imagens tridimensionais de isosuperfícies, provou ser muito útil para a definição da geometria das estruturas arqueológica e do seu mapeamento, bem como para melhorar a sua interpretação.

### 3.3. Gravuras rupestres de Campelo

Descreve-se de seguida a prospecção arqueogeofísica com Georadar realizada na área envolvente às gravuras rupestres de Campelo, em Mondim de Basto. Este trabalho desenvolveu-se em Julho de 2008, no âmbito de uma colaboração com o arqueólogo António Pereira Dinis, integrada na campanha de estudo e valorização do Santuário Rupestre de Campelo, enquadrada no projecto “PNNTA/2006-2009 - Estudo e Valorização do Património Arqueológico da Vertente Oeste do Monte da Senhora da Graça”, financiado pelo IGESPAR.IP e pela Câmara Municipal de Mondim de Basto.

#### 3.3.1. Enquadramento contextual arqueológico

A estação arqueológica de Campelo localiza-se no lugar de Campelo, pertencente à freguesia e concelho de Mondim de Basto, distrito de Vila Real, nas coordenadas geográficas de 41° 25' 12” N de latitude e 7° 55' 44” W de longitude, e 420 m de altitude (figura 3.28.1) e 3.29).

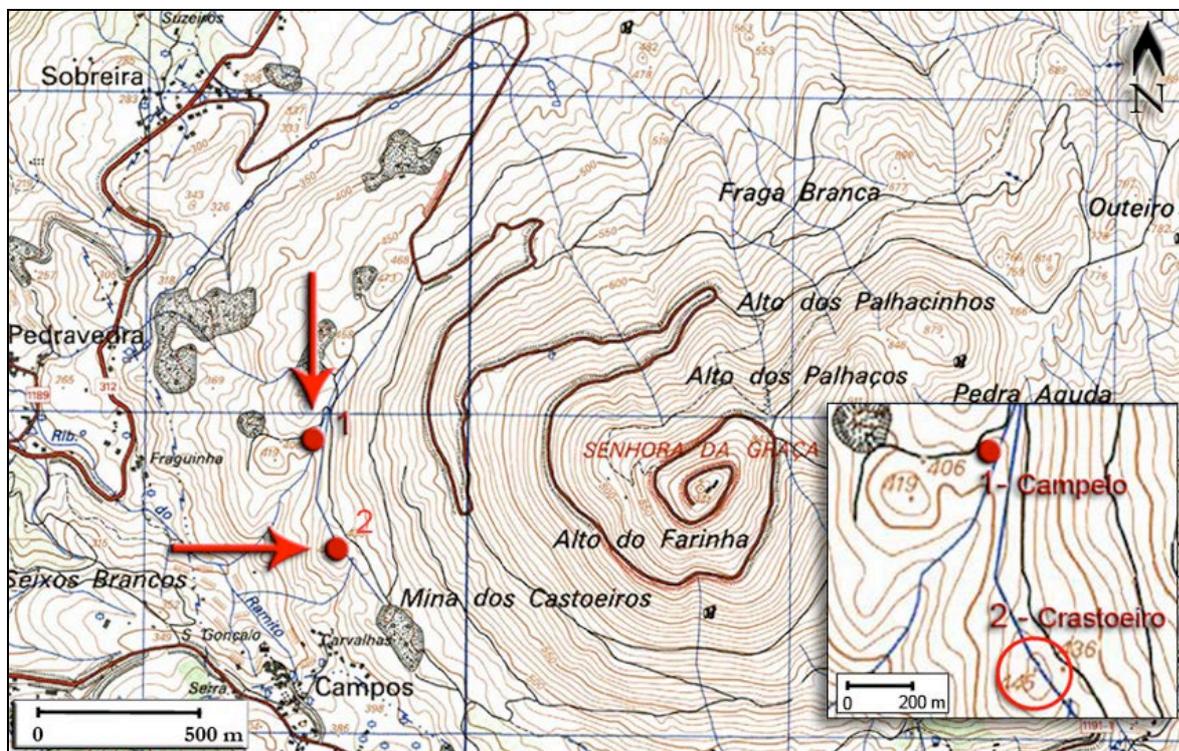


Figura 3.28 - Localização das estações arqueológicas de: 1) Campelo; 2) Craстоeiro (extracto da Carta Militar 1:25000, folha 87 de Vilar de Ferreiros (Mondim de Basto), série M888, IGEOE, 1997).

A estação arqueológica situa-se numa estreita plataforma aplanada, na vertente sudoeste do Monte Farinha, conhecido por Monte da Senhora da Graça, junto de uma nascente de água que corre para a ribeira de Ramilo, a aproximadamente 500 m a norte da povoado da Idade do Ferro do Crastoeiro (figuras 3.28 e 3.29). Dinis (2009c e 2011) caracteriza a área de implantação do Santuário como sendo uma pequena depressão, em anfiteatro, orientado a sul, encaixada entre a pronunciada vertente do monte e um conjunto de pequenos outeiros que a rodeiam de noroeste a sudoeste. Para o referido autor esta circunstância dificulta a visibilidade de e para as gravuras e torna mais difícil o acesso, a partir de cotas inferiores, com excepção do corredor S-N, que acompanha as curvas de nível do relevo.

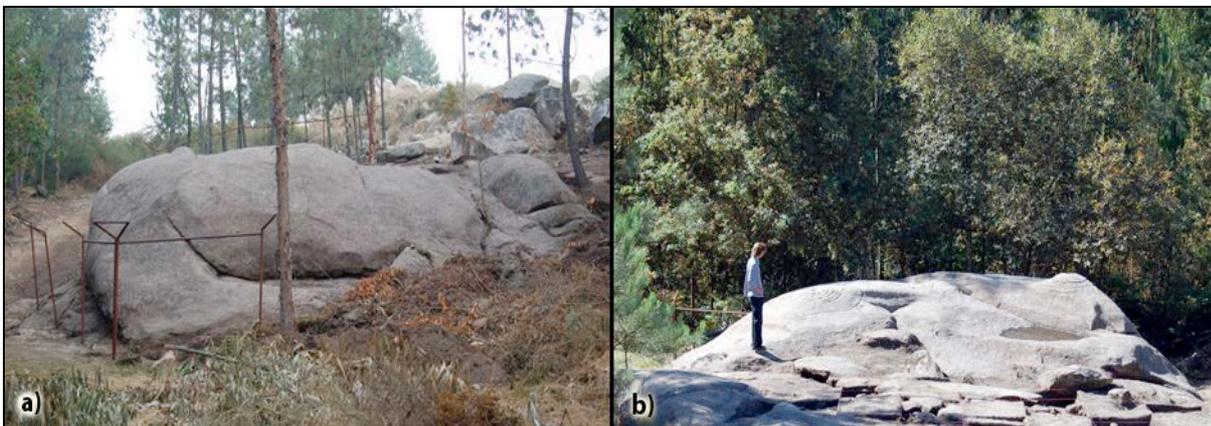


**Figura 3.29** – Localização das estações arqueológicas de Campelo e Crastoeiro na encosta do monte da Sr.<sup>a</sup> da Graça em Mondim de Basto (imagem retirada do Google Earth, em 2009).

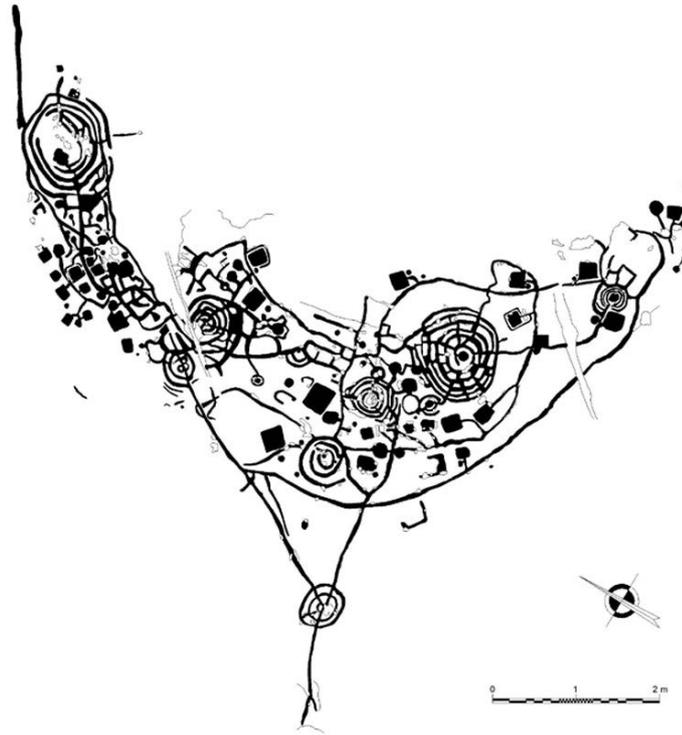
Arqueosítio monumental no dizer de Dinis (2001) e, segundo Alves (2009), provavelmente um dos mais interessantes sítios de arte atlântica conhecidos no norte de Portugal, a estação arqueológica de Campelo foi descoberta durante trabalhos de prospecção arqueológica realizados em finais da década de 1990, na envolvente da estação arqueológica do Crastoeiro, com a finalidade de identificar materialidades que se pudessem relacionar, em termos espaciais e cronológico-culturais, com o povoado e as gravuras rupestres aí encontradas, e já parcialmente

publicadas (Dinis, 2001; Rey Castiñeira & Soto-Barreiro, 2001; Dinis 2009; Dinis & Bettencourt 2009)

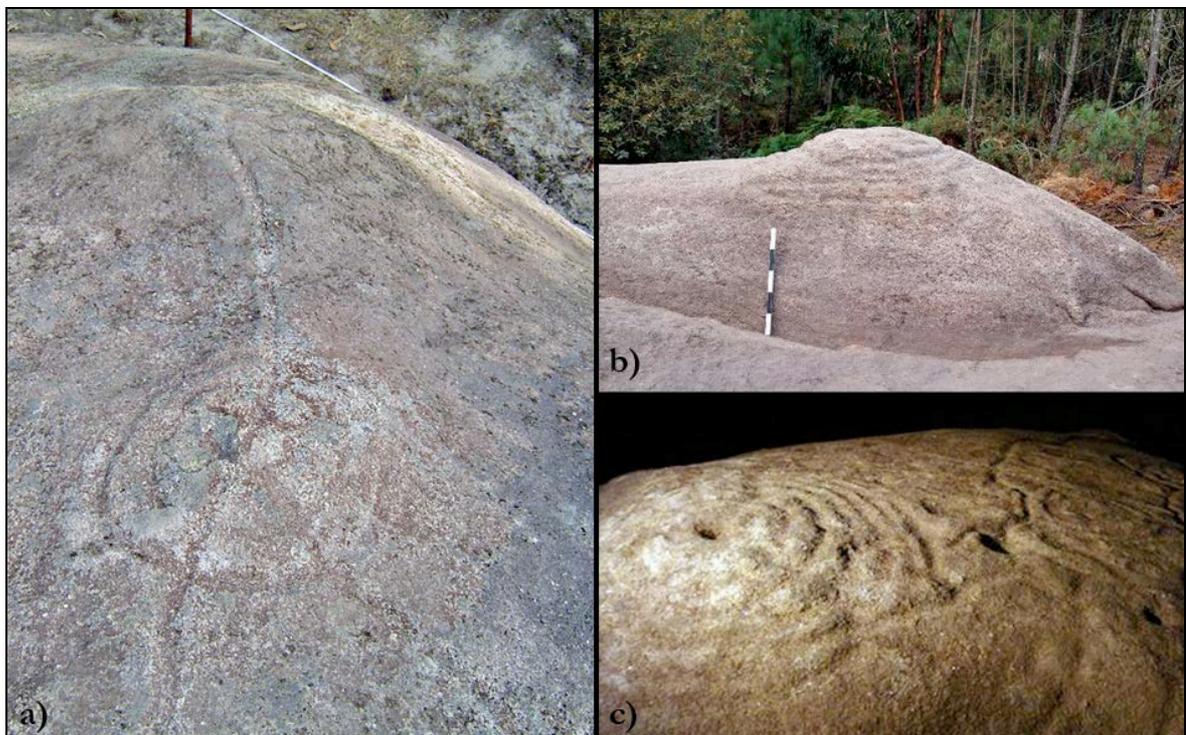
O Santuário Rupestre de Campelo é composto por dois afloramentos de granito, que Dinis convencionou designar por Rochas 1, 2 e 3 por se desconhecer, de início, que a rocha 3 era uma extensão da rocha 1. Salienta a Rocha 1 (figura 3.30) dadas as suas características excepcionais, tanto pelas dimensões que a destacam na envolvente como pela organização compositiva, que se estende, praticamente, por toda a sua face mais elevada, integrando as irregularidades da rocha na própria composição (Dinis, 2001). Este afloramento apresenta uma superfície bastante irregular, marcada por saliências, diaclases e ângulos, onde foram gravados por picotagem e abrasão as gravuras, em número de 130 (Dinis 2011). A organização compositiva é muito complexa (figura 3.31 e 3.32), prefigurando uma meia lua na fase minguante (quando vista de nascente), integrando meandros, reticulados, paletas quadrangulares e circulares, covinhas, círculos simples, círculos concêntricos e espirais, por vezes com traços radiais (Dinis, 2009b, 2009c, 2011). O afloramento conserva ainda dois furos, feitos com broca mecânica há duas décadas, executados com o intuito de o fender e aproveitar os blocos de pedra daí resultantes (Dinis, 2009b). O objectivo não foi alcançado pela oposição do proprietário do terreno, alertado pelos operários que se aperceberam da existência das gravuras (Dinis, 2011).



**Figura 3.30** – Vistas gerais da Rocha 1 de Campelo. a) Vista tomada de sul, sendo visível os postes de uma antiga rede de protecção, e ao fundo o escombro da pedreira que cobriu a Rocha 2. b) Vista tomada de norte, sendo observáveis algumas das gravuras na superfície da rocha (fotografias de António Pereira Dinis).



**Figura 3.31** – Perspectiva das gravuras da Rocha 1 de Campelo (imagem de Dinis, 2011).



**Figura 3.32** – Pormenores da Rocha 1 de Campelo e de alguns dos elementos figurativos gravados na sua superfície (fotografias b e c de António Pereira Dinis).

Tendo em consideração a topografia do afloramento, a distribuição dos motivos gravados e a sua visibilidade, Dinis (2009c) considera para a Rocha 1 duas superfícies distintas, uma abarcando os quadrantes S-E e outra os quadrantes N-W. A primeira superfície, boleada e com uma pendente mais pronunciada, concentra as gravuras no ponto mais elevado, facto que priva a sua observação para quem se encontrar à superfície do terreno circundante. No entanto, o acesso ao topo é possível a partir do lado oriental, contornando o afloramento e seguindo por uma espécie de corredor definido por uma “fenda” existente entre as Rochas 1 e 3 (Dinis, 2009c). A segunda superfície, sita no quadrante N-W, configura um “L” cujos braços são marcados por uma acentuada diferença de cota e uma “fenda” na Rocha. Aqui as gravuras distribuem-se de forma mais densa, percepcionando-se um verdadeiro “horror ao vazio” (Dinis, 2009c). No extremo poente, o afloramento eleva-se e cria uma pendente verticalizada para norte, sendo a protuberância gravada com uma sequência de círculos concêntricos. Nesta superfície, o acesso a partir da vertente norte é mais simples porque o afloramento encontra-se à cota da envolvente frontal, circunstância que permite uma mais fácil contemplação das gravuras (figura 3.30b). Este pormenor parece indiciar que a entrada para este local era realizada por este lado, o único que deixa que as gravuras sejam vistas na sua totalidade e tendo como pano de fundo o cume do Monte Farinha, ponto onde se ergue o sol e a lua (Dinis, 2009c).

Dinis (2001, 2009a, 2009b, 2011) refere que em termos temáticos sobressaem nesta rocha vários motivos e sobreposições. Os símbolos mais antigos, esbatidos, pouco profundos e difíceis de visualizar actualmente, correspondem a composições circulares, principalmente círculos concêntricos frequentemente sobrepostos por motivos similares mas gravados com sulcos mais largos e profundos. Por último gravam-se inúmeras linhas sobrepostas aos círculos, não raro desembocando em paletas circulares e rectangulares. Há ainda a registar um conjunto de sulcos pouco pronunciados que formam um quadriculado complexo e periférico, em relação aos motivos centrais localizados a cotas mais elevadas no seio do afloramento, apontando para um processo aditivo. Todas estas características levam Dinis (2009c) a considerar estarmos perante um lugar de longa diacronia, alvo de reorganizações e de reinterpretações no tempo e frequentado e actuante, durante cerimónias provavelmente cíclicas, desde, pelo menos, o III milénio até ao I milénio a.C..

O segundo afloramento (Rocha 2), actualmente desaparecido (o local foi coberto com inertes provenientes de uma pedreira que laborava nas proximidades), distava cerca de 20 metros para nor-noroeste da Rocha 1. Dinis (2001) refere que se tratava de um afloramento de pequenas dimensões e pouco saliente no terreno, tendo um único motivo gravado - um círculo concêntrico, com “fossette” central e haste ondeada.

O terceiro afloramento (Rocha 3), que corresponde ao prolongamento do primeiro (Rocha 1) para nordeste, orienta-se, longitudinalmente, de leste para oeste. Na sua superfície estão gravadas grandes paletas quadrangulares e covinhas.

Em trabalho concertado com as prospecções de georadar António Pereira Dinis realiza escavações na envolvência da Rochas 1, a norte e sul, durante os anos de 2008 e 2009, com o objectivo de encontrar novas superfícies gravadas e restos resultantes do tipo de cerimónias aí praticadas, coetâneas das gravuras (Dinis, 2011). Estas revelaram que o local se encontra muito perturbado pela acção antrópica recente embora tivessem confirmado que algures, no lugar, teria existido uma ocupação durante a Pré-História Recente, materializada por fragmentos de cerâmica lisa, um fragmento de dormente de mó de vaivém em granito, um cristal de quartzo, e um fragmento de ponta de seta em xisto (Dinis 2009b, 2009c, 2011).

### 3.3.2. Contexto geológico e geomorfológico

O sítio arqueológico de Campelo situa-se na bacia hidrográfica do rio Tâmega, tributário do rio Douro, localizando-se na margem esquerda daquele rio, a cerca de 3 km, em linha recta, na encosta sudoeste de um importante maciço montanhoso, com orientação NE-SW e altitude média de 900 m, o qual integra o Alto das Pedras, o Alto dos Palhacinhos, o Alto dos Palhaços e o Monte Farinha. Este maciço (figura 3.33) desenvolve-se numa mancha granítica Hercínica, tardi a pós tectónica relativamente a F2, designada de Granito da Senhora da Graça (granito de duas micas, de grão médio, com esparsos megacristais). A mancha granítica, circundada por terrenos metassedimentares Alóctones (Unidade de Vila Nune) e Parautóctones (Unidade de Mouquim e Unidade de Canadelo), apresenta forma elíptica, com cerca de 6 km de diâmetro, no eixo maior, e 5 km, no menor (Pereira *et al.*, 1989). Neste maciço o Monte Farinha assume-se como o relevo com maior destaque na paisagem, devido à sua altitude de 941 m (quase 800 m a cima do vale), apresentando uma visibilidade ímpar desde distâncias consideráveis. A sua altitude e configuração cónica (assemelha-se a um gigante monte de farinha quando coberto com neve no Inverno, de onde lhe advirá o nome), conferem-lhe um aspecto imponente, reforçado pelas vertentes particularmente abruptas a partir da cota de 500 m.

O sítio arqueológico de Campelo situa-se, como referido, numa plataforma na parte média do Monte Farinha, implantado junto a um pequeno ribeiro, onde afloram as superfícies graníticas que serviram de suporte às gravações de representações simbólicas. A morfologia envolvente encontra-se muito modificada pela exploração de rochas ornamentais adjacente ao sítio.

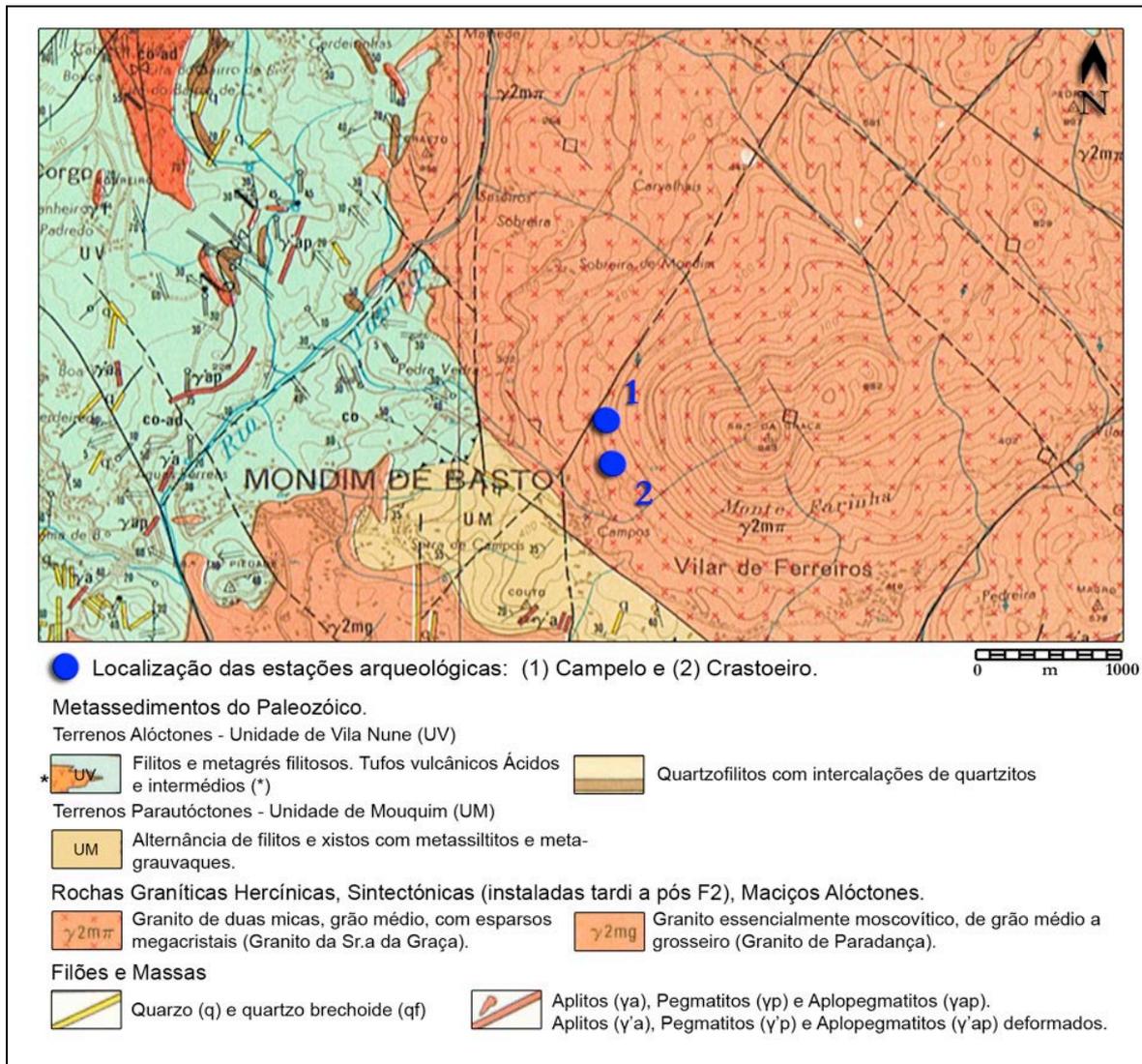


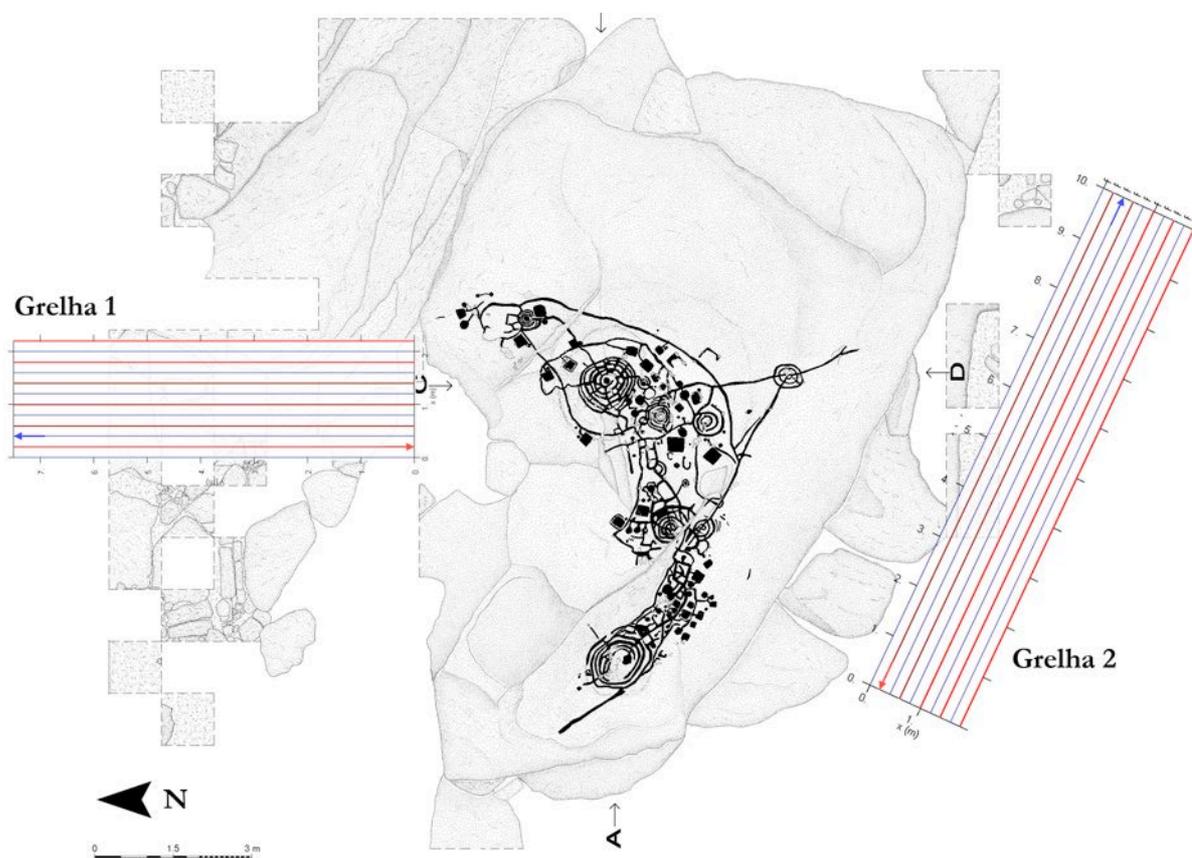
Figura 3.33 - Enquadramento geológico das estações arqueológicas de: 1) Campelo; 2) Crastoeiro (extracto da Carta Geológica, 1:50.000, 10A de Celorico de Basto, 1989).

### 3.3.3. Aquisição dos dados

Este estudo geofísico realizou-se na área envolvente da Rocha 1, com os seguintes objectivos: perceber se o afloramento se prolongava para Norte; identificar potenciais estruturas antropogénicas ali soterradas contemporâneas dos momentos de uso do lugar (como por exemplo, pavimentos em argila, lareiras ou estruturas em negativo) e definir a estratigrafia do local, tendo em vista a orientação e direcção das intervenções arqueológicas a ocorrer. Para o estudo foram definidas duas áreas de prospecção, uma localizada a norte e outra a sul (figura 3.34).

Neste caso concreto optou-se pela antena de 400 MHz para a realização da prospecção. Esta escolha foi efectuada após a realização de alguns ensaios no terreno (concretizados com a antena

de 200 MHz e a de 400 MHz) que evidenciaram a presença do substrato rochoso granítico a pequena profundidade. Esta constatação levou à opção da referida antena por esta apresentar uma maior resolução de sinal, possibilitando uma boa definição das potenciais estruturas arqueológicas soterradas.



**Figura 3.34** – Planta do Santuário Rupestre de Campelo com a localização das grelhas de prospecção pseudo 3D e das áreas escavadas posteriormente (imagem adaptada de Dinis, 2011).

Para a definição da metodologia de aquisição dos dados foi necessário considerar o contexto arqueológico da estação. De ampla diacronia, o local enquadra-se cronologicamente entre o Calcolítico e a Idade do Ferro, sendo expectável que, a existirem estruturas antrópicas, estas fossem semelhantes às do Povoado do Pego (como apresentado no ponto 3.2 deste capítulo), embora possam ocorrer lareiras e outras estruturas em positivo. Com este intuito, e de acordo com o proposto por autores como Conyers *et al.* (2002) e Conyers (2004), definiu-se uma estratégia prospectiva que se adequasse a esta realidade.

Considerando então as tipologias da estação escolheu-se o método de prospecção em área, com a definição de duas grelhas ortogonais pseudo 3D, as quais passaremos a designar de grelha 1,

implementada na área norte, e grelha 2, implementada na área sul (figura 3.34). A grelha 1 (figura 3.35) foi definida com 7 m por 2,5 m (área de 17,5 m<sup>2</sup>) tendo sido adquiridos doze perfis longitudinais correspondentes a um total de 84 m de prospecção. Na área da base do penedo, a sul, definiu-se a grelha 2 (figura 3.36) com 10 m por 2 m (área de 20 m<sup>2</sup>) e adquiriram-se dez perfis longitudinais correspondentes a um total de 100 m de prospecção.



**Figura 3.35** – Pormenor, à esquerda, tomado de norte da área de prospecção da grelha 1, localizado a norte da Rocha 1. Pormenor, à direita, da prospecção com o Georadar na grelha 1 (fotografias de António Pereira Dinis).



**Figura 3.36** – Pormenor tomado de noroeste da área de prospecção da grelha 2, localizada junto à base sul da Rocha 1, onde também é possível observar os pilares de uma antiga rede de protecção do monumento.

A prospecção pseudo 3D em cada uma das referidas grelhas foi composta por perfis de radar paralelos entre si, espaçados de 20 cm, adquiridos numa direcção (y), em zig-zag, e no modo *survey wheel*. Cada perfil foi adquirido com seguintes parâmetros: 50 traços de reflexão por metro; 512 amostras por traço; janela de aquisição de 40 ns.

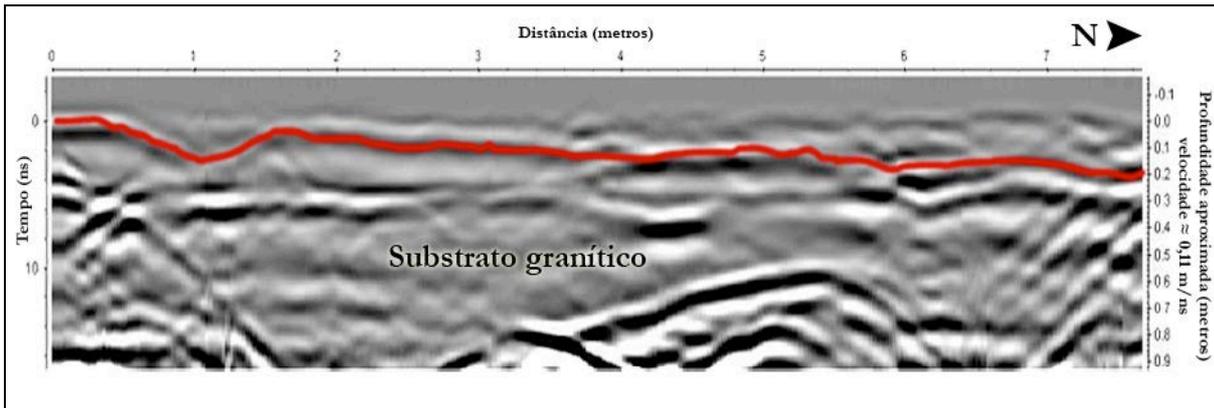
### 3.3.4. Resultados

Para a interpretação dos resultados obtidos com as prospecções efectuadas nas duas grelhas procedeu-se ao seu processamento com o programa ReflexW. Numa primeira fase determinou-se a velocidade de penetração do sinal de radar pelo método de ajuste de hipérbolas, tendo-se obtido uma velocidade de 0,11 a 0,12 m/ns. Posteriormente, os dados foram processados com o seguinte fluxo de trabalho: correcção do tempo zero; *devon*; filtro *band-pass*; remoção do *background*; *subtract mean*.

Numa primeira abordagem todos os radargramas foram analisados para a definição da estratigrafia do local. Posteriormente os dados foram processados com o programa GPR-process tendo sido gerados volumes de dados pseudo 3D, através de interpolação do valor de amplitudes entre perfis, num raio de 20 cm, pelo método *kriging*. Os volumes pseudo 3D foram seguidamente seccionados para geração de mapas de amplitudes, a intervalos de 0,5 ns de profundidade e espessura de 5 cm com 20% de sobreposição.

#### Grelha 1

A análise e interpretação inicial dos radargramas permitiu aferir a localização do substrato granítico e a espessura dos materiais sobrejacentes (figura 3.37), ocorrendo a fronteira entre essas duas unidades entre os 5 cm e os 20 cm de profundidade. A interpretação dos mapas de amplitudes gerados não evidenciou qualquer tipo de estrutura arqueológica interpretável. As escavações arqueológicas de 2008 e 2009 confirmaram estas interpretações (figura 3.38), tendo-se verificado que o substrato granítico se encontrava muito próximo da superfície, a 10 cm – 20 cm de profundidade, correspondendo este à continuidade para norte do afloramento da Rocha 1. Também não foram identificadas aí novas gravuras, ficando bem circunscrita a área de dispersão das gravuras no afloramento. As escavações não identificaram qualquer estrutura na área prospectada, tal como havia sido interpretado.



**Figura 3.37** - Aspecto de um perfil de Georadar da grelha 1 de Campelo. A linha vermelha assinala o contacto entre o substrato granítico e os materiais sobrejacentes.



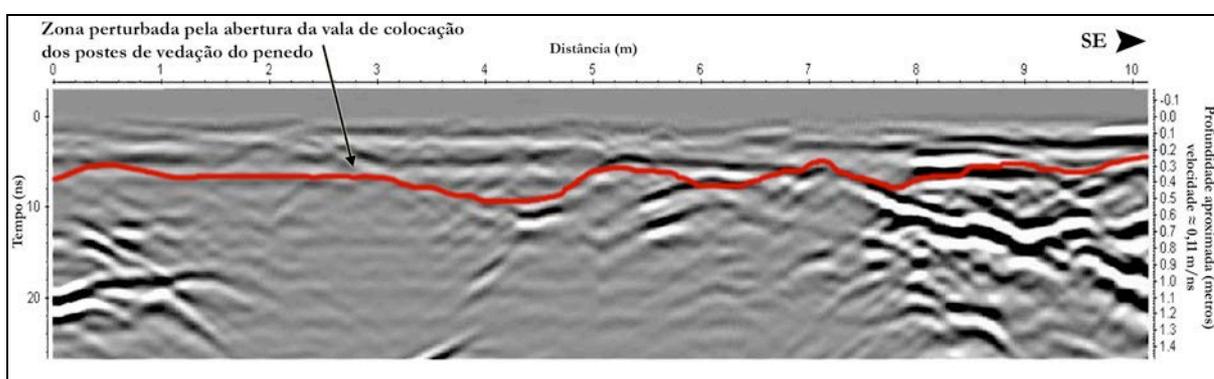
**Figura 3.38** – Pormenor da escavação de 2008 realizada na área prospectada com a grelha 1, localizada a norte da Rocha 1. Pela fotografia nota-se a fraca potência estratigráfica do local que cobria o prolongamento do afloramento para norte. Cada quadrado tinha 1 m por 1 m (fotografia de António Pereira Dinis).

## Grelha 2

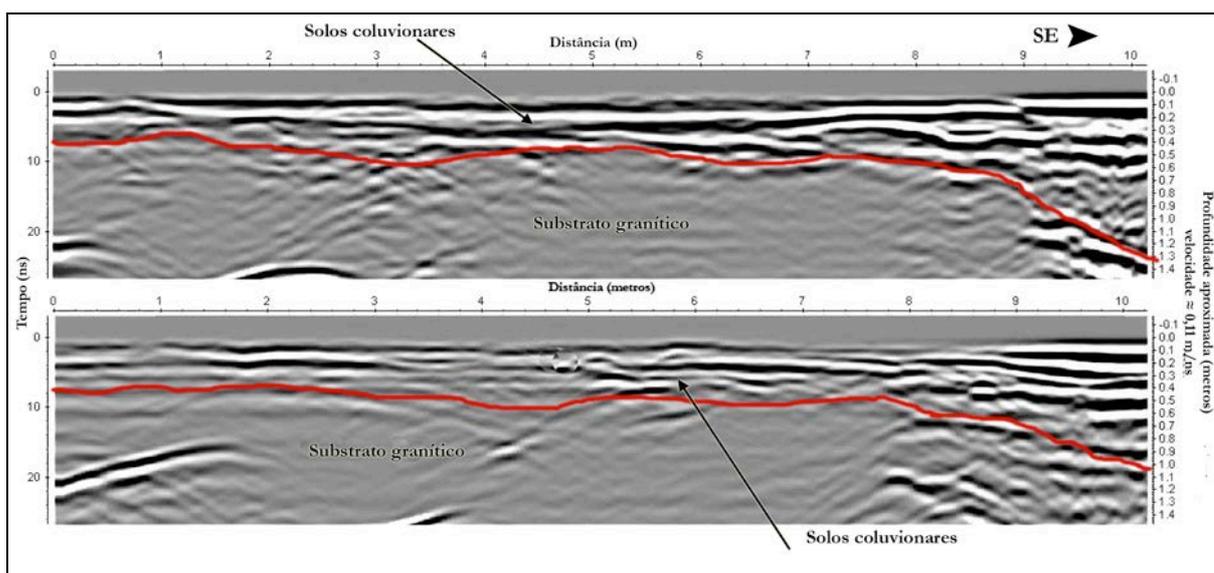
A análise dos radargramas permitiu constatar que a estratigrafia deste local era um pouco mais complexa. Os perfis realizados junto à base da Rocha 1 evidenciaram uma área perturbada, com

cerca de 30 cm de profundidade, correspondente à vala de fundação dos pilares de uma rede de protecção do monumento (figura 3.39). Os radargramas seguintes (figuras 3.40) evidenciaram uma profundidade média de 50 cm para a localização do substrato granítico, aprofundando este até 1 m a 1,5 m na zona à direita dos perfis, a sudeste, localizada nas proximidades de um pequeno curso de água. Os materiais sobrejacentes apresentam um conjunto de reflectores contínuos, o que poderá atestar a sua natureza coluvionar, contudo estes reflectores são pontualmente seccionados parecendo indicar alguma perturbação antrópica do subsolo.

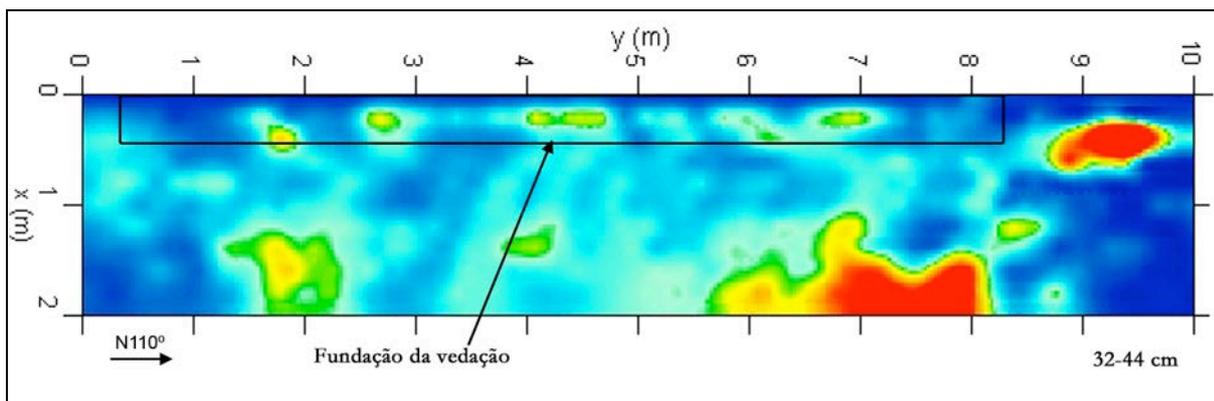
A interpretação do mapas de amplitudes não revelou qualquer reflexão interpretável como pertencendo a estruturas arqueológicas (figura 3.41).



**Figura 3.39** - Perfil 1 da grelha 2 de Campelo. A linha vermelha assinala o limite da área perturbada pela fundação dos postes da vedação de protecção da Rocha 1.



**Figura 3.40** - Perfil 9 (topo) e 3 (base) da grelha 2. A linha vermelha assinala o limite provável entre o substrato granítico e os materiais sobrejacentes. De notar o aprofundamento deste limite no lado direito dos perfis, provavelmente associado à proximidade de um pequeno vale.



**Figura 3.41** – Exemplo de um dos mapas de amplitudes gerado a partir dos dados pseudo 3D da grelha 2. As reflexões assinaladas no mapa correspondem à zona perturbada pela abertura da vala de fundação dos postes da vedação visíveis na figura 3.36.

### 3.3.5. Discussão

A prospecção arqueogeofísica com Georadar, realizada nesta estação arqueológica, provou ser bastante útil para a definição da estratigrafia da estação, permitindo perceber a continuidade do afloramento, a norte, e a estimativa da espessura dos materiais sobrejacentes. As condições de aquisição mostraram-se bastante favoráveis, uma vez que o subsolo não se encontravam nem muito seco nem saturado, possibilitando o contraste dieléctrico ideal para resolver a estratigrafia local. O método de aquisição em grelha pseudo 3D, com distância entre perfis de 20 cm, possibilitou a compreensão tridimensional do subsolo local, tendo sido adequado à definição da estratigrafia desta estação.

Por outro lado, a interpretação dos dados tridimensionais, particularmente a análise dos mapas de amplitudes, permitiu concluir que não existiam estruturas antrópicas soterradas na envolvente da Rocha 1, quer no perfil 1 quer no 2, com excepção das valas recentes para implantação de postes metálicos. Esta informação, associada à definição estratigráfica, foram importantes para a definição das estratégias interventivas por parte da arqueologia. As escavações subsequentes realizadas nas áreas da grelhas 1 e 2 comprovaram a natureza coluvionar dos materiais sobrejacentes ao substrato granítico. Na área da grelha 1 os solos coluvionares, bastante revolvidos, em determinados locais, continham diversos artefactos Neo-Calcolíticos, permitindo remontar o uso do lugar de Campelo, à Pré-história Recente, tal como referido por Dinis (2009b, 2009c, 2011).

### 3.4. Estação arqueológica do povoado do Crastoeiro

Apresenta-se de seguida a prospecção arqueogeofísica com Georadar efectuada no povoado do Crastoeiro, em Mondim de Basto. Este estudo decorreu em Julho de 2008 e realizou-se no âmbito de uma colaboração com o arqueólogo António Pereira Dinis, integrada na campanha de estudo e valorização da referida estação, enquadrada no projecto PNTA/2006-2009 - Estudo e Valorização do Património Arqueológico da Vertente Oeste do Monte da Senhora da Graça, financiado pelo IGESPAR.IP e pela Câmara Municipal de Mondim de Basto.

#### 3.4.1. Enquadramento contextual arqueológico

O povoado do Crastoeiro localiza-se no lugar de Campos, na freguesia de Mondim de Basto, muito próximo do limite com a freguesia de Vilar de Ferreiros. Administrativamente, pertence ao concelho de Mondim de Basto, distrito de Vila Real. As coordenadas geográficas da estação, tomadas no ponto mais elevado (445 metros - figura 3.42.2) são de 41° 24' 58" N de latitude e 7° 55' 41" W de longitude.

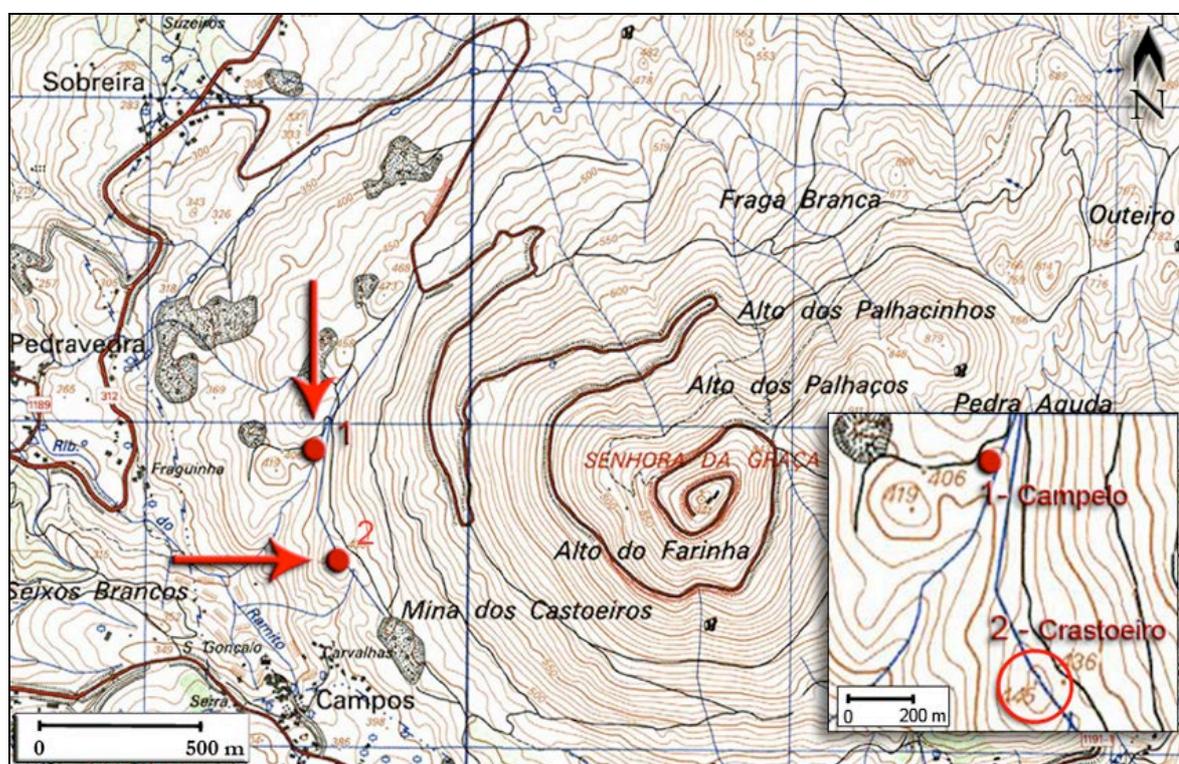


Figura 3.42 - Localização das estações arqueológicas de: 1) Campelo; 2) povoado do Crastoeiro (extracto da Carta Militar 1:25000, folha 87 de Vilar de Ferreiros (Mondim de Basto), série M888, IGEOE, 1997).

O Crastoeiro, também designado por Alto do Muro, ocupa um esporão granítico, destacado na vertente sudoeste do Monte Farinha, mais conhecido por Monte da Senhora da Graça, (figura 3.42.2), sobranceiro ao vale da ribeira de Campos. Na parte superior possui uma plataforma, circuitada por muralha pétreia em 2/3 do seu perímetro, com cerca de 120 m no eixo maior e 65 m no menor, que estrutura diversos recintos, desnivelados e delimitados por afloramentos graníticos, muitos deles com gravuras rupestres de temática abstracta (Dinis, 2009a e 2009b).

O sítio arqueológico do Crastoeiro foi identificado no verão de 1983 (Dinis, 2001), no decorrer dos trabalhos de prospecção e de campo realizados no âmbito do projecto de Levantamento Arqueológico do Concelho de Mondim de Basto. A sua identificação acaba por ser tardia pois, como refere Dinis (2001), a sugestiva toponímia, conhecida já no reinado de D. Afonso III, e a associação do monte a tesouros escondidos e a lendas de mouras encantadas não foram atributos suficientes para despertar o interesse dos arqueólogos, particularmente o de Henrique Botelho, autor da maior parte das referências a valores arqueológicos do distrito de Vila Real.

Os trabalhos de escavação iniciaram-se em 1984 tendo-se realizado, até à data, dez campanhas de escavação, integradas em diversos projectos programados para o local (Dinis, 2009a). Os resultados das primeiras fases de escavação encontram-se descritos em diversas publicações da especialidade (Dinis, 1986a, 1986b, 1987, 1993-94, 1994, 2001 e 2005). Estas escavações revelaram a ocupação permanente do local, pelo menos a partir da Idade do Ferro Antigo, designadamente a partir do séc. IV a.C., segundo datas radiométricas (Dinis, 2009a), momento em que se realizaram cabanas feitas com materiais perecíveis e fossas abertas no saibro (figura 3.43d), revelando uma população ligada às práticas agro-silvo-pastoris e ao trabalho da metalurgia do ferro. Cerca do séc. II a.C. o povoado foi fortificado com uma muralha de pedra (figura 3.43a) e, um pouco mais tarde, construíram-se as primeiras casas em pedra, de planta circular (figura 3.43a, c) e sub-rectangular. A romanização do povoado foi comprovada pela existência de edifícios quadrangulares e rectangulares (figura 3.44). Segundo Dinis (2009b), o local terá sido abandonado no séc. I d.C., sendo provável uma breve reocupação na Idade Média.

Durante as várias campanhas arqueológicas efectuadas no povoado foi recolhido um diversificado espólio, distribuído pelas diferentes fases da sua ocupação. A maior percentagem corresponde a fragmentos de cerâmica, maioritariamente lisos e de fabrico manual, até ao séc. II a.C., e às formas de potes e de potinhos/púcaros. Nos períodos seguintes a loiça evoluiu técnica e morfológicamente, passando a ser usada a roda de oleiro, surgindo novas formas, como as panelas de asa interior, as panelas de asa em orelha e as talhas. Da época romana, assinala-se a presença de algum material de importação (ânforas e cerâmica de paredes finas).

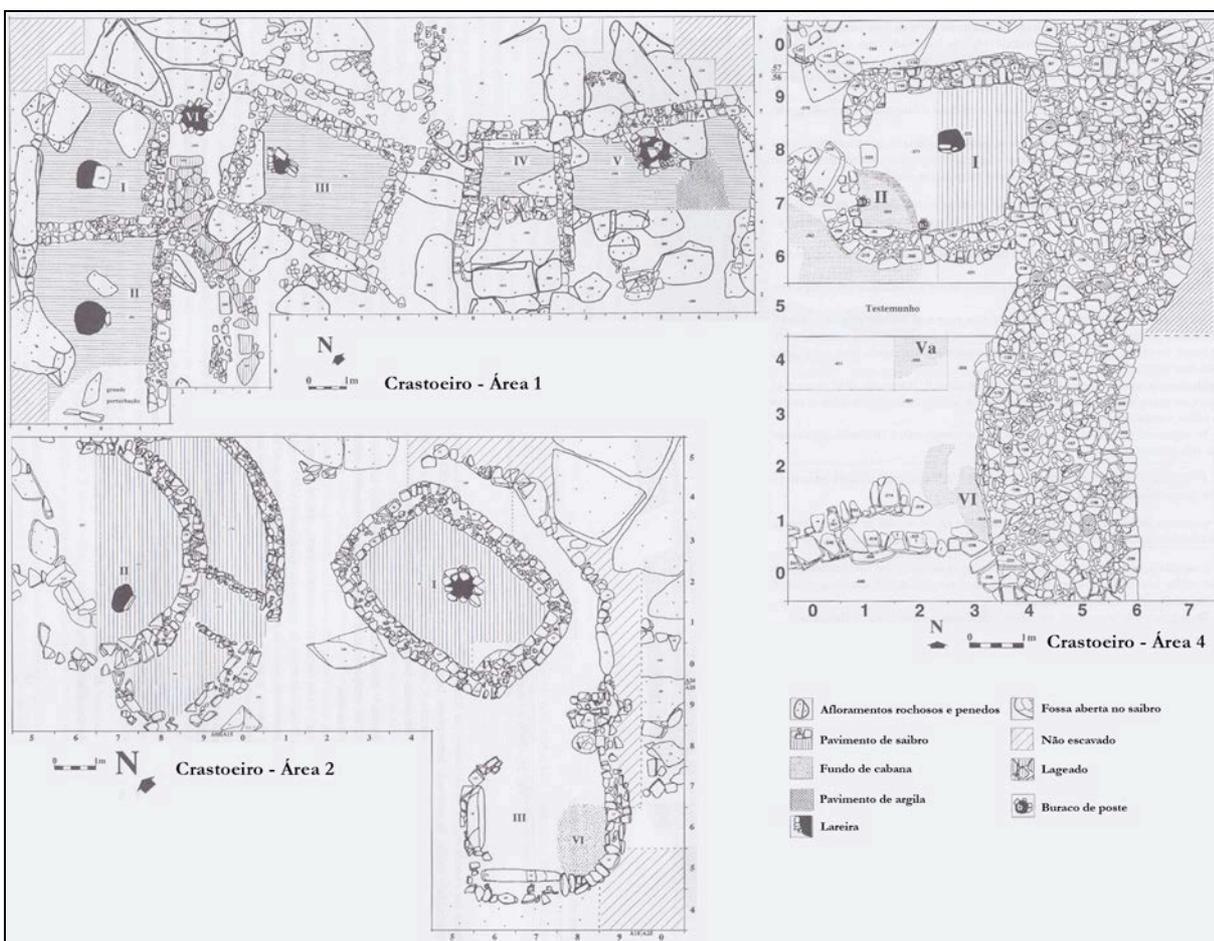
A metalurgia do ferro e do bronze estão presentes no povoado, desde a Idade do Ferro, tendo-se recolhido fíbulas, alfinetes de cabelo e pregos. Também foram encontrados artefactos líticos (mós, percutores, alisadores e fusaiolas) realizados com pedra local (granito) e com outras matérias-primas, destacando-se a utilização de seixos do rio. Foi também encontrado algum material de excepção, durante este período (Dinis, 2009b), comprovando a existência de contactos supra-regionais, dos quais se salienta diversas contas de vidro, algumas com fina película dourada no interior.



**Figura 3.43** – Perspectivas do povoado do Crastoieiro: a) casas circulares da Idade do Ferro, observando-se um troço da muralha do povoado em segundo plano; b) gravuras rupestres do tipo atlântico; c) pormenor de uma casa circular, observando-se o piso de argila compactada e o lugar da lareira; d) gravuras rupestres em segundo plano e estruturas da Idade do Ferro escavadas no substrato granítico, em primeiro plano (fotografias b, c e d da autoria de António Pereira Dinis).

Este povoado integra também um vastíssimo número de gravuras rupestres (figura 3.43b e d), com algumas características análogas às de Campelo. Os trabalhos de Dinis (2009b, 2009c; Dinis & Bettencourt, 2009), referem a identificação de, aproximadamente, 50 afloramentos com gravuras, distribuindo-se por cinco complexos ou núcleos, cada um deles parecendo organizar diferentes recintos. Os principais complexos, pelo número de exemplares e variedade de motivos,

são os complexos 1 e 2, tendo sido estes os únicos conjuntos à volta dos quais foram realizadas escavações e efectuadas descrições pormenorizadas (Dinis 2009a, 2009b; Dinis & Bettencourt, 2009). As gravuras identificadas foram efectuadas por picotagem seguidas de abrasão, observando-se nos vários afloramentos diferentes tipos de representações. Alguns apresentam unicamente covinhas (Fig. 3.43d), outros conjugações pictóricas compostas por covinhas, semi-círculos, círculos simples e círculos concêntricos e sulcos (3.43b). Há afloramentos com motivos singulares como espirais ou um motivo ovalado segmentado, preenchido com nuvens de pontos no seu interior.



**Figura 3.44** – Planos finais de três das áreas escavadas até 2001 localizadas na figura 3.46. Estes planos apresentam um edifício de planta circular com avançado e alguns de planta quadrangular e rectangular descobertos no Crastoeiro (adaptado de Dinis, 2001).

Os estudos realizados nos complexos 1 e 2 mostram a sua utilização durante grande parte da Idade do Ferro regional, ao longo de mais de quatro séculos (IV/III até I a.C.), ou mesmo durante a Romanização deste local (Dinis & Bettencourt, 2009), se bem que a descoberta de

cerâmicas pré-históricas descontextualizadas e o reconhecimento de sobreposições e adições de motivos gravados, nalguns afloramentos, possam indicar que a construção destes lugares se iniciou muito antes, talvez durante o Calcolítico Regional (finais do IV a meados do III milénios a.C.). Deste modo, as gravuras (inseridas no contexto da Arte Atlântica) teriam sido usadas e, possivelmente reinterpretadas durante 2500 a 3000 anos (Dinis 2009a, 2009b; Dinis & Bettencourt). Neste último trabalho, os autores consideraram que o seu uso até tarde poderá resultar de fortes arcaísmos existentes nesta região, mais oriental relativamente à arte Atlântica. Segundo Alves (2009) esta zona integra-se na área de transição da Arte Atlântica peninsular (característica do noroeste Peninsular desde o litoral até ao sistema montanhoso Galaico-Duriense) e da Arte Esquemática peninsular.

### 3.4.2. Contexto geológico e geomorfológico

O povoado do Crastoeiro situa-se, como anteriormente referido, na vertente ocidental do Monte Farinha, a uma altitude de 450 m. Encontra-se implantado num esporão natural, que se destaca na vertente, conferindo-lhe uma protecção natural.

Situa-se no rebordo sudoeste da mancha de Granito da Senhora da Graça (granito Hercínico, tardi a pós tectónico relativamente a F2, de duas micas, grão médio, com esparsos megacristais) muito próximo da zona de contacto com os metassedimentos Parautóctones da Unidade de Mouquim (alternâncias de filitos e xistos com metassiltitos e metagrauvaques) (Pereira *et al.*, 1989), onde ocorrem com abundância filões e massas de quartzo e aplitos (figura 3.45). Numa área muito considerável do arqueosítio o substrato granítico aflora à superfície, circunstância aproveitada pelas populações que frequentaram o local quer para adoçar casas e a muralha quer para servir de suporte à gravação de representações de carácter simbólico (Dinis, 2001).

As metalurgias do bronze e do ferro desempenharam um importante papel no povoado do Crastoeiro (Dinis, 2009a; 2009b). Considerando as necessidades destas populações em termos de recursos minerais indispensáveis à manutenção destas práticas, verificamos que este sítio arqueológico se encontra numa posição estratégica, relativamente ao acesso às matérias primas que carecia. Analisando as cartas geológicas 1:50.000 da região, nomeadamente a folha 10 A de Celorico de Basto (Pereira *et al.*, 1989), verifica-se a existência de diversas jazidas minerais, das quais se destacam as de estanho, de ferro e de cobre. A menos de 4 km para sudeste do Crastoeiro, localiza-se uma jazida de estanho (mina das Mestras – mina concessionada para a exploração de estanho e de volfrâmio) e, num raio de cerca de 10 km, encontram-se outras jazidas de estanho (minas da Fonte a cerca de 8 km para nordeste e minas do Ciadoiro a cerca de

10 km para sudeste), bem como outras mineralizações do referido minério a aproximadamente 15 km a sudoeste. A cerca de 5 km para sudeste, verifica-se a existência de ricos níveis de ferro, enquadrados na Formação Ordovícica do Quartzito Armoricano. Junto a Vila Cova, cerca de 10 km para su-sudeste, encontram-se as minas com o mesmo nome, onde se explorou ferro, cobre, chumbo e zinco. Pereira (1989) a existência de mineralizações de cobre e de chumbo, na mina da Fafuca, em filões de quartzo associados ao cavalgamento de Vila Cova, e a mineralizações de cassiterite, nas minas de Seixoso, associados a filões sub-horizontais a verticais de aplitos e aplito-pegmatitos.

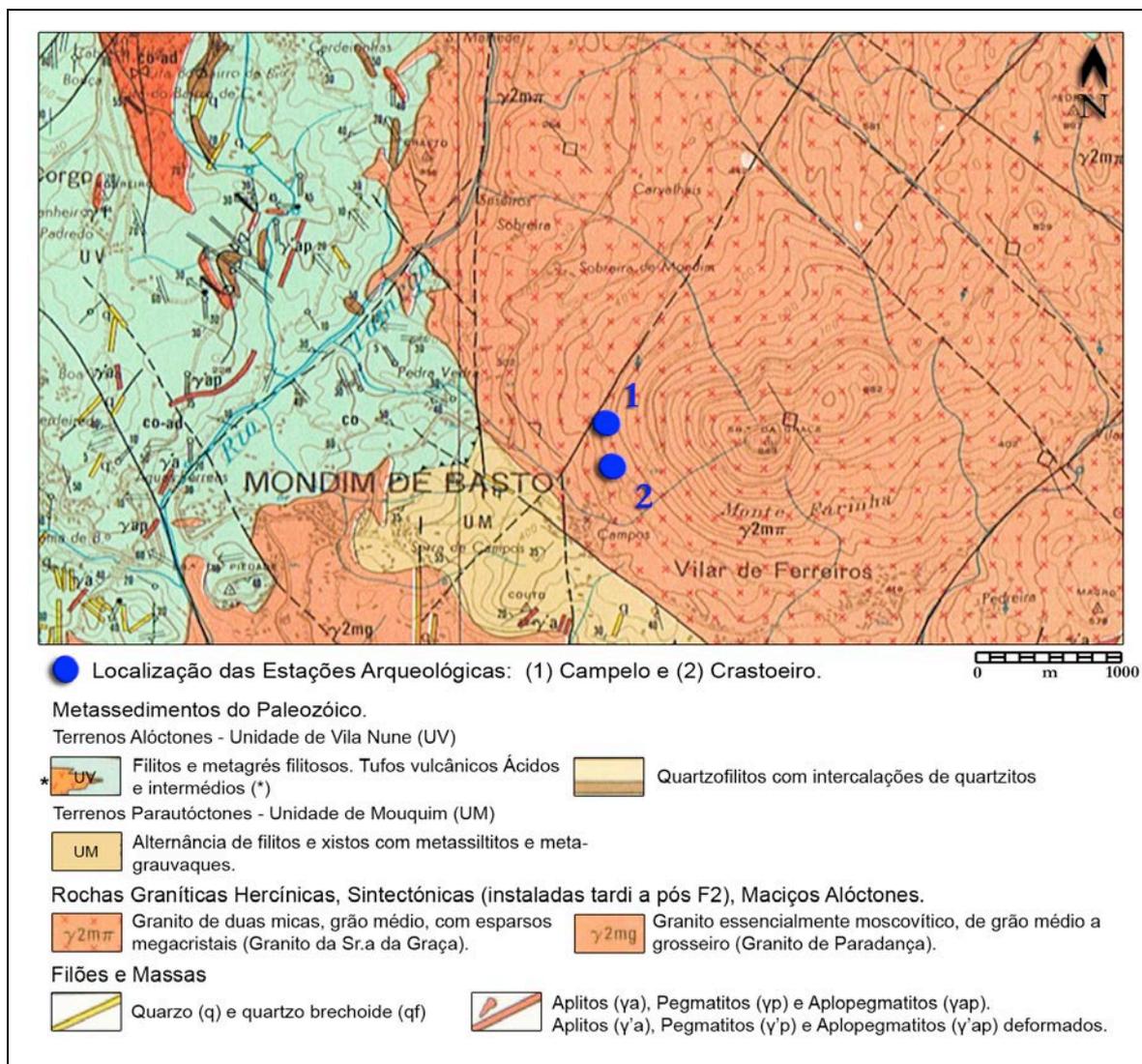


Figura 3.45 - Enquadramento geológico das estações arqueológicas de: 1) Gravuras rupestres de Campelo; 2) Povoado do Crastoeiro (extracto da Carta Geológica, 1:50.000, 10A de Celorico de Basto, 1989).

### 3.4.3. Aquisição dos dados

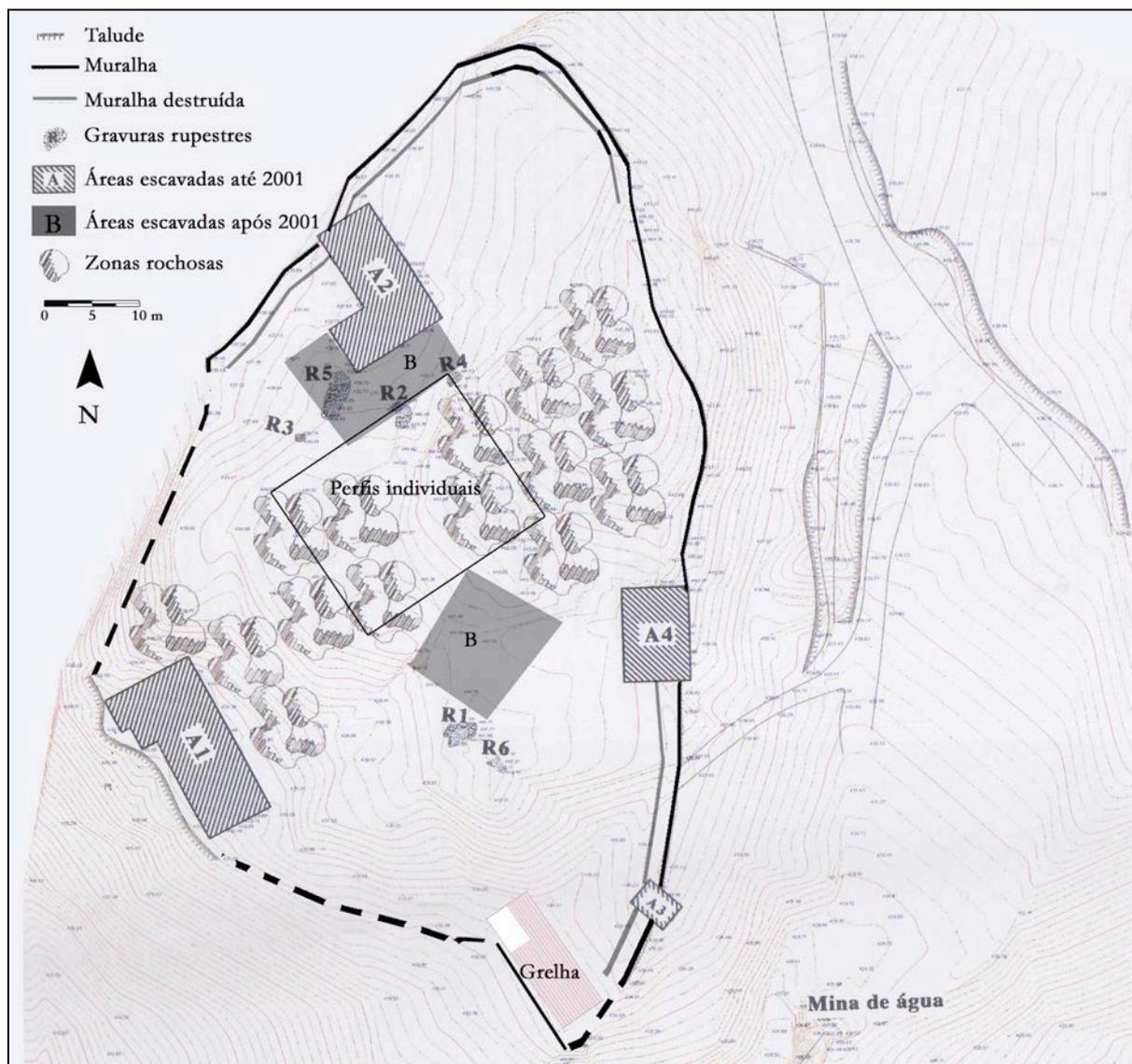
Este trabalho revestiu-se de particular interesse por ter sido o primeiro, conduzido no âmbito da presente dissertação, a realizar-se numa cronologia diferente da dos casos anteriores tornando-o, assim, um bom exemplo de estudo.

Trata-se de um estudo prospectivo que teve como principais objectivos a detecção de estruturas arqueológicas pétreas enterradas e a definição da estratigrafia dos locais prospectados. Tal como nas estações anteriores, pretendeu-se detectar, identificar e mapear potenciais estruturas arqueológicas, com o intuito de fornecer informações concretas sobre a localização, a profundidade e a geometria das estruturas identificadas, tendo em vista o direccionamento de futuras campanhas de escavação e a implementação de medidas de protecção para os locais.

Para a concretização da prospecção geofísica nesta estação arqueológica foi necessário, primeiramente, proceder à escolha das áreas a estudar. Esta escolha foi realizada com o apoio de António Dinis e teve em consideração os objectivos propostos para a prospecção e as questões inerentes às problemáticas arqueológicas, tendo sido seleccionadas duas áreas: uma relativa à área mais alta do povoado, localizada entre dois núcleos importantes de arte rupestre e correspondente a um grande barrocal, onde eventuais edifícios da Idade do Ferro teriam sido construídos no meio do caos de blocos graníticos (figura 3.46 a 3.48) e outra na zona sudeste da estação, numa plataforma mais baixa sobrejacente ao pano de muralha do povoado (figura 3.46).

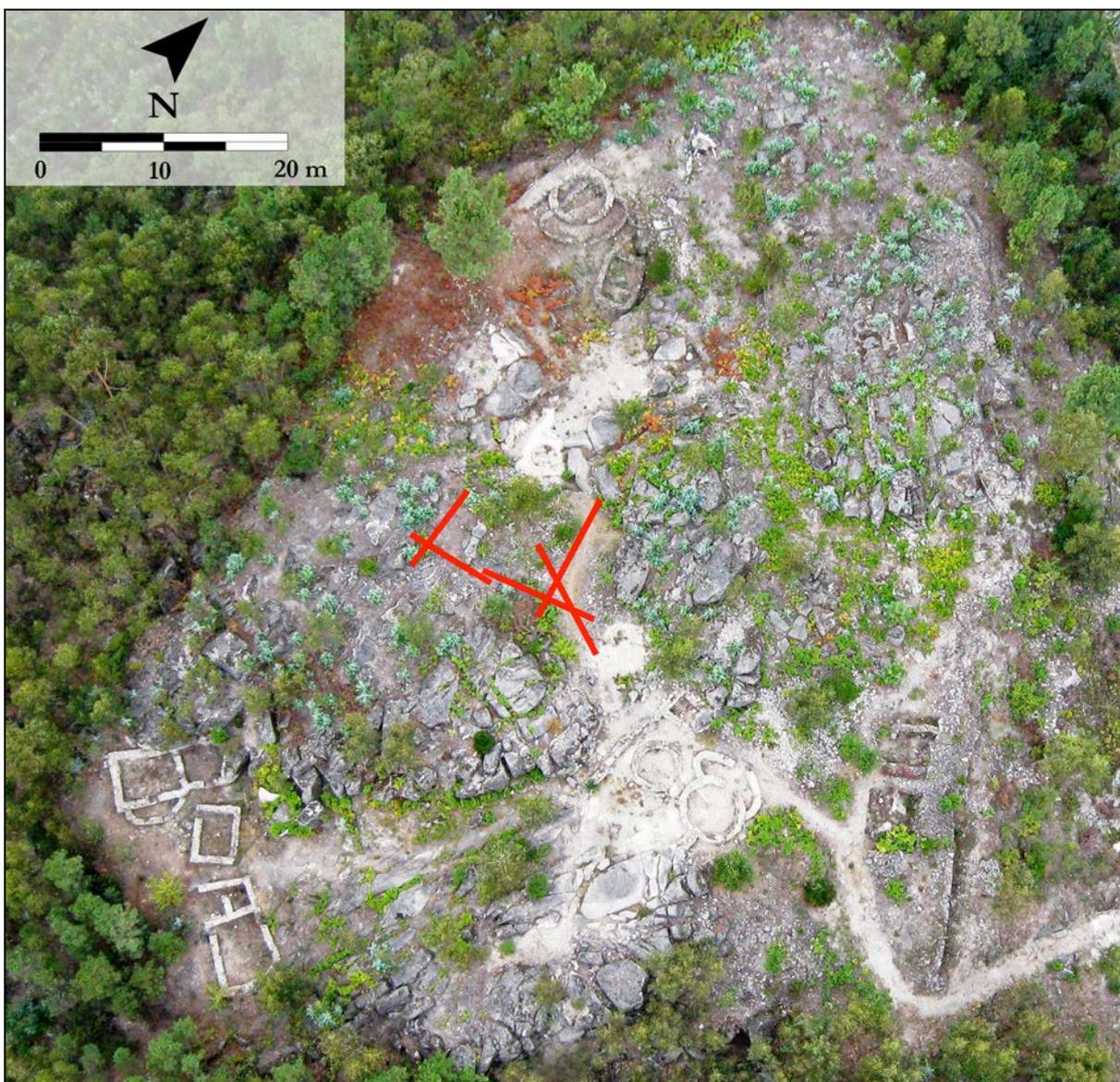
No primeiro local pretendia-se verificar se os pequenos blocos de pedra existentes à superfície, correspondiam, efectivamente, a derrubes de estruturas arqueológicas soterradas e definir a sua geometria. Este local escolhido mostrou ser particularmente difícil de prospectar uma vez que apresentava muitos obstáculos na sua superfície (blocos e afloramentos graníticos, montículos de pedras, raízes, etc.) que dificultaram a utilização do Georadar. Estas características inviabilizaram a opção por uma prospecção em área, visto ser impossível implementar uma grelha onde fosse exequível a aquisição de perfis paralelos. Para se poder concretizar o trabalho de investigação optou-se pelo método de prospecção através de perfis individuais, tendo sido possível escolher cinco locais onde se conseguiram realizar, de uma forma linear, cinco perfis de Georadar, tal como se representa na figura 3.49.

Para a prospecção realizada neste local, dada a exiguidade do espaço, optou-se pela utilização da antena de 400 MHz, por esta ser bastante mais estreita que a de 200 MHz e, também, por permitir uma melhor resolução de sinal. Para a aquisição dos perfis foram definidas os seguintes parâmetros de aquisição: 50 traços de reflexão por metro; 512 amostras por traço; janela de aquisição de 40 ns.



**Figura 3.46** – Mapa do povoado do Crastoeiro. São apresentadas as áreas onde se adquiriram os perfis individuais e se realizou a prospecção pseudo 3D (adaptado de Dinis, 2001).

O segundo local prospectado localiza-se, como já foi referido, na zona sudeste do povoado junto à face interna da muralha, numa área de cota mais baixa (figura 3.46). Este local caracteriza-se por ser relativamente aplanado (figura 3.50), formando uma pequena plataforma entre a muralha (esta foi edificada aproveitando uma pequena escarpa natural) e um declive mais acentuado que desce desde as zonas mais altas da estação. Esta plataforma terá tido origem na acumulação de materiais coluvionares resultantes da erosão das zonas mais altas da estação, os quais ficaram retidos pela muralha criando uma zona aplanada. No lado norte desta plataforma observavam-se alguns derrubes pétreos, o que indicia a presença de uma potencial estrutura antrópica soterrada que se pretendia confirmar pela prospecção de Georadar.

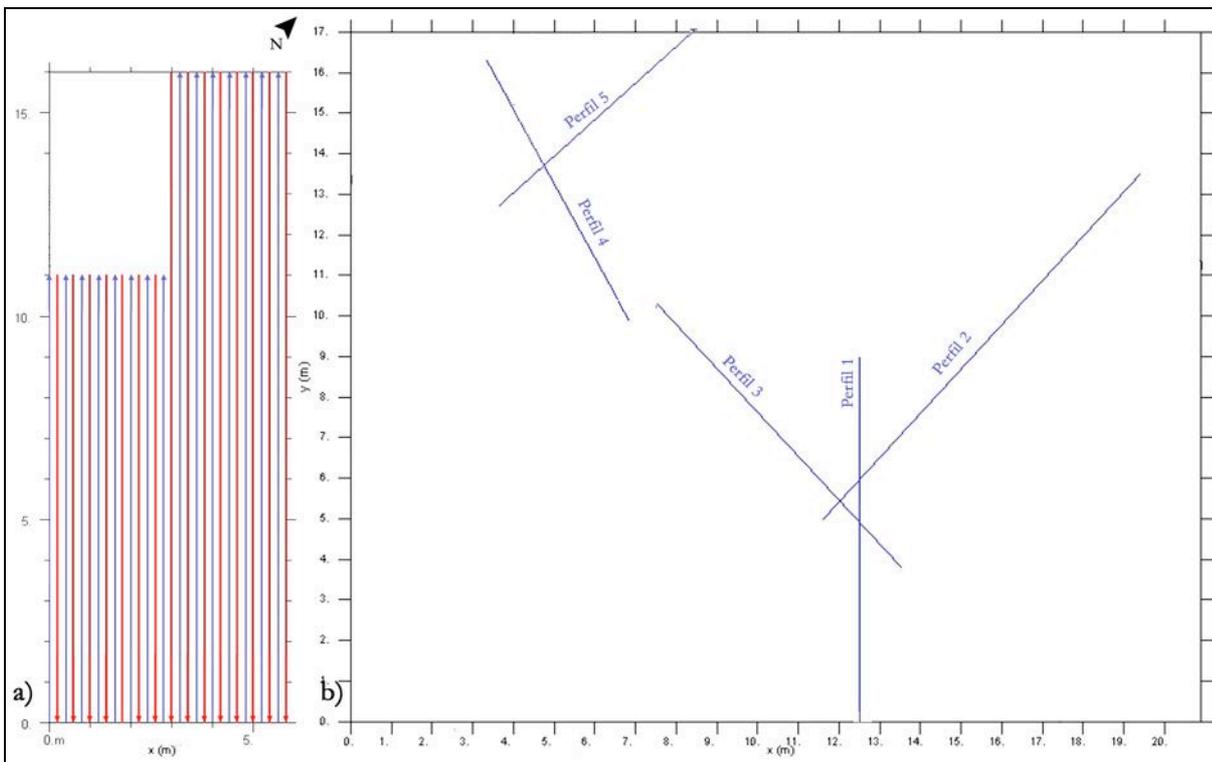


**Figura 3.47** – Fotografia aérea do povoado do Crastoeiro. No centro do povoado foram assinalados os perfis individuais adquiridos com Georadar. A plataforma onde foi adquirida a grelha pseudo 3D localiza-se a sudeste, fora da área desta fotografia. Destaca-se nesta imagem o caos de blocos graníticos que dominam a área. A leste, junto à entrada passa a muralha. A noroeste observa-se um núcleo habitacional onde se destaca uma casa circular com vestíbulo e um edifício de planta rectangular. A sul destaca-se um núcleo de casas de planta rectangular e ao centro um núcleo de casas circulares.

As características físicas do terreno existentes neste local foram favoráveis à realização de uma prospecção em área, escolhendo-se o método pseudo 3D com espaçamento de 20 cm entre perfis. Definiu-se, no local, uma grelha de 16 m por 6 m, onde foram adquiridos trinta perfis, paralelos entre si, em zig-zag (figura 3.49 a), quinze dos quais com 11 m de extensão e os restantes quinze com 16 m de extensão, correspondendo a uma área de 114 m<sup>2</sup>, e um total de 405 m de prospecção. Os perfis foram adquiridos com os seguintes parâmetros de aquisição: 50 traços de reflexão por metro; 1024 amostras por traço; janela de aquisição de 40 ns.



**Figura 3.48** – Área central do povoado do Crastoeiro onde foram adquiridos os perfis lineares de Georadar. Nas imagens estão posicionadas as fitas métricas que auxiliaram a aquisição dos referidos perfis.



**Figura 3.49** – a) Esquema da prospecção em área realizada na zona ocidental da estação, com a posição dos perfis e respectiva direcção de aquisição. b) Esquema da aquisição dos perfis individuais na zona central da estação.



**Figura 3.50** – Perspectiva, tomada de noroeste, da área prospectada na zona sudeste do povoado do Crastoeiro, adjacente à muralha.

#### 3.4.4. Resultados

As prospeccões realizadas nas zonas central e sudeste da estação arqueológica permitiram a aquisição de um vasto conjunto de dados que foram processados de forma a gerar imagens interpretáveis das potenciais estruturas arqueológicas presentes no local. Uma primeira observação dos radargramas em bruto (i.e., sem processamento), de todas as campanhas, evidenciou uma boa penetração de sinal e uma grande diversidade de reflectores.

A velocidade de penetração do sinal de radar foi determinada pelo método de ajuste de hipérboles, tendo-se obtido uma velocidade média de 0,10 a 0,11 m/ns. Este intervalo de velocidades está de acordo com o expectável para este tipo de terrenos (solos coluvionares e granito, alternando por vezes com granito muito alterado e/ou muito fracturado) e com as condições de humidade dos mesmos (subsolo com teores elevados de humidade, tendo em conta que os dias anteriores à prospeccão registaram precipitação moderada) estando de acordo com o apresentado na tabela 2.1 para este tipo de materiais.

O processamento dos dados dos perfis individuais adquiridos na zona central e dos perfis da grelha pseudo 3D da área sudeste foi efectuado com o programa ReflexW, tendo sido adoptado o seguinte fluxo de processamento: correcção do tempo zero; *dewon*; filtro *band-pass*; remoção do

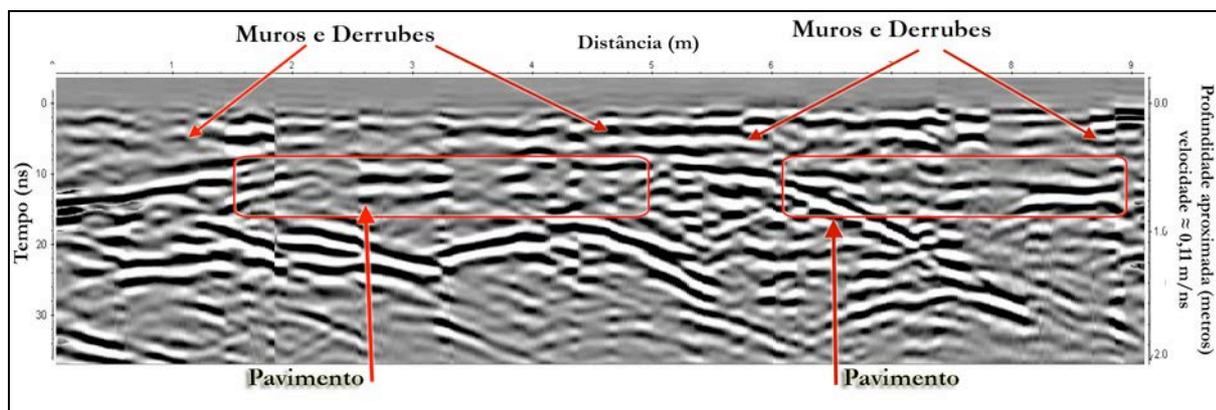
*background*; *subtract mean*. Posteriormente, os dados da grelha pseudo 3D, adquiridos na zona sudeste do povoado, foram processados com o programa GPR-process, tendo sido gerados volumes de dados pseudo 3D, através de interpolação do valor de amplitudes entre perfis num raio de 20 cm, pelo método *kriging*. Os volumes pseudo 3D foram seguidamente seccionados para geração de mapas de amplitudes, a intervalos de 1 ns de profundidade, e espessura de 12 cm com 50% de sobreposição.

### Perfis Individuais

O processamento dos cinco perfis individuais adquiridos na zona central da estação arqueológica permitiu salientar nos radargramas dos perfis 1, 2 e 3 algumas reflexões de potencial interesse arqueológico. Os perfis 4 e 5 não apresentaram reflexões de interesse arqueológico.

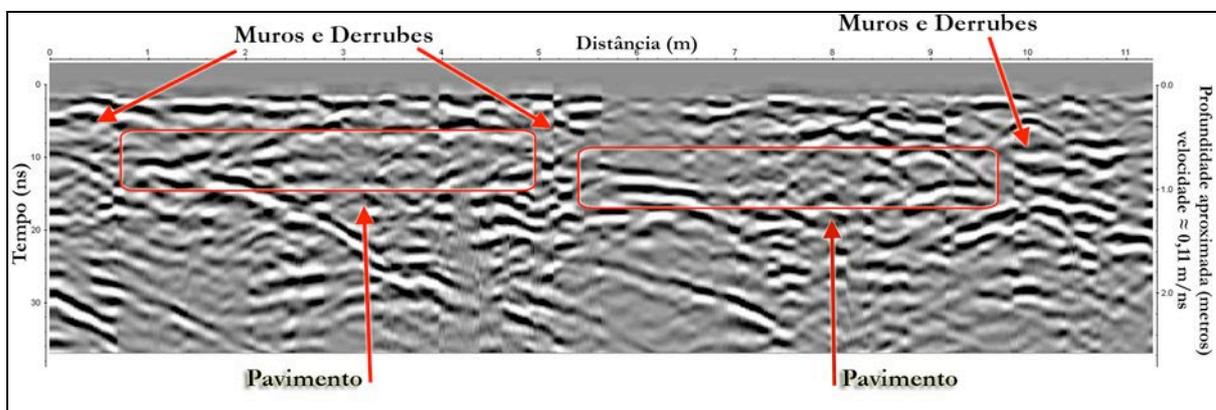
As primeiras interpretações permitiram inferir que a posição do substrato granítico é muito variável, não sendo de fácil localização uma vez que a heterogeneidade dos materiais do subsolo é grande. São também visíveis nos radargramas reflexões de estruturas geológicas como diáclases e bolas graníticas.

Analisando o perfil 1 (figura 3.51) observa-se a presença de duas reflexões lineares, a cerca de 50-60 cm de profundidade, interpretadas como possíveis pavimentos de edifícios ou vestíbulos de casas circulares. Associadas a estas, foram identificadas as reflexões do que se interpreta como muros e respectivos derrubes, os quais apresentam em média 30 a 60 cm de largura, o que corresponde à espessura média das paredes de alguns edifícios do Crastoeiro (Dinis, 2001).



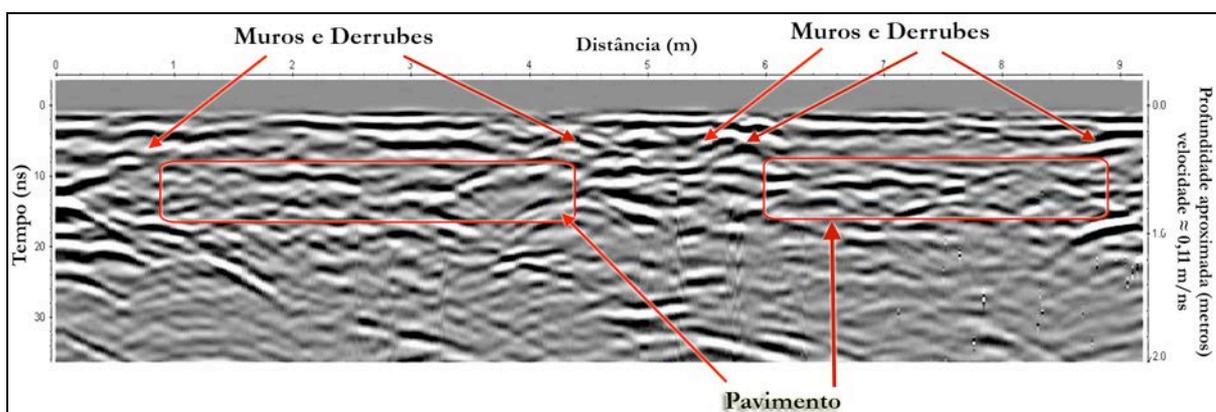
**Figura 3.51** – Pormenor do perfil 1, adquirido na zona central do povoado, onde se assinalaram as reflexões interpretadas como muros, derrubes e pavimentos de edifícios da Idade do Ferro ou da romanização.

No perfil 2 (figura 3.52) registou-se, também, a presença de reflexões lineares, a cerca de 50-60 cm de profundidade, interpretadas como possíveis pavimentos de edifícios, bem como reflexões do que se interpreta como muros e respectivos derrubes.



**Figura 3.52** – Pormenor do perfil 2, adquirido na zona central do povoado, onde se assinalaram as reflexões interpretadas como muros, derrubes e pavimentos de edifícios da Idade do Ferro ou da romanização.

No perfil 3 (figura 3.53) observou-se no centro do perfil uma zona com um grande conjunto de reflexões que são interpretadas como pertencendo a dois muros, contíguos, associados aos respectivos derrubes. Observam-se, também, duas reflexões lineares, a cerca de 50-60 cm de profundidade, interpretadas como possíveis pavimentos de edifícios ou de vestíbulos de casas circulares.



**Figura 3.53** – Pormenor do perfil 3, adquirido na zona central do povoado, onde se assinalaram as reflexões interpretadas como pertencendo a edifícios da Idade do Ferro ou da romanização.

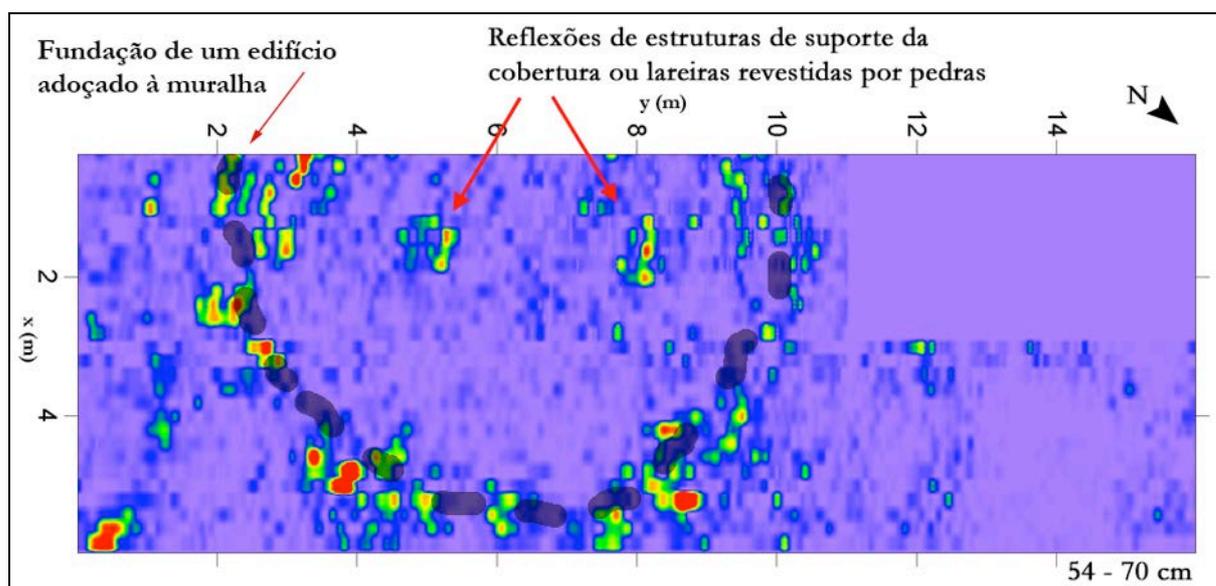
Em síntese, nos 3 perfis descritos, verificou-se a presença de reflexões de pavimentos, possivelmente pisos de argila compactada, e de muros de pedra. As reflexões dos pisos, pela sua posição nos perfis leva-nos à conclusão que seriam de 3 eventuais edifícios, uma vez que uma das reflexões dos pisos é comum aos três perfis (a da direita no perfil 1 e da esquerda nos perfis 2 e 3). O espaçamento entre as reflexões das paredes, em quase todos os perfis, rondam os 3 m a 4 m. Considerando que os perfis podem ter seccionado os edifícios segundo uma corda da circunferência, estas medidas são coincidente com o diâmetro de alguns edifícios circulares do Crastoeiro, que rondam os 4 m a 5 m (figura 3.44 e 3.47). Algumas das reflexões poderão corresponder também a vestíbulos de casas circulares. Por outro lado, as reflexões do pavimento ficam sempre entre as reflexões atribuídas às paredes, o que reforça a interpretação efectuada. Assim, os dados interpretados nos radargramas permitem propor para o local a presença de um pequeno núcleo habitacional, com provavelmente três edifícios, semelhante a outros núcleos identificados no Crastoeiro (figura 3. 47). A interpretação realizada, a partir da posição das reflexões permitiu elaborar o esquema da figura 3.54 onde se apresenta uma proposta para a geometria das estruturas existentes no local.



**Figura 3.54** – Proposta para a planta das estruturas arqueológicas presentes na área prospectada, construída a partir da posição das reflexões nos perfis e tendo por base a tipologia das estruturas presentes nesta área do povoado.

### Grelha pseudo 3D

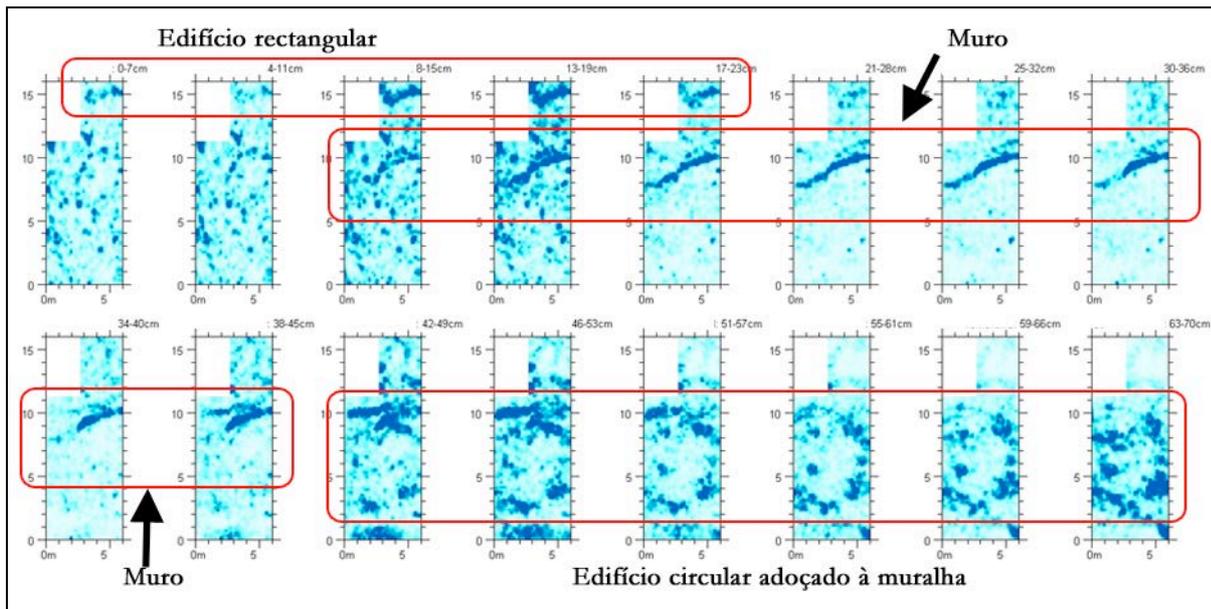
Relativamente aos dados da zona sudeste do povoado, adquiridos pelo método de prospecção em área, o seu processamento deu origem a um conjunto de mapas de amplitude, os quais apresentaram interessantes padrões de reflexão originados por estruturas arqueológicas pétreas. O mapa de amplitudes apresentado na figura 3.55, apresenta um conjunto de reflexões formando um padrão semi-circular que correspondem às paredes de um edifício da Idade do Ferro adoçado à muralha do povoado, localizada a sudeste. O edifício em questão apresenta um diâmetro de 8 m, bastante acima do diâmetro médio dos edifícios deste povoado, podendo corresponder a um edifício de cariz comunitário, semelhante à casa grande da citânia de Briteiros, em Guimarães, embora este possua um diâmetro de aproximadamente 15 m (Gonzalez Ruibal, 2006-2007). A presença destas casas grandes, também conhecidas como casas do conselho, é um fenómeno comum em muitos povoados da Idade do Ferro. Observam-se também, no centro desta estrutura, um conjunto de reflexões que podem corresponder a estruturas de fundação de pilares de sustentação de uma cobertura ou a lareiras revestidas por pedras.



**Figura 3.55** – Mapa de amplitude resultante da prospecção em área pseudo 3D realizada na zona sudeste do povoado do Crastoeiro. Este mapa apresenta reflexões localizadas entre os 54 cm e os 70 cm de profundidade de uma estrutura semi-circular adoçada à muralha com um conjunto de reflexões centrais, correspondentes a derrubes ou a estruturas de sustentação da cobertura.

Os dados atrás referidos foram reprocessados utilizando o programa GPR-Slice. Os mapas de amplitudes gerados confirmam as interpretações efectuadas anteriormente (figura 3.56) mostrando também algumas reflexões que não foram resolvidas no processamento inicial. Foram identificadas no canto norte da grelha algumas reflexões, associadas aos derrubes observados na

superfície do terreno, que parecem corresponder ao canto de um pequeno edifício rectangular, semelhante aos apresentados na figura 3.44. Observa-se, também, uma reflexão linear, presente entre os 13 cm e os 50 cm de profundidade, provavelmente pertencente à base de um muro pétreo que se sobrepõem à estrutura circular. Este muro terá sido construído após o desmantelamento da estrutura anterior, podendo ser porventura de períodos mais recentes, talvez já da romanização ou posterior.

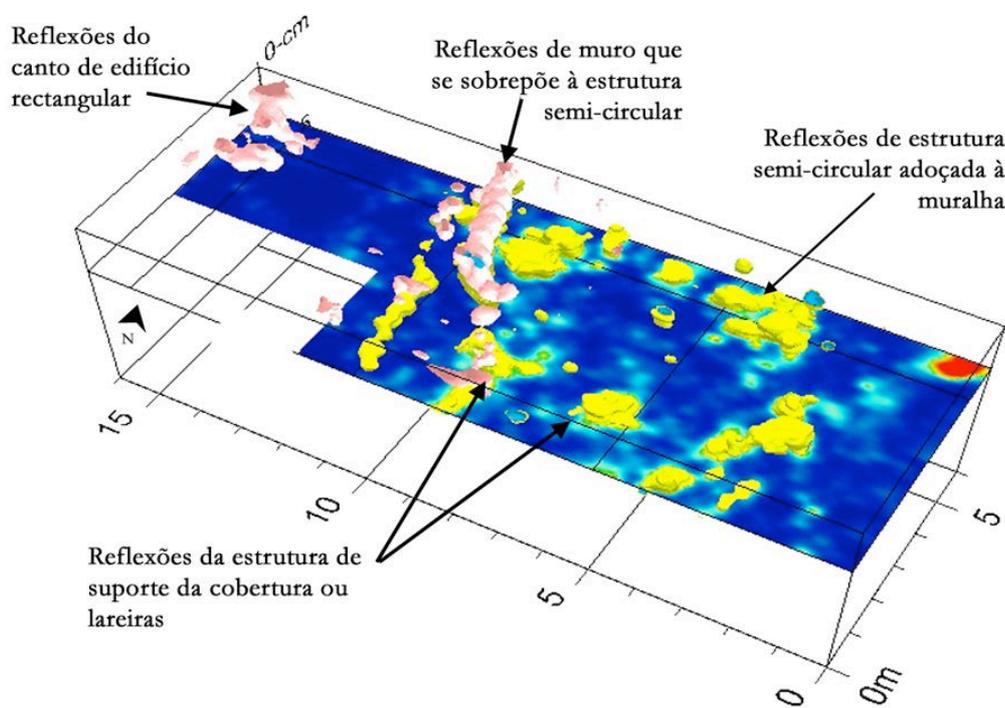


**Figura 3.56** – Sequência de mapas de amplitudes dos dados processados com o GPR-Slice, localizados entre a superfície e os 70 cm de profundidade. Os primeiros 5 mapas (até  $\approx 30$  cm de profundidade) apresentam um padrão ortogonal no canto superior direito, que corresponderá ao canto de um edifício rectangular da romanização. Entre os 8 cm e os 45 cm de profundidade, observa-se, sobreposta ao edifício circular, uma estrutura linear que corresponderá a um muro provavelmente do período de romanização ou posterior. Os últimos mapas apresentam reflexões, localizadas entre os 42 cm e os 70 cm de profundidade, de uma estrutura semi-circular adoçada à muralha, com um conjunto de reflexões centrais, talvez de estruturas de sustentação da cobertura ou de lareiras revestidas com pedras.

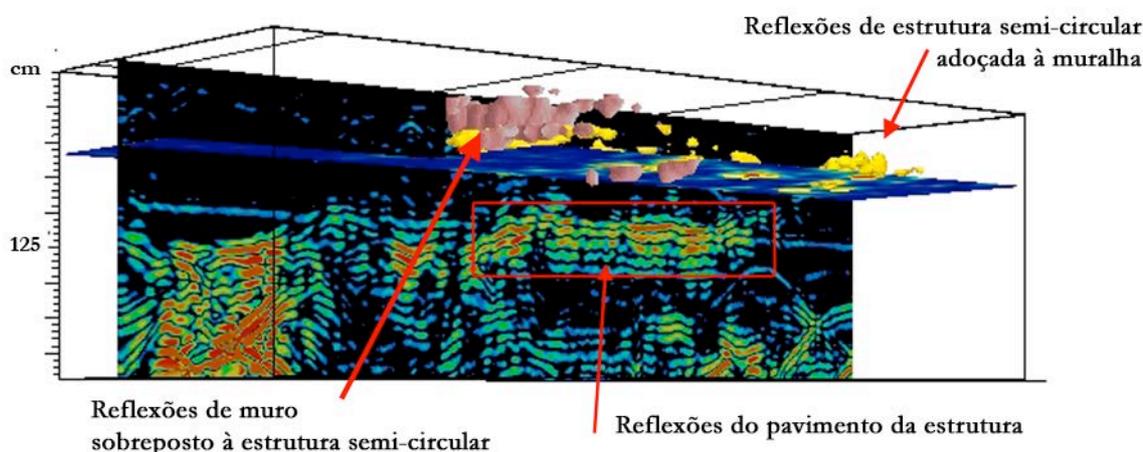
A utilização do programa GPR-Slice possibilitou, neste caso concreto, a visualização das reflexões de diversas formas que, integradas entre si, fornecem uma perspectiva das estruturas presentes neste local. Com este programa foram gerados blocos diagrama com os volumes das isosuperfícies das reflexões mais intensas, os quais revelaram as formas das estruturas presentes na parte central da grelha, nomeadamente o edifício circular e o muro que se lhe sobrepõe (figura 3.57).

A integração destes blocos diagrama com os mapas de amplitudes e/ou os radargramas, tal como se pode observar nas figuras 3.57 e 3.58 permite visualizar tridimensionalmente a estrutura presente, reforçando a sua interpretação e contribuindo para uma melhor apresentação dos

resultados. Nestas imagens é mais perceptível a relação espacial entre as diferentes estruturas, sendo nítida a sobreposição do muro sobre o edifício circular.



**Figura 3.57** – Bloco diagrama integrando o mapa de amplitudes dos 58 cm de profundidade com os volumes de isosuperfícies das amplitudes até aos 100 cm de profundidade. Observa-se uma semi-circunferência de uma estrutura adoçada à muralha, à qual se sobrepõem uma estrutura linear (muro) edificada em período mais recente. No canto norte observa-se o canto de um edifício de planta rectangular.



**Figura 3.58** – Bloco diagrama integrando o mapa de amplitudes dos 58 cm de profundidade, os volumes de isosuperfícies das amplitudes mais fortes até aos 70 cm de profundidade e um dos radargramas. Para além das estruturas já descritas na figura 3.56 observa-se no radargrama, associado à estrutura semi-circular, um conjunto de reflexões correspondentes ao pavimento do edifício da Idade do Ferro.

### 3.4.5. Discussão

A dificuldade da aquisição dos dados na zona central do povoado do Crastoeiro, devido ao obstáculos presentes nesse área, não impossibilitou o sucesso desta prospecção. A utilização do método de prospecção com perfis individuais mostrou ser eficaz na detecção de estruturas arqueológicas pétreas (paredes) e de argila compactada (pavimentos) não se tendo, no entanto, conseguido definir, por este método, a planta das estruturas. No entanto, os dados recolhidos permitiram formular uma hipótese de trabalho sobre a forma e o arranjo espacial das estruturas arqueológicas soterradas, tendo por base o que já se conhece sobre o Crastoeiro.

Quanto à prospecção em área pseudo-3D efectuada na zona sudoeste do povoado, esta mostrou ser bastante eficaz na detecção de estruturas pétreas e de argila (pavimento), tendo o espaçamento utilizado, entre os perfis, sido adequado para a obtenção imagens de qualidade das estruturas soterradas.

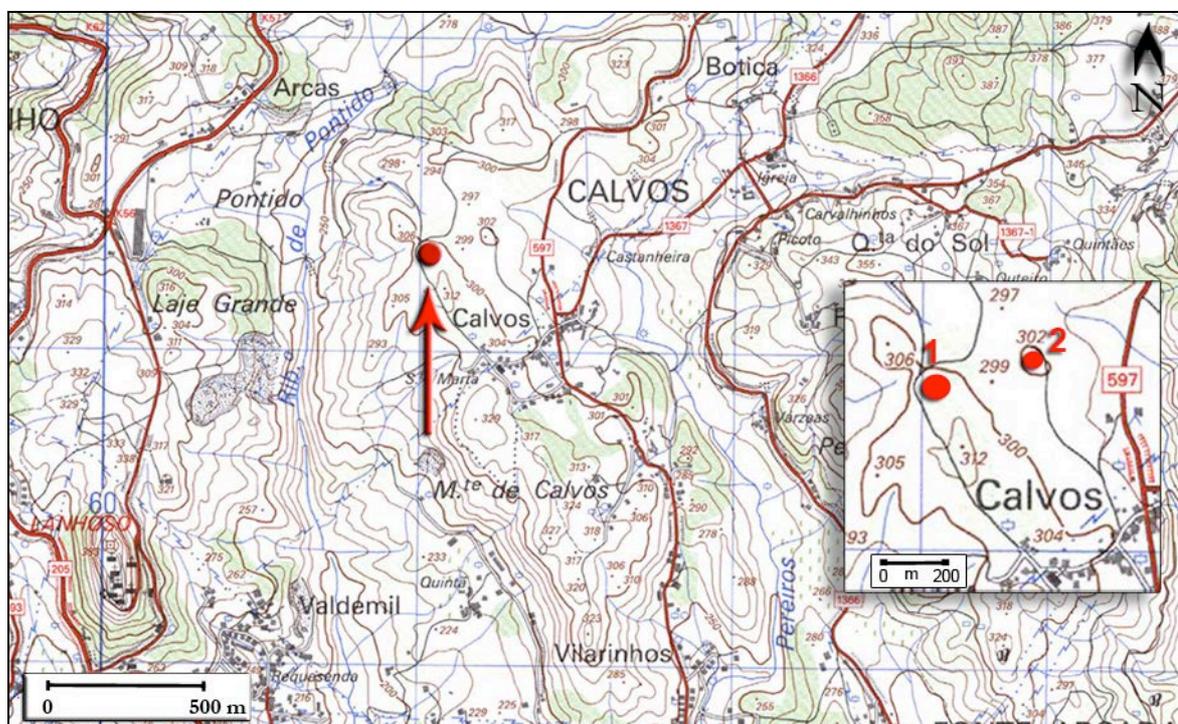
A apresentação tridimensional dos resultados e a integração de diferentes formas de imagem (mapas de amplitudes, radargramas, volumes de isosuperfícies) mostrou ser a forma mais eficaz para a compreensão e interpretação das estruturas arqueológicas presentes. Esta, a par da visualização sequencial dos mapas de amplitudes, possibilitou a interpretação não só da forma, mas também das relações temporais existente entre as diferentes estruturas pétreas.

### 3.5. Estação arqueológica do dólmen da Tojeira

Neste sub-capítulo descreve-se a prospecção arqueogeofísica com Georadar realizada na estação arqueológica do dólmen da Tojeira, em Calvos, concelho da Póvoa de Lanhoso. Este estudo decorreu em Outubro de 2008 e realizou-se no âmbito de uma colaboração com o arqueólogo Rui Pedro Alves Barbosa, enquadrada no projecto intitulado *Estudo e Valorização do Dólmen da Tojeira, Póvoa de Lanhoso*, apoiado pela Câmara Municipal da Póvoa de Lanhoso e aprovado pelo IGESPAR.IP (2008 e 2009).

#### 3.5.1. Enquadramento contextual arqueológico

O dólmen da Tojeira localiza-se no lugar com o mesmo nome, na freguesia de Calvos, concelho da Póvoa de Lanhoso, distrito de Braga. As coordenadas geográficas da estação, tomadas no ponto mais elevado (301 metros de altitude - figura 3.59) são: 41° 35' 42.8" N de latitude e 8° 16' 09.4" W de longitude.



**Figura 3.59** - Localização do dólmen da Tojeira (Calvos), assinalada com o ponto vermelho nº 1 (extrato da Carta Militar 1:25.000, folha 57, série M888, IGEOE, 1997). Na ampliação do local, no ponto 2 está representado o *tumulus* do Madorro, descoberto durante a campanha de prospecção arqueogeofísica.

O dólmen da Tojeira foi identificado em Novembro de 2006, no âmbito do projecto de “*Valorização da Via XVII em Póvoa de Lanhoso*”, trabalhos promovidos pela Câmara Municipal da Póvoa de Lanhoso e desenvolvidos pela empresa *Palimpsesto* (Barbosa, 2009; Barbos, no prelo). Segundo este autor, este monumento, a par das necrópoles megalíticas do Moinho de Vento, da Pena Província, do Alto de S. Mamede, do Marco Branco, do Alto de S. Miguel em Galegos, de Garfe, e de monumentos aparentemente isoladas como o de Bárrio, em Verim, constituem um importante indício do fenómeno sepulcral Neolítico, no concelho de Póvoa de Lanhoso.

A importância deste fenómeno, a nível concelhio e regional motivou a elaboração do projecto intitulado *Estudo e Valorização do Dólmen da Tojeira, Póvoa de Lanhoso*, a desenvolver em quatro fases distintas, visando, não só, a componente de investigação, mas igualmente a questão social e pedagógica do património (Barbosa, no prelo). Dentro deste contexto, inserido na 1ª Fase de trabalhos de valorização, decorreu em Abril de 2008, a primeira intervenção no monumento funerário, que teve por objectivo a avaliação, caracterização, definição e registo do monumento, nomeadamente dos limites do montículo artificial ou *tumulus* e a localização do corredor, bem como a avaliação do seu estado de conservação.

Os dólmenes são construções edificadas durante o Neolítico (desde o V e durante o IV milénios a.C.), de âmbito funerário, servindo propósitos de inumação colectiva, sendo igualmente interpretados como locais de culto e de reunião entre populações que viveriam ainda com grande disposição para a mobilidade (Bettencourt, 2009). Os monumentos megalíticos tinham câmaras e, por vezes, corredores, construídos com grandes esteios, possuindo, muitas vezes, átrios definidos com pequenas pedras na entrada dos corredores. Os corredores que podiam ser curtos, médios ou longos, eram maioritariamente voltados a nascente. Todas as estruturas internas eram cobertas por montículos ou *tumulus* de planta circular ou elíptica, designadas popularmente por mamoas. Estas, compostas por terras, podiam ser revestidas por couraças líticas na sua totalidade ou conter apenas um anel lítico periférico.

A intervenção realizada em 2008, no âmbito do referido projecto, consistiu na realização de sondagens arqueológicas que, na totalidade, atingiram uma área de 30 m<sup>2</sup>. A localização das áreas intervencionadas, implantadas em consonância com os objectivos estabelecidos, passaram pela abertura de quatro trincheiras ou sanjas: as sanjas norte, sul, este e oeste (figura 3.60).

Os trabalhos realizados permitiram identificar os limites do *tumulus* nas sanjas abertas nos quadrantes norte, sul e oeste. Permitiram também verificar que o monumento era constituído por um *tumulus* em terra, delimitado, na sua quase totalidade, por um anel de pedras periférico (figura 3.61) com cerca de 1 m de largura. Este era composto por calhaus grandes e blocos de granito. A

nascente, na área correspondente à entrada/corredor/átrio do monumento, não foi detectado o anel lítico periférico, mas uma colmatção com depósitos sedimentares que deverão corresponder à época de condenação do monumento (Barbosa, no prelo).



**Figura 3.60** – Perspectivas do dólmen da Tojeira: a) a partir de norte, observando-se a sanja norte e, à esquerda a sanja este; b) a partir de sudeste, observando-se a sanja este e a sanja sul; c) a partir de noroeste, observando-se as sanjas norte e oeste; d) a partir de sudoeste, observando-se a fase inicial de abertura da sanja oeste. Nestas imagens é perceptível a forma do *tumulus*, sendo este bastante aplanado no topo e apresentando declive mais acentuado no flanco oriental (b) (fotografias da autoria de Rui Barbosa).

Segundo Barbosa (no prelo), nesta zona, constatou-se, ainda, a alteração antrópica do substrato granítico arenizado, tendo este sido cortado e afeiçoado, de modo a conferir maior monumentalidade à entrada da câmara. É também referido o reconhecimento de uma estrutura limitada por pequenas lajes graníticas e por clastos de granito, no limite sudoeste desta sanja, não tendo sido possível compreender o resto da estrutura.

Na zona central do monumento, ainda não totalmente escavada, as sondagens revelaram uma perturbação que poderá corresponder a uma violação. No entanto, identificaram-se duas estruturas compostas por “pedra seca”, aparentemente, não afectadas pela perturbação e possivelmente relacionadas com a câmara funerária (Barbosa, no prelo).



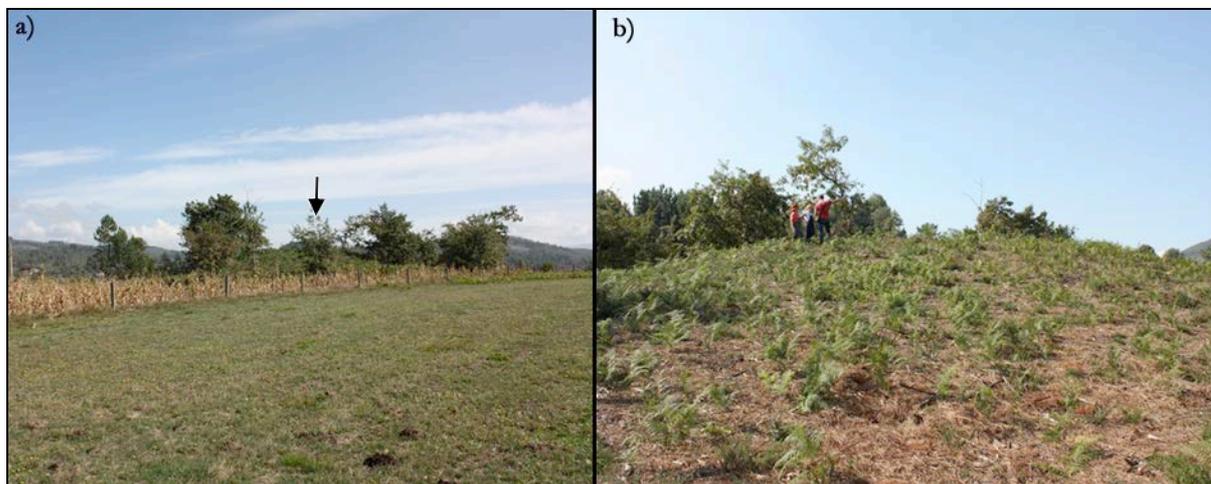
**Figura 3.61** – Perspectivas das sanjas de escavação arqueológica do dólmen da Tojeira. a) Na sanja norte observa-se o anel pétreo periférico do *tumulus* e o substrato granítico arenizado. b) Na sanja sul, também é possível observar o anel pétreo periférico e o substrato granítico arenizado. c) Na sanja este, observa-se o substrato granítico arenizado, relativamente plano na zona mais alta e mergulhando quase um metro para nascente. Aqui, eventual zona de entrada no monumento, não foi detectado o anel lítico periférico. d) Na sanja oeste observa-se o substrato granítico arenizado, a cerca de 1 m de profundidade e, na zona mais oriental, uma estrutura indeterminada (fotografias da autoria de Rui Barbosa).

A escavação revelou um espólio constituído por fragmentos que constituem um recipiente cerâmico, uma enxó em pedra polida e uma ponta de seta em xisto, artefactos tipologicamente integráveis no período Neolítico. Este espólio foi identificado quase única e exclusivamente na zona que corresponderia à entrada do monumento, certamente deposições intencionais, segundo Barbosa (no prelo).

A análise dos dados da escavação revelou que o dólmen da Tojeira, não corresponde a um monumento “clássico” mas sim a uma estrutura *sui generis*, sem paralelo na vasta bibliografia já consultada (Barbosa, no prelo).

Durante a campanha de prospecção geofísica descrita neste subcapítulo, foi descoberto por Rui Barbosa, na companhia do autor desta dissertação, o *tumulus* do Madorro, localizado a apenas 200 metros para NE da Tojeira. Trata-se de um monumento de grandes dimensões, com pelo menos 4 m de altura e 30 m de diâmetro, com destaque notório na paisagem (figura 3.62). Pretende-se,

num futuro próximo, enquadrado no "Projecto de Valorização do Dólmen da Tojeira" realizar um estudo prospectivo com Georadar sobre este monumento, para o qual muito contribuirá a metodologia testada no dólmen da Tojeira.



**Figura 3.62** – *Tumulus* do Madorro, localizado a cerca de 200 m a NE do dólmen da Tojeira. a) Perspectiva vista de oeste, sendo bem visível o destaque que esta estrutura tem na paisagem local. b) Pormenor do *tumulus*, visto de sul, onde é perceptível a sua grande dimensão (fotografias de Rui Barbosa).

### 3.5.2. Contexto geológico e geomorfológico

O dólmen da Tojeira está localizada no limite nor-noroeste de uma superfície aplanada, que corresponde ao topo do monte de Calvos. Este monte, de alinhamento NW-SE, encontra-se limitado a poente e norte pelo vale do ribeiro de Pontido e a nascente pelo vale da ribeira de Pereiros, ambos pertencentes à bacia hidrográfica do rio Ave. Este monte tem o topo aplanado, com altitude média de 300 m, pontilhado por alguns outeiros mais elevados que podem chegar aos 323 m de altitude. Trata-se de um relevo residual granítico, de aparente controlo tectónico (está localizado entre duas zonas de fractura de direcção NW-SE).

O monte de Calvos (figura 3.63) é formado por dois tipos de rochas graníticas hercínicas (Ferreira *et al.*, 2000), sendo estas o Granito de Briteiros (leucogranito, moscovítico-biotítico, de grão fino, tardi a pós-tectónico relativamente a F3) e o Granito de Agrela (monzogranito, biotítico, porfiróide, de grão médio, tarditectónico relativamente a F3 e pertencente ao Complexo Granítico da Póvoa do Lanhoso (Ferreira *et al.*, 2000).

O monumento da Tojeira encontra-se sobre o granito de Agrela, mesmo junto ao contacto deste com o Granito de Briteiros. Nessa zona o substrato encontra-se muito alterado, apresentando-se o granito bastante arenizado (saibro), o que deve ter facilitado a construção do monumento

megalítico. De referir que os blocos que constituem o anel pétreo que circunda o monumento são, na sua maioria, constituídos por Granito de Agrela, observando-se, pontualmente, alguns blocos do Granito de Briteiros.

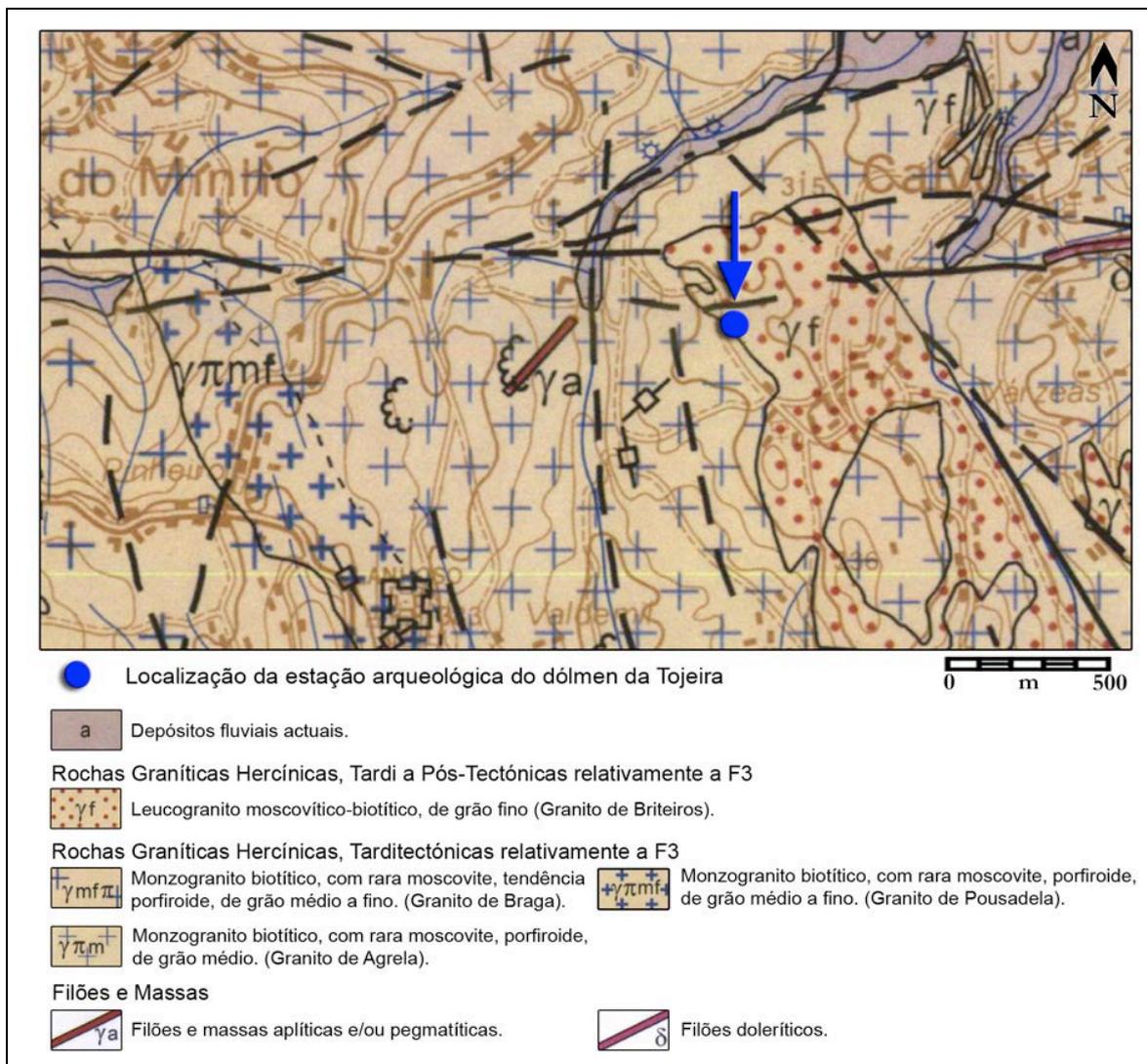


Figura 3.63 - Enquadramento geológico do dólmen da Tojeira, Calvos (extracto da Carta Geológica, 1:50.000, 5D de Braga – 2ª edição, 2000).

### 3.5.3. Aquisição dos dados

Este trabalho prospectivo surgiu para tentar dar resposta a um conjunto de questões postuladas após a realização das sondagens arqueológicas, nomeadamente se o anel lítico da periferia do *tumulus* se encontrava intacto em toda a estrutura; qual a posição da câmara e o seu grau de conservação, na parte central do monumento; se teria existido alguma reutilização do *tumulus*,

observável a partir de alterações na sua estratigrafia e se o corte observável na arena granítica se prolongava.

Para responder a estas questões foi necessário definir uma metodologia de aquisição de dados que se adaptasse a esta problemática, bem como às condições físicas do sítio arqueológico. Neste sentido, numa primeira abordagem (figura 3.64), realizaram-se algumas passagens prospectivas com as duas antenas (400 MHz e 200 MHz), de forma a se obter uma primeira perspectiva da possível estrutura interna da mamoa e da profundidade dos principais reflectores. Estes ensaios permitiram constatar uma boa penetração do sinal e a existência de uma grande quantidade de reflectores, permitindo também verificar que a profundidade máxima do substrato granítico seria de aproximadamente 1 m na sua zona central. Foi então possível, a partir destes dados, optar pela a antena de 400 MHz pois esta é a mais adequada à prospecção de sítios pouco profundos, apresentando um melhor compromisso entre resolução e profundidade de penetração do que a antena de 200 MHz.

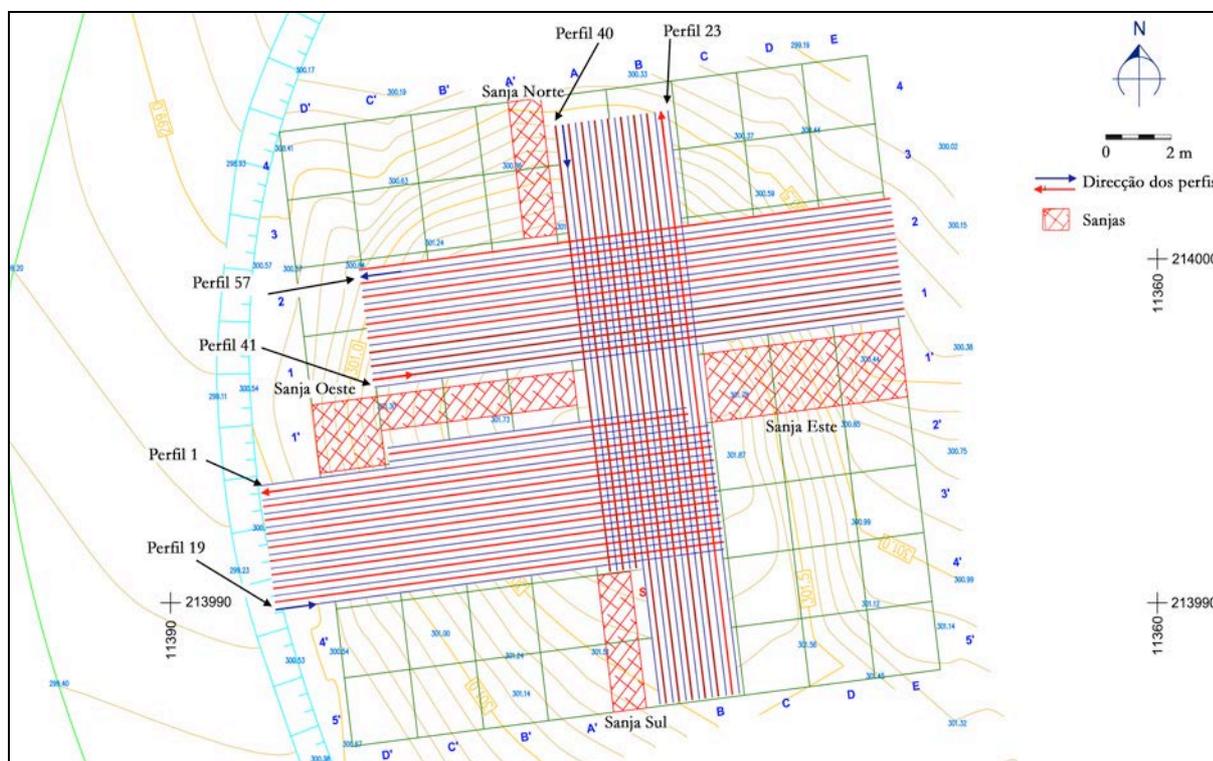


**Figura 3.64** – Prospecção preliminar realizada com o a antena de 400 MHz sobre o *tumulus* da Tojeira. Fotografia da autoria de Rui Barbosa, tirada para sul, observando-se em primeiro plano a sanja norte.

Para a prospecção do *tumulus* escolheu-se o método de prospecção em área, havendo-se definido uma grelha pseudo-3D (figura 3.65), cobrindo o máximo de área possível do monumento, com

perfis adquiridos em duas direcções (X e Y) de forma a que a parte central da mamoa fosse intersectada em duas direcções perpendiculares. A grelha foi implementada utilizando-se a quadrícula dos trabalhos arqueológicos (figura 3.65), tendo os perfis X sido adquiridos segundo a direcção E-W, paralelamente às sanjas oeste e este, e os perfis Y segundo a direcção N-S, paralelamente às sanjas sul e norte.

Os perfis foram adquiridos em zig-zag, com 20 cm de espaçamento entre si, no modo *survey wheel*, com os seguintes parâmetros de aquisição: 50 traços de reflexão por metro; 1024 amostras por traço e janela de aquisição de 40 ns. No total foi coberta uma área com cerca de 170 m<sup>2</sup> e adquiridos 58 perfis correspondentes a cerca de 885 m de prospecção.



**Figura 3.65** – Esquema do posicionamento da grelha de prospecção pseudo 3D. Os perfis foram adquiridos entre as quatro sanjas de prospecção: norte; sul; este e oeste. Planimetria da Câmara Municipal da Póvoa de Lanhoso e da *Palimpsesto*, cedida por Rui Barbosa.

### 3.5.4. Resultados

A prospecção realizada gerou um conjunto apreciável de dados, os quais foram processados com o programa ReflexW. Numa primeira fase determinou-se a velocidade de penetração do sinal de radar pelo método de ajuste de hipérbolas, tendo-se obtido uma velocidade de 0,10 a 0,11 m/ns. Posteriormente, os dados foram processados com o seguinte fluxo de trabalho: correcção do

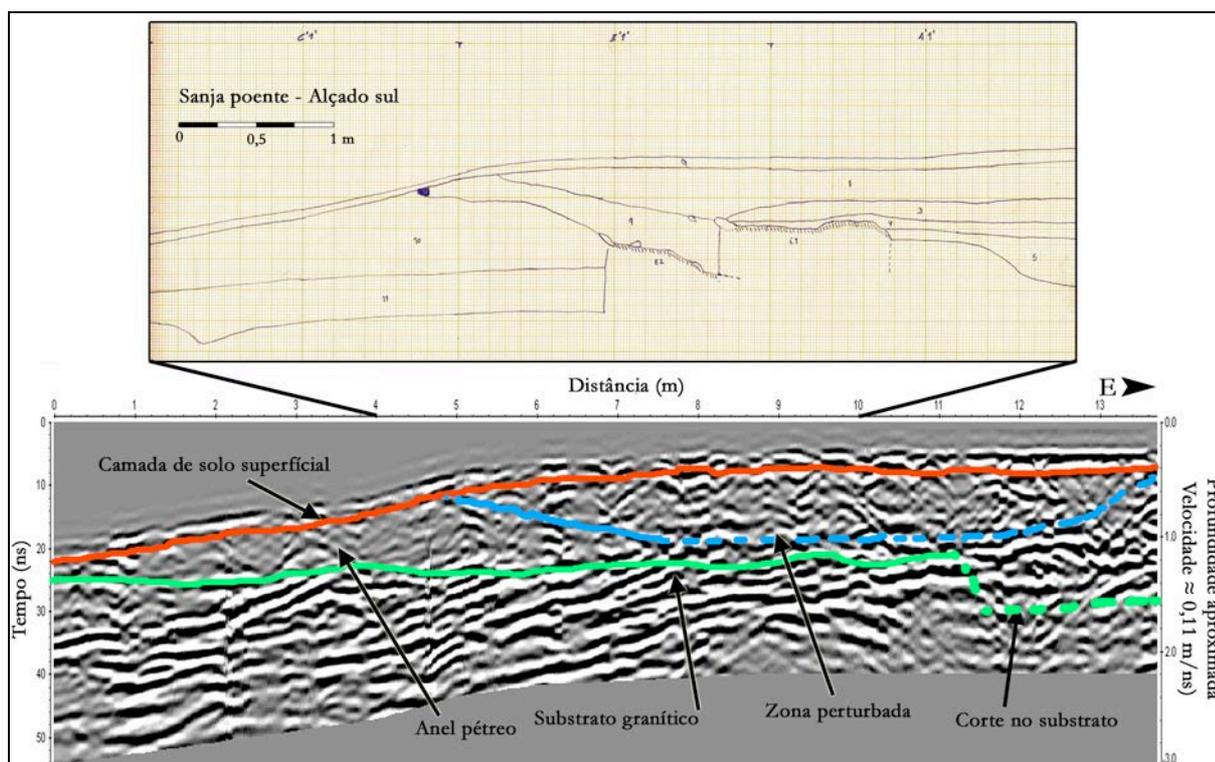
tempo zero; *dewon*; filtro *band-pass*; remoção do *background*; *subtract mean*. Como o terreno prospectado era irregular, devido à forma do *tumulus*, o qual condiciona a topografia do local, tornou-se também necessário proceder à correcção topográfica dos radargramas.

Os dados dos radargramas tratados com o ReflexW foram posteriormente processados com o programa GPR-process tendo sido gerado um volume de dados pseudo 3D através da interpolação dos valores de amplitudes entre perfis, num raio de 20 cm. Estes volumes foram seguidamente seccionados para a geração de mapas de amplitudes, a intervalos de 1 ns de profundidade e espessura de 12 cm com 50 cm de sobreposição. Os mapas foram criados por interpolação dos valores de amplitude pelo método *krigging*.

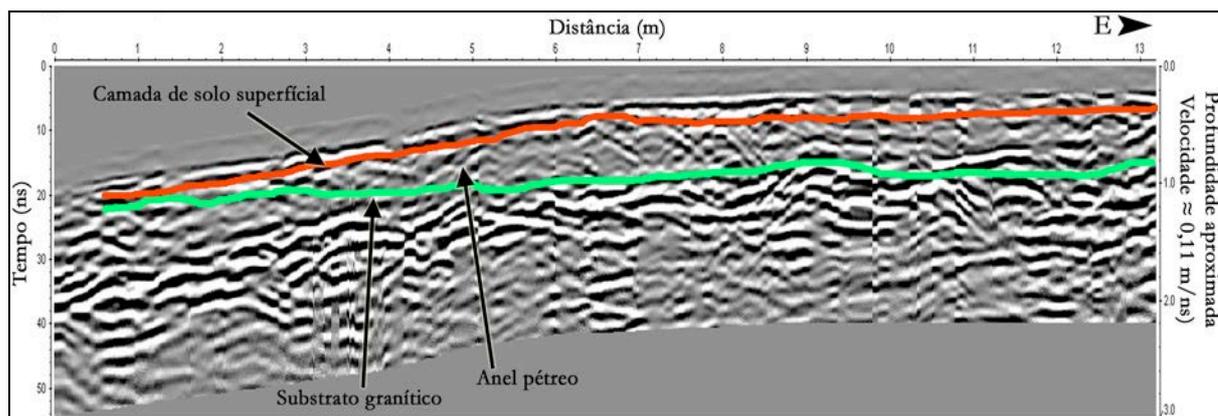
Numa primeira abordagem interpretativa procedeu-se à análise individual dos radargramas processados e corrigidos topograficamente. A interpretação dos radargramas, tais como os representados nas figuras 3.65 a 3.70 (localização dos perfis na figura 3.65), permitiu determinar a estratigrafia do *tumulus*, tal como se descreve de seguida.

- Observa-se uma reflexão contínua em todos os perfis, localizada à superfície, correspondente a uma camada de solo vegetal, com 0,1 m a 0,2 m de espessura, cortada pontualmente por reflexões que indicam a presença de clastos com diâmetro médio de 10 a 30 cm e distribuição aleatória.
- Verificou-se que o substrato granítico é relativamente plano na parte central do *tumulus*, mergulhando cerca de 1 m no lado nascente. A sua profundidade é de aproximadamente 1 m a 1,5 m, em toda a zona central, encontrando-se a cerca de 50-60 cm de profundidade nas zonas do anel pétreo.
- Observaram-se nos radargramas reflexões que indicam a continuidade do anel pétreo. Este parece estar bem conservado em toda a metade ocidental do *tumulus*, e nas zonas orientais próximas das sanjas norte e sul, tal como se pode observar na figura 3.66 – 3.71. Já as reflexões observadas na parte oriental, logo a norte da sanja este, parecem indicar uma fragmentação do anel, quer por estar em pior estado de conservação, quer por ter sido interrompido intencionalmente.
- No perfil 1 (sul da sanja oeste – figura 3.66) e no perfil 41 (norte da sanja oeste – figura 3.71) observaram-se algumas reflexões associadas a estruturas pétreas indeterminadas.
- Os radargramas mostram a existência de uma grande perturbação dos materiais sobrejacentes ao substrato granítico em toda a zona central do *tumulus*. Esta perturbação poderá indiciar a ocorrência de violações na área da câmara (figura 3.72).

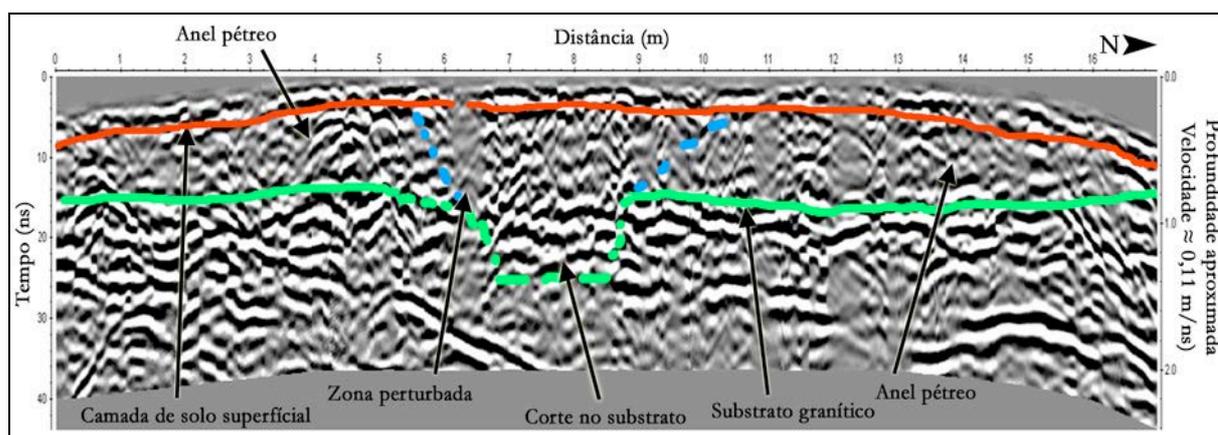
- Não foram identificados padrões de reflexão que pudessem indicar a presença de uma estrutura lítica no centro do monumento. Esta ausência deve-se à sua destruição, por remoção dos esteios durante as violações ocorridas, ou indicar um tipo de *tumulus* sem câmara pétrea. Alguns perfis da zona central (figuras 3.66, 3.68 e 3.69) apresentam reflexões de um eventual corte no substrato que tanto poderá estar relacionado com uma câmara semi-subterrânea, como com violações muito profundas. A estrutura, pela interpretação dos radargramas, parece ter uma direcção E-W.



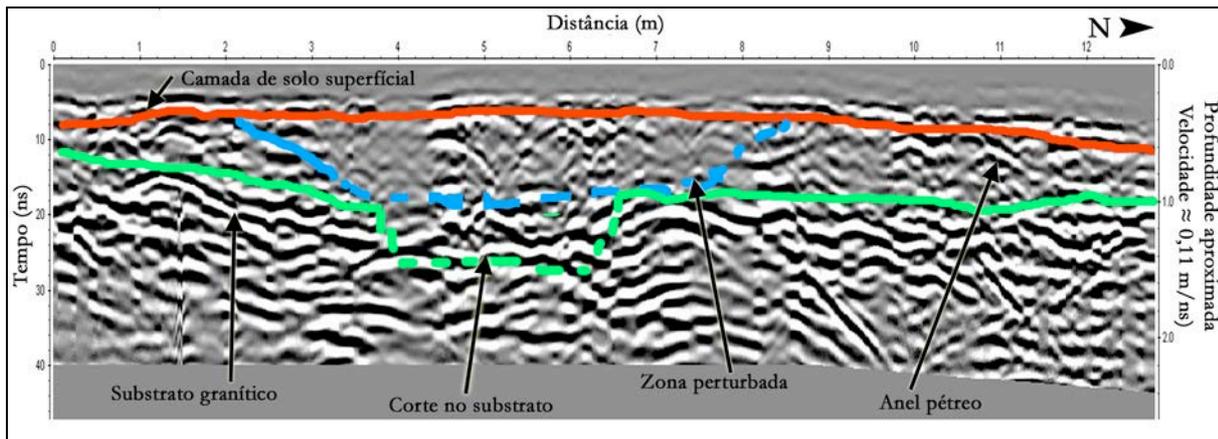
**Figura 3.66** – A imagem apresenta o radargrama referente ao perfil 1, adquirido no sentido W-E, a sul da sanja oeste. É apresentado, também, o desenho de campo da autoria de Rui Barbosa, do perfil sul da referida sanja (a escala vertical do desenho é igual à escala horizontal). No radargrama foi possível interpretar a posição aproximada do substrato granítico, o qual se encontra, quase sempre, à mesma cota (aproximadamente 1 m de profundidade na zona central do *tumulus*). À superfície observa-se um nível contínuo com 0,1 m a 0,2 m de espessura a uma camada de solo vegetal superficial, pontualmente interrompida por reflexões de clastos. Verifica-se que a zona direita do perfil, entre os 5 m e os 14 m, apresenta um conjunto de reflexões que indiciam uma grande perturbação dos materiais sobrejacentes ao substrato granítico potencialmente devida a violações da zona central. Entre os 3 m e os 4 m do perfil foram identificadas reflexões pertencentes ao anel pétreo periférico que circunscreve o monumento. Entre os 11 m e o fim do perfil observa-se um corte no substrato, que tanto poderá corresponder a violações mais antigas como a valas para implantação de uma câmara funerária semi-subterrânea, o que seria original.



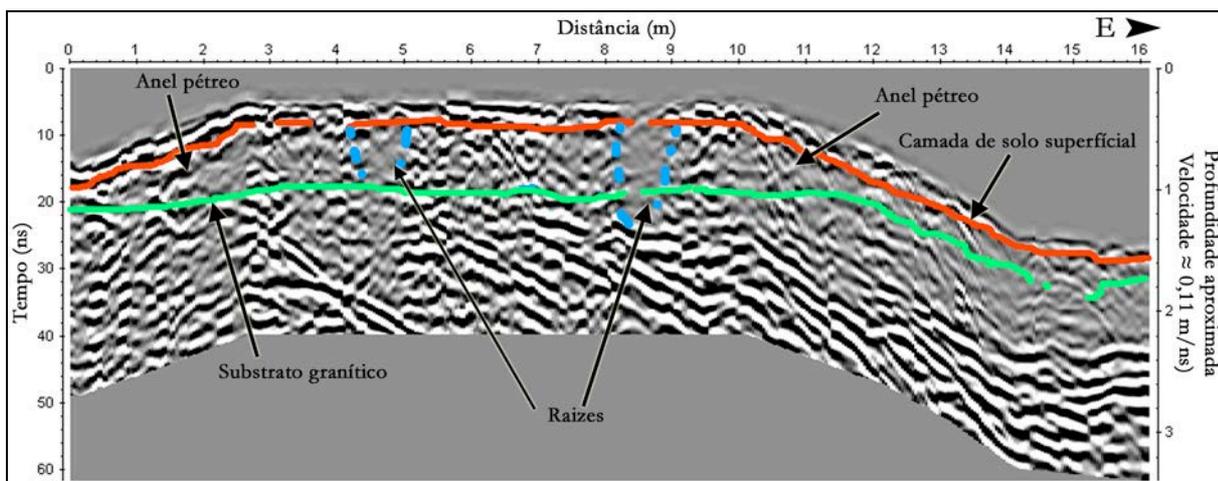
**Figura 3.67** – A imagem apresenta o radargrama referente ao perfil 19, adquirido no sentido W-E. Neste foi possível interpretar a posição aproximada do substrato granítico, o qual se encontra quase sempre à mesma cota (aproximadamente 0,8 m de profundidade na zona à direita do perfil). À superfície observa-se um nível contínuo com 0,1 m a 0,2 m de espessura de uma camada de solo vegetal superficial, pontualmente interrompida por reflexões de pedras descontextualizadas ou pertencentes a uma possível couraça lítica muito degradada. Entre os 4 m e os 5 m do perfil foram identificadas reflexões pertencentes ao anel pétreo periférico que delimita o *tumulus*.



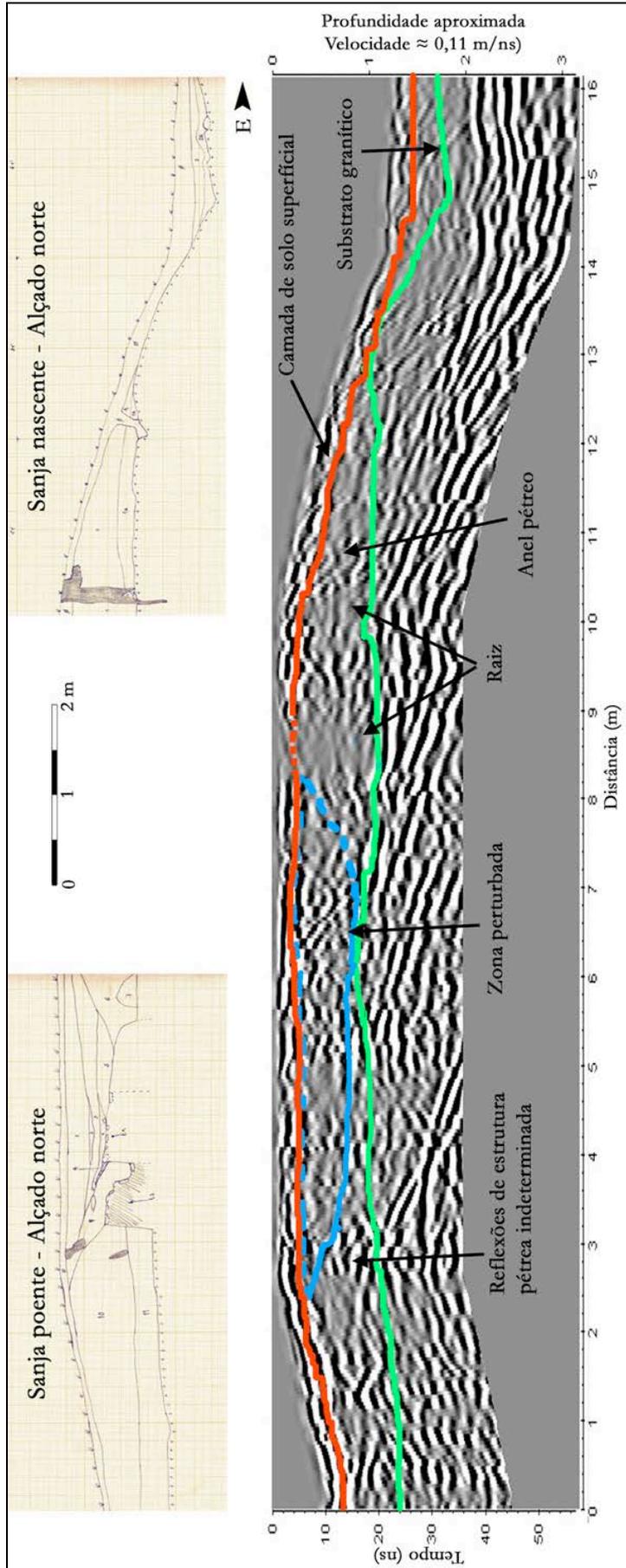
**Figura 3.68** – A imagem apresenta o radargrama referente ao perfil 23, adquirido no sentido S-N. Neste foi possível interpretar a posição aproximada do substrato granítico, o qual se encontra quase sempre à mesma cota (aproximadamente 1 m de profundidade na zona central). Entre os 6,5 m e os 9 m o substrato apresenta-se cortado o que, pela posição da zona perturbada nos níveis superiores, corresponderá a uma profunda vala de violação na área da câmara, embora não se possa inviabilizar que parte deste corte seja antigo e relacionado com a primitiva câmara. À superfície observa-se um nível contínuo com 0,1 m a 0,2 m de espessura de uma camada de solo vegetal superficial, pontualmente interrompida por reflexões de pedras. Entre os 3-4 m e aos 14 m do perfil foram identificadas reflexões pertencentes ao anel pétreo que circunscreve o dólmen da Tojeira. Verifica-se que a zona central do perfil, entre os 5 m e os 10 m, apresenta um conjunto de reflexões que indiciam uma grande perturbação dos materiais sobrejacentes ao substrato granítico, potencialmente devida a violações da zona central.



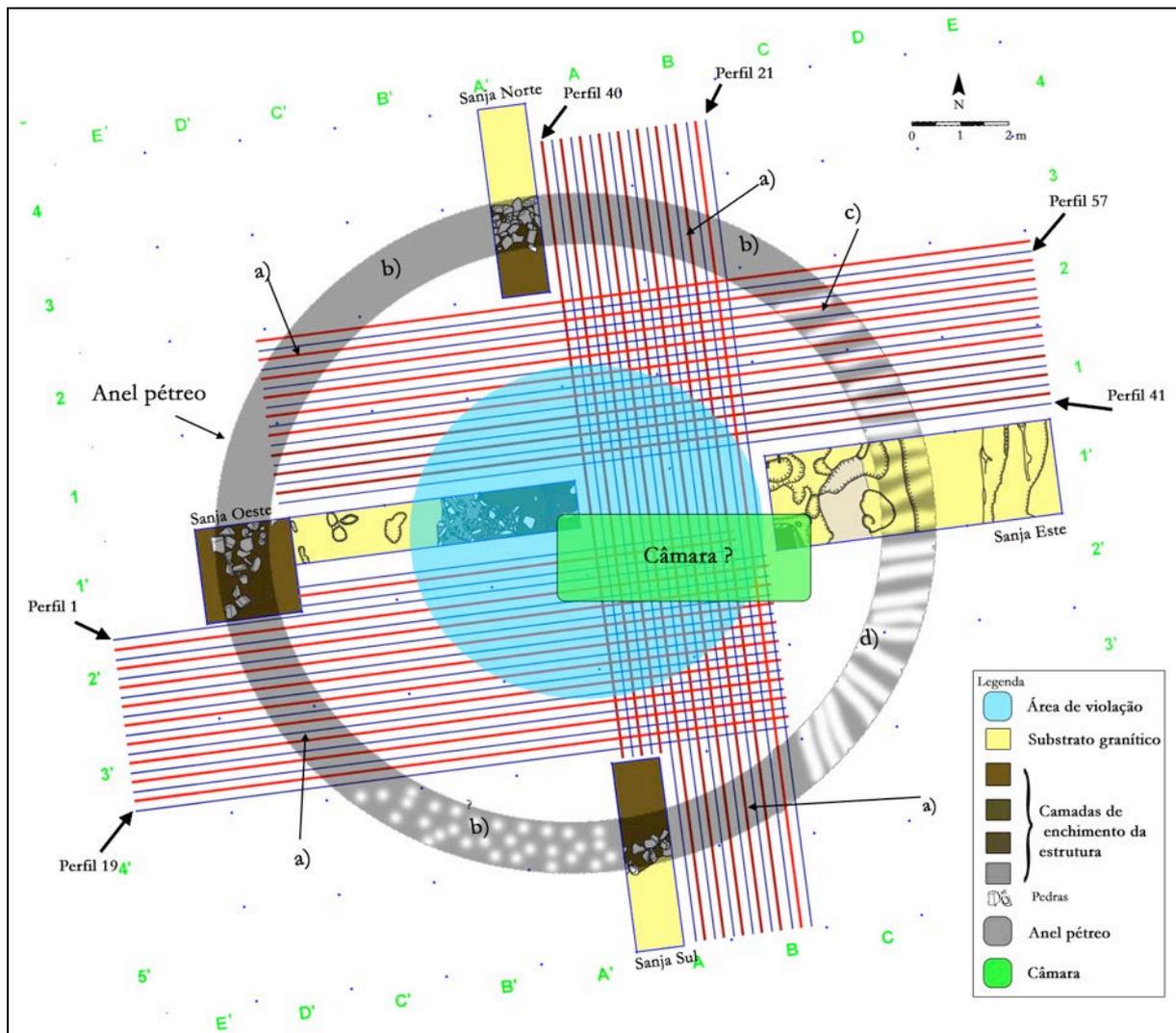
**Figura 3.69** – Radargrama referente ao perfil 40, adquirido na direção S-N. Foi possível identificar o substrato granítico, que se encontra quase sempre à mesma cota ( $\approx 1$  m de profundidade na zona central do perfil), subindo ligeiramente na parte sul. O substrato apresenta-se cortado entre os 3,5 m e os 6 m, o que corresponderá a uma possível câmara. À superfície observa-se um nível contínuo com 0,1m a 0,2 m de espessura de uma camada de solo vegetal superficial. Aos 11 m do perfil foram identificadas reflexões pertencentes ao anel pétreo. Observa-se, entre os 1 m e os 10 m do perfil, um conjunto de reflexões que indiciam uma grande perturbação dos materiais sobrejacentes ao substrato granítico provavelmente devida a violações da zona central.



**Figura 3.70** – Radargrama referente ao perfil 57, adquirido na direção W-E, onde foi possível identificar o substrato granítico, o qual se encontra quase sempre à mesma cota (cerca de 1 m de profundidade na zona central do perfil), mergulhando cerca de um metro no flanco nascente do perfil. Tal foi verificado nas escavações (sanja este) e parece corresponder à continuação da “terraplanagem” realizado pelo lado nascente do monumento, local onde foi depositado um machado de pedra polida. À superfície observa-se um nível contínuo com 0,1m a 0,2 m de espessura de uma camada de solo vegetal superficial, pontualmente interrompida por reflexões de pedras que apresentam distribuição aleatória. Aos 4 m e aos 11 m do perfil foram identificadas reflexões pertencentes ao anel pétreo. Observa-se também duas zonas perturbadas que, pela forma poderão ter sido originadas por raízes de árvores.

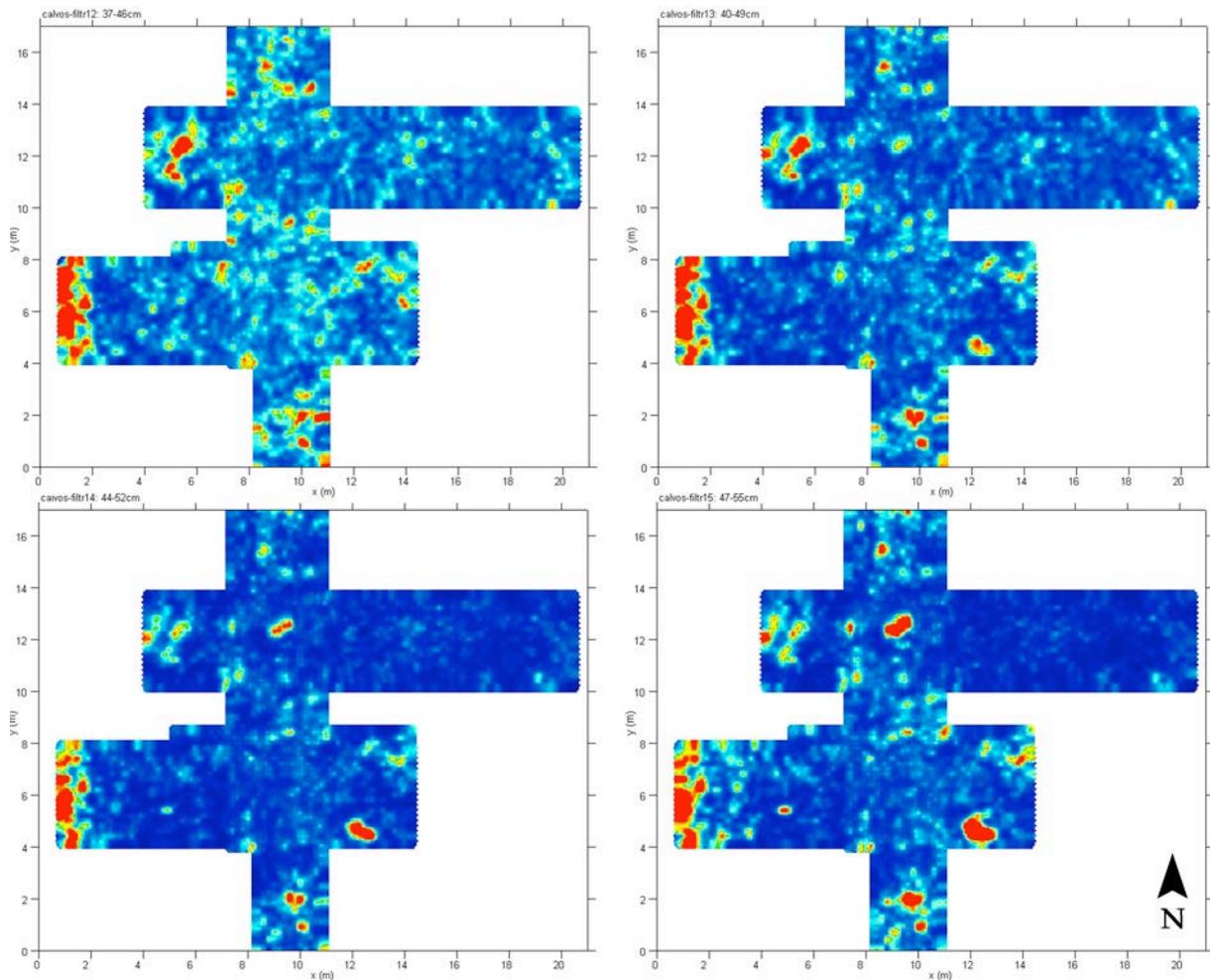


**Figura 3.71** – A imagem apresenta o radargrama referente ao perfil 41, adquirido no sentido W-E, 40 cm a norte das sanjas poente e nascente. Em cima, apresentam-se os desenhos de campo do arqueólogo Rui Barbosa, correspondentes aos perfis norte das referidas sanjas. No radargrama foi possível interpretar a posição aproximada do substrato granítico, o qual se encontra quase sempre à mesma cota (entre 1 m a 1,5 m de profundidade na zona central do *tumulus*), mergulhando cerca de um metro no flanco nascente do perfil. À superfície, observa-se um nível contínuo com 0,1 m a 0,2 m de espessura de uma camada de solo vegetal superficial, pontualmente interrompida por reflexões de clastos de dimensão variável com aparente distribuição aleatória. Verifica-se que a zona central do perfil, entre os 2,5 m e os 10 m, apresenta um conjunto de reflexões que indiciam uma grande perturbação dos materiais sobrejacentes ao substrato granítico possivelmente devida a violações do *tumulus*, na zona central.



**Figura 3.72** – Apresentação da posição do anel pétreo periférico e da vala de violação do monumento a partir das interpretações das reflexões dos radargramas. a) As reflexões indicam a presença do anel pétreo bem preservado. b) Localização do anel pétreo interpretado a partir dos dados dos radargramas e da escavação arqueológica da sanja sul. c) Anel pétreo diminuto ou inexistente. d) Anel pétreo diminuto ou inexistente. De notar que o arqueólogo responsável pelo projecto coloca a hipótese de, neste quadrante do monumento, virado a nascente, não existir anel periférico, podendo o monumento ter tido uma câmara aberta, o que justificaria a “terraplanagem” e o corte do saibro em forma de degrau que se notou nas escavações da sanja este e que se verificam, também, nos perfis do radargrama.

Os mapas de amplitudes gerados a partir dos volumes pseudo 3D com o programa GPR-process não apresentaram padrões de reflexão claros, que permitissem uma interpretação das estruturas do dólmen da Tojeira. Todos os dados foram também reprocessados com o programa GPR-Slice, tendo sido gerados novos mapas de amplitudes (figura 3.73). No entanto estes, tal como os gerados com o GPR-process, também não apresentaram padrões de reflexão interpretáveis, não tendo sido possível observar qualquer tipo de estrutura, nem mesmo o anel pétreo que, dada a sua forma circular, seria expectável que aparecesse nas imagens geradas.



**Figura 3.73** – Exemplo de alguns dos mapas de amplitudes mais significativos gerados a partir dos dados da prospecção. A visualização dos mapas não permitiu identificar nenhum padrão reflectivo que pudesse ser associado a estruturas do *tumulus*.

### 3.5.5. Discussão

O trabalho de prospecção realizado no dólmen da Tojeira pretende contribuir para a definição de uma metodologia prospectiva eficaz na interpretação das estruturas internas deste tipo de monumento, com o objectivo de auxiliar os arqueólogos a tomar opções no âmbito dos seus trabalhos de campo. Esta metodologia poderá vir a ser utilizada no estudo do *tumulus* do Madorro, localizado nas proximidades desta estação.

Os resultados obtidos com esta prospecção permitiram determinar vários aspectos relativos à estrutura do *tumulus* da Tojeira, nomeadamente:

- a posição do substrato granítico e eventuais trabalhos de nivelamento do terreno antes da construção do *tumulus*;

- a localização do anel pétreo periférico a norte, oeste e sul do monumento;
- a possível descontinuidade do anel pétreo a este;
- a extensão da área de violação do monumento;
- a eventualidade de uma câmara semi-subterrânea.

Para além do referidos aspectos foi possível verificar a não existência de estruturas internas pétreas, nomeadamente de esteios de pedra, na área central. A sua ausência poderá dever-se, como já foi discutido, quer ao facto de terem sido removidos durante as violações, quer à tipologia construtiva deste monumento.

O estudo permitiu verificar que a realização de perfis longitudinais em direcções ortogonais, interceptando toda a estrutura do monumento é a metodologia mais adequada para este tipo de prospecções. No entanto, a realização de uma prospecção pseudo 3D não foi conclusiva quanto à sua validade neste tipo de estudos, ao contrário do referido por Goodman *et al.* (2009). Este autor estudou montículos funerários no Japão e conseguiu obter, a partir dos mapas de amplitudes e da análise de sobreposição, resultados relevantes. No entanto, esses *tumuli* possuíam câmara funerária pétreo intacta, o que não é o caso. Será espectável que, em montículos funerários com estrutura interna bem preservada, os resultados sejam mais promissores quando utilizado este método.

Este trabalho vem também salientar a importância da realização de sondagens arqueológicas como forma de validar e/ou reforçar as interpretações e as questões realizadas com base nos dados fornecidos pelo Georadar, pelo que se aguarda a continuação das escavações neste monumento, entretanto suspensas por constrangimentos vários.

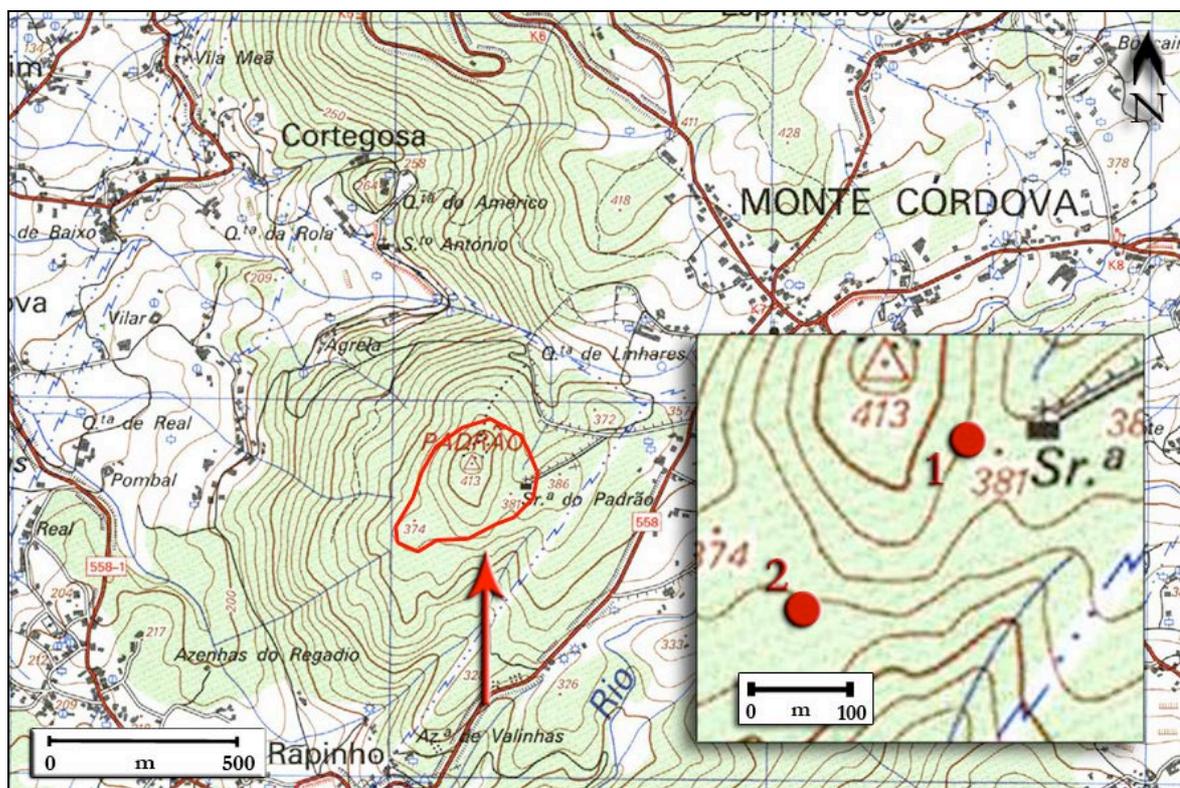
Em futuras prospecções, nomeadamente no *tumulus* do Madorro, a prospecção geofísica poderá, numa primeira fase, permitir o direccionamento das sondagens arqueológicas e, após a correlação das duas informações extrapolar os dados para toda a área prospectada de forma a auxiliar os arqueólogos na definição de estratégias de escavação e/ou de preservação dos sítios e arqueológicos.

### 3.6. Estação arqueológica do Castro do Monte do Padrão

Descreve-se a prospecção arqueogeofísica com Georadar realizada na estação arqueológica do Castro do Monte do Padrão, Santo Tirso. Este estudo decorreu entre Julho e Setembro de 2009 e realizou-se no âmbito de uma colaboração com o arqueólogo Álvaro Brito Moreira, director do Gabinete Municipal de Arqueologia da Câmara Municipal de Santo Tirso.

#### 3.6.1. Enquadramento contextual arqueológico

O Castro do Monte do Padrão localiza-se no lugar com o mesmo nome, sito na freguesia de Monte Córdova, concelho de Santo Tirso, distrito do Porto. As coordenadas geográficas da estação arqueológica, tomadas no ponto mais elevado (413 metros de altitude - figura 3.74) são de 41° 18' 53" N de latitude e 8° 26' 51" W de longitude.



**Figura 3.74** - Localização do Castro do Monte do Padrão, assinalada com a linha vermelha (extracto da Carta Militar 1:25.000, folha 98, série M888, IGEOE, 1997). Na ampliação o ponto 1 assinala a localização da área 1 de prospecção e o ponto 2 a localização da área 2.

Representativo de uma ampla diacronia, o local onde se encontra implantado o Castro do Monte do Padrão foi ocupado desde a Idade do Bronze até ao séc. XVII da nossa era, contendo um património arqueológico e arquitectónico de relevância histórica na região. Este local é referenciado, de forma mais ou menos desenvolvida, na bibliografia de cronistas, corógrafos e viajantes do séc. XVI, até poucos anos antes de ser definitivamente abandonado, no segundo quartel do séc. XVII (Moreira, 2006, 2008 e 2010). Outras referências importantes, são os inquéritos paroquiais de meados do séc. XVIII, onde o cura e reitor de Monte Córdova, o Padre Veríssimo de Araújo, dá contributo significativo para a interpretação dos vestígios medievais do Monte do Padrão (Moreira 2006, 2010) e as obras de Alberto Pimentel (Pimentel, 1902) e Alberto Pires de Lima (Lima, 1948).

Na primeira década do séc. XX, esta estação arqueológica é classificada como monumento nacional (Decreto-Lei de 16 de Junho de 1910), com a designação de Castro do Monte Córdova, tendo sido rectificadada a sua denominação para a Castro do Monte do Padrão, em 1951 (Decreto-Lei n.º 38491, art. 3 de 6 de Novembro de 1951).

As primeiras intervenções arqueológicas apenas ocorreram na década de 50 do século passado, mais precisamente entre os anos de 1951 e 1956, tendo sido levadas a cabo pelo arqueólogo Carlos Manuel Faya Santarém (Martins, M., 1985). Os vestígios arquitectónicos, bem como o espólio exumado, revelado pelas escavações então realizadas, evidenciaram dois momentos distintos de ocupação a saber: um da Idade do Ferro, caracterizado pela tipologia das cerâmicas encontradas, por uma casa de planta redonda e pela muralha, que limita a zona mais alta do povoado, e outro do período romano, identificado pela presença de dois grandes edifícios romanos (uma *domus* de planta quadrada, e um edifício de planta rectangular), bem como pelo espólio cerâmico que sugeriu uma longa utilização do local entre os sécs. I e IV da nossa era.

Os estudos desta estação apenas são retomados na década de 1980, mais precisamente em 1985. Nesse ano, a equipa liderada por Manuela Martins da Universidade do Minho, procede à limpeza e conservação das estruturas existentes na plataforma superior do monte, e à abertura de quatro sondagens que permitiram identificar a ocupação relativa ao período do Bronze Final (Martins, M., 1985). Este trabalho aprofundou-se com a realização de mais cinco pequenas intervenções arqueológicas, entre os anos de 1985 e 1989 ainda sob direcção de Manuela Martins (Moreira, 2006).

Nas décadas de 1990 e de 2000 desenrolaram-se outros importantes trabalhos de carácter científico sob a responsabilidade de Álvaro Moreira (Moreira 1991, 1991a, 1997, 2005, 2005a, 2007) que contribuiram para aumentar a informação disponível sobre as diferentes cronologias da

estação. Nestas décadas verifica-se, também, uma significativa preocupação ao nível da valorização patrimonial, que culmina com a construção do Centro interpretativo do Castro do Monte do Padrão, inaugurado em 2008.

Os trabalhos científicos realizados no Monte do Padrão permitiram a Moreira (2010), tendo por base os elementos à data disponíveis, efectuar uma proposta sobre os diferentes momentos de ocupação do povoado. Este autor propõe sete fases de ocupação, que se descrevem de seguida, definidas a partir do espólio em articulação com os elementos arquitectónicos e a estratigrafia do sítio.

#### Fase I – (900/700 a.C. – 500 a.C.)

Corresponde ao período do Bronze Final do noroeste de Portugal, cuja periodização tem vindo a ser balizada entre 900/700-500 a.C., e identificada como a Fase I da Cultura Castreja (Martins, M. & Jorge, 1992). No entanto é de referir que Bettencourt (1999, 2010) considera que o Monte do Padrão poderá ter ocupações desde o Bronze Médio. É nesta fase que se começa a verificar uma alteração dos padrões de povoamento pois, em simultâneo com os lugares construídos em colinas e vales, em áreas férteis no interior de grandes planaltos ou mesmo em contextos de montanha, aparecem povoados localizados em esporões de média altitude, na bordadura de grandes bacias fluviais (Bettencourt, 2009), sendo paradigmática desta fase a localização do povoado do Monte do Padrão. Segundo Moreira (2010), apesar de se terem recolhido materiais praticamente em todas as intervenções realizadas na plataforma superior não foi ainda identificada qualquer estrutura habitacional ou defensiva relacionada directamente com este período. A dispersão e a quantidade dos materiais permite, com alguma segurança, admitir que o povoado teria uma dimensão razoável, cuja ocupação se desenvolveria em toda a face leste da plataforma superior do lugar.

#### Fase II – (500 a.C. – 138/136 a.C.)

Corresponde ao início da Idade do Ferro, até ao primeiro contacto, directo, com o mundo romano. No Monte do Padrão identifica-se esta fase a partir da cultura material associada às primeiras estruturas habitacionais pétreas, de planta circular (casas VI / VII), intervencionadas a nordeste da plataforma superior, e uma outra estrutura caracterizada por um muro de sustentação de terras que teria a dupla função de nivelamento da plataforma, assim como constituiria a primeira linha defensiva do local (Moreira, 1991, 2010). Segundo Moreira (2010) as cerâmicas indígenas caracterizam-se por um forte arcaísmo e simplicidade nas formas e técnicas de fabrico. Relativamente a esta fase foram intervencionadas duas estruturas habitacionais (casa VI / VII) intervencionadas a nordeste da plataforma superior, e uma outra estrutura caracterizada por um

muro de sustentação de terras que teria a dupla função de nivelamento da plataforma, assim como constituiria a primeira linha defensiva do local (Moreira, 1991, 2010). Esta estrutura desenvolve-se paralelamente a uma muralha construída posteriormente, na Fase III, pela sua face interna e a sensivelmente dois metros desta. É composta por blocos graníticos de diferente calibre, dispostos aleatoriamente, não formando uma estrutura muito consistente. O paramento é formado por blocos graníticos de dimensões variadas, alguns dos quais dispostos transversalmente, em forma de cunha.

Fase III – (138/136 a.C. – Tibério/Cláudio)

Corresponde ao período que medeia entre os primeiros contactos directos do mundo romano com os povos desta região, com a campanha de *Decimus Iunius Brutus* (138-136 a.C.) e a morte de Augusto (14 d.C.). É geralmente identificada como a fase de apogeu da Idade do Ferro, observando-se no Castro do Monte do Padrão um grande desenvolvimento tecnológico, económico e cultural (Moreira, 2010), no qual se desenvolve um fenómeno de reorganização proto-urbanística.

O castro do Monte do Padrão regista nesta fase o seu apogeu, ao qual correspondem a maior parte das estruturas habitacionais identificadas na plataforma superior da estação, assim como as estruturas defensivas que foram alvo de significativos trabalhos de restauro e ampliação neste período. No interior do recinto formado pela primeira muralha foram intervencionadas oito estruturas de carácter habitacional. Do conjunto das construções identificam-se duas distintas fases construtivas, estruturalmente e cronologicamente sobrepostas.

Da estrutura defensiva do povoado apenas se conhece parte da primeira muralha e um pequeno segmento de um pano de reforço que se desenvolve transversalmente à primeira, localizado na face sul da plataforma superior. Todavia, os taludes e plataformas existentes, perceptíveis pela análise da topografia do terreno, permitem admitir a existência de mais uma linha defensiva, assim como a existência de uma estrutura defensiva complementar composta por um fosso, localizado na face leste do povoado, que corresponde a uma zona de ligação ao interior do planalto, local em que as condições topográficas menos significativas impõem maior vulnerabilidade defensiva. Estruturalmente, a muralha forma um muro contínuo e uniforme, apresentando uma ligeira inclinação para o interior em toda a sua extensão, interrompida por pequenos “covelos” semicirculares dispostos a espaços regulares. A estrutura é composta por um paramento simples, em alvenaria de granito, registando uma técnica construtiva de elevada qualidade (figura 3.75). A sua construção assenta invariavelmente no afloramento granítico.



**Figura 3.75** – Perspectivas das estruturas arqueológicas descobertas nas várias intervenções ocorridas no Monte do Padrão. a) Vista aérea da plataforma superior onde se observam edifícios do período romano de planta rectangular (fase IV). Observam-se também edifícios circulares das Fases II e III. b) Segmento da muralha da fase III. c) Aspecto dos vestígios do mosteiro medieval do Monte Córdova (Fase VI). d) Necrópole medieval (fase V e VI). Fotografia a) da Câmara Municipal de Santo Tirso (*in* <http://www.cm-stirso.pt/pages/409>, 05-12-2012). Fotografias b), c) e d) de Património sustentável (*in* <http://patrimoniosustentavel.blogspot.pt/2010/02/castro-do-monte-padrao-i-ocupacao-pre.html>, 05-12-2012).

Fase IV – (Tibério/Cláudio-1ª Metade do séc. II d.C.) e Fase IVa – (1ª Metade séc. II-Meados séc. III d.C.)

Corresponde ao período onde se assiste à profunda remodelação “urbanística” do castro, no qual se regista o definitivo abandono e destruição das estruturas habitacionais e defensivas da Idade do Ferro, dando lugar a edifícios “romanos”, de planta rectangular, encontrados na plataforma superior do monte (figura 3.75), cujas características arquitectónicas revelam uma ruptura definitiva com o arquétipo da sociedade indígena, no qual a estrutura social se reflectia na organização estrutural dos povoados.

Segundo Moreira (2010) a nova realidade cultural transformou os hábitos sociais e ampliou as necessidades de consumo, uniformizando práticas e comportamentos. A grande panóplia de materiais de uso quotidiano – cerâmicas, vidros e objectos metálicos – até aqui relativamente escassos, generalizam-se e dão origem a produções locais e regionais que permitem suprir a ampla procura dos novos produtos, provenientes das mais remotas origens do império romano. A

rotina do quotidiano altera-se modificando os hábitos alimentares, a higiene e o vestuário, reflectindo uma progressiva aculturação. A cultura material diversifica-se alargando-se exponencialmente o espectro dos materiais importados, documentando-se a presença de vidros, ânforas, *sigillatas* gálicas, sudgálicas e hispânicas, assim como, de materiais de âmbito regional, tais como as cerâmicas bracarenses, ou as cerâmicas calcíticas pintadas, registando-se também a ocorrência das primeiras espécies numismáticas.

O início da dinastia dos Flávios e a atribuição do *ius latii* à Hispânia, com Vespasiano, no ano 73-74, tem vindo a ser interpretado como um momento decisivo no processo de romanização do noroeste peninsular, período ao qual correspondem uma parte muito significativa das obras alto-imperiais identificadas na região. Na fase IVa no Monte do Padrão assiste-se à continuação da remodelação estrutural do local, registando-se obras de ampliação e remodelação dos edifícios existentes na plataforma superior.

#### Fase V – (990 d.C. – finais séc. XII)

Corresponde à fase de construção e ocupação do primeiro mosteiro de Monte Córdova, apontando algumas evidências arqueológicas, ainda pouco claras, para a existência de uma construção do séc. X, cuja planta integral ainda é desconhecida. O segundo momento registado relaciona-se com a remodelação do primeiro mosteiro que ficaria anexo à igreja, como parece corroborar a extensa necrópole que está associada aos edifícios identificados. Nesta fase não é ainda possível caracterizar estruturalmente os edifícios, sendo, no entanto, claro que a ocupação se verificou principalmente para leste da plataforma superior, estendendo-se a necrópole para sul.

O definitivo abandono do mosteiro ocorreu em 1597 após uma longa e conturbada existência, onde foram permanentes os pleitos jurídicos entre o mosteiro de Celanova, que tutelava as instalações de Monte Córdova, e a coroa portuguesa que, por diversas vezes, interpôs acções no sentido de recuperar os proveitos e rendimentos do mosteiro.

#### Fase VI – (Finais séc. XII/Inícios séc. XIII – finais séc. XVI/inícios séc. XVII)

Corresponde à reconstrução e remodelação do primeiro mosteiro e igreja paroquial de Monte Córdova. A esta fase encontra-se associada a extensa necrópole (figura 3.75) que se desenvolve a sul da igreja e do mosteiro. Em 1514, no reinado de D. Manuel, é retirado o priorado de S. Salvador de Monte Córdova ao mosteiro de Celanova, tendo sido nomeado um abade comendatário para administrar o mosteiro. A extinção definitiva do mosteiro dar-se-á em finais

do século XVI, mais precisamente em 1597, poucos anos antes da trasladação da igreja para o local em que se encontra actualmente a igreja paroquial de Monte Córdova.

Fase VII – (1738 -....)

Corresponde ao período posterior à data da sagração da capela do Nosso Senhor do Padrão, a última intervenção construtiva verificada na área arqueológica, cuja implantação se insere na área de dispersão das ruínas. A capela do Senhor do Padrão encontra-se implantada numa plataforma existente a leste do sopé do castro. Apresenta uma planta rectangular com orientação leste/oeste, de um só corpo com galilé, tendo sacristia adoçada pelo lado norte.

### 3.6.2. Contexto geológico e geomorfológico

O Castro do Monte do Padrão ocupa um esporão rochoso que corresponde a um dos relevos mais significativos da vertente ocidental do maciço montanhoso conhecido por Serra de Monte Córdova. Encontra-se implantado na área limite das bacias hidrográficas dos rios Ave e Leça, integrando na face norte a rede de drenagem do rio Ave e, na face sul, a do rio Leça. Encontra-se sobranceiro aos vales do rio Sanguinhedo e da ribeira do Matadouro, ambos afluentes do Ave. Para sul, desenvolvem-se as veigas de Refojos e da Agrela que integram a bacia hidrográfica do rio Leça.

O povoado ocupa uma posição topográfica de destaque, dominando visualmente para oeste uma extensa faixa de costa marítima que se prolonga desde a cidade do Porto até à cidade da Póvoa de Varzim, bem como todo o sector a jusante do Ave, a partir da cidade de Santo Tirso, sendo o seu campo visual mais limitado para leste.

Segundo Moreira (2006), a sua implantação reflecte um claro propósito de controlo visual sobre as principais vias de comunicação, para além de o acesso ao vale e ao interior do planalto.

A elevação onde o castro está localizado (figura 3.76) consiste num relevo residual granítico, constituído por rochas graníticas hercínicas, tarditectónicas relativamente a F3, pertencentes ao Complexo Granítico de Celeirós, e designadas por Granitos de Guimarães e Santo Tirso (monzogranitos biotíticos, porfiróides, de grão grosseiro) (Andrade & Noronha, 1986). Na zona do povoado estes granitos contactam, no limite oriental da estação, com o Granito tardi a póstectónicos de Burgães, Selho e Arões (monzogranitos biotíticos, porfiróides, de grão médio), e a ocidente, na base do esporão, com metassedimentos paleozóicos do Silúrico, mais precisamente corneanas, da orla de metamorfismo de contacto que afectou os xistos e metagrauvaques, pertencentes à Formação de Sobrado.

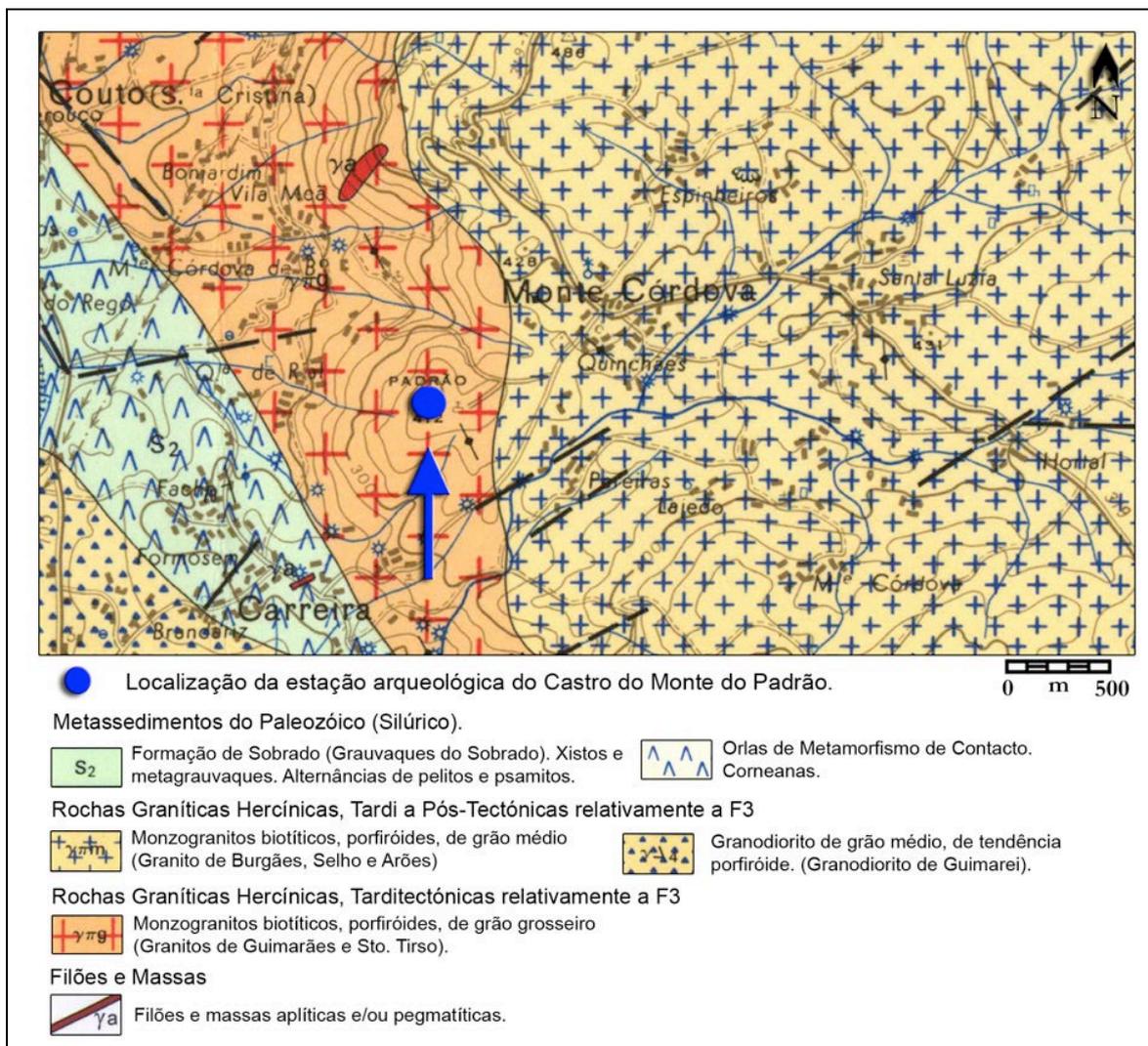


Figura 3.76 - Enquadramento geológico da estação arqueológica do Castro do Monte do Padrão (extracto da Carta Geológica, 1:50.000, 9B de Guimarães, 1986).

Topograficamente o castro estrutura-se a partir de uma plataforma superior, de forma oval, relativamente plana, apesar dos abundantes afloramentos à superfície. A acrópole do povoado é definida pela curva de nível de 400 m que corresponde, sensivelmente, ao recorte da sua primeira muralha. A plataforma desenvolve-se por um comprimento máximo de 183 m no sentido norte/sul e de 101 m no sentido este/oeste, perfazendo uma área aproximada de 15 000 m<sup>2</sup>. A elevação possui condições naturais de defesa relevantes propiciadas por uma topografia favorável. As vertentes norte, sul e oeste possuem pendores acentuados, sendo a vertente da encosta do lado nascente mais suave e curta, correspondendo a uma zona de ligação ao interior do maciço montanhoso da serra do Monte Córdova.

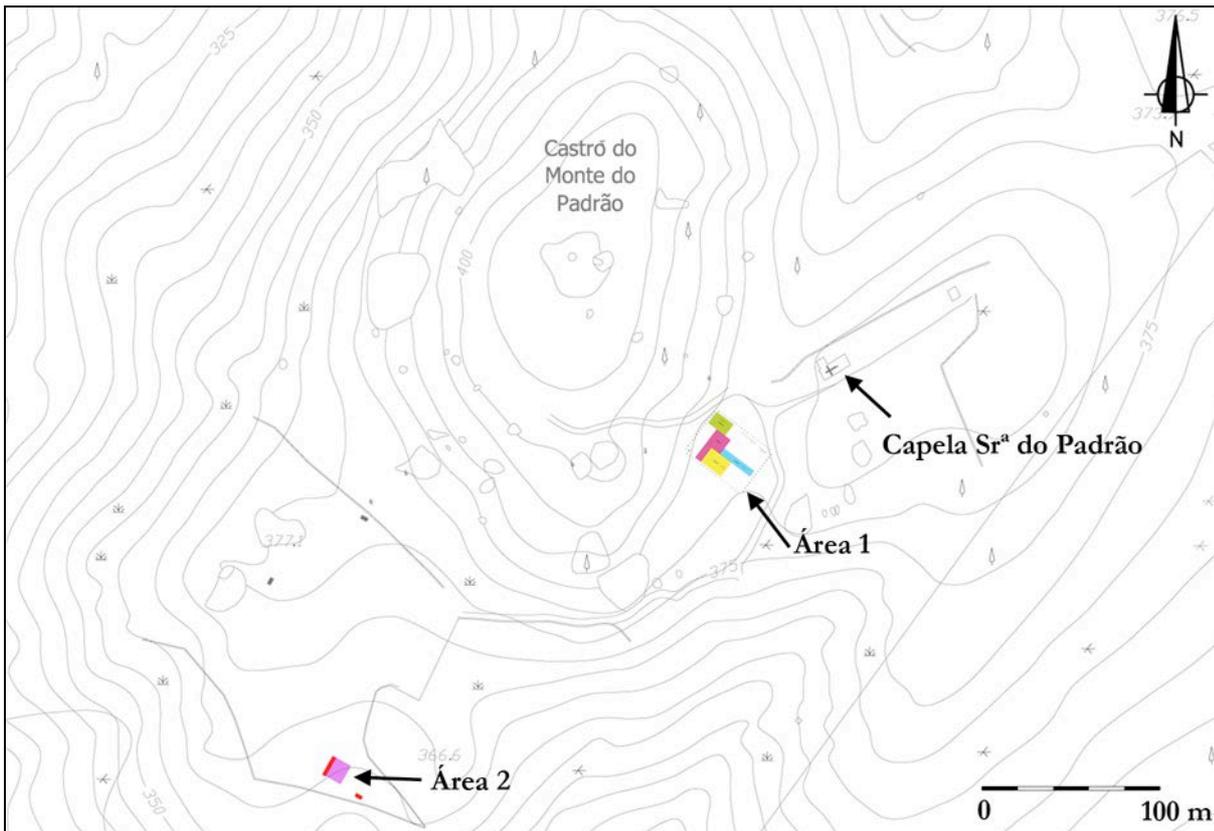
### 3.6.3. Aquisição dos dados

A prospecção arqueogeofísica surge no âmbito dos trabalhos de escavação realizados em 2009, enquadrados no projecto “Estudo e Salvaguarda da Estação Arqueológica de Monte Padrão e Área Arqueológica de Monte Saltos - Santo Tirso”. Este trabalho, coordenado por Álvaro Brito Moreira, director do Gabinete Municipal de Arqueologia de Santo Tirso, contou com a colaboração de José Carlos Martins, à época, arqueólogo estagiário no referido gabinete.

A intervenção tinha por objectivos dar continuidade à avaliação do sistema defensivo da face leste do castro do Monte do Padrão, assim como detectar eventuais estruturas de época romana localizadas no sopé do castro. Com estes objectivos em mente, e dada a dimensão da área em estudo, a equipa de arqueologia optou pela realização de uma prospecção geofísica com Georadar, tendo em vista a identificação de estruturas arqueológicas passíveis de corresponder às suas expectativas e de planear as sondagens arqueológicas a realizar futuramente.

Para a concretização deste trabalho prospectivo, considerando os objectivos propostos, foi necessário definir uma metodologia de aquisição dos dados de radar. Um dos objectivos principais era o de localizar o sistema defensivo da Idade do Ferro, i. é, a muralha do castro, neste sector da estação, e ou a presença de outras estruturas arqueológicas enterradas. Para a definição do método de aquisição foi necessário considerar, também, o contexto arqueológico da estação, em particular o seu diacronismo. Sendo de esperar encontrar estruturas da Fase III de ocupação (Idade do Ferro Recente) e da Fase IV (Época Romana) não era de desconsiderar a possibilidade de se identificarem estruturas de qualquer uma das restantes cronologias identificadas por Moreira (2010). Considerando estas condições definiu-se como metodologia de aquisição a prospecção em área, com a utilização de grelhas ultra densas (verdadeiro 3D) tal como proposto por Novo (2009), com espaçamento entre perfis adequado ao teorema de amostragem espacial de Nyquist.

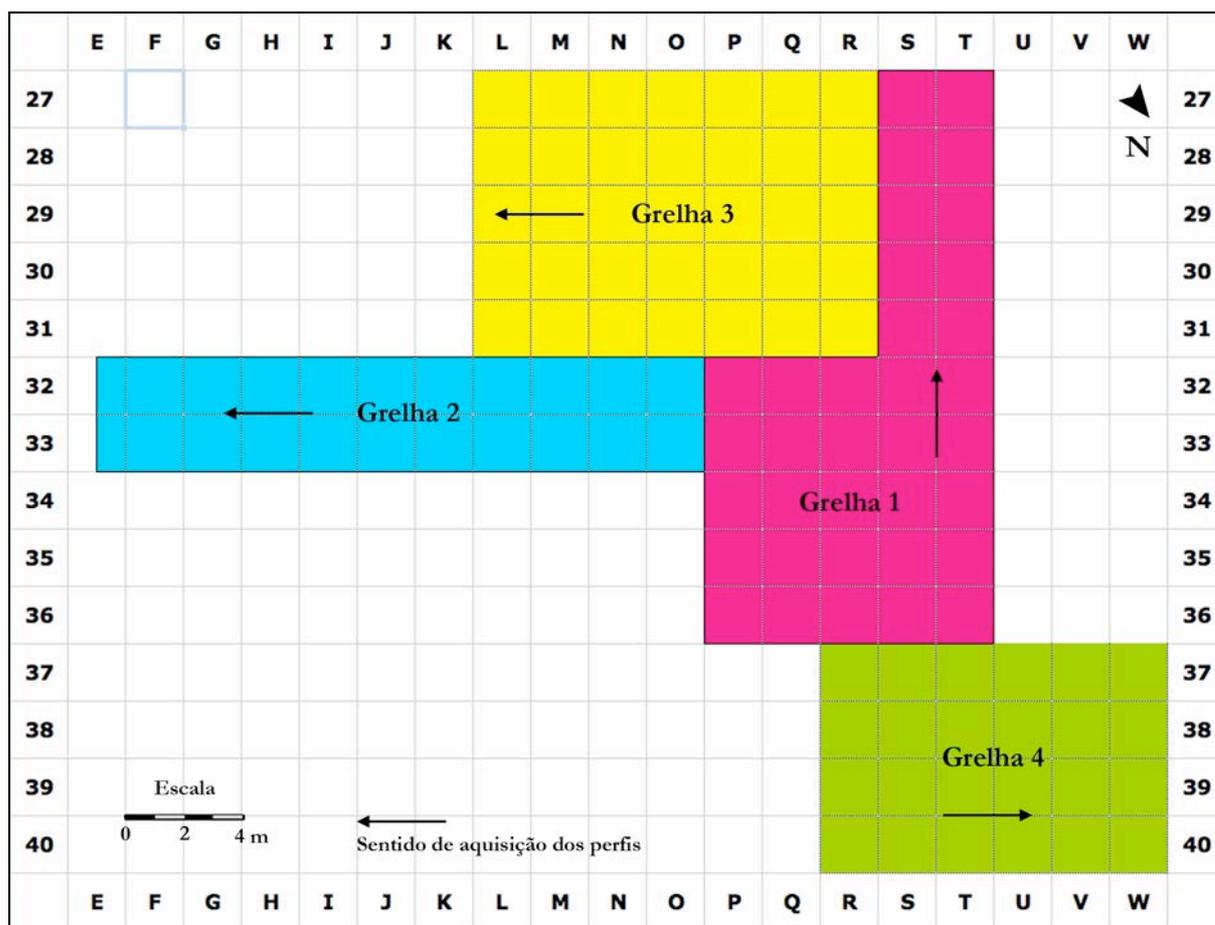
A prospecção foi realizada numa área do sector sudeste do castro, a qual designaremos por área 1 (figura 3.77). Numa primeira fase, em Julho de 2009, definiram-se nessa área duas grelhas de prospecção (grelha 1 e 2) de acordo com a grelha de referenciação utilizada na escavação arqueológica (figura 3.78). Numa segunda fase, em Agosto e Setembro, após se ter identificado com a primeira prospecção geofísica o que foi interpretado como muralha do castro, definiram-se mais duas grelhas (grelha 3 e 4) nas áreas adjacentes à grelha 1 de modo a compreender a orientação e a continuidade da muralha. Esta área (figura 3.79) era relativamente plana, quase sem obstáculos, excepto na zona da grelha 3 onde existiam algumas árvores e blocos graníticos, o que facilitou a implantação das grelhas e a aquisição dos dados.



**Figura 3.77** - Localização das áreas 1 e 2 onde se realizaram trabalhos prospectivos com Georadar na área arqueológica do Castro do Monte do Padrão. Planimetria do Gabinete Municipal de Arqueologia de Santo Tirso.

Para a escolha das antenas foram realizadas algumas passagens prospectivas com as duas antenas (400 MHz e 200 MHz) de forma a se obter uma primeira perspectiva da profundidade dos principais reflectores. Estes ensaios permitiram constatar uma boa penetração do sinal e a existência de uma grande quantidade de reflectores no primeiro metro de profundidade. Foi então possível, a partir destes dados, optar pela antena de 400 MHz pois esta é a mais adequada à prospecção de sítios pouco profundos, apresentando melhor compromisso entre resolução e profundidade de penetração do que a antena de 200 MHz.

A prospecção em área nas grelhas 1, 3 e 4 foi realizada com perfis de radar paralelos entre si, adquiridos apenas numa direcção e espaçados de 10 cm, no modo *survey wheel*, seguindo o esquema apresentado na figura 3.78. Na grelha 2, os perfis foram adquiridos com 20 cm de espaçamento. Para cada perfil definiram-se os seguintes parâmetros de aquisição: 50 traços de reflexão por metro; 1024 amostras por traço; janela de aquisição de 60 ns.



**Figura 3.78** - Esquema da localização das grelhas prospectivas na área 1 de prospecção, enquadrada na quadrícula de referência utilizada na estação arqueológica. Na imagem é apresentada com uma seta a direcção de aquisição dos perfis em cada grelha.

No total foram prospectados cerca de 460 m<sup>2</sup> de terreno e adquiridos 293 perfis, correspondentes a cerca de 3762 m de prospecção distribuídos da seguinte forma: 140 m<sup>2</sup> na grelha 1, com um total de 98 perfis correspondentes a cerca de 1320 m de prospecção; 84 m<sup>2</sup> na grelha 2, com um total de 12 perfis correspondentes a 252 m de prospecção; 140 m<sup>2</sup> na grelha 3, com um total de 102 perfis correspondentes a cerca de 1300 m de prospecção e a grelha 4, com 96 m<sup>2</sup>, com um total de 81 perfis, correspondentes a 890 m de prospecção.

No decorrer desta campanha de prospecção surgiu o interesse de estudarmos outra área do castro, a qual designámos por área 2, a su-sudoeste do topo do monte (figura 3.77). Aí havia sido identificado o que se considerava ser um possível vestíbulo de um balneário proto-histórico descoberto através de uma sondagem arqueológica. Pretendeu-se, com este estudo, definir a geometria da estrutura enterrada, bem como a profundidade e possível estado de conservação da mesma. O local apresentava um ligeiro declive e alguns obstáculos na superfície (figura 3.80).

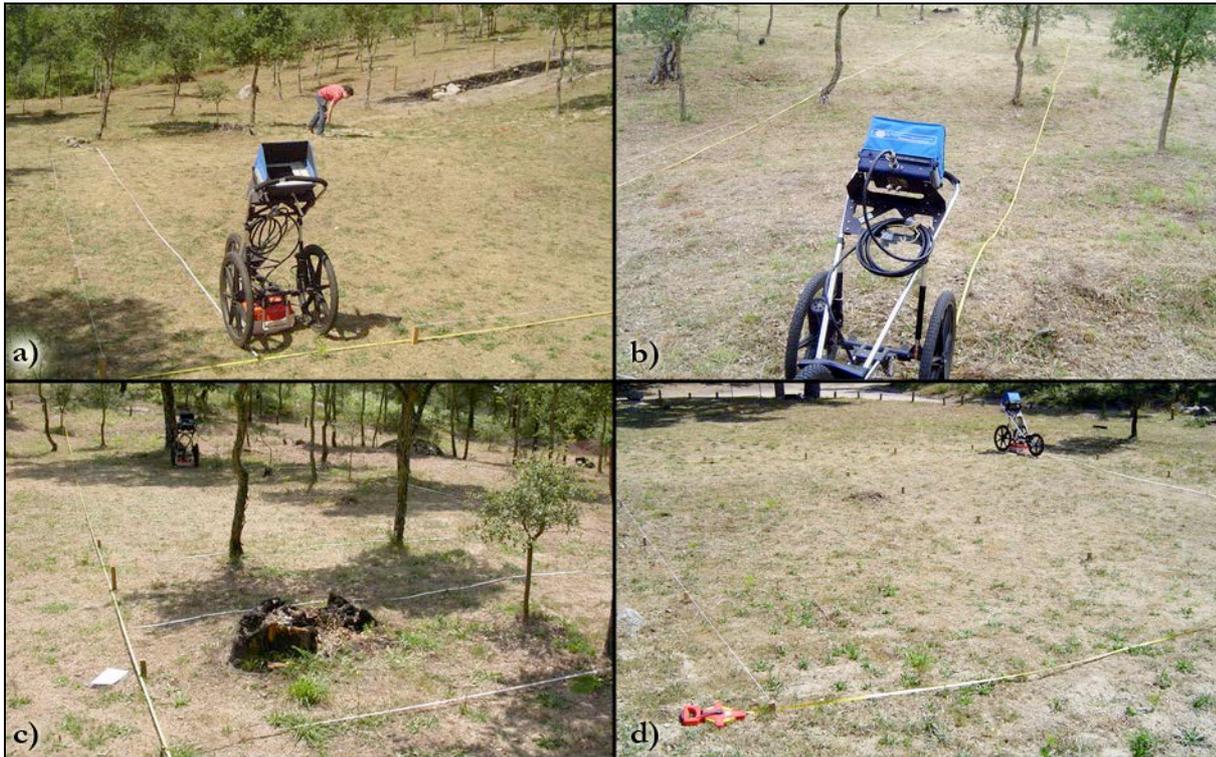


Figura 3.79 – Perspectivas da área 1: a) grelha 1; b) grelha 2; c) grelha 3 e d) grelha 4.

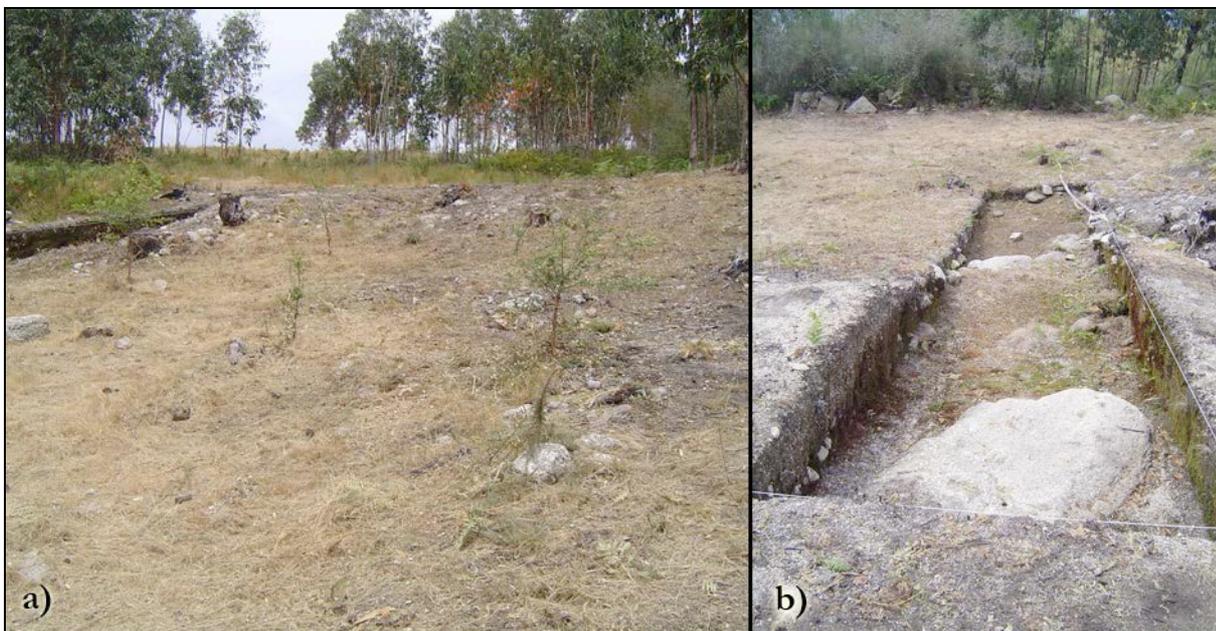
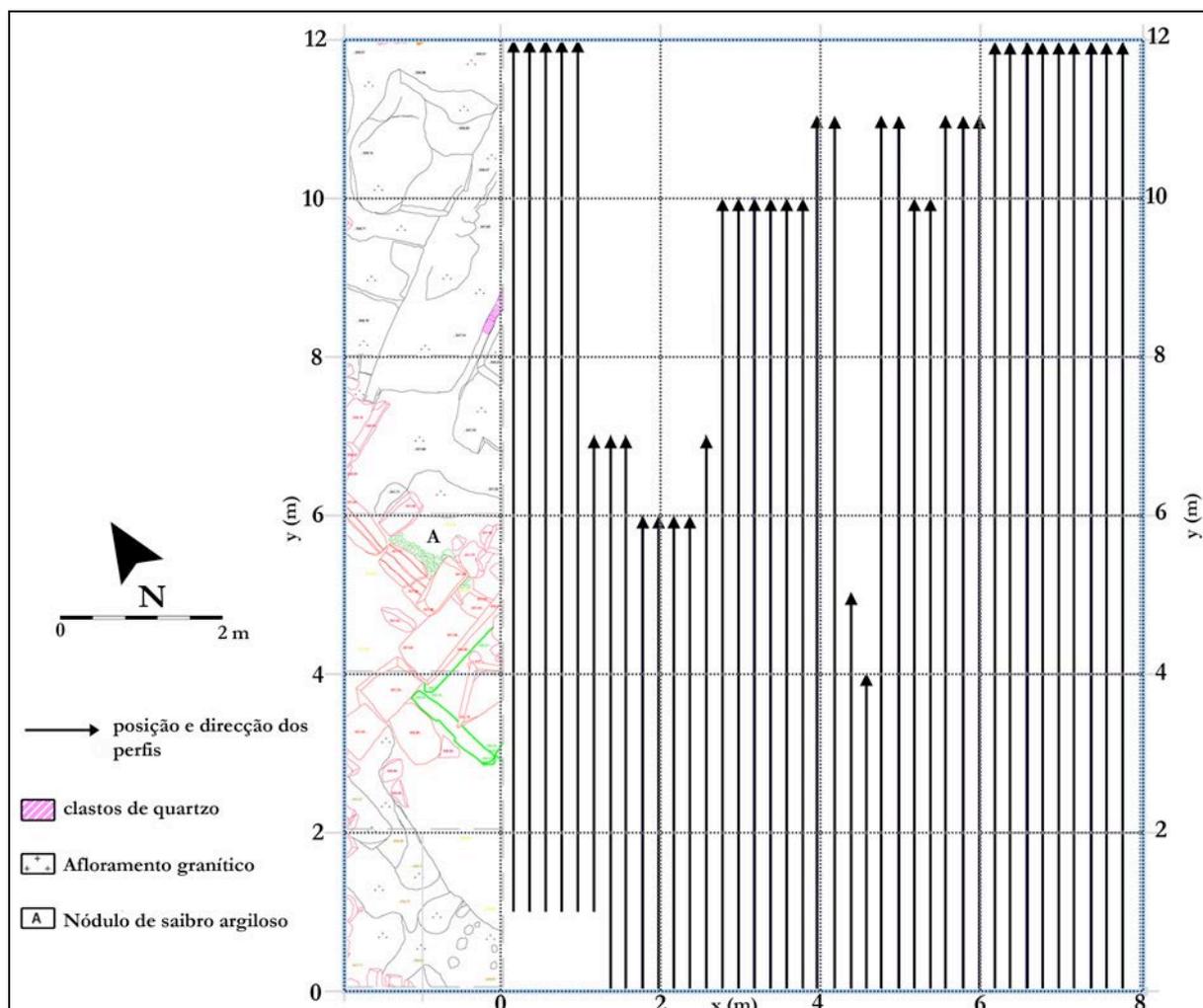


Figura 3.80 – Perspectivas da área 2: a) zona de implantação da grelha prospectiva, vista de sul. Do lado esquerdo pode ver-se a implantação da sondagem arqueológica; b) aspecto da sondagem arqueológica vista de norte.

Para o estudo da área 2 foi definido o método de prospecção em área, com perfis espaçados de 20 cm, adquiridos numa direcção paralela à sondagem, de acordo com o esquema apresentado na

figura 3.81. A grelha foi implantada paralelamente à sondagem arqueológica e a direcção dos perfis foi definida de forma a intersectar as possíveis estruturas diagonalmente, potenciando a sua identificação. A aquisição dos perfis foi realizada com a antena de 400 MHz, na direcção Y, no modo *survey wheel*, tendo sido utilizados os seguintes parâmetros prospectivos: 50 traços de reflexão por metro; 1024 amostras por traço; janela de aquisição de 60 ns.



**Figura 3.81** - Esquema da localização da grelha na área 2 de prospecção, com a posição dos perfis e respectiva direcção de aquisição. Esta imagem apresenta o desenho da sondagem arqueológica realizada pelo Gabinete Municipal de Arqueologia de Santo Tirso, onde se observa (entre os 2 m e os 6 m de Y) o muro correspondente a um eventual vestíbulo de balneário proto-histórico.

### 3.6.4. Resultados

As prospecções realizadas nas duas áreas da estação arqueológica permitiram a aquisição de um vasto conjunto de dados que foram processados de forma a gerar imagens interpretáveis das potenciais estruturas arqueológicas presentes no local. Uma primeira observação dos radargramas

em bruto (i.e., sem processamento), de todas as campanhas, evidenciou uma boa penetração de sinal e, no caso da área 1 (grelhas 1 e 2) e da área 2, uma grande diversidade de reflectores. Contudo, os radargramas adquiridos nas grelhas 3 e 4 da área 1, durante o mês de Setembro, mostraram um sinal anómalo, bastante atenuado e com interferências que comprometeram a sua qualidade. Estes dados anómalos resultaram de uma pequena avaria no equipamento, não tendo sido possível interpretar a informação contida nos radargramas. No entanto, a utilização de alguns filtros no processamento, como o filtro *Subtract mean* permitiu identificar algumas das reflexões mais fortes, o que possibilitou a elaboração dos mapas de amplitudes e a identificação das reflexões de algumas estruturas, embora sem a qualidade dos mapas gerados a partir dos dados não corrompidos.

A velocidade de penetração do sinal de radar foi determinada pelo método de ajuste de hipérbolas, tendo-se obtido uma velocidade média de 0,11 a 0,12 m/ns para as grelhas 1 e 2 da área 1 e para a área 2. Para as grelhas 3 e 4 da área 1 obteve-se um valor para a velocidade de 0,09 a 0,10 m/ns. Este intervalo de velocidades está de acordo com o expectável para este tipo de terrenos (solos coluvionares e granito, alternando, por vezes, com granito muito alterado e/ou muito fracturado). As diferenças de velocidade observadas, devem-se às condições de humidade do subsolo aquando das campanhas. As prospeções das grelhas 1 e 2 da área 1 e da grelha na área 2 foram realizadas em Julho e Agosto, num período relativamente seco, as restantes foram realizadas em Setembro, após um período de alguma pluviosidade.

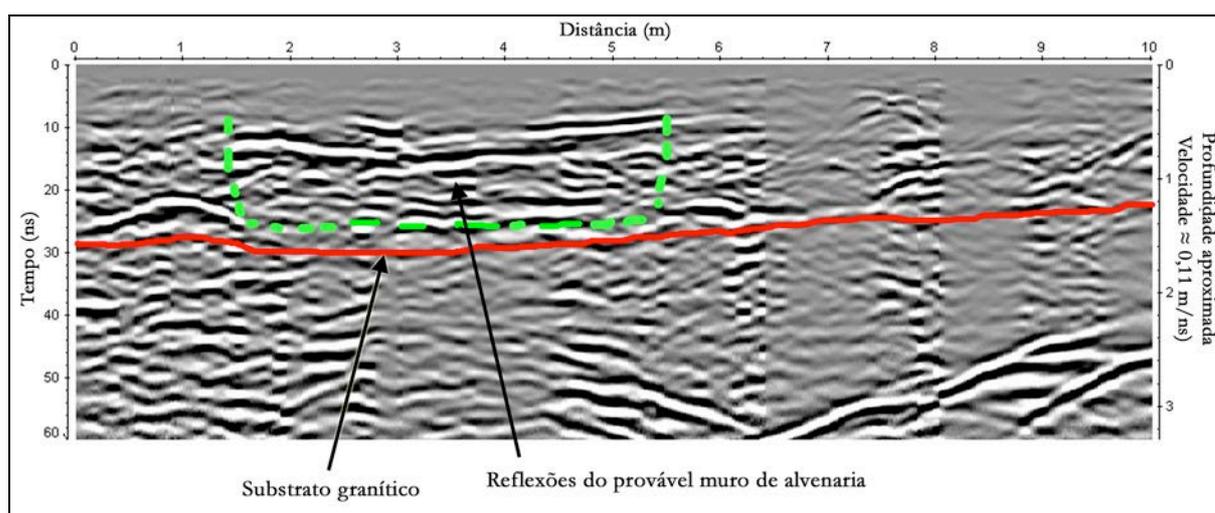
O processamento dos dados dos perfis adquiridos nas duas áreas foi efectuado com o programa ReflexW, tendo sido adoptado o seguinte fluxo de processamento: correcção do tempo zero; *dewow*; filtro *band-pass*; remoção do *background*; *subtract mean*. Posteriormente, os dados foram processados com o programa GPR-process, tendo sido gerados volumes de dados 3D, através de interpolação do valor de amplitudes entre perfis, num raio de 10 cm, pelo método *kriging*. Os volumes pseudo 3D foram seguidamente seccionados para geração de mapas de amplitudes, a intervalos de 1 ns de profundidade, e espessura de 10 cm com 50% de sobreposição.

### Área 1

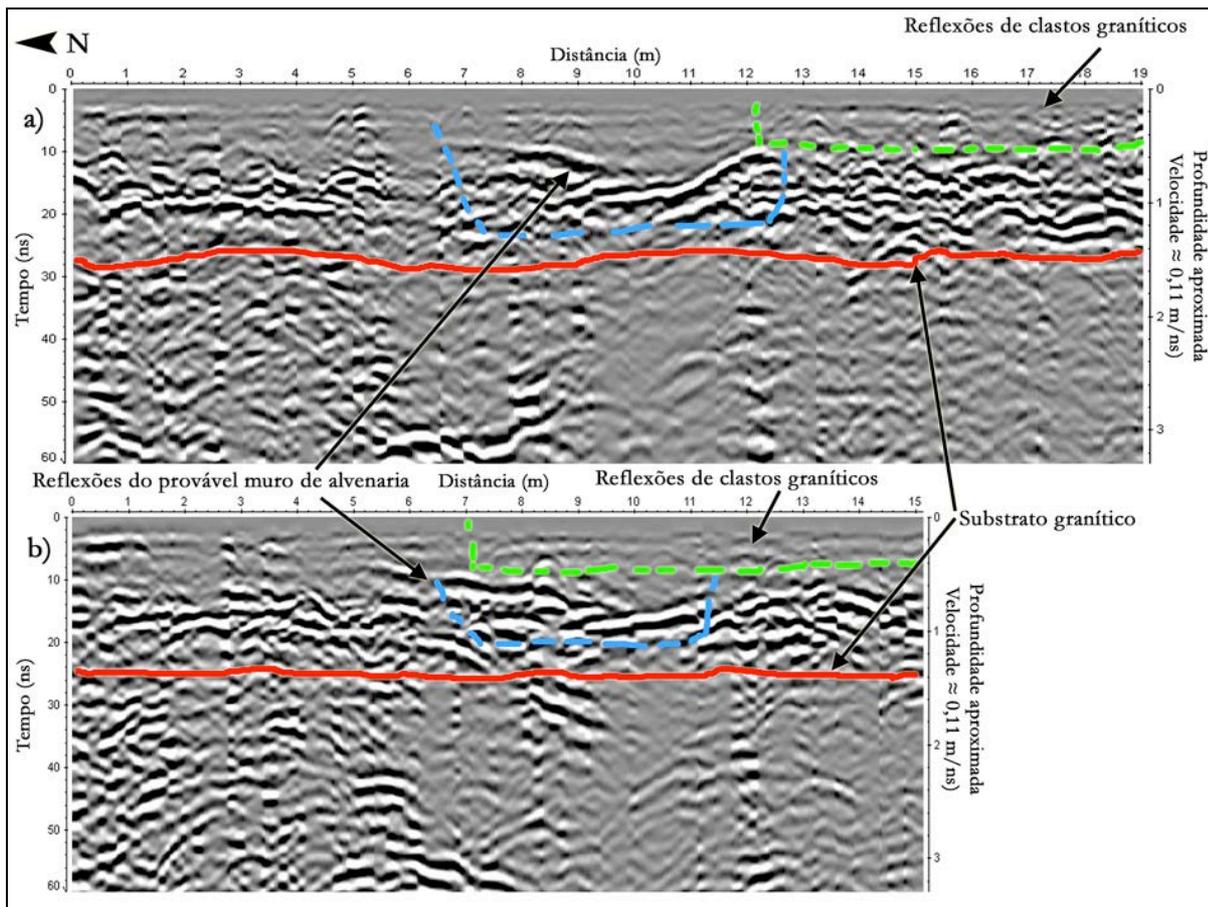
A área 1 foi a primeira área a ser estudada. Como referido anteriormente, os dados presentes nestas duas grelhas são os de melhor qualidade e os que permitiram gerar mapas de amplitudes mais claros. Estes dados foram também os primeiros a ser processados, tendo a decisão de continuar a prospeção para as grelhas 3 e 4, surgido após a identificação das estruturas que se descreverão.

A observação dos radargramas na grelha 1, adquiridos sobre os quadrados P, Q e R (32-36) permitiu verificar a existência de uma reflexão horizontal muito intensa (figura 3.82), aos 40-50 cm de profundidade, sobreposta a todo um conjunto de reflexões que se estendem até aos 100 cm de profundidade. Esta reflexão foi interpretada como pertencendo a um muro de alvenaria, do sistema defensivo do castro, possivelmente da Fase III de ocupação. Esta reflexão apresenta cerca de 4-5 m de espessura o que se deverá à intersecção dessa estrutura na diagonal, visto as estruturas defensivas identificadas neste povoado não ultrapassarem os 2 m de espessura (Moreira, 2010). Foi também possível interpretar a posição do substrato granítico, encontrando-se este a cerca de 1,2 m de profundidade.

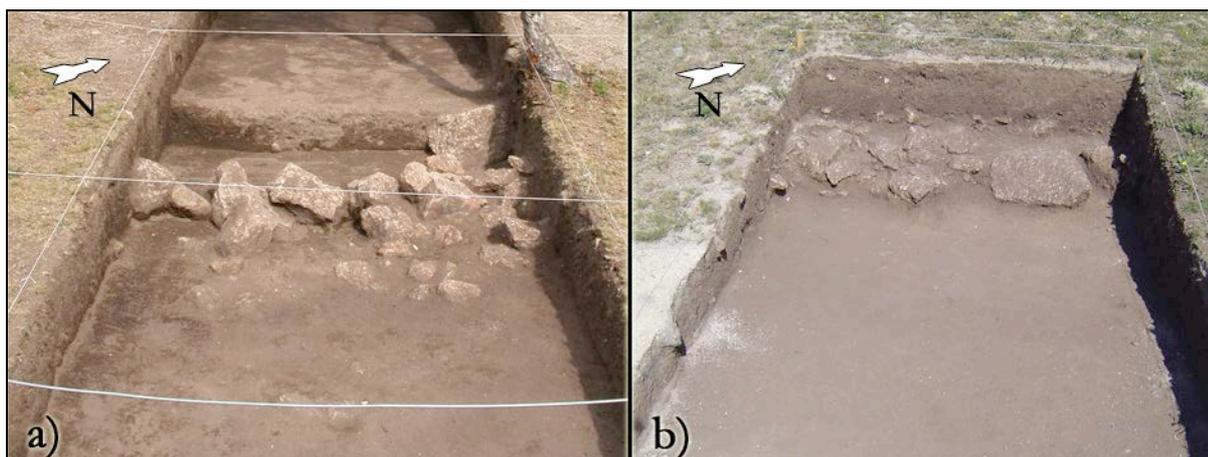
Nos radargramas dos quadrados S e T visualizou-se a presença de reflexões semelhantes às anteriormente descritas, sensivelmente à mesma profundidade, mas associadas aos quadrados 27 a 32 (figura 3.83). Estas reflexões poderão corresponder também a muros de alvenaria ou a acumulações de clastos com dimensões decamétricas (10-50 cm). Nos perfis adquiridos sobre os quadrados 28T e 31T, identificaram-se nessas posições algumas hipérbolas de reflexão, pouco profundas (10-30 cm) e bastante próximas umas das outras. Estas foram interpretadas como um possível nível de clastos com diâmetros entre os 10-30 cm. Estes quadrados foram escavados durante o mês de Agosto de 2009, e permitiram observar um aglomerado de blocos graníticos de diferente calibre (10-40 cm), dispostos aleatoriamente, não formando uma estrutura consistente (figura 3.84).



**Figura 3.82** - Perfil 40 da grelha 1, adquirido aos 4 m, entre os quadrados Q e R. São assinaladas as reflexões interpretadas como muro de alvenaria, provavelmente pertencente ao sistema defensivo do castro. É também indicada posição do substrato granítico, sensivelmente aos 1,2 m.



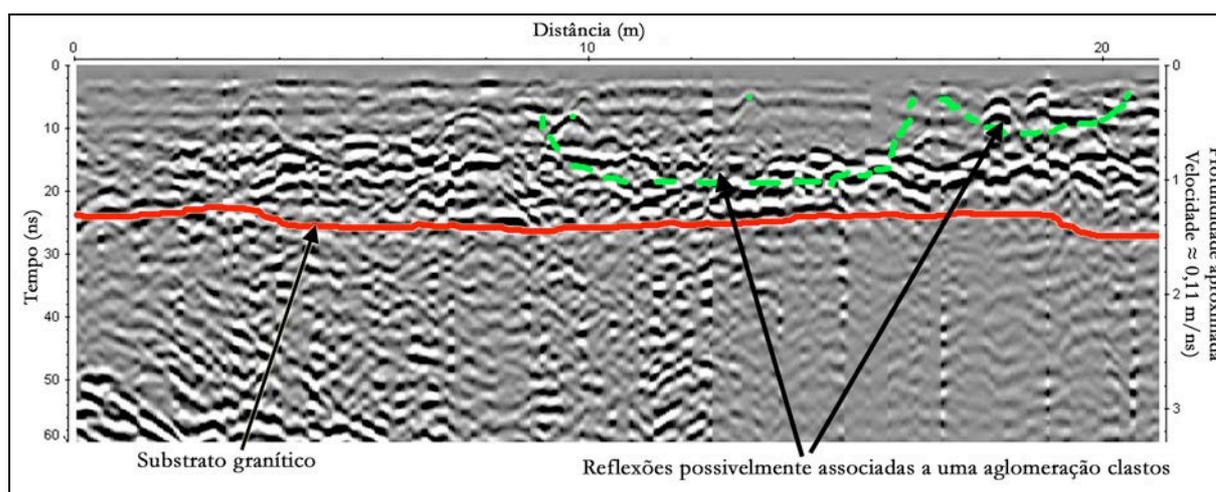
**Figura 3.83** - Perfil 90 (a) e 96 (b) da grelha 1, adquiridos aos 9 m e 9,6 m, respectivamente, dentro dos quadrados T. São assinaladas as reflexões interpretadas como muro de alvenaria (a azul) e as reflexões de um nível de clastos graníticos (a verde), localizada entre 10-30 cm de profundidade. É também indicada a posição do substrato granítico, sensivelmente aos 1,4 m.



**Figura 3.84** – Aspecto das sondagens realizadas nos quadrados 28T e 28S (a) e nos quadrados 31T e 31S (b). Observa-se no quadrado 28T (a) e 31T (b) um aglomerado de blocos graníticos de diferente calibre (10-40 cm), dispostos aleatoriamente, não formando uma estrutura consistente.

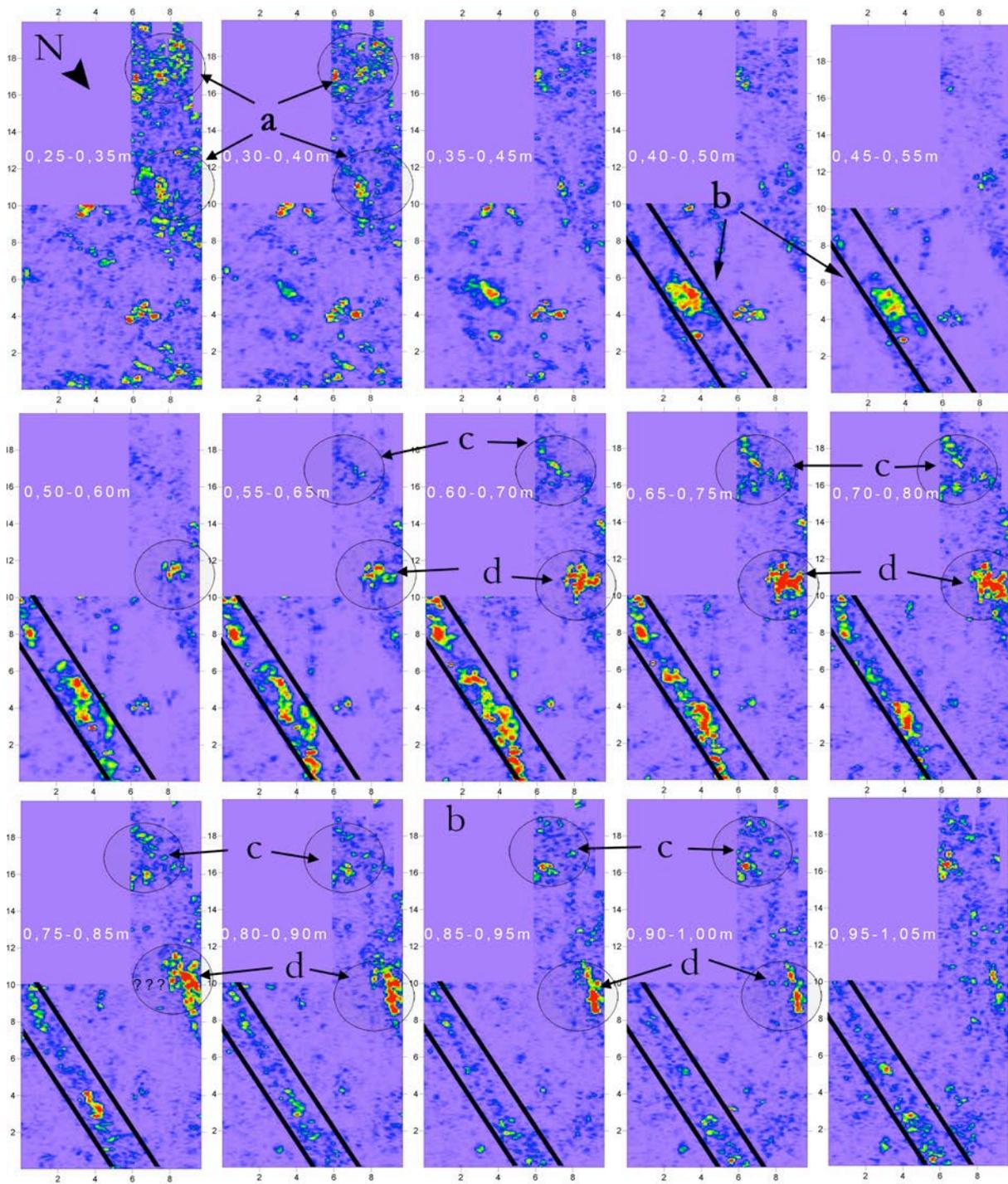
Os perfis da grelha 2 (figura 3.85) permitiram identificar um conjunto de reflexões possivelmente associadas a uma aglomeração clastos, de distribuição aleatória, formando um nível relativamente contínuo a cerca de 1 m de profundidade, entre os quadrados I e G. Observaram-se, também, algumas reflexões pouco profundas (10-40 cm), entre os quadrados 32F e 33F, provavelmente pertencentes a uma pequeno aglomerado de blocos graníticos.

A interpretação dos mapas de amplitudes (figura 3.86) permitiu identificar na grelha 1, nos quadrados P, Q e R (32-36), uma reflexão contínua, com cerca de 1-2 m de espessura e orientação N-S. No mesmo nível observam-se, nos quadrados S e T (27-32), algumas reflexões que, nos quadrados 27S e 28S, foram interpretados como podendo pertencer a muros de um edifício e nos quadrados 31T e 32T a um possível muro de alvenaria. Estas reflexões estão associadas às observadas nos radargramas, o que permitiu reforçar a interpretação realizada anteriormente.

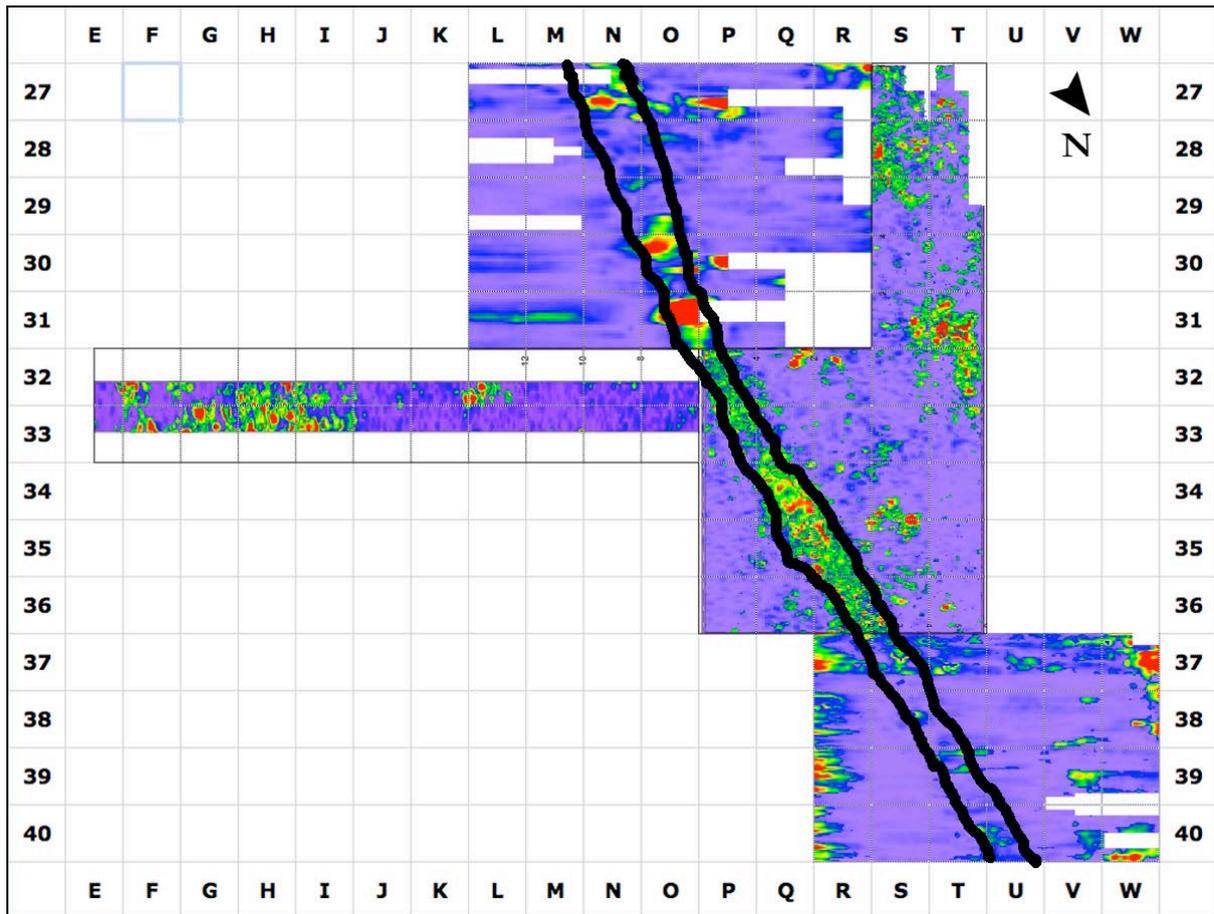


**Figura 3.85** - Perfil 102 da grelha 2, aos 2 m entre os quadrados 32 e 33. São assinaladas as reflexões interpretadas como possivelmente associadas a uma aglomeração de clastos, de distribuição aleatória.

Como referido anteriormente, os mapas de amplitudes das grelhas 3 e 4 não apresentaram grande qualidade. No entanto, foi possível observar em algumas um conjunto de reflexões contínuas, mais nítidas na grelha 3, e quase imperceptíveis na grelha 4, alinhadas, com as do possível muro de alvenaria identificado nos quadrados P, Q e R da grelha 1. A partir destes mapas, bem como a partir dos mapas das grelhas 1 e 2, realizou-se a análise de sobreposição das reflexões mais intensas, o que permitiu gerar um conjunto de mapas que são apresentados na figura 3.86. Nesta imagem é possível observar a continuidade da estrutura atrás referida ao longo de toda a área prospectada, entre os quadrados 27N e 40U, segundo uma direcção N-S.



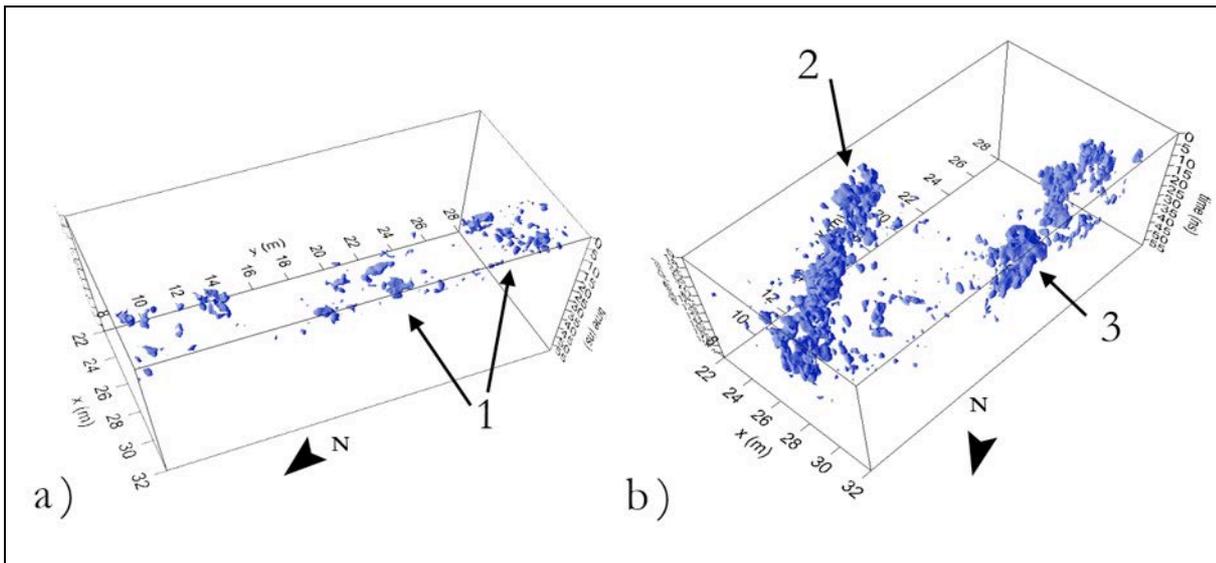
**Figura 3.86** – Mapas de amplitude elaborado a partir do processamento dos perfis da grelha 1. São apresentados os mapas das reflexões dos 0,25 m aos 1,05 m de profundidade. Nestes é possível observar as reflexões interpretadas como: a) aglomerado de blocos graníticos com 10-40 cm de dimensão, dispostos aleatoriamente; b) muro de alvenaria, provavelmente pertencente ao sistema defensivo do castro; c) paredes de um edifício e d) muro de alvenaria.



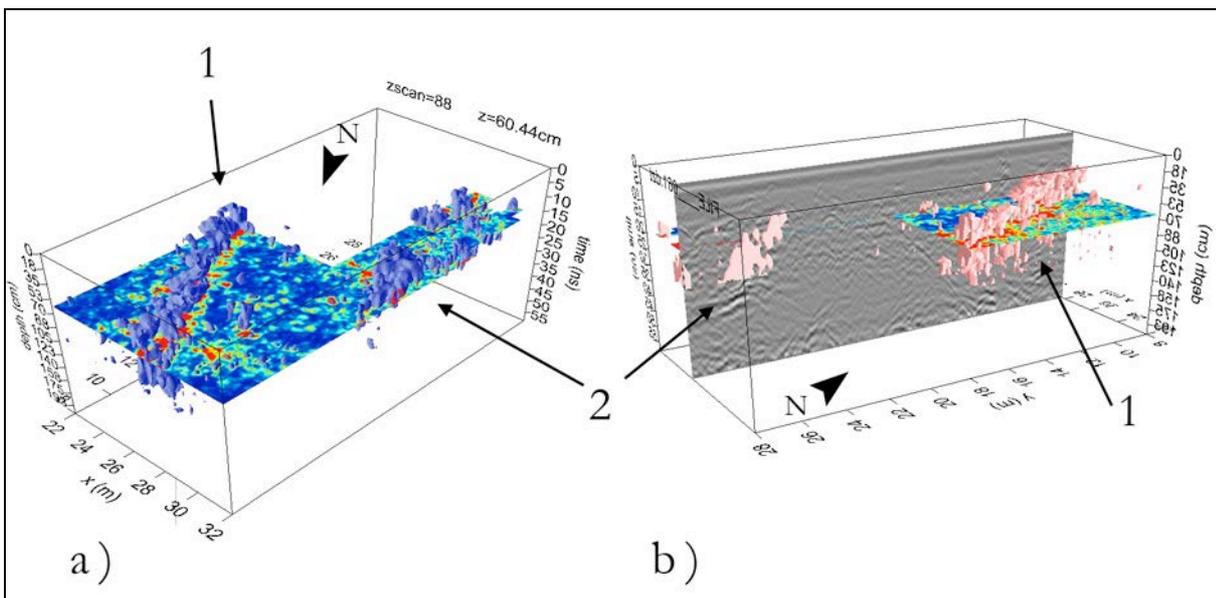
**Figura 3.87**– Mapas de amplitude dos perfis das quatro grelhas elaboradas na área 1. São apresentados os mapas das reflexões realizados com a técnica da análise de sobreposição das reflexões mais intensas. Nesta imagem é possível observar as reflexões interpretadas como muro de alvenaria, as quais cruzam as grelhas 1, 3 e 4, segundo a direcção N-S.

Numa fase posterior, os perfis de todas as grelhas foram reprocessados utilizando o programa GPR-Slice. Os mapas de amplitudes gerados confirmam as interpretações efectuadas anteriormente, não tendo sido possível obter melhores resultados a partir dos dados das grelhas 3 e 4.

A partir dos dados da grelha 1 geraram-se blocos de dados tridimensionais os quais foram interpolados para criar volumes de isosuperfícies calculados a partir das amplitudes mais intensas, tal como se pode observar na figura 3.88. A integração daqueles num bloco diagrama, com os radargramas e os mapas de amplitudes, permitem visualizar tridimensionalmente a estrutura presente (figura 3.89), reforçando a sua interpretação.



**Figura 3.88** – Bloco diagrama apresentando os volumes de isosuperfícies das amplitudes mais fortes ocorrentes nos primeiros 30 cm de profundidade (a) e entre os 30 e os 100 cm de profundidade (b). Nestes blocos são observáveis os volumes interpretados como 1) clastos graníticos de diferente calibre (10-40 cm), dispostos aleatoriamente; 2) muro de alvenaria, provavelmente pertencente ao sistema defensivo do castro; 3) outro muro de alvenaria.

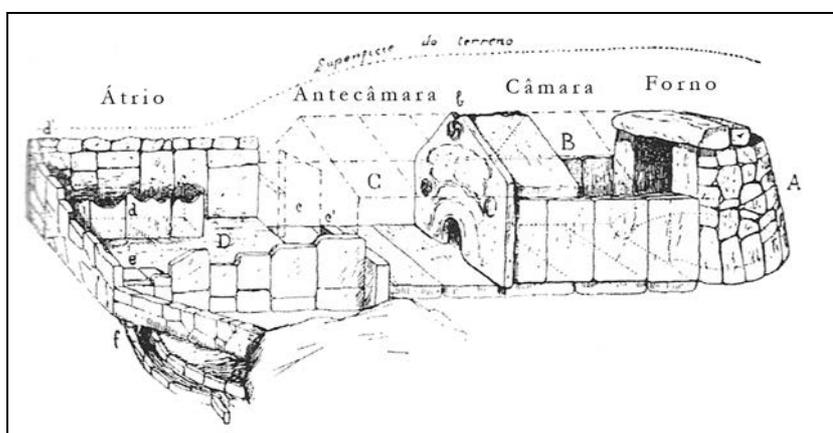


**Figura 3.89** – Blocos diagramas da grelha 1 apresentando: a) mapa de amplitudes dos 60 cm de profundidade, integrado com os volumes de isosuperfícies das amplitudes mais fortes ocorrentes entre os 20 cm e os 100 cm de profundidade; b) mapa da análise de sobreposição integrado com os volumes de isosuperfícies das amplitudes mais fortes ocorrentes entre os 20 cm e os 100 cm de profundidade e com o perfil 61. Nestes blocos diagrama são observáveis os volumes interpretados como muro de alvenaria, provavelmente pertencente ao sistema defensivo do castro (1) e outro muro de alvenaria (2).

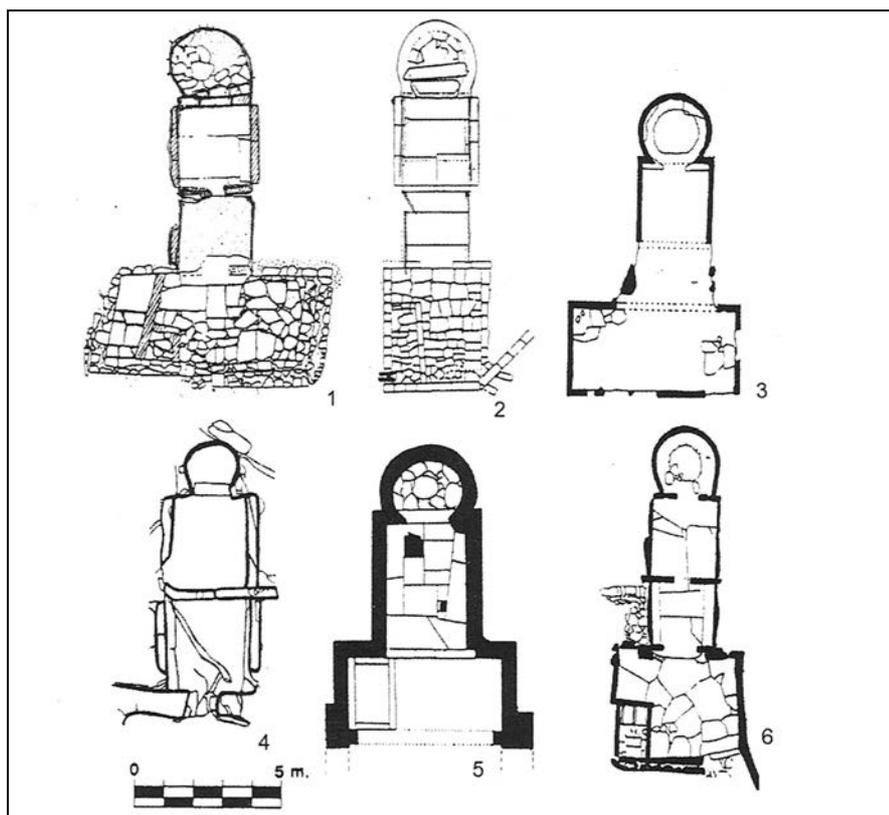
## Área 2

Como inicialmente referido, as sondagens arqueológicas abertas nesta área permitiram considerar a possibilidade de aí existir um balneário proto-histórico, edifício também designado por sauna. Este tipo de estruturas, segundo Doce (2006), foram identificadas pela primeira vez no séc. XVIII, na citânia de Briteiros, em Guimarães. Actualmente conhecem-se muitos mais, embora circunscritos ao noroeste peninsular, mais precisamente à região galaica (norte de Portugal, Galiza e Astúrias). Correspondendo, provavelmente, a estruturas com funções rituais, segundo diversos autores sintetizados em González-Ruibal (2006-2007), estes localizam-se, geralmente, fora da área habitacional. Estes monumentos apresentam um conjunto de características que os permite individualizar em dois tipos básicos (Queiroga, 1992; Ríos González, 2000): o tipo setentrional ou lucense e o tipo meridional ou bracarense. O primeiro estende-se pelo noroeste da Galiza e ocidente das Astúrias. O segundo corresponde à zona bracarense, estendendo-se pelo território a sul do rio Minho.

Para o nosso estudo interessarão os balneários do tipo meridional que, exceptuando pequenas diferenças, apresentam uma estrutura arquitectónica similar entre si (figuras 3.90 e 3.91) na qual se observam, segundo Ríos González (2000) um átrio ou vestíbulo pavimentado que ocupa, geralmente, uma área de 13 a 20 m<sup>2</sup> e onde está presente um tanque com água; 2) uma antecâmara (sala temperada), situada na continuação do átrio, possuindo cobertura constituída por grandes lajes de pedra, formando duas águas (área de 4,5 a 6,65 m<sup>2</sup>); uma câmara (sala quente), similar em dimensões à anterior, à qual se acede através de uma grande laje monolítica, geralmente decorada (pedra formosa), possuindo uma pequena abertura semi-circular por onde é necessário rastejar para conseguir entrar; 4) um forno, geralmente com planta em forma de ferradura.



**Figura 3.90** – Balneário pré-romano do tipo meridional ou bracarense de Briteiros I (Cardozo, 1931-1932, *in* Doce, 2006).



**Figura 3.91** – Balneários pré-romanos do tipo meridional ou bracarense. 1) Sanfins, em Paços de Ferreira. 2) Briteiros, em Guimarães. 3) Monte da Saia, em Barcelos. 4) Tongóbriga, no Marco de Canaveses. 5) Arneá, em Santa Mariña de Augas Santas, Ourense, Galiza. 6) Galegos, em Barcelos (retirado de Almargo Gorbea & Álvarez Sanchís, 1993, *in* González Ruibal, 2006-2007).

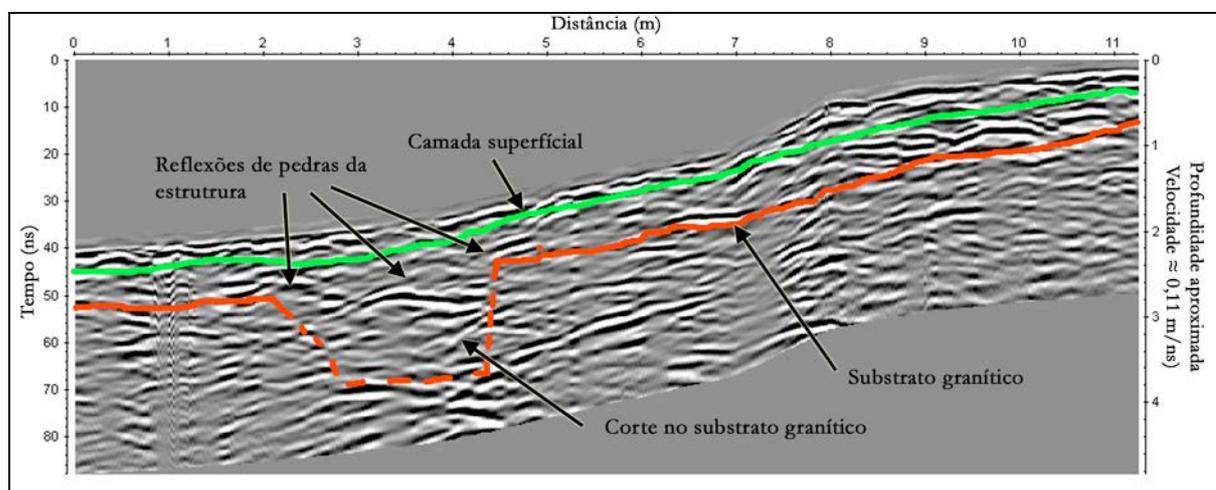
Considerando o enquadramento arqueológico das estruturas soterradas, procedeu-se à interpretação dos dados obtidos na área prospectada. A observação dos radargramas adquiridos na área 2 permitiu constatar que o subsolo da zona estudada é relativamente complexo, observando-se diversas reflexões que mereceram particular cuidado na sua interpretação. Esta complexidade dever-se-á, em parte, à presença de blocos graníticos dispersos, bem como a variações de profundidade do substrato granítico, substrato este que apresentará variações no grau de alteração, havendo alternâncias entre rocha sã e rocha muito alterada ou mesmo arenizada. Outro dos aspectos que dificultaram esta interpretação prendeu-se com o facto de a estrutura arqueológica aqui interpretada se encontra parcialmente encastrada no substrato granítico, tal como o de Tongóbriga, no Marco de Canaveses (figura 3.91-4) e de as pedras que a compõem se encontrarem derrubadas. No entanto foi possível chegar às interpretações que se apresentam de seguida.

Observou-se em todos os radargramas uma camada superficial (figuras 3.92, 3.93 e 3.94) correspondendo a um misto de coluvião e de solo vegetal, com espessura variando entre os 10

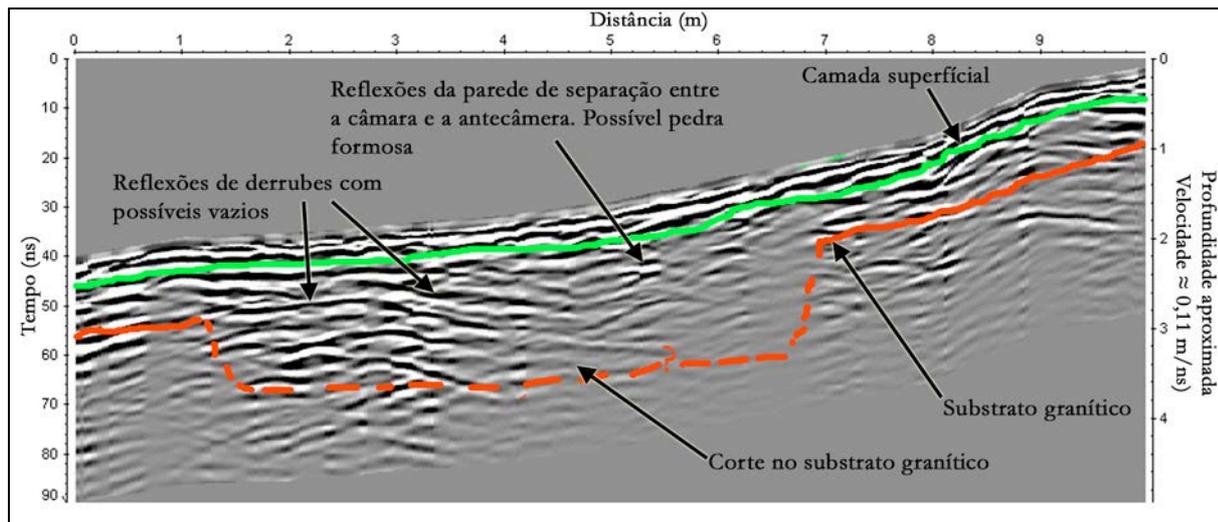
cm e os 30 cm, por vezes apresentando reflexões de clastos rochosos de dimensões variadas (5 a 50 cm), alguns dos quais observáveis à superfície. Esta camada sobrepõe-se a um outro nível, provavelmente coluvionar, identificado como nível de areia na sondagem arqueológica. Este nível assenta sobre o substrato rochoso, cuja profundidade é variável ao longo da área prospectada, estando este entre 0,2 m e 1 m de profundidade.

Nos perfis foram também identificadas áreas onde é visível um corte no substrato granítico, com dimensões variáveis (entre 1 m a 4 m), dependendo da posição dos perfis. Estes cortes parecem indicar a presença de uma estrutura, parcialmente escavada no substrato granítico, individualizada em áreas separadas. Em alguns dos perfis (figura 3.93) foram também observados, dentro destes cortes, algumas reflexões de possíveis paredes, muito possivelmente da pedra formosa que separa a antecâmara da câmara, assim como reflexões de possíveis derrubes da estrutura. No radargrama da figura 3.94 observa-se um conjunto de reflexões intensas, lateralmente ao corte no substrato, interpretadas como as paredes do forno do balneário.

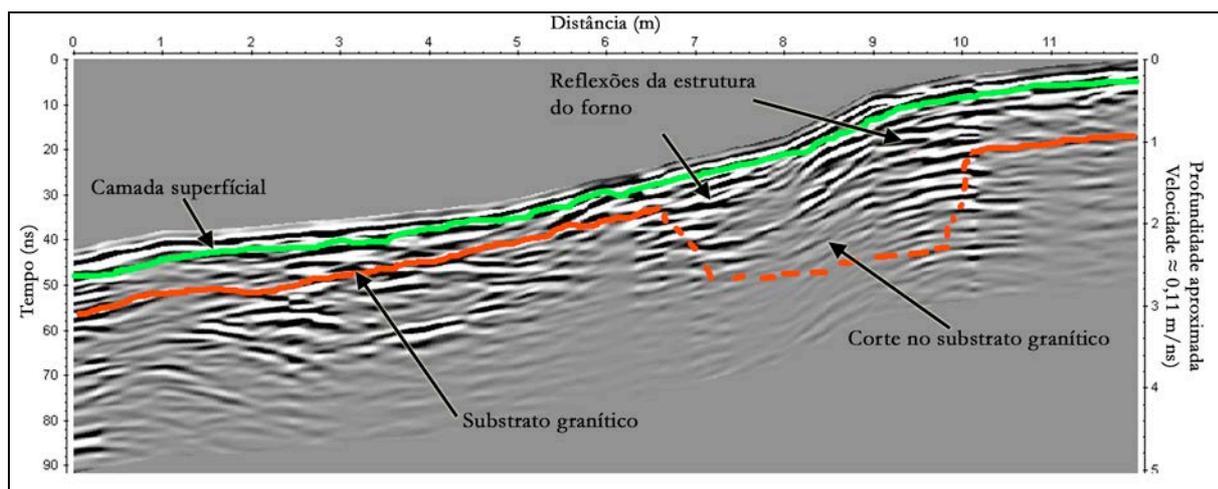
Os mapas de amplitude gerados apresentaram um conjunto interessante de reflexões, associadas às zonas dos cortes no substrato granítico, que parecem individualizar quatro espaços alinhados, separados por muros ou lajes pétreas (figuras 3.95 e 3.96).



**Figura 3.92** – Radargrama do perfil 1, adquirido aos 0 m da grelha de prospecção. São assinaladas as reflexões interpretadas como correspondendo ao contacto da camada superficial e ao limite do substrato granítico. Observam-se também um corte no substrato que, pela sua posição relativamente à sondagem arqueológica deverá corresponder ao átrio do balneário.



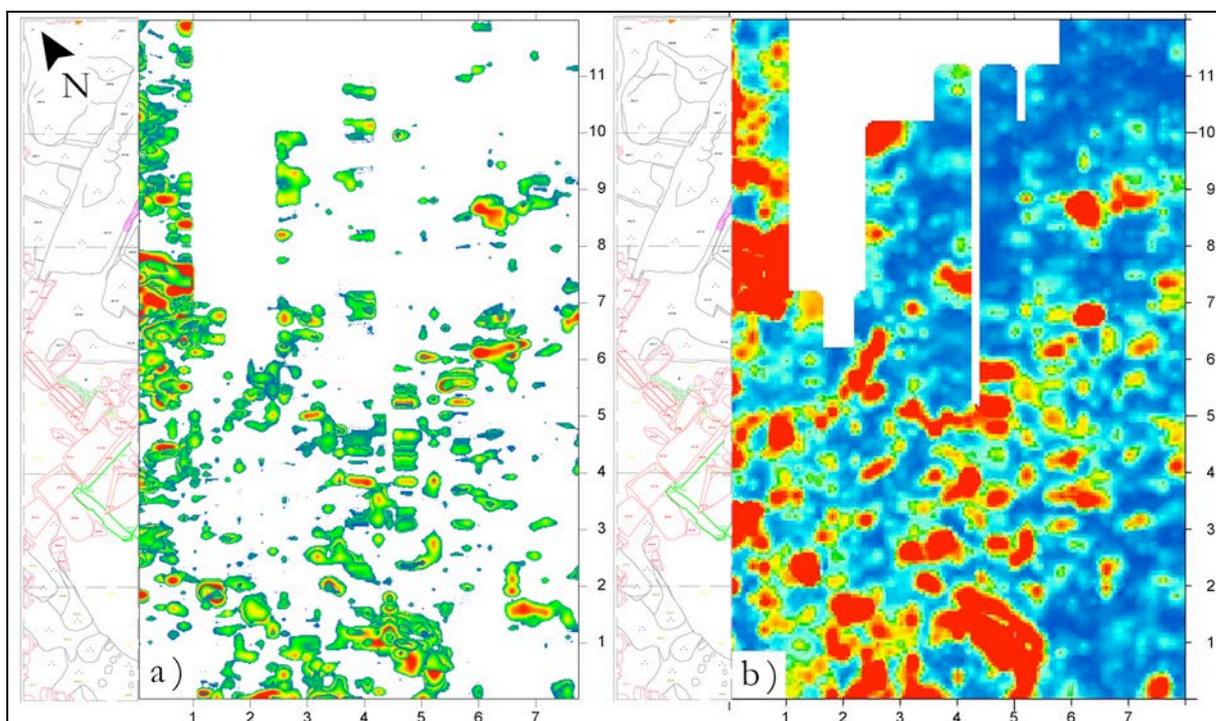
**Figura 3.93** – Radargrama do perfil 16, adquirido aos 3,20 m da grelha de prospecção. São assinaladas as reflexões interpretadas como correspondendo ao contacto da camada superficial (a verde) e ao limite do substrato granítico (a vermelho). Observa-se, também, um corte no substrato que corresponderá à zona da antecâmara e da câmara, interceptadas na diagonal pelo radargramas, além de uma reflexão de uma parede de separação existente entre as duas divisões, possivelmente correspondente à pedra formosa.



**Figura 3.94** – Radargrama do perfil 16, adquirido aos 3,20 m da grelha de prospecção. São assinaladas as reflexões interpretadas como correspondendo ao contacto da camada superficial e ao limite do substrato granítico. Observa-se, também, um corte no substrato com intensas reflexões laterais. Este corte corresponderá ao forno do balneário e as reflexões laterais são interpretadas como pertencendo às suas paredes.

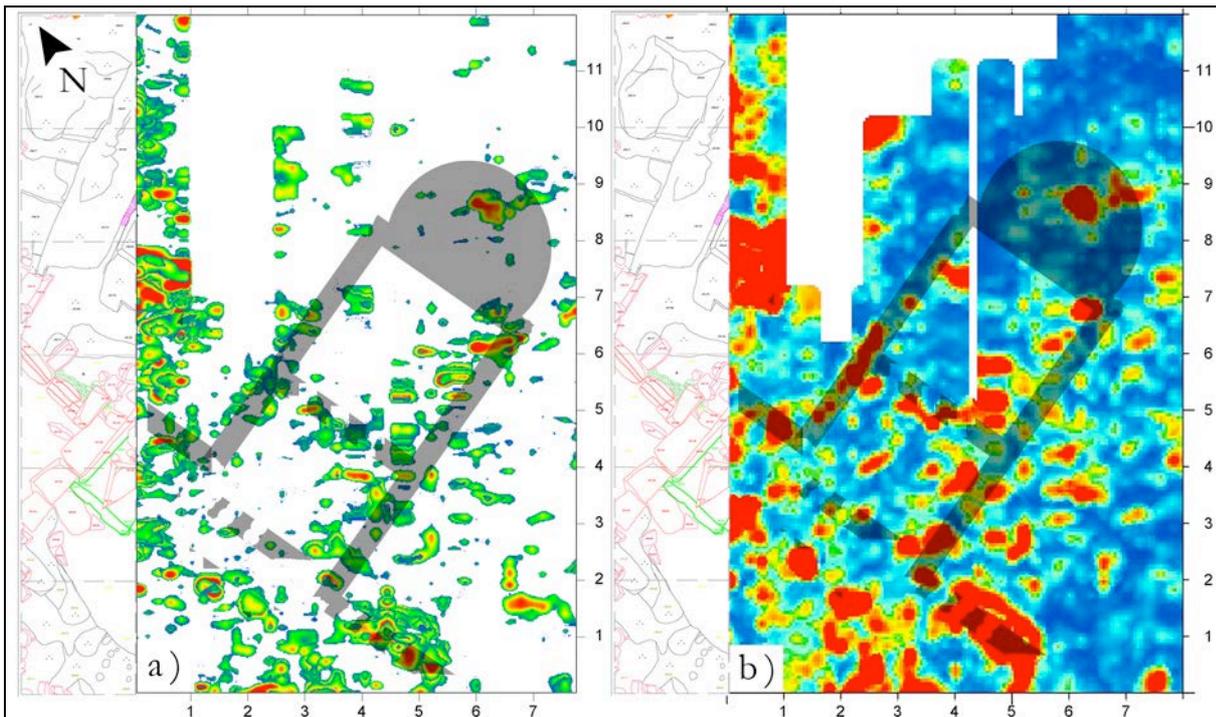
Considerando as tipologias dos balneários meridionais, procedeu-se à comparação das reflexões obtidas com as formas presentes na figura 3.91. As áreas individualizadas detectadas nos padrões de reflexão, referido anteriormente, parecem indiciar uma organização em quatro espaços, que corresponderão ao átrio, antecâmara, câmara e forno dos balneários do tipo meridional (figura 3.91). A posição das reflexões, conjuntamente com a posição do muro da sondagem arqueológica, aprece indicar que o átrio se estende um pouco mais para o interior do terreno, sendo a antecâmara um pouco mais curta. A separação entre estes dois espaços quase não

apresenta reflexões, o que está de acordo com a tipologia destes espaços em que, poderá não existir uma porta na passagem do átrio para a antecâmara (figura 3.91). Um conjunto de reflexões mais intensas observadas na zona do átrio poderá indicar a existência de derrubes ou, a lajes associadas a tanques de água.

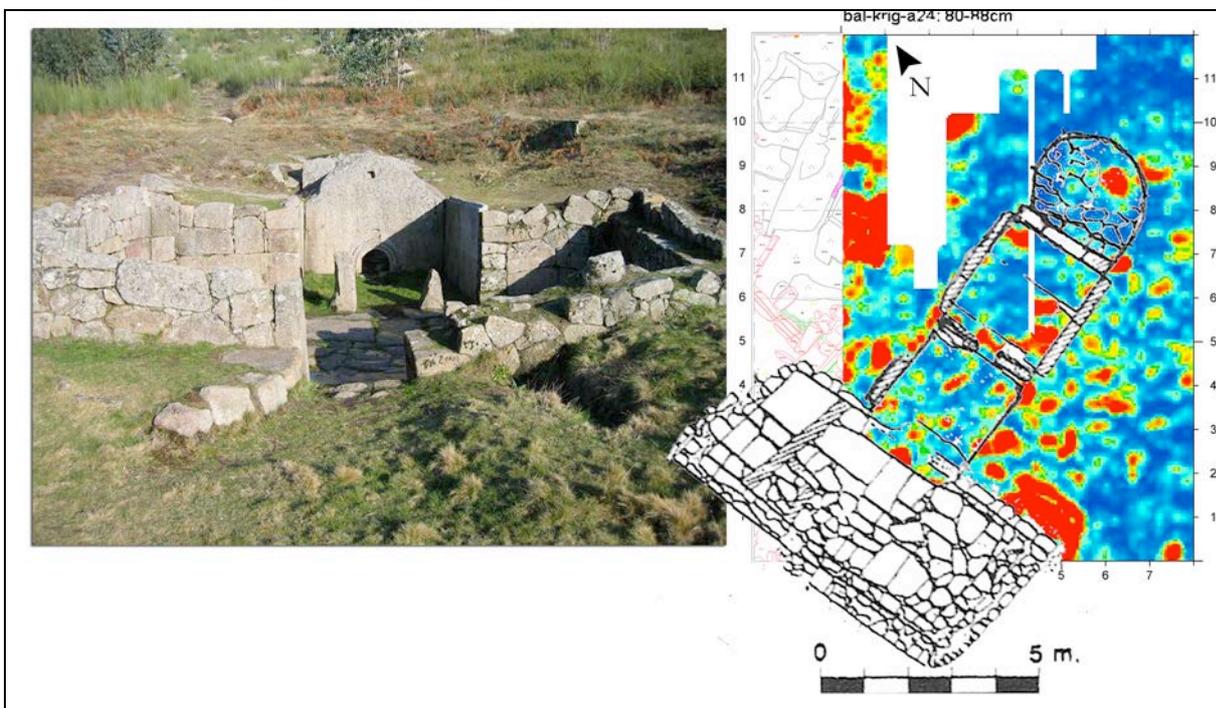


**Figura 3.95** – a) Mapa com as amplitudes obtidas pela análise de sobreposição das reflexões mais intensas entre os 40 cm e os 1,5 m de profundidade. b) Mapa de amplitudes correspondente ao intervalo de profundidades dos 80-88 cm. Nestes mapas observam-se um conjunto de padrões de reflexão organizados em espaços individualizados, interpretados como sendo as divisões do balneário pré-romano.

Considerando que a interpretação presentes na figura 3.96 é apenas uma proposta, passível de discussão, mas fundamentada nas reflexões presentes nos radargramas, na forma dos padrões observados nos mapas de amplitudes e nos resultados da sondagem, procedeu-se a uma tentativa académica de relacionar este balneário com os presentes na figura 3.91. Ajustada a escala, procedeu-se à justaposição dos diferentes balneários bracarenses tendo-se verificado que os padrões de reflexão observados nos mapas de amplitudes se ajustam, quer às dimensões quer à forma do balneário pré-romano da Citânia de Sanfins (figura 3.97). No entanto, será de considerar que, no caso do Monte do Padrão, a antecâmara seja mais curta.



**Figura 3.96** – Esta imagem apresenta os mapas descritos em 3.95 com a interpretação das reflexões observadas, individualizadas em quatro áreas: átrio; antecâmara; câmara e forno.



**Figura 3.97** – À direita apresenta-se a sobreposição do desenho do balneário pré-romano da citânia de Sanfins ao mapa de amplitudes, observando-se o ajuste quase perfeito entre esta estrutura e os padrões de reflexão existentes nos mapas de amplitudes da área 2 prospectada em Monte do Padrão. À esquerda observa-se uma fotografia do balneário da referida citânia (fotografia de Henrique Matos, *in* [http://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ACitania\\_de\\_Sanfins\\_Portugal\\_02.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ACitania_de_Sanfins_Portugal_02.jpg), 5-12-2012).

### 3.6.5. Discussão

O estudo realizado no Castro do Monte do Padrão mostrou ser de grande importância para a definição de uma metodologia prospectiva eficaz para a detecção de estruturas arqueológicas em estações destas cronologias (Idade do Ferro e Romanização). Este trabalho foi facilitado pelas condições favoráveis das áreas prospectadas, relativamente planas e quase sem obstáculos, o que possibilitou a implementação de uma estratégia aquisitiva de alta resolução, com a prospecção em área segundo grelhas ortogonais.

A utilização da prospecção de alta resolução, com a aquisição de perfis pouco espaçados (10 cm) como a utilizada nas grelhas 1, 3 e 4 da área 1, permitiu a obtenção de imagens de grande resolução que permitiram uma boa observação e interpretação das estruturas presentes, exceptuando, obviamente, o caso das grelhas 3 e 4 onde, devido à avaria do equipamento, não foi possível obter imagens de qualidade.

Quanto à área 2, a aquisição dos dados com uma estratégia de prospecção em área pseudo 3D, mostrou ser também bastante eficaz na obtenção de dados interpretáveis. A observação dos radargramas, topograficamente corrigidos, e dos mapas de amplitudes gerados, permitiu confirmar a existência de um balneário nesta área do Monte Padrão e definir a sua possível forma, possibilitando também a sua comparação com o balneário da Citânia de Sanfins. No entanto, só novos estudos geofísicos no local, particularmente a realização de uma prospecção magnética, poderão permitir a localização com precisão da área do forno, validando desta forma os dados do Georadar. Também são necessárias novas campanhas de escavação arqueológica para esclarecer as dimensões da antecâmara e confirmar definitivamente as interpretações aqui realizadas, num diálogo interdisciplinar indispensável para o avanço deste domínio científico.

### 3.7. Estação arqueológica de Vale de Chãos

Apresenta-se o trabalho de prospecção geofísica com Georadar realizada na estação arqueológica de Vale de Chãos, em Pedralva, concelho de Braga. Este estudo, que decorreu em Outubro e Novembro de 2009 e em Março de 2010, realizou-se no âmbito de uma colaboração com o arqueólogo Luciano Villas-Boas, no contexto do projecto intitulado “O Povoamento da Pré-História Recente da Serra do Carvalho. Um estudo a partir dos tumuli 1 e 2 de Vale de Chãos, Norte de Portugal”, aprovado pelo IGESPAR.IP, e desenvolvido entre 2009 e 2011.

#### 3.7.1. Enquadramento contextual arqueológico

A estação arqueológica de Vale de Chãos localiza-se no lugar das Eiras, sito na freguesia de Pedralva, concelho e distrito de Braga, na área fronteiriça com a freguesia de Covelas, concelho de Póvoa de Lanhoso. As coordenadas geográficas da estação, tomadas no ponto mais elevado (440 metros - figura 3.98) são: 41° 34' 25.7" N de latitude e 8° 15' 31.3" W de longitude.

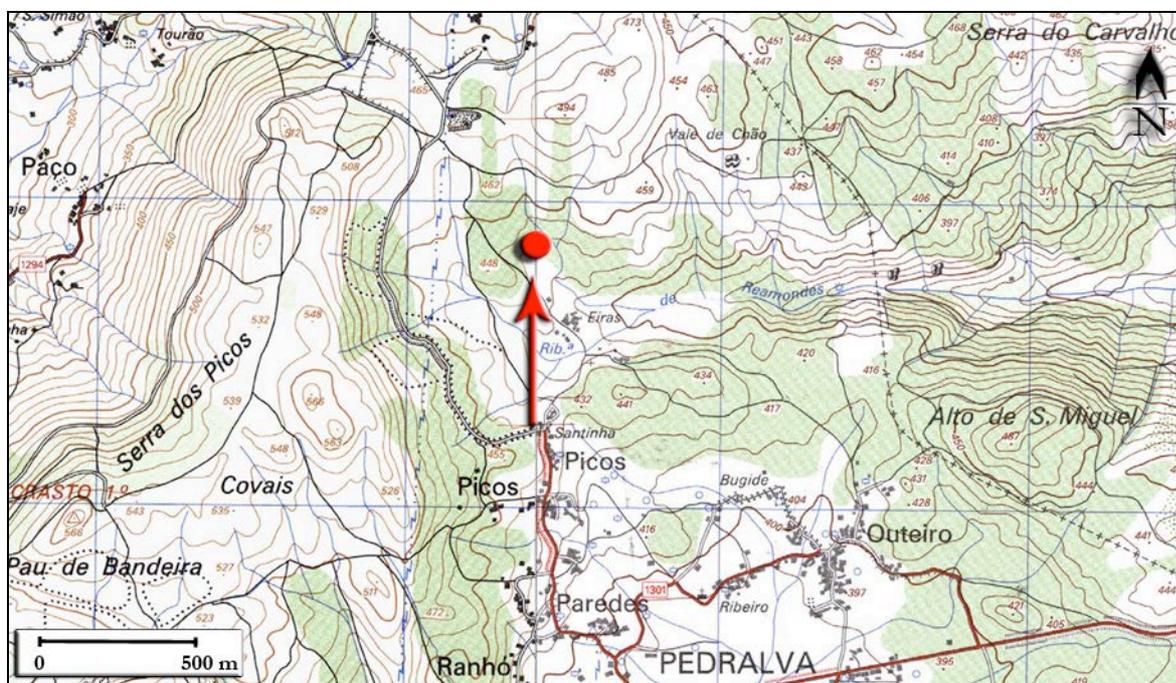
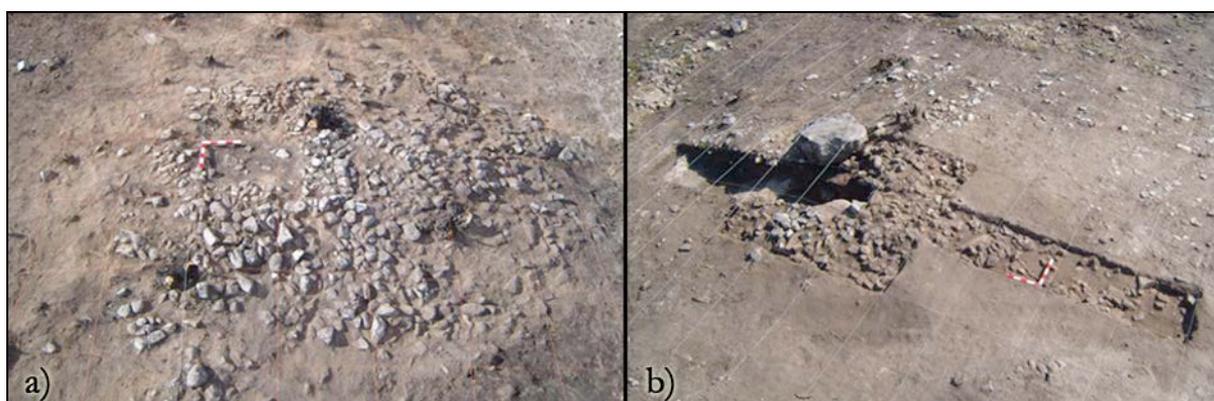


Figura 3.98 - Localização da estação arqueológica de Vale de Chãos assinalada com o ponto vermelho (extracto da Carta Militar 1:25.000, folha 57, série M888, IGEOE, 1997).

O sítio arqueológico foi identificado em Maio de 2007, no âmbito de trabalhos de arqueologia empresarial, mais precisamente durante o acompanhamento arqueológico da obra do *Desvio da Linha Aérea do Alto Lindoso – Riba D’Ave 1, a partir do Apoio P101 para a Subestação de Pedralva*, relacionada com a construção de linhas de alta tensão (Loureiro, 2007). Aí foram identificados dois monumentos sob *tumuli*, (pequenos monumentos funerários de tradição megalítica) designados por monumento 1 e 2 de Vale de Chãos (figura 3.99). Posteriormente foram identificados mais dois *tumuli*, localizando-se o nº 3 a cerca de 70 m para SSW do monumento 1 e o nº 4 a aproximadamente 60 m a SE do monumento 2.



**Figura 3.99** – Aspecto dos *tumuli* de Vale de Chãos 1 e 2 por ocasião da primeira intervenção arqueológica, em 2007. a) Decapagem inicial da totalidade do monumento 1. b) Decapagem parcial e vala de sondagem do monumento 2. Fotografias de Loureiro (2007).

As primeiras intervenções arqueológicas, de âmbito empresarial, decorreram em Julho e Setembro de 2007, tendo sido intervencionados os monumentos 1 e 2 por se localizarem nas proximidades da área de colocação de um novo poste de alta tensão. A segunda intervenção arqueológica, já no quadro do projecto de investigação de Luciano Vilas Boas, decorreu entre 2009 e 2010. Esta incidiu apenas no monumento 1 e sua área adjacente visando esclarecer alguns problemas que tinham ficado em aberto aquando dos primeiros trabalhos: o tipo de câmara existente; a orientação e funcionalidade de um valado encontrado sob o monumento e a existência ou não de outras estruturas pré-históricas na área envolvente, eventualmente relacionáveis com o valado (Vilas Boas, informação pessoal).

As escavações de 2007 revelaram que o monumento 1 apresentava uma planta tendencialmente circular, de pequenas dimensões (aproximadamente 7 m de diâmetro). Era construído por uma couraça pétrea constituída por pequenos clastos e alguns blocos de granito local. Entre as pedras da couraça registaram-se, também, seixos de quartzo leitoso. Este foi construído sobre um solo

pouco espesso, inclinado para sul, local onde foi reforçada a couraça lítica. Sob o montículo, com orientação NW-SE, foi registado um valado, coberto com algumas pedras de granito, anterior à construção do montículo.

O monumento 2 apresentava uma planta tendencialmente circular com um *tumulus* de aproximadamente 10 m de diâmetro. Era constituído por uma couraça pétreia com pequenos clastos de granito e de quartzo. Na sua zona central e mais elevada, registava-se a presença de blocos de maiores dimensões, alguns com mais de 70 cm, perfazendo uma forma tendencialmente circular que encostava, no limite nascente, a um enorme bloco, de várias toneladas que apresentava cinco covinhas gravadas no seu topo e dispostas em semi-círculo.

Segundo Loureiro (2007), os monumentos 1 e 2 de Vale de Chãos, considerando os materiais encontrados durante a escavação e a estratigrafia identificada, evidenciam a existência de zonas revolvidas, nomeadamente na época romana e posteriormente. Os materiais encontrados e as características que apresentam estas estruturas, bem como as semelhanças com outros *tumuli* estudados noutras regiões do Noroeste peninsular, permitiu inseri-las, cronologicamente, na Pré-história recente.

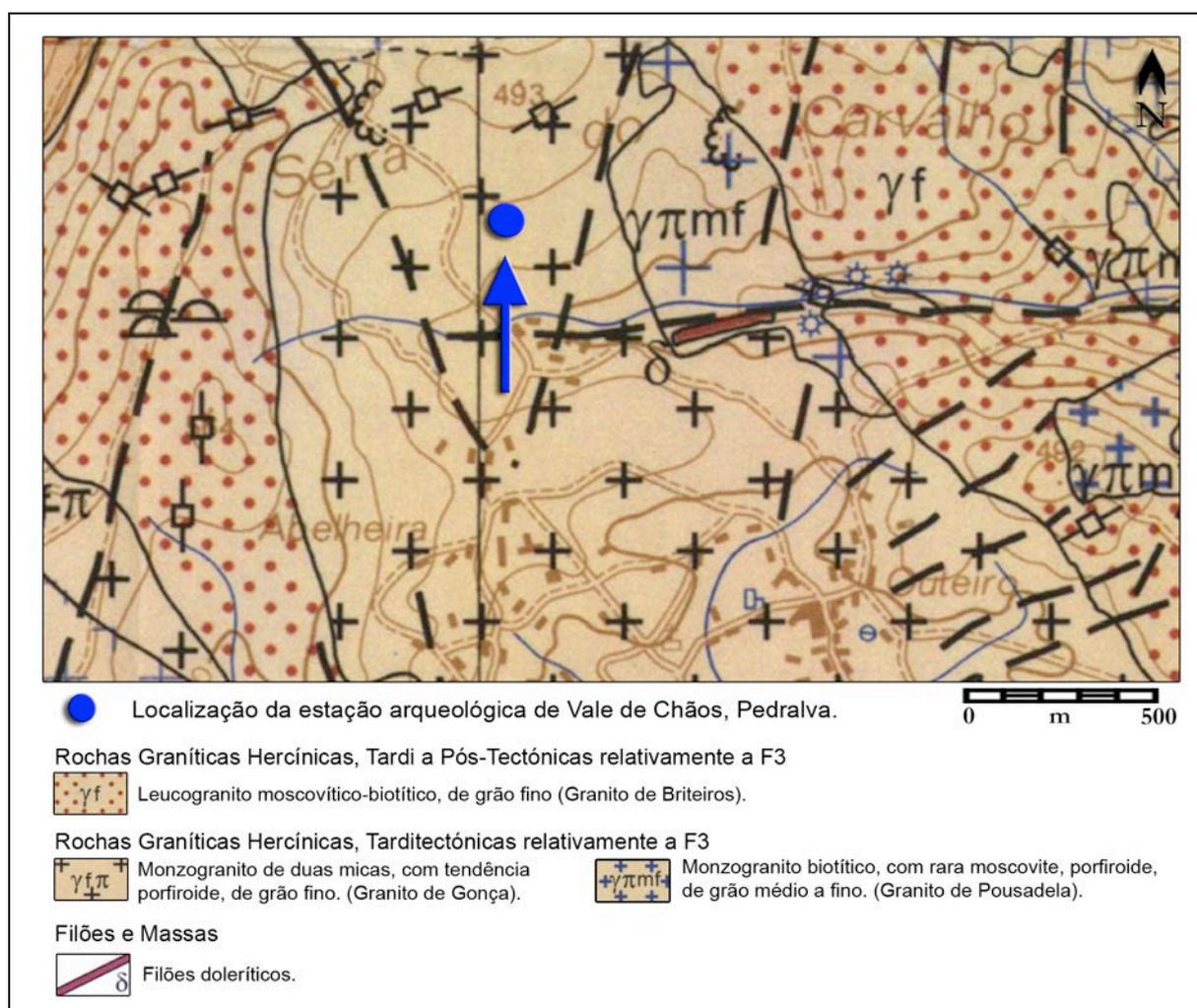
Após a realização deste estudo foi construída, entre os dois *tumuli*, um poste de alta tensão integrado na obra de *Desvio da Linha Aérea do Alto Lindoso – Riba D’Ave 1, a partir do Apoio P101 para a Subestação de Pedralva*. A implantação desta estrutura implicou a construção de alicerces para as sapatas e a abertura de uma vala que circunscreve todo o poste, onde foi colocada a linha de terra, a qual cortou parcialmente o *tumulus* do monumento 1, pelo lado sudoeste.

No contexto do projecto de Luciano Vilas-Boas foram alargadas as escavações no monumento 1 quer para a zona central, quer para norte e leste do montículo. Concomitantemente realizaram-se escavações para áreas exteriores ao mesmo. Estas intervenções, permitiram verificar que o *tumulus* do monumento era revestido por uma couraça pétreia que se sobrepunha a terras aí depositadas intencionalmente; que o monumento não possuía uma câmara estruturada em pedra, o que levou Vilas Boas & Bettencourt (no prelo) a considerarem que a deposição de restos fúnebres foi efectuada directamente sobre o solo e que o *tumulus* do monumento foi reutilizado para uma provável inumação secundária em sepultura plana. Os dois momentos de ocupação foram datados através do método de radiocarbono permitindo aferir que: o imóvel foi construído durante o Bronze Inicial e reutilizado durante o Bronze Médio; o valado foi construído no Neolítico (Vilas Boas & Bettencourt, no prelo).

Na área nascente contígua ao monumento foi verificada grande perturbação provocada pelos trabalhos de implantação do poste de alta tensão, embora a sudeste se tenha verificado o que parece ser a continuação do valado anterior ao monumento (Vilas Boas, informação pessoal).

### 3.7.2. Contexto geológico e geomorfológico

Os monumentos sob *tumuli* de Vale de Chãos foram edificados num substrato constituído por rochas graníticas (figura 3.100), tarditectónicas relativamente a F3, do Complexo Granítico de Braga (Ferreira *et al.*, 2000), mais precisamente pelo Granito de Gonça (monzogranito de duas micas, com tendência porfiróide, de grão fino). O granito aflora na zona da estação, apresentando-se muito fracturado e meteorizado, por vezes arenizado, identificando-se sob o monumento 1 um pequeno filão de quartzo (sem expressão cartográfica).



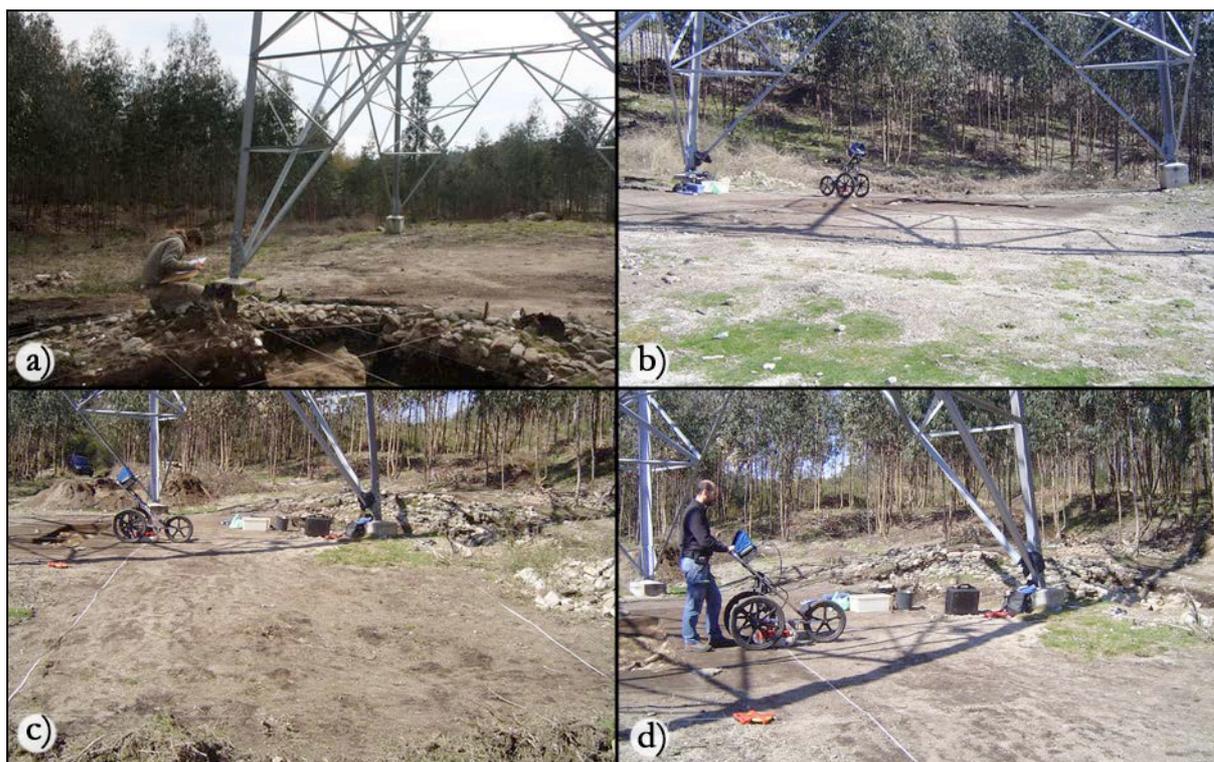
**Figura 3.100** – Enquadramento geológico da estação arqueológica de Vale de Chãos, Pedralva (extracto da Carta Geológica, 1:50.000, 5D de Braga – 2ª Edição, 2000).

A estação arqueológica de Vale de Chãos localiza-se no sector montante do vale da ribeira de Riamondes, subsidiária da bacia hidrográfica do rio Ave. Esta ribeira, corre num vale de direcção E-W, controlado tectonicamente, que é mais largo e de fundo plano no seu sector montante, correspondendo esta zona ao alvéolo ocupado pela Veiga de Eiras, encaixando e estreitando progressivamente para leste, em direcção ao vale do Ave. O sector montante do vale possui altitude média de 400 m e está rodeado por relevos residuais graníticos cuja altitude média varia entre os 490 m a norte (cumeada da serra do Carvalho), os 560 m a oeste (cumeada da serra de Picos) e os 440 m a sul (cumeada que separa o alvéolo da Veiga de Eiras do planalto de Pedralva). A estação situa-se numa pequena plataforma na vertente a SSW da serra do Carvalho, a cerca de 500 m da sua cumeada, delimitada por dois cursos de água que correm para a Ribeira de Riamondes, na zona de transição entre a referida vertente e o alvéolo da veiga de Eiras. A sua posição próxima da portela entre as bacias do Cávado, a norte, do Rio Este, a poente e do Ave, a sul e nascente, faz deste local uma zona preferencial de passagem e de ligação entre as referidas bacias.

### 3.7.3. Aquisição dos dados

No âmbito do projecto da responsabilidade de Luciano Vilas Boas, após a escavação do monumento 1 de Vale de Chãos, foi necessário expandir a escavação para áreas exteriores ao mesmo, ou seja, para a zona compreendida entre os dois *tumuli* e para a área a oriente do *tumulus* 1 (figura 3.101). A premência da aplicação do Georadar surge da necessidade de direccionar as escavações arqueológicas para os locais com maior potencial dada as grandes dimensões destas áreas (> 200 m<sup>2</sup>). Além de se definir a estratigrafia local, com indicação da profundidade do substrato granítico, e se identificar potenciais estruturas antrópicas nas zonas exteriores ao monumento 1, nomeadamente na sua zona oriental e área entre os dois *tumuli*, pretendia-se verificar se o valado identificado sob o monumento 1 tinha continuidade.

Para este trabalho prospectivo optou-se pela utilização da antena de 400 MHz por esta apresentar uma maior resolução de sinal, possibilitando uma boa definição das potenciais estruturas arqueológicas. Esta escolha foi efectuada após a realização de alguns ensaios no terreno (concretizados com a antena de 200 MHz e a de 400 MHz) que evidenciaram a presença do substrato rochoso granítico a pequena profundidade.



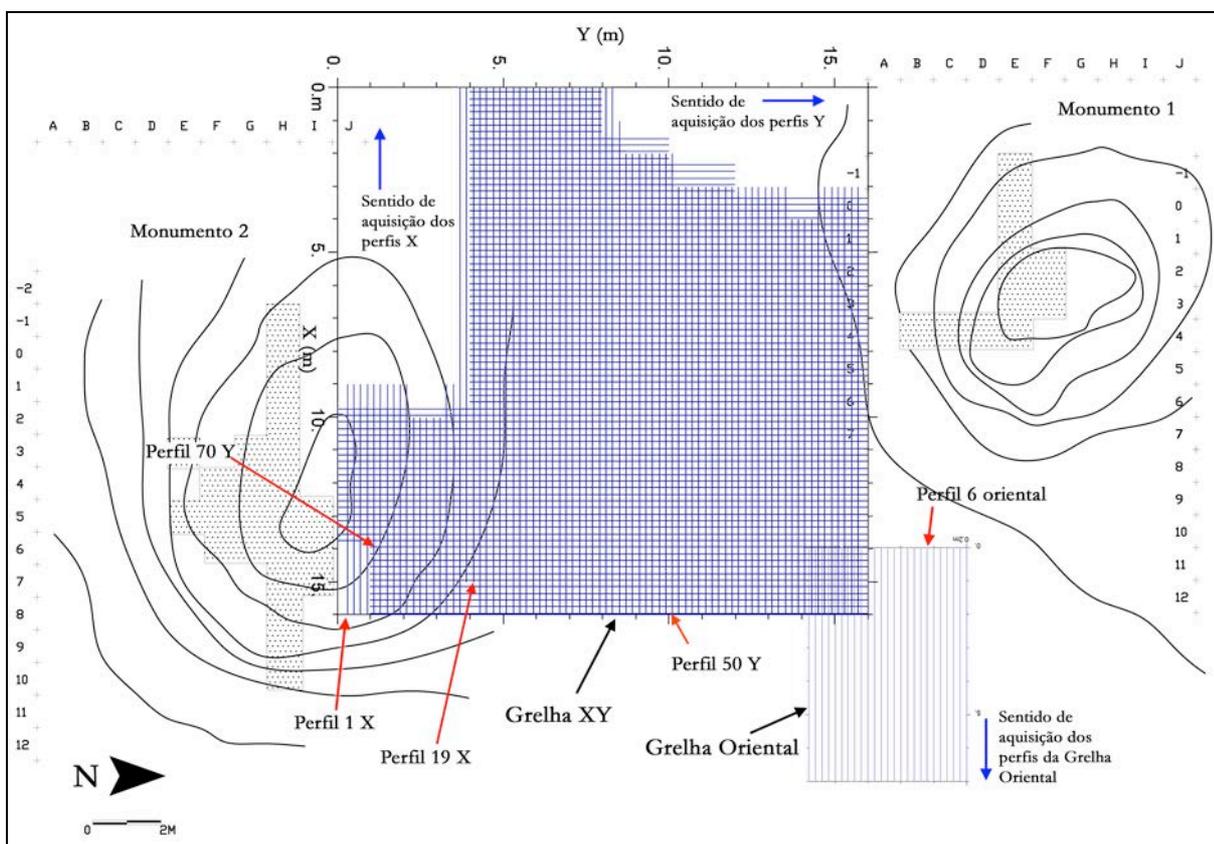
**Figura 3.101** – Pormenor das áreas prospectadas: a) e b) área entre os dois *tumuli*, onde se definiram as grelhas XY (na fotografia “a” pode ver-se em primeiro plano o monumento 1 e, ao fundo, o monumento 2 – fotografias de Luciano Vilas-Boas); c) e d) área oriental observando-se, atrás do pilar do poste de alta tensão, o monumento 1.

Para a definição da metodologia de aquisição dos dados considerou-se os contextos arqueológicos da estação, ou seja, o Neolítico e a Idade do Bronze. Com excepção de alguns fenómenos tumulares, a maioria das estruturas antrópicas destes períodos cronológico-culturais são estruturas percíveis ou escavadas no subsolo (buracos de poste, valas e valados, fossas, sepulturas, etc.), semelhantes às encontradas na estação arqueológica do Pego (ponto 2 deste capítulo). Tendo em vista a identificação deste tipo de vestígios optou-se pela realização de uma prospecção em área, pseudo-3D, com espaçamento entre perfis de 20 cm e duas direcções de aquisição (XY), para a zona entre os dois monumentos. Na prática, definiram-se duas grelhas de prospecção sobrepostas, uma com os perfis a serem adquiridos com a direcção Y (sul-norte) e outra com os perfis a serem adquiridos segundo a direcção X (este-oeste), tal como apresentado na figura 3.102.

Estas grelhas cobrem uma área de aproximadamente 200 m<sup>2</sup>, tendo sido adquiridos 80 perfis, na direcção Y, e 78 perfis na direcção X, correspondendo a um total de 1940 m de prospecção. A zona oriental do *tumulus* 1 foi parcialmente prospectada pela grelha atrás descrita, tendo sido alargada para leste a prospecção com uma segunda grelha (figura 3.102), cobrindo uma área de 35 m<sup>2</sup>, tendo sido adquiridos 25 perfis correspondendo a 175 m de prospecção. Cada perfil foi

adquirido com os seguintes parâmetros: 50 traços de reflexão por metro; 1024 amostras por traço e janela de aquisição de 40 ns. A implantação da grelha XY teve em consideração os obstáculos existentes no local, nomeadamente as bases do poste de alta tensão construído no local da estação arqueológica. Escolheu-se a aquisição segundo duas direcções ortogonais de modo a potenciar a identificação de estruturas lineares (figura 3.101).

Durante a aquisição dos perfis foi observada a presença de interferências no sinal de radar. Estas manifestavam-se sob a forma de intensas oscilações do sinal que, em condições ideais, deveria permanecer estático.



**Figura 3.102** – Localização das grelhas de prospecção na estação arqueológica de Vale de Chãos (planimetria de Loureiro, 2007).

### 3.7.4. Resultados

As prospecções realizadas na estação arqueológica permitiram a aquisição de um vasto conjunto de dados que foram processados de forma a gerar imagens interpretáveis das potenciais estruturas arqueológicas presentes no local.

Uma primeira observação dos radargramas em bruto (i.e., sem processamento) mostrou a presença de fortes interferências no sinal registado do radar as quais, muito provavelmente são

devidas ao poste de alta tensão sob o qual se realizou a prospecção. A passagem de uma corrente de alta tensão sobre a área de prospecção e a linha de terra que circunscribe o poste poderão interferir com o sinal de radar, sendo com certeza responsáveis pelo ruído registado nos radargramas. A presença da estrutura metálica sobre a área de prospecção foi também responsável por muitas reflexões observadas nos radargramas.

Os radargramas foram processados com vista à remoção do ruído e das interferências registadas. Para além dos processamentos e filtros usuais (correção do tempo zero; *devon*; filtro *band-pass*; remoção do *background*; *subtract mean*) aplicou-se o filtro *subtracting average* através da média de 5 traços de radar. Relativamente ao filtro *band-pass*, aplicou-se para o intervalo de corte de frequências os 200 MHz e 700 MHz, já que parte do ruído ocorre nas frequências mais altas.

A velocidade de penetração do sinal de radar foi determinada pelo método de ajuste de hipérbolas, tendo-se obtido uma velocidade de 0,11 a 0,12 m/ns. Este intervalo está de acordo com o expectável para este tipo de terrenos (solos coluvionares e aterro, sobrejacente a granito muito alterado e/ou muito fracturado, por vezes arenizado) e com as condições de humidade dos mesmos (subsolo com teores altos de humidade pois os dias anteriores às prospecções foram pluviosos) estando de acordo com o apresentado na tabela 2.1 para este tipo de materiais.

O processamento dos perfis individuais, adquiridos na grelha XY e na grelha oriental, foi efectuado com o programa ReflexW, tendo sido adoptado o seguinte fluxo de processamento: correção do tempo zero; *devon*; filtro *band-pass* (200-700 MHz); remoção do *background*; *subtract mean*, *subtracting average*). Posteriormente, estes foram reprocessados com o programa GPR-Slice, tendo sido gerados volumes de dados pseudo 3D, através de interpolação do valor de amplitudes entre perfis num raio de 20 cm, pelo método *kriging*. Os volumes pseudo 3D foram seguidamente seccionados para geração de mapas de amplitude a intervalos de 1 ns de profundidade e espessura de 12 cm, com 50% de sobreposição. Foram gerados mapas de amplitudes para a grelha Y, a grelha X, o conjunto das duas grelhas (XY) e para a grelha oriental.

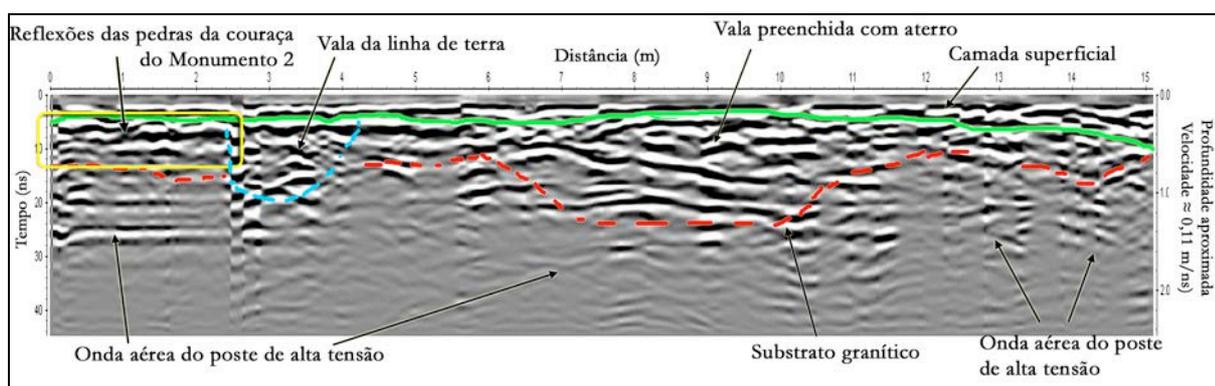
O processamento dos perfis permitiu salientar algumas reflexões com potencial interesse arqueológico. As interpretações dos perfis da grelha XY permitiram inferir que existia uma camada superficial pouco espessa (10-20 cm), composta essencialmente por aterro (mistura de solos coluvionares, restos vegetais e arena granítica) resultante da fase de construção do poste de alta tensão (figura 3.103 a 3.106); que o substrato granítico se encontrava entre os 20 cm e os 50 cm de profundidade; que existiam cortes no substrato granítico, inicialmente interpretados como eventuais fossas ou secções de valados e que alguns perfis intersectaram a estrutura do monumento 2, observando-se reflexões da couraça pétreia que cobria o *tumulus*.

Verificou-se, ainda, que alguns dos perfis interceptaram a vala que circunscreve o poste de alta tensão, sendo as suas reflexões visíveis nos radargramas. Observaram-se, também, muitas reflexões pertencentes à onda aérea reflectida pela estrutura metálica do referido poste.

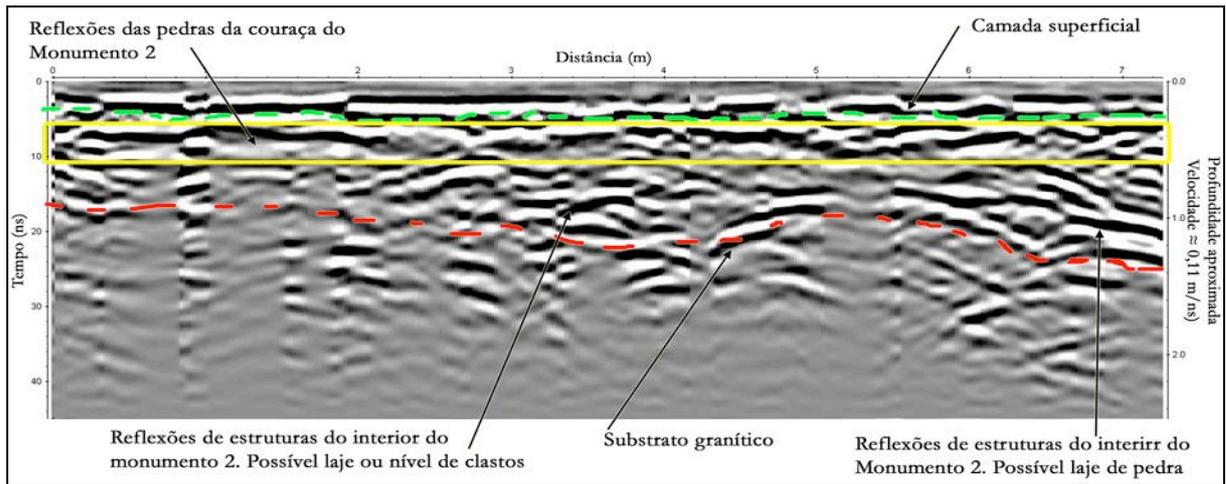
A análise dos mapas de amplitudes das grelhas X e Y permitiu constatar a presença de reflexões intensas originadas pelas interferências ocorridas no sinal de radar. Apesar dos processamentos realizados e dos filtros aplicados não foi possível eliminar esses sinais anómalos. No entanto, estes possibilitaram a visualização de alguns padrões de reflexão, com potencial interesse (figura 3.107), associados às reflexões identificadas nos radargramas.

Nos mapas de amplitudes gerados a partir da interpolação dos dados das duas grelhas (XY) é possível observar os padrões anteriormente descritos (figura 3.107), embora estes mapas apresentem, também, todas as reflexões anómalas observadas nos mapas Y e X, tornando-os menos claros do ponto de vista interpretativo.

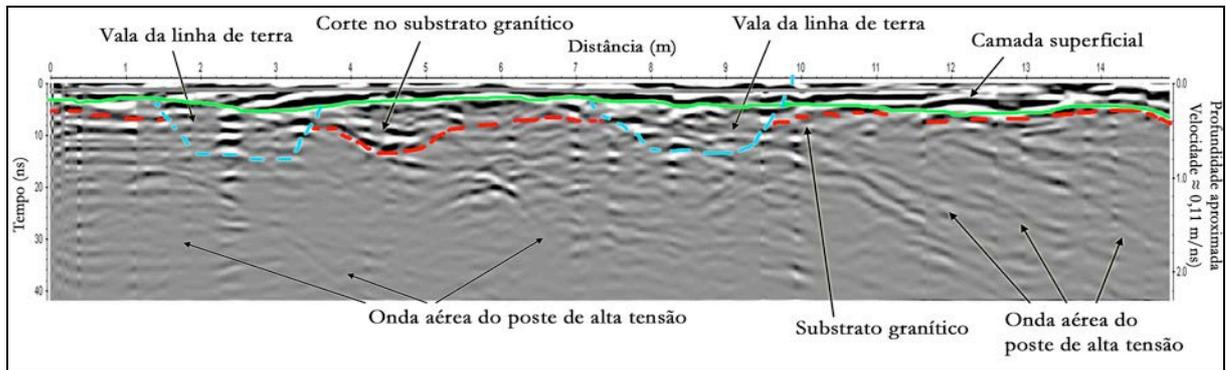
As reflexões dos cortes observados no substrato granítico, interpretados como estruturas antrópicas, a par dos padrões reflectivos presentes nos mapas de amplitudes, permitiram direccionar a escavação arqueológica. Esta ocorreu entre Janeiro e Março de 2010 e, efectivamente, comprovou-se que as estruturas identificadas eram de origem antrópica, no entanto com uma diferença de três milénios face ao esperado. A sondagem realizada (figura 3.108) mostrou que os cortes no substrato, identificados nos radargramas, foram realizados por uma pá de uma retroescavadora durante a construção do poste de alta tensão, tendo o espaço sido posteriormente aterrado com restos de arena granítica, solo vegetal e madeira.



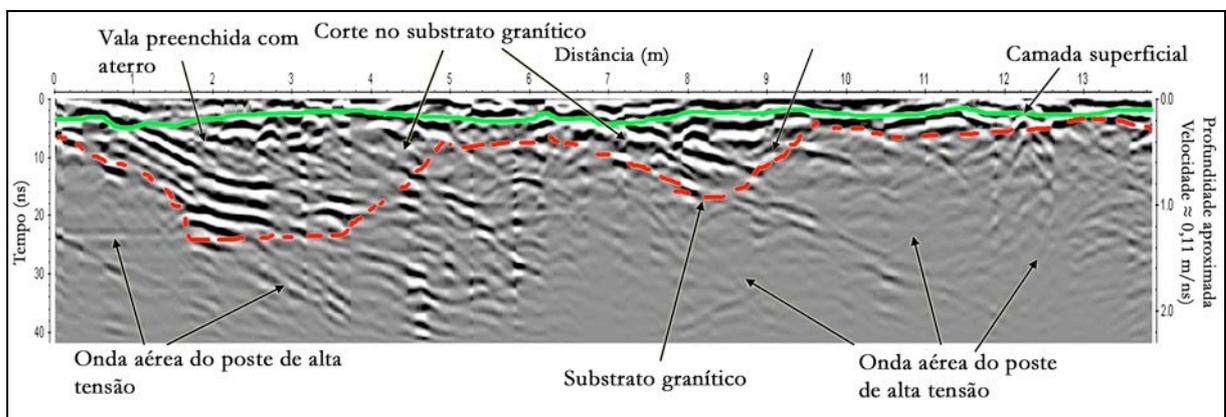
**Figura 3.103** – Pormenor do perfil 70 da grelha Y, adquirido aos 14,2 m. Do lado esquerdo, observam-se reflexões de clastos da couraça lítica que cobre o monumento 2. Pode observar-se no radargrama as reflexões da vala da linha de terra e da vala aberta e aterrada durante a construção do poste de alta tensão. São também observáveis as reflexões da onda aérea da estrutura metálica do referido poste.



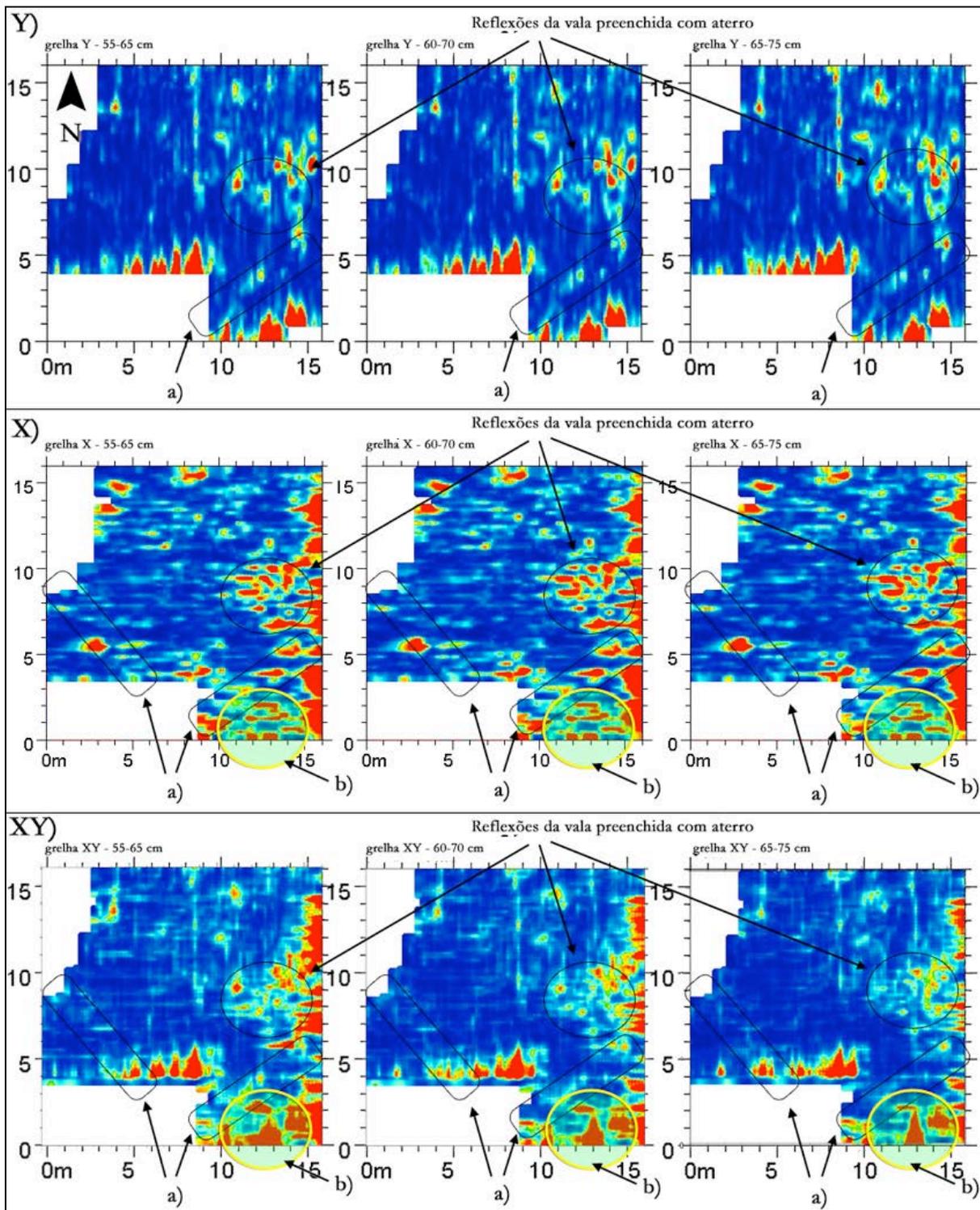
**Figura 3.104** – Pormenor do perfil 1 da grelha X, adquirido aos 0,2 m. Este perfil intersectou, no sentido W-E, a parte norte do monumento 2. Pode-se observar um conjunto de reflexões pertencentes à couraça lítica do *tumulus*. Entre esta e o substrato granítico, observam-se reflexões que poderão representar níveis de clastos ou lajes de pedra com dimensões superiores a 50 cm.



**Figura 3.105** – Pormenor do perfil 19 da grelha X, adquirido aos 4 m. Pode observar-se no radargrama as reflexões da vala da linha de terra, interceptada na diagonal em dois locais diferentes. É observado um corte no substrato, provavelmente relacionado com a fase de construção do poste de alta tensão. São também observáveis as reflexões da onda aérea da estrutura metálica do poste de alta tensão.



**Figura 3.106** – Pormenor do perfil 50 da grelha X, adquirido aos 10 m. Pode observar-se no radargrama as reflexões a vala inicialmente interpretada como provável fossa ou valado e que, após a escavação, mostrou ser uma vala aberta no momento da construção do poste de alta tensão. São também observáveis as reflexões da onda aérea da estrutura metálica do poste de alta tensão.

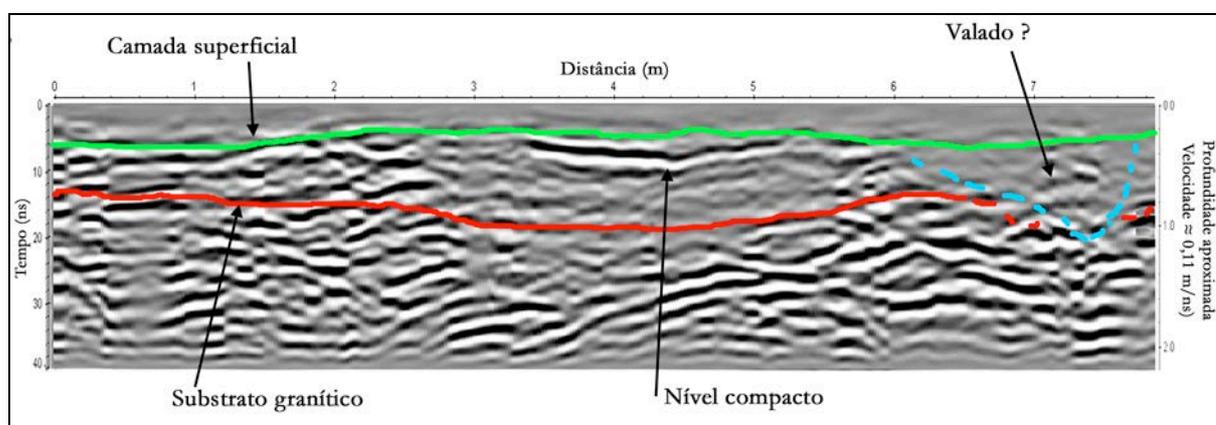


**Figura 3.107** – Na imagem são apresentados 3 mapas de amplitudes por grelha, Y, X e XY, correspondentes às mesmas profundidades. Observa-se que em todas as grelhas, independentemente da direcção de aquisição, é observável o padrão de reflexão de uma vala preenchida com aterro. Verifica-se que na grelha X, é perceptível a vala da linha de terra (a), linha esta que não é tão clara nos mapas cujos perfis foram adquiridos segundo Y. As reflexões assinaladas com b) estão associadas ao anel pétreo do *tumulus* do monumento 2. Estas reflexões estão patentes na grelha X e XY mas devido às interferências não são observáveis na grelha Y. Os mapas XY apresentam as reflexões das duas valas, bem como as interferências intensas observadas nos outros mapas, mas de forma mais notória.



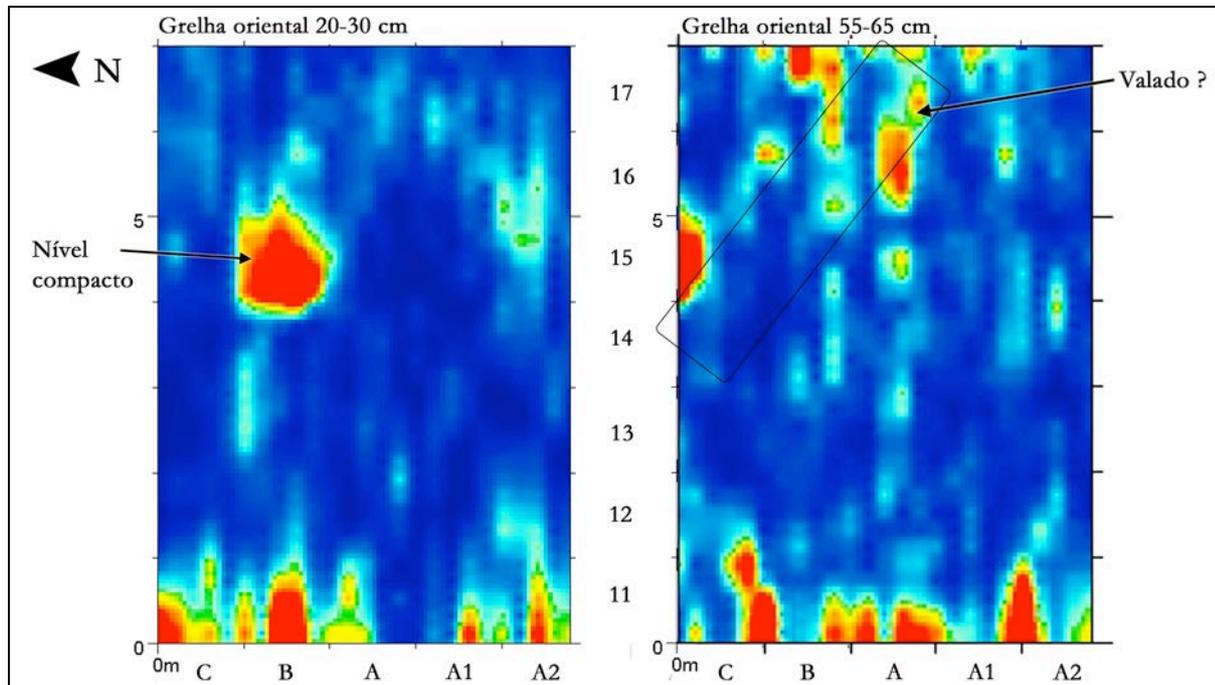
**Figura 3.108** – Pormenor da sondagem arqueológica realizada na zona central entre os *tumuli*. Na imagem da esquerda pode observar-se algum material do aterro, nomeadamente restos de madeira. Na imagem da direita observa-se parte do corte feito pela pá da retroescavadora, sendo visíveis as marcas dos seus dentes. Fotografia da direita de Luciano Vilas Boas.

Os radargramas dos perfis da grelha oriental necessitaram também do mesmo fluxo de processamento devido ao ruído e interferências presentes no sinal. Após processamento, foi possível verificar que a camada mais superficial tinha entre 10 cm e 20 cm de espessura e que o substrato granítico se encontrava a 40-50 cm de profundidade. Identificaram-se nos perfis algumas reflexões de potencial interesse arqueológico, nomeadamente um nível contínuo, localizado entre a camada superficial e o solo coluvial subjacente (figura 3.109). Este nível foi interpretado como correspondendo a uma zona mais compactada ou a um nível de clastos. Foram também identificadas reflexões que parecem indiciar a presença de um valado, interceptado na diagonal, com pendor mais inclinado do lado norte e mais suave do lado sul, que aparenta cruzar o local.



**Figura 3.109** – Pormenor do perfil 6 da grelha oriental, adquirido aos 1,2 m. Pode observar-se no radargrama as reflexões interpretadas como de um possível valado. São também observáveis as reflexões de um nível, aos 20-30 cm de profundidade, provavelmente correspondente a um zona mais compactada ou a um nível de clastos.

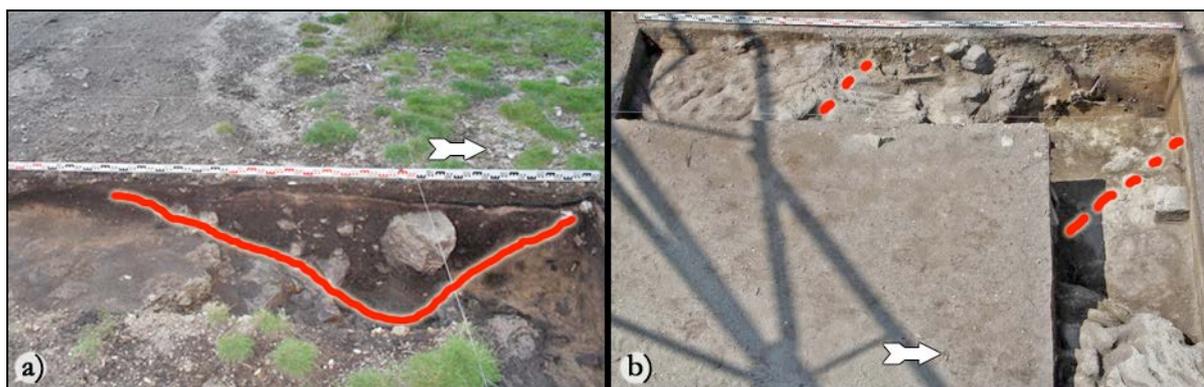
Os mapas de amplitudes desta grelha (figura 3.110) vieram reforçar as interpretações realizadas a partir dos radargramas, tendo-se observado padrões de reflexão correspondentes ao que foi interpretado como um nível mais compacto de solo ou um nível de pedras e um possível valado com orientação NW-SE e 1 m a 1,5 m de largura.



**Figura 3.110** – Mapas de amplitudes da grelha oriental. Identificaram-se reflexões associadas às dos radargramas, interpretadas como sendo de um possível valado (rectângulo) e nível compacto, correspondente a um zona mais compactada ou a um nível de clastos (reflexão circular).

Na escavação desta área (quadrados A15, A1-15, A2-15, B15, B16, B17 e B18) foi comprovada a existência de um valado (figura 3.111) com cerca de 1,5 m de largura na área mais próxima da superfície, estreitando em profundidade. Apresenta o pendor nordeste mais inclinado e o pendor sudoeste mais suavizado. Tal estrutura parece corresponder à interpretada nos radargramas e mapa de amplitudes.

Identificou-se também na escavação um nível muito compacto, de arena granítica, localizado na zona do quadrado B15, aos 10-20 cm de profundidade, sob a camada de solo superficial. Este nível é contemporâneo da fase de construção do poste de alta tensão e estará relacionada com a reflexão intensa interpretada como nível compacto.



**Figura 3.111** – Aspecto do valado, assinalado a vermelho, identificado na escavação arqueológica da área oriental observando-se o valado, assinalado a vermelho, no lado norte da sondagem.

### 3.7.5. Discussão

O estudo geofísico realizado na estação arqueológica de Vale de Chãos provou ser capaz de dar resposta a algumas das questões colocadas pela arqueologia.

Os dados obtidos com a prospecção em área, após cuidado processamento, possibilitaram a definição da estratigrafia do sítio. Concretamente, foi possível definir a partir dos radargramas a espessura da camada mais superficial e a profundidade a que ocorre o substrato rochoso. Permitiram também visualizar a existência de estruturas antrópicas escavadas no substrato granítico, passíveis de interesse arqueológico o que foi investigado em termos arqueológicas.

A prospecção em área com grelhas XY *per se* não trouxe melhorias às imagens geradas quando comparadas com as imagens geradas com as grelhas Y e X, o que no caso em questão se deverá essencialmente às interferências registadas no sinal de radar. No entanto, a aquisição de dados em grelhas cujos perfis se intersectem ortogonalmente, permitiu verificar que algumas estruturas podem não ser visualizadas quando os perfis lhes são paralelos ou sub-paralelos. A aquisição de grelhas XY prova, deste modo, que os dados de cada uma das grelhas ortogonais sobrepostas poderá mostrar estruturas que a outra grelha não resolveu. Apesar de mais morosa, a aquisição XY poderá potenciar a identificação de estruturas antrópicas particularmente em sítios arqueológicos com estruturas percíveis em negativo.

Este caso de estudo evidencia, também, que as interpretações realizadas através da utilização dos meios de prospecção geofísica em geral, e do Georadar, em particular, necessitam de validação por parte da arqueologia, se possível, através de sondagens arqueológicas. A identificação de uma das estruturas observadas nos radargramas como tendo origem antrópica provou ser correcta, no entanto, a escavação arqueológica mostrou que era muito mais recente do que o esperado. Esta sondagem mostrou também que a perturbação induzida num sítio arqueológico por maquinarias

pesadas, particularmente máquinas com lagartas, podem modificar de tal forma as condições de compactação dos solos locais que certas estruturas recentes poderão parecer, nos radargramas, estruturas mais antigas. De destacar que as sondagens arqueológicas certificaram o processo interpretativo, tal como se verificou na zona oriental do monumento 1 onde se confirmou a presença do valado de interesse arqueológico.

Capítulo 4

## **SÍNTESE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**



#### 4.1. Metodologias prospectivas

A detecção e identificação de estruturas arqueológicas soterradas é o principal objectivo da generalidade dos trabalhos de prospecção arqueológica efectuada com Georadar, estando o sucesso desses estudos dependente da utilização de uma adequada metodologia de aquisição, prospecção e visualização de dados.

No decorrer desta tese, importantes questões foram sendo postuladas, questões essas relacionadas com a abordagem metodológica a utilizar. Referiremos algumas das mais pertinentes, nomeadamente: qual a metodologia de aquisição de dados mais adequada à cronologia dos sítios estudados e às suas especificidades construtivas; qual a metodologia de aquisição de dados mais adequada a sítios de ampla diacronia e estratigrafia complexa; qual a densidade de aquisição de dados; qual o processamento adequado e que metodologias de apresentação e visualização dos dados permitirão uma correcta interpretação das estruturas arqueológicas.

Das questões levantadas, as relacionadas com a metodologia de aquisição dos dados e a densidade de aquisição dos mesmos são as de maior importância, uma vez que condicionam o sucesso das campanhas de prospecção. Os dados de Georadar adquiridos numa prospecção contêm grande variedade de informação capaz de permitir a interpretação de estruturas e estratigrafia dos sítios arqueológicos. No entanto, se não forem adquiridos com uma correcta metodologia e com uma densidade de aquisição adequada, muita informação poderá perder-se. Portanto, desde os primeiros ensaios e testes realizados que se tornou premente definir uma metodologia prospectiva que permitisse caracterizar correctamente os sítios arqueológicos enquadrados nos diferentes períodos cronológico-culturais estudados. Verificou-se também a importância de escolher uma metodologia que se adequasse a sítios arqueológicos com ampla diacronia e de elevada complexidade estratigráfica.

Os casos de estudo apresentados mostram a evolução verificada ao longo deste trabalho, evidenciando um acumular de conhecimentos e de experiências em resultado da investigação realizada e da necessidade de resolver as questões colocadas pelos arqueólogos, associadas às particularidades construtivas e estratigráficas de cada local.

Os primeiros estudos realizados com o Georadar no âmbito desta tese - o caso de estudo da estação arqueológica da Idade do Bronze do Pego, foram marcados pela filosofia seguida pela

*escova* de Lawrence Conyers (Conyers & Cameron, 1998; Conyers, 2004, 2006; Conyers & Osburn, 2006; Ernenwein, 2006; Grealy, 2006; Weaver, 2006). Segundo Conyers, a prospecção em área recorrendo à antena de 400 MHz da GSSI, com perfis adquiridos numa direcção, em zig-zag, e espaçados de 50 cm, seria a metodologia mais adequada à detecção de estruturas espectáveis no Pego (subtis ou construídas com materiais percíveis). Este método possibilitaria a geração de mapas de amplitude (*time slices*) os quais, associados aos radargramas, permitiriam a interpretação das estruturas presentes.

Esta abordagem metodológica, associada a um conjunto de processamentos de dados com aplicação de diferentes conjuntos de filtros de frequência, provou ser eficaz, pelo menos em parte, na identificação das estruturas do Pego. No entanto, as imagens geradas (mapas de amplitudes das grelhas 1, 2 e 3 da campanha de 2007 – figuras 3.13, 3.14, 3.15, 3.19, 3.20 e 3.25) possuem uma grande interpolação de dados, podendo criar reflexões não reais, o que poderá levar a interpretações erróneas. Por sua vez, a sub-amostragem poderá também fazer com que certas estruturas não sejam observadas. Por esse motivo, nos estudos subsequentes, nomeadamente na segunda campanha de prospecção realizada no Pego, e nas campanhas realizadas na envolvência das gravuras rupestres de Campelo, no povoado do Crastoeiro e na área 2 do castro do Monte do Padrão, ajustou-se a metodologia aplicada, tendo-se optado pela diminuição do espaçamento entre perfis, que passou de 50 cm para 20 cm. Pretendeu-se, desta forma garantir uma maior densidade de amostragem que possibilitasse a detecção de todas as potenciais estruturas presentes no terreno e a geração de imagens de qualidade superior, com o mínimo de interpolação. Efectivamente, observou-se uma melhoria substancial na qualidade dos mapas de amplitudes e imagens tridimensionais geradas o que, no estudo realizado no Crastoeiro (figura 3.55 e 3.56) e no Monte do Padrão (figura 3.95), permitiu aumentar o número de estruturas identificadas e precisar sobreposições.

No entanto, todas estas prospecções realizaram-se com uma sub-amostragem uma vez que, relativamente à frequência da antena utilizada (400 MHz), o espaçamento entre perfis encontrava-se acima do determinado pelo teorema de amostragem espacial de Nyquist que, para as condições médias dos terrenos prospectados (características dieléctricas e profundidade dos “alvos”), implicaria um espaçamento de 6 cm a 8 cm entre perfis. Este espaçamento garantiria a intersecção de todas as potenciais estruturas arqueológicas e a geração de mapas de amplitudes com o mínimo de interpolação. Tendo em vista o cumprimento deste teorema, a terceira campanha de prospecção no Pego foi realizada com um espaçamento de 5 cm entre perfis. Nesta campanha eliminou-se a aquisição em zig-zag, tendo os perfis sido adquiridos sempre no mesmo sentido, de forma a minimizar o ruído de *Jitter*, presente nos mapas de amplitudes. As imagens de

alta resolução, geradas por este método, evidenciaram melhor qualidade e definição mais detalhada das estruturas identificadas (figura 3.22). Mesmo assim, a melhoria da qualidade da imagem, dado o tipo de estruturas presentes nesta estação e as condições do terreno, não trouxe forçosamente uma melhor capacidade de detecção das potenciais estruturas presentes.

A aquisição de perfis de radar, realizada segundo os critérios definidos pelo teorema de Nyquist, originou a elevada qualidade dos dados adquiridos. No entanto, este método é bastante moroso, particularmente quando se utiliza um sistema de GPR mono-antena, o que limita a sua utilização a pequenas áreas, sendo possível o seu uso em grandes superfícies mas com custos mais elevados. Considerando a morosidade deste procedimento, para a prospecção realizada na área 1 do Monte do Padrão optou-se por relaxar ligeiramente as condições de aquisição definidas pelo teorema de Nyquist tendo-se definido o espaçamento de 10 cm como intervalo entre perfis. Os resultados obtidos para a grelha 1 desta área, após processamento dos dados e geração dos mapas de amplitudes, mostraram que não houve perda significativa de dados tendo estas imagens (figura 3.86 e 3.87) permitido definir correctamente as estruturas existentes. A prospecção aqui realizada evidenciou que o espaçamento escolhido foi o adequado para a recolha do máximo de informação dos locais prospectados, continuando no entanto a ter o inconveniente de ser uma metodologia bastante morosa.

Se em locais arqueológicos como os do castro do Monte Padrão foi relativamente fácil a identificação das estruturas arqueológicas existentes, dada a sua natureza pétreia e o elevado contraste que estas apresentam com o meio envolvente, relativamente homogéneo do ponto de vista das suas características dieléctricas, já sítios com estruturas mais subtis e/ou cortadas no substrato rochoso, cuja orientação não é conhecida, poderão não ser de tão fácil interpretação.

Para o estudo da área envolvente ao túmulo de Vale de Chãos 1, onde se esperavam encontrar estruturas percíveis e cortadas no substrato, e para o dólmen da Tojeira, com estratigrafia complexa, definiu-se uma prospecção em área com perfis adquiridos em duas direcções (X e Y) de forma a potenciar a identificação das estruturas presentes. Optou-se também por relaxar as condições do teorema de Nyquist, tendo-se definido um espaçamento de 20 cm entre perfis. Relativamente ao estudo realizado na Tojeira, os mapas de amplitudes gerados pela prospecção em área não foram de grande utilidade para a interpretação da estrutura do monumento (figura 3.73), no entanto, a aquisição dos perfis em duas direcções ortogonais e a interpretação individual de cada um dos radargramas (figuras 3.66 a 3.71) forneceu valiosa informação sobre a sua estrutura interna. Relativamente a Vale de Chãos o método empregue possibilitou a identificação de algumas estruturas antrópicas (a maioria, infelizmente, demasiado recentes) nos mapas de amplitudes gerados.

A análise destes casos de estudo permite concluir que a metodologia de prospecção ideal para estações arqueológicas enquadradas nos contextos da pré-história recente e da proto-história, bem como para contextos arqueológicos de elevado diacronismo, será a prospecção em área de alta resolução, seguindo os pressupostos do teorema de Nyquist, ou a realização de uma prospecção em área com aquisição de perfis em direcções ortogonais com um espaçamento entre perfis ligeiramente mais amplo, de modo a diminuir o tempo de aquisição, mas nunca superior a 20 cm (considerando a antena de 400 MHz de frequência central).

## 4.2. Visualização e interpretação dos dados

Sendo a fase de aquisição dos dados de enorme importância pois influenciará os passos subsequentes, não se deverá descurar a importância da fase de processamento dos dados de Georadar. Esta ditará a qualidade das imagens a gerar, quer sejam radargramas, mapas de amplitudes ou volumes tridimensionais de isosuperfícies. Os casos de estudo mostraram a importância do processamento dos dados (1D, 2D e 3D) para a remoção de ruídos e interferências no sinal de radar, bem como para a amplificação de reflexões de interesse arqueológico, não sendo possível definir uma metodologia padronizada de processamento pois cada caso é particular. Estes processamentos devem ser aplicados com precaução de modo a evitar a geração de imagens irreais ou a eliminação de reflexões importantes. Assim sendo, os procedimentos gerais de processamento dos dados devem ter em conta as condições de aquisição, as interferências externas registadas no sinal, a natureza do subsolo dos terrenos a prospectar e as características das estruturas a investigar.

Nos casos estudados foi aplicada um fluxo de processamento (correção do tempo zero; *deconv*; filtro *band-pass*; remoção do *background*; *subtract mean*) que permitiu obter imagens de elevada qualidade. Pontualmente, este processamento foi complementado, sempre que necessário, com a correção topográfica (casos da Tojeira e área 2 do Monte Padrão) e a migração, esta última particularmente utilizada para a geração de mapas de amplitudes.

Sendo o principal objectivo das prospecções arqueofísicas com Georadar, a identificação do tamanho, forma, profundidade e localização de estruturas arqueológicas soterradas, é de grande importância a criação de imagens que possam ser analisadas e interpretadas. Destas, os mapas de amplitudes, a par com as imagens tridimensionais, tem-se destacado, nos últimos anos, como ferramenta ideal para a visualização e interpretação dos dados de radar. Estes métodos de visualização são bons a produzir imagens interpretáveis, quando as estruturas arqueológicas

enterradas produzem reflexões distintas dentro de um meio relativamente homogêneo. Quando as estruturas se encontram associadas a meios com estratigrafia complexa e/ou baixo contraste dieléctrico entre os materiais, a interpretação dos mapas de amplitudes e imagens tridimensionais deverá ser sempre cruzada com a interpretação e visualização dos radargramas individuais. Mesmo nas situações ideais deverá proceder-se a uma cuidada análise dos radargramas antes da geração das imagens 2D e 3D, pois o processamento dos dados poderá eliminar algumas das reflexões presentes, limitando ou impossibilitando a sua interpretação.

A interpretação das imagens geradas e das reflexões e amplitudes nelas representadas deve ser criteriosa, sendo importante que seja realizada por investigadores experimentados que conheçam as características das reflexões das ondas de Radar geradas pelas estruturas a investigar, uma vez que as reflexões produzidas por estruturas complexas raramente se assemelham à sua geometria real. Esta interpretação deverá ser fundamentada no conhecimento das características dieléctricas dos materiais arqueológicos e do terreno envolvente, tendo em consideração as condições climáticas dos dias que precederam a prospecção. Neste tipo de trabalho a interacção com o arqueólogo é indispensável, principalmente no que se relaciona com o conhecimento e interpretação do tipo de estruturas que se esperam encontrar em determinados contextos.

O conhecimento dos padrões de reflexão de um determinado tipo de estruturas arqueológico é bastante importante. Se por um lado a bibliografia é rica em exemplos de prospecções de sucesso em estruturas pétreas, o mesmo não se poderá dizer para o caso da prospecção em estações com estruturas subtis e/ou pereficeis e escavadas no substrato, sendo até normal encontrar referências a insucessos (ex: Valera *et al.*, 2010), não se percebendo claramente se estes se devem à utilização de metodologias de aquisição e processamento incorrectas, às condições do terreno ou a outros motivos.

Dada a ausência de um grande número de exemplos referenciados na bibliografia, o estudo aqui realizado pretende criar uma base metodológica e de conhecimento consistindo em três fases: 1) interpretação dos dados observados; 2) cruzamento da interpretação com os resultados das escavações, nos casos em que estas foram realizadas e 3) reanálise dos dados de forma a melhor compreender as reflexões associadas às estruturas identificadas e extrapolar essa informação para estações, ou áreas das estações, que não venham a ser alvo de intervenção arqueológica.

São de seguida apresentadas as interpretações e discussões gerais dos sítios estudados, tendo em consideração as diferenças tipológicas das estruturas e estações.

#### 4.2.1. Sítios arqueológicos com estruturas pétreas

Nos casos de estudo apresentados foram investigados dois tipos de sítios com construções pétreas, embora diferentes entre si: os monumentos megalíticos do Neolítico, de que é exemplo o dólmen da Tojeira, e os povoados da Idade do Ferro do Crastoeiro e do Monte Padrão, embora este último tenha continuidade de ocupação para a época romana e medieval.

Nos contextos megalíticos, sabe-se que estes poderão apresentar câmaras e, por vezes, corredores, construídos com grandes esteios, possuindo, muitas vezes, átrios definidos com pequenas pedras na entrada dos corredores. Os corredores que podiam ser curtos, médios ou longos, eram maioritariamente voltados a nascente. Rodeando estas estruturas podiam existir contrafortes mais ou menos possantes. O conjunto destas construções internas era coberto por montículos ou *tumulus* de planta circular ou elíptica, designadas popularmente por mamoas. Estas, compostas por terras, podiam ser revestidas por couraças líticas na sua totalidade, conter apenas um anel lítico periférico ou um anel intermédio e um anel periférico.

Nos contextos proto-históricos ocorrem, frequentemente, as primeiras estruturas habitacionais pétreas, geralmente de planta circular, evoluindo posteriormente para plantas ortogonais na transição para o mundo romano e para plantas rectangulares em plena romanização. Uma das características dos povoados da Idade do Ferro é a sua ampla diacronia, apresentando muitos fases diferentes de ocupação ou mesmo uma ocupação continuada. Estes locais são geralmente bastante mais complexos particularmente se o tipo de diacronismo for muito amplo. Nestes contextos podemos encontrar sobreposições de estruturas de épocas distintas, por exemplo a sobreposição de edifícios romanos e/ou medievais a estruturas da Idade do Ferro. Por vezes, as estruturas pétreas da Idade do Ferro sobrepõem-se a pavimentos em argila ou a estruturas em negativo da própria Idade do Ferro ou da Idade do Bronze.

Os resultados obtidos com a prospecção de Georadar sobre o *tumulus* da Tojeira foram relevantes e admitem a continuidade da sua aplicação com sucesso, neste tipo de monumentos. Aqui realizou-se a prospecção em área, tendo a parte central do monumento sido prospectada com duas direcções de aquisição de perfis, ortogonais entre si. No entanto, os mapas de amplitudes (figura 3.73) não apresentaram padrões de reflexão interpretáveis o que, numa primeira abordagem, poderia ser considerado um insucesso do método. Mas, uma atenta observação das reflexões dos radargramas e a sua comparação com os registos das sondagens arqueológicas permitiu aferir que os perfis continham uma informação estratigráfica extremamente rica que possibilitou: a definição da estratigrafia do *tumulus* (figuras 3.66 a 3.71); a identificação da área de violação da câmara; a definição de um anel pétreo periférico, aparentemente parcial, que o

circunscreveria, pelo menos, pelos lados norte, sul e oeste; a identificação de uma depressão, relativamente descentrada, que tanto poderia corresponder a uma câmara cortada no substrato, a uma área cortada no solo para colocação de esteios ou a uma violação profunda.

Este caso de estudo permitiu verificar que, apesar de não ter sido possível a geração de mapas com reflexões interpretáveis, a prospecção em área com duas direcções ortogonais forneceu uma densidade elevada de radargramas que possibilitaram uma interpretação tridimensional da estrutura interna do *tumulus* e das suas estruturas pétreas.

Relativamente aos casos de estudo do Crastoeiro e do Monte Padrão verificou-se que a prospecção em área com a aquisição de perfis com espaçamento reduzido (20 cm no Crastoeiro e área 2 do Monte do Padrão, 10 cm na área 1 de Monte do Padrão) foi fundamental para a obtenção de um volume de dados que permitiu a geração de imagens interpretáveis. Para estes locais, a geração de sequências de mapas de amplitudes com intervalos de tempo/profundidade reduzidos permitiu determinar a geometria, volume e profundidade aproximada das estruturas presentes. A geração de mapas de amplitudes pelo método da análise de sobreposição foi, também, muito importante para a definição da geometria das estruturas, uma vez que associou no mesmo plano reflexões que se encontravam a profundidades distintas (figuras 3.55 e 3.87). Os estudos da área 1 do Monte Padrão e da área sudoeste do Crastoeiro provaram a importância da geração de imagens tridimensionais, tais como os volumes de isosuperfícies (figuras 3.57 e 3.88), e a sua correlação com os mapas de amplitudes e os radargramas em blocos diagrama das áreas prospectadas (3.58 e 3.89). Estas imagens possibilitaram a interpretação espacial de cabanas e de muralhas, mostrando a sua forma e posição no terreno. Relativamente à prospecção da área 2 do Monte do Padrão a integração das interpretações dos radargramas (figuras 3.92 a 3.94) com os mapas de amplitudes (figura 3.95) permitiu definir a geometria do balneário pré-romano ou da romanização (figura 3.96), apesar da elevada complexidade estratigráfica do local.

O caso da área 2 do Monte do Padrão e da prospecção realizada na área central do povoado do Crastoeiro são exemplos do potencial de informações existente nos radargramas, mesmo quando não se realizam prospecções em área. Com base nos respectivos radargramas verificou-se, ainda, que parte da estrutura do balneário foi escavada no substrato granítico alterado. Para o Crastoeiro foi, também, possível propor uma hipotética distribuição interna de diversas cabanas para a área central (figura 3.54), a partir da posição das paredes e dos pavimentos identificados nos perfis.

#### 4.2.2. Sítios arqueológicos com estruturas subtis e/ou perecíveis

Nos casos de estudo apresentados foram investigados três sítios arqueológicos da pré-história recente caracterizados pela presença de estruturas subtis ou construídas com materiais perecíveis, nomeadamente: o povoado/necrópole da Idade do Bronze do Pego; a área contígua às gravuras rupestres de Campelo e a área contígua aos monumentos sob *tumuli* da Idade do Bronze de Vale de Chãos 1 e 2, mas onde se supunha existirem estruturas em negativo de época Neolítica.

Os povoados da Idade do Bronze caracterizam-se, muitas vezes, pela ausência de estruturas pétreas, embora possam aparecer algumas lareiras, pequenas superfícies empedradas, alinhamentos e raras muralhas. Nestes contextos são mais comuns as estruturas construídas com materiais perecíveis e em negativo. No primeiro grupo podemos incluir os fundos de cabana em argila ou terra compactada e, no segundo, os buracos de poste e séries de buracos de poste que, por vezes, tomam a forma de pequenos valados ou se associam a eles. Os buracos de poste também se podem encontrar em áreas de outras estruturas em negativo, como fossas, ou delimitando fossos, neste último caso, indiciando paliçadas. É também possível encontrar em alguns povoados da Idade do Bronze necrópoles de sepulturas planas, ou seja, cortadas no subsolo, de forma rectangular, oval ou trapezoidal (Bettencourt, 2009).

As estruturas subtis ou construídas com materiais perecíveis são consideravelmente mais difíceis de detectar, dado o reduzido contraste entre as suas características dieléctricas e as do meio envolvente. Ainda assim, a investigação apresentada nos casos estudados mostra que, mesmo quando as condições são aparentemente adversas, é possível obter resultados satisfatórios, particularmente se for aplicada uma metodologia prospectiva que permita retirar o máximo de informação possível do sítio estudado.

Relativamente às metodologias prospectivas utilizadas, já atrás referidas, todas permitiram gerar mapas de amplitudes interpretáveis e, em algumas situações, também imagens tridimensionais. A prospecção em área foi fundamental para a obtenção de um volume de dados que proporcionasse a geração de imagens interpretáveis. Para estes locais, a geração de sequências de mapas de amplitudes com intervalos de tempo/profundidade reduzidos permitiu determinar a geometria, volume e profundidade aproximada das estruturas presentes. A geração de mapas de amplitudes pelo método da análise de sobreposição mostrou, também, ser muito importante na definição da geometria das estruturas, uma vez que associou, no mesmo plano, reflexões que se encontravam a profundidades distintas. No entanto, os mapas de amplitudes gerados nas prospecções com intervalos entre perfis elevados (50 cm) possuem demasiada interpolação dos dados, o que poderá gerar imagens irreais. Já a prospecção de alta resolução permite a geração de

mapas de amplitudes de elevada qualidade, como se pode observar no caso da grelha 2 do povoado do Pego. Contudo, este tipo de estruturas arqueológicas nem sempre geram reflexões fortes, não sendo observáveis nos mapas de amplitudes. Notou-se, ainda, que uma determinada estrutura, se paralela à direcção dos perfis, poderá não ser identificada, o que se constatou após a escavação de parte da área da grelha 2 do Pego. A solução para a mitigação de situações como esta é a aquisição de perfis em duas direcções ortogonais, tendo-se aplicado este método na estação de Vale de Chãos. Esta solução é mais morosa, mas, se suavizarmos as condições do teorema de Nyquist, aumentando ligeiramente a largura entre os perfis, não se compromete grandemente a qualidade das imagens geradas.

Em Vale de Chãos, esta metodologia, aplicada com espaçamento entre perfis de 20 cm, permitiu gerar três conjuntos de mapas de amplitudes (segundo X, Y e XY) que, em conjunto, forneceram valiosa informação sobre o sítio. Apesar de parte das estruturas encontradas na área prospectada (valados de pequenas e médias dimensões) serem bastante mais recentes do que o esperado, verificou-se que algumas destas estruturas apenas foram identificadas nos perfis adquiridos numa das direcções, o que mostra que, muitas vezes, pode estar a perder-se muita informação, por não se realizar a aquisição numa direcção que intersecte favoravelmente as estruturas, independentemente da densidade de aquisição utilizada.

Uma relevante conclusão retirada do estudo conduzido em Vale de Chãos, foi a importância da análise dos radargramas. Estes, *per si*, ou correlacionados com os mapas de amplitudes, permitiram a identificação das estruturas presentes e a compreensão da sua geometria e orientação.

Os casos de estudo aqui apresentados ilustram o valor da utilização dos radargramas em estações com as suas características, não só na identificação de estruturas, mas também na definição da estratigrafia dos sítios prospectados.

Outra conclusão prende-se com as condições de humidade dos sítios estudados. De todos os sítios estudados, por coincidência, o povoado do Pego foi o único que foi prospectado sempre em condições de seca, o que aliado ao facto de ser uma área com uma excelente drenagem, favoreceu a reduzida humidade do subsolo, diminuindo a permitividade relativa do substrato rochoso e dos materiais sobrejacentes e, conseqüentemente, diminuindo substancialmente o contraste entre ambos. Se por um lado esta situação favoreceu a velocidade e a capacidade de penetração das ondas de radar no solo, por outro lado dificultou a detecção das estruturas existentes. Apesar de todos estes constrangimentos foi possível detectar áreas de valados, fossas, buracos de poste e sepulturas, algumas já confirmadas pela escavação.

Nos outros casos de estudo, os solos apresentavam valores de humidade mais elevados, o que se reflectiu na velocidade ondas de radar (em média 11 cm/ns, face aos 14 cm/ns do Pego). O aumento de humidade no solo favorecerá o contraste entre os materiais, uma vez que as diferenças dieléctricas entre os diferentes meios é mais contrastante quando estes se encontram húmidos ou saturados do que quando se encontram secos. Seria então aconselhável que, quando possível, as prospecções se realizem em solos com alguma humidade. É no entanto de evitar prospecções com solos saturados, particularmente quando estes contêm argilas condutivas, uma vez que poderão inviabilizar a prospecção. Autores como Conyers (2004b) e Weaver (2006) salientam que determinadas estruturas arqueológicas, particularmente estruturas subtis e estruturas percíveis, poderão ser identificadas em situações de solos muito húmidos, enquanto que outras estruturas sairão realçadas em solos secos, sendo esta relação mais dependente das características dieléctricas das estruturas e do meio envolvente do que propriamente da sua geometria.

Capítulo 5

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**



## 5.1. Conclusões

O Georadar possui, de entre as várias técnicas geofísicas de prospecção sub-superficial, a característica única de produzir mapas e imagens tridimensionais de estruturas arqueológicas enterradas bem como de outras estruturas naturais associadas. Para tal é necessário aplicar uma correcta e adequada metodologia prospectiva nos sítios a estudar, tendo em consideração os contextos arqueológicos, as características das prováveis estruturas e as características do subsolo assim como as condições superficiais do terreno.

Esta tese é um contributo nesse sentido, apresentando-se os resultados e conclusões das metodologias prospectivas utilizadas nos seis casos de estudo, relativos a estações arqueológicas da pré-história recente à proto-história e romanização: dólmen da Tojeira (Póvoa de Lanhoso); gravuras rupestres de Campelo (Mondim de Basto); monumentos sob *tumuli* de Vale de Chãos (Braga); povoado/necrópole do Pego (Braga); povoado do Crastoeiro (Mondim de Basto); castro do Monte de Padrão (Santo Tirso).

O trabalho realizado cumpriu o propósito inicial do projecto de tese o qual pressupunha a introdução, através de uma abordagem multidisciplinar e interdisciplinar, de novas metodologias desenvolvidas pelas Geociências, como forma de dar resposta às problemáticas em aberto no âmbito dos contextos arqueológicos da pré-história recente ao período romano do noroeste português. Este propósito foi concretizado com a aplicação do Georadar e a definição de metodologias de estudo adequadas às problemáticas dos contextos em questão. Os resultados e discussões apresentados permitiram dar resposta à questão fundamental: quais as metodologias prospectivas mais adequadas aos contextos arqueológicos do noroeste de Portugal, particularmente aos da pré-história recente e da proto-história, bem como aos contextos arqueológicos de elevado diacronismo.

Conclui-se que a metodologia de aquisição mais adequada será a prospecção em área com grelhas ultra densas e/ou com perfis paralelos adquiridos em duas direcções (grelhas XY). A utilização de grelhas ultra densas provou ser eficaz nos sítios arqueológicos com estruturas pétreas. A prospecção com das grelhas XY mostrou ser a mais adequada ao estudo dos sítios com estruturas subtis e/ou matérias percíveis. Para contextos arqueológicos com elevado diacronismo a metodologia aquisitiva que, à partida, garantirá um maior sucesso na identificação de qualquer potencial estrutura será, a prospecção em área com grelhas ultra densas (se possível) e perfis adquiridos em duas direcções. Para casos, como os da área central do povoado do Crastoeiro ou

a área 2 do Castro do Monte do Padrão, com condições desfavoráveis (topografia irregular, presença de obstáculos, solos condutivos, etc.) o método deverá adequar-se às condições do terreno, podendo em algumas situações optar-se pela execução de perfis individuais ou pela prospecção em área com grelhas pseudo 3D.

Verificou-se que a fase de visualização dos resultados é muito importante, pois dela depende o sucesso da interpretação. Para a visualização, a abordagem que se mostrou mais adequada consistiu na criação de radargramas, mapas de amplitude e imagens tridimensionais (volumes de isosuperfícies, blocos diagrama). A análise dos radargramas, após o seu processamento, deverá ser o primeiro passo na interpretação, seguida da análise de mapas de amplitudes e de imagens tridimensionais, caso se tenha realizado uma prospecção em área. A correlação dos vários tipos de imagens favorecerá uma melhor interpretação das estruturas e da estratigrafia das estações arqueológicas.

Acrescenta-se ainda que a realização de sondagens arqueológicas pontuais são vantajosas e por vezes necessárias, pois permitem: validar ou reforçar as interpretações realizadas; eliminar dúvidas existentes; relacionar as estruturas escavadas com as reflexões e extrapolar essas conclusões para outros locais da estação arqueológica.

## 5.2. Questões em aberto

Concluído este trabalho ficam, no entanto, em aberto algumas questões, das quais se destacam as que de seguida se apresentam.

– Verificou-se o potencial do método e da utilização da antena de 400 MHz para a identificação da estratigrafia das estações, incluindo a identificação da posição e profundidade do substrato rochoso. Contudo, será possível, com a utilização de antenas de maior frequência (ex: 500 MHz, 900 MHz) uma definição mais fina da estratigrafia local?

– O Georadar foi o único método geofísico utilizado. Em algumas das prospecções, particularmente nas áreas com estruturas em negativo, com pisos de argila e fornos ou lareiras, será que a realização de prospecções com outros métodos, nomeadamente a resistividade eléctrica e a magnetometria poderiam complementar ou reforçar as interpretações realizadas?

– Haverá vantagens, particularmente nos sítios de maior complexidade estratigráfica e/ou de ampla diacronia, em realizar prospecções na mesma área com duas ou mais antenas de diferentes frequências?

– As condições dieléctricas dos sítios prospectados mostraram-se adequadas aos estudos realizados. Contudo, fica a questão se este método será adequado ao estudo de sítios arqueológicos em zonas com solos argilosos condutivos ou necessitará de ser complementado com outros métodos geofísicos?

Estas questões indicam que a utilização do Georadar aplicado à arqueologia está ainda aquém das suas totais potencialidades, havendo muito a pesquisar e a desenvolver.

### 5.3. Perspectivas futuras

As futuras linhas de investigação a desenvolver no seguimento desta tese poderão seguir caminhos diversos, dos quais julgo serem fundamentais os seguintes: a integração das prospecções de Georadar com outras metodologias geofísicas, particularmente com a resistividade eléctrica e com a magnetometria; a integração com outras valências como a fotografia aérea, fotogrametria e SIG; a integração de sistemas de posicionamento mais precisos (GPS diferencial ou estação total) na fase de aquisição de dados.

No entanto, uma das linhas de investigação futuras que considero ser das mais aliciantes relaciona-se com as propostas de investigação lançadas por Conyers (2010, 2011) e Conyers & Leckebush (2010) os quais propõem o direccionamento da investigação com Georadar de modo a que os mapas e imagens gerados possam servir de base a pesquisas históricas e antropológicas.

A utilidade do Georadar, percebida no seio da comunidade arqueológica, advém da sua capacidade de detectar estruturas arqueológicas, que poderão ser escavadas mais tarde através de métodos arqueológicos. Esta aplicação tradicional dos métodos geofísicos, como uma simples ferramenta exploratória, é ainda dominante na prática de muitos arqueólogos. Mas, a comunidade de arqueogeofísicos já começa a utilizar em projectos de investigação as metodologias de prospecção e visualização tridimensionais de uma forma muito mais holística, usando o Georadar com objectivos que vão muito para além do que o de uma simples ferramenta prospectiva. Dentro desta linha, propõe-se que o Georadar, *per se*, ou integrado com outras metodologias geofísicas e sondagens arqueológicas pontuais, seja utilizado como fonte primária de informação, a partir da qual se possa estudar o passado humano, e não como uma mera ferramenta de auxílio à escavação arqueológica. Imbuída neste propósito, pretende-se levar a investigação futura com o Georadar numa direcção em que, se bem interpretados os dados por este fornecidos (como os mapas e as imagens tridimensionais), poderão ser usados para testar hipóteses acerca das

actividades humanas do passado. No caso do noroeste português tal poderá ser aplicado no conhecimento das estratégias de povoamento; das dimensões e organização interna de diferentes tipos de povoados, casais, *villae* ou cidades; das dimensões e organização interna de necrópoles; de acampamentos militares romanos, castelos, mosteiros e fortes medievais ou modernos; da diacronia de ocupação de alguns locais, entre outras aplicações, desde a pré-história recente à Idade Média ou Moderna. Por exemplo, se os modelos da actividade humana do passado podem ser relacionados com a posição, orientação, forma e modo de aglomeração no terreno das estruturas arquitectónicas enterradas, então os mapas e imagens tridimensionais do Georadar são capazes de testar com precisão estas hipóteses ou de desenvolver novas ideias sobre o passado. Deste modo, o Georadar poderá fornecer grande informação sobre sítios arqueológicos sem haver necessidade de os escavar, o que tem vantagens para a investigação arqueológica numa altura em que as escavações tradicionais, por questões orçamentais ou de preservação das estruturas, se tornam cada vez mais difíceis de realizar.

## **BIBLIOGRAFIA**



- Aitken, J.A. & Stewart, R.R., 2006 – Analysis and optimization of Ground Penetrating Radar acquisition parameters. *Proceedings of the 11th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Columbus, Ohio, USA. CD-ROM, 5 p.
- Al-Qadi, I.L. & Lahouar, S., 2005 – Measuring layer thickness with GPR – Theory to practice. *Construction and Building Materials*, 19, 763-772.
- Al-Qadi, I.L., Lahouar, S. & Loulizi, A., 2001 – In situ measurements of hot-mix asphalt dielectric properties. *NDT & E International*, 34, 427-434.
- Al-Qadi, I.L., Lahouar, S. & Loulizi, A., 2003 – GPR: from the state-of-the-art to the state-of-practice. *Proceedings International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*. Berlin, Germany, CD-ROM, 12 p.
- Alarcão, J., Carvalho, P.C. & Gonçalves, A. (coord.), 2010 – *Castelo da Lousa – Intervenções arqueológicas de 1997 a 2002*. Studia Lusitânia, 5, 650 p.
- Almargo Gorbea, M. & Álvarez Sanchís, J.R., 1993 – La “Sauna” de Ulaca: Saunas y baños iniciáticos en el mundo céltico. *Cuadernos de Arqueología de la Universidad de Navarra*, 1, 177-253.
- Almeida, F., 1997 – Prospecção geofísica de depósitos Quaternários. In: Zilhão, J. (Coord.), *Arte Rupestre e pré-história do Vale do Côa. Trabalhos de 1995-1996. Relatório científico ao governo da República Portuguesa elaborado nos termos da resolução do conselho de ministros nº4/96 de 17 de Janeiro*. Ministério da Cultura, 55-73.
- Almeida, F., Silva, J., Duarte, M., Moura, R., Hermosilha, H., Rocha, A. & Gomes, C., 2006 – Prospecção Geofísica e Geotécnica no sítio de implantação do Colombo's Resort, Porto Santo. *Actas do 10º Congresso Nacional de Geotecnia*. Lisboa. V1-21, 1-10.
- Álvarez, M.F., Lorenzo, H., Picos, J. & Valero E., 2005 – Eucalyptus health monitoring system based on remote sensing and GIS for plantations affected by weevil outbreaks in Galicia (northwest Spain). *Proceedings of ForestSat 2005*, National Board of Forestry Rapport, 8c, 56-61.
- Alves, L.B. & Reis, M., 2009 – No limiar das “Artes”? – Questões em torno da permeabilidade de fronteiras temporais e espaciais da Arte Rupestre de Trás-os-Montes Ocidental. *Revista Aquae Flaviae*, 41, 45-92.
- Andrade, A.M. & Noronha, F., 1986 – *Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50000, folha 9-B, Guimarães*. Serviços Geológicos de Portugal.
- Angelucci, D.E., 2003 – A partir da Terra: A contribuição da Geoarqueologia, capítulo 2 - Laboratório de Geoarqueologia. *Trabalhos de Arqueologia 29 Paleoeccologia Humana e Arqueociências - Um Programa Multidisciplinar para a Arqueologia sob a Tutela da Cultura*, Instituto Português de Arqueologia, Lisboa. 35-84.
- Annan, A.P., 2009 – Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar. In: *Ground penetrating radar theory and applications*. Harry M. Jol (Ed.), Elsevier, 141-176.
- Annan A.P. & Cosway S.W., 1994 – GPR frequency selection. *Abstracts SAGEEP*, Boston, Massachusetts, 27–31 March. Reprinted by Sensors and Software Inc. PEMD 97.
- Annan, A.P. & Davis, J.L., 1977 – Impulse Radar applied to ice thickness measurements and freshwater bathymetry. *Geological Survey of Canada, Report of Activities*, 77-1B, 117-124.

- Araújo, A.C. & Almeida, F., 2003 – Barca do Xerez de baixo: balanço de quarto anos de trabalhos arqueológicos. *Revista Portuguesa de arqueologia*, 6 (1), 17-67.
- Arcone, S.A., 2009 – Glaciers and ice sheets. In: *Ground penetrating Radar Theory and Applications*. Harry M. Jol (Ed.), Elsevier, 362-388.
- ASTM International, 2003 – *Standard guide for using surface ground penetrating radar method for subsurface investigation*. D6432-99. <http://www.astm.org>.
- Azevedo, J., Mota, T., Oliveira, J. & Pereira, B., 2012 – Using a Ground Penetrating Radar to predict upper soil moisture levels. *Agrotec*, 3, 92-97.
- Baker, G.S., Jordan, T.E. & Pardy, J., 2007 – An introduction to ground penetrating radar (GPR), in Baker, G.S. & Jol, H.M. (eds.), *Stratigraphic Analyses Using GPR*. Geological Society of America Special Paper, 432, 1-18.
- Baker, P.L., 1991 – Response on Ground-penetrating Radar to bounding surfaces and lithofacies variations in sand barrier sequences. *Exploration Geophysics*, 22, 19-22.
- Barbosa, R.P., 2009 – Inventário Arqueológico ao longo da Via Romana XVII no troço concelhio de Póvoa de Lanhoso, *Lanyoso – Revista Cultural da Póvoa de Lanhoso*, nº 2, Câmara Municipal da Póvoa de Lanhoso, Póvoa de Lanhoso. 7-67.
- Barbosa, R.P., no prelo – *O Monumento sob tumulus/dólmen da Tojeira. Balanço dos Trabalhos Realizados*. Relatório de escavação. 5 p.
- Basson, U., Enzel, Y., Amit, R. & Ben-Avraham, Z., 1994 – Detecting and Mapping recent faults with a ground-penetrating radar in the alluvial fans of the Arava Valley, Israel. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground-Penetrating Radar*. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada, 777-788
- Benta, A.A., Tareco, H., Maranhão, H. & Cardoso, C., 2008 – Pesquisa da profundidade de ocorrência de uma camada argilítica através de GPR. *5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, 2º Congresso de Engenharia de Moçambique*, Maputo, 565-567.
- Berard B.A., Maillol J-M., 2008 – Common- and multi-offset ground penetrating radar study of a Roman villa, Tourega, Portugal. *Archaeological Prospection*. 15, 32–46.
- Beres, L. & Haeni, H., 1991 – Application of ground-penetrating radar methods in hydrogeologic studies. *Groundwater*, 29(3), 375-386.
- Bettencourt, A.M.S., 1999 – A paisagem e o homem na bacia do Cávado durante o II e o I milénio AC. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho. 1311 p.
- Bettencourt, A.M.S., 2000 – *Estações da idade do Bronze e inícios da idade do Ferro da bacia do Cávado (Norte de Portugal)*. Cadernos de Arqueologia, Monografias. Unidade de Arqueologia da Universidade do Minho (Ed.), 11, 303.
- Bettencourt, A.M.S., 2008 – Life and death in the Bronze Age of the NW Iberian Peninsula. In: Fredrik Fahlander & Terje Oestigaard (eds.), *The materiality of death – bodies, burials and beliefs*, BAR International Series, Ed. Archeopress, 99-104.
- Bettencourt, A.M.S., 2009 – A Pré-História do Minho. Do Neolítico à Idade do Bronze. In: Paulo Pereira (coord.), *Minho. Traços de Identidade*, Ed. Conselho Cultural da Universidade do Minho, Braga, 70-113.
- Bettencourt, A.M.S., 2010 – Comunidades Pré-Históricas da bacia do Leça. In: *O Rio da Memória: Arqueologia no Território do Leça*, Ed. Câmara Municipal de Matosinhos. 33-44.

- Bettencourt, A.M.S. & Silva, I., 2003 – O património pré-histórico de Póvoa do Lanhoso. Que Valorização?, *Cadernos do Noroeste*, n.º 20 (fascículo 1-2), 633-648.
- Bevan, B.W. & Kenyon, J., 1975 – Ground-penetrating radar for historical archaeology. *MASCA Newsletter*, 11 (2), 2-7.
- Bevan, B.W., 2000 – An early geophysical survey at Williamsburg, USA. *Archaeological Prospection*, 7, 51-58.
- Bewley R.H., 1997 – From military to civilian: A brief history of the early development of aerial photography for archaeology. In: Oexle (ed.), *Aus der Luft - Bilder unserer Geschichte: Luftbildarchäologie in Zentraleuropa*, Dresden, 10 – 21.
- Billinger, S.M., 2009 – Utilising Ground Penetrating Radar for the location of a potential human burial under concrete. *Canadian Society Forensic Sciences Journal*, 42 (3), 200–209.
- Binda, L., Saisi, A. & Tiraboschi, C., 2000 – Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries. *Construction and building materials*, 14(4), 199-233.
- Bjelm, L., 1980 – Geologic interpretation of SIR data from a peat deposit in northern Sweden. Unpublished manuscript, Lund Institute of Technology, Department of Engineering Geology, Lund, Sweden.
- Bourgeois, J. & Meganck, M. (ed.), 2003 – *Aerial Photography and Archaeology 2003. A Century of Information*. Archaeological Reports Ghent University 4. Ghent: Academia Press. 412 p.
- Bridge, J.S., Alexander, J., Collier, R.E.L., Gawthorpe, R.L. & Jarvis, J., 1995 – Ground penetrating radar and coring used to study the large-scale structure of point-bar deposits in three-dimensions. *Sedimentology*, 42, 839-852.
- Bristow, C.S. & Jol, H.M., 2003 – *Ground Penetrating Radar in Sediments*. Geological Society, Special Publication N° 211, London, 330 p.
- Bristow, C.S., Pugh, J. & Goodall, T., 1996 – Internal structure of aeolian dunes in Abu Davi determined using ground-penetrating radar. *Sedimentology*, 43, 995-1003.
- Bruschini, C., Gros, B., Buere, F., Piece, P.Y. & Carmona, O., 1998 – Ground-penetrating radar and imaging metal detector for anti-personnel mine detection. *Journal of Applied Geophysics*, 40, 59-71.
- Buderi, R., 1996 – *The invention that changed the world*. Simon & Schuster, New York, 352 p.
- Buderi, R., 1998 – *The invention that changed the world: How a Small Group of Radar Pioneers won the Second world war and launched a technological revolution*. Simon & Schuster, New York, 576 p.
- Butler, D.K., Simms, J.E. & Cook, D.S., 1994 – Archaeological geophysics investigation of the Wright Brothers 1910 hanger site. *Geoarchaeology*, 9, 6, 437-466.
- Butzer, K.W., 2011 – Geoarchaeology, climate change, sustainability: A Mediterranean perspective. In: Brown, A.G., Basell, L.S., & Butzer, K.W., eds., *Geoarchaeology, Climate Change, and Sustainability*. Geological Society of America Special Paper 476, 1–14.
- Buxó, R., 1997 – *Arqueologia de las plantas. La explotación económica de las semillas y los frutos en el marco mediterráneo de la Península Ibérica*. Crítica, Barcelona. 367 p.
- Campana S., 2009 – Archaeological site detection and mapping: some thoughts on differing scales of detail and archaeological ‘non-visibility’. In: Seeing the Unseen – Geophysics and Landscape Archaeology, Campana, S. & Piro, S. (eds.). CRC Press: London, 5–26.

- Capineri, L., Ivashov, S., Bechtel, T., Zhuravlev, A., Falorni, P., Windsor, C., Borgioli, G., Vasiliev, I. & Sheyko, A., 2008 – Comparison of GPR sensor types for landmines detection and discrimination. *In: Proceedings of the Twelfth International Conference on Ground-Penetrating Radar*, Birmingham, UK, 10 p.
- Cardozo, M., 1931-1932 – A última descoberta arqueológica na Citânia de Briteiros e a interpretação da Pedra Formosa. *Revista de Guimarães*, 41-42.
- Cassidy, N.J., 2009a – Electrical and magnetic properties of rocks, soils and fluids. *In: Ground penetrating Radar Theory and Applications*. Edited by Harry M. Jol. Elsevier. 41-72.
- Cassidy, N.J., 2009b – Ground penetrating radar data processing, modelling and analysis. *In: Ground penetrating Radar Theory and Applications*. Edited by Harry M. Jol. Elsevier. 141-176.
- Castro, D.L. & Branco, R.M.G.C., 2003 – 4D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: a case history. *Journal of Applied Geophysics*, 54, 127-144.
- Cavalheiro, A. & Carvalho, J., 2009a – Prospecção por Geo-radar na fábrica de vidro do Côvo (Oliveira de Azeméis). Texto de Apoio do Workshop Prospecção Geofísica e Arqueológica da Fábrica de Vidro do Côvo. 16 p.
- Cavalheiro A. & Carvalho J., 2009b – *Reconhecimento Geofísico Pelo Método Electromagnético GPR, Foz – Porto, (Rua da Trinitária/Viela do Caminho Novo)*, relatório, FEUP-DEM/CIGAR.
- Cheethan, P., 2005 – Forensic geophysical survey. *In: Forensic Archaeology: advances in theory and practice*. Hunter, J. & Cox, M. (editors). Routledge. 62-95.
- Clark, M.C., Utsi, E. & Utsi, V., 1999 – Ground penetrating radar investigations at North Ballachulish Moss, Scotland. *Archaeological Prospection*, 6, 107-121.
- Clark, M.R., Gillespie, R., Kemp, T., Mccann, D.M. & Forde, M.C., 2001 – Electromagnetic properties of railway ballast. *NDT & E International*, 34, 305-311.
- Clark, M.R., Gordon, M. & Forde, M.C., 2004 – Issues over high-speed non-invasive monitoring of railway trackbed. *NDT & E International*, 37, 131-139.
- Clemeña, G., 1991 – Short-pulse Radar Methods. *In: CRC Handbook on non-destructive testing of concrete*. V.M. Malhotra & N. Carino (Ed.), CRC press, 253-274.
- Colla, C., Mccann, D.M., Forde, M.C. & Das, P.C., 1997 – Radar imaging in composite masonry structures. *In: Proceedings of the 7<sup>th</sup> international conference on structural faults and repairs*, Edinburgh, Scotland, 493-504.
- Collins, M.E., 1992 – Soil taxonomy: A useful guide for the application of ground penetrating radar. *In: Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar, June 8-13*. Rovaniemi, Finland. Pauli Hanninem and Sini Autio (editors). Geological Survey of Finland. Special Paper 16, 125-132.
- Conyers L.B., 1995 – The use of Ground-penetrating radar to map the buried structures and landscape of the Ceren site, El Salvador. *Geoarchaeology: An International Journal*, 10 (4), 275-299.
- Conyers L.B., 2004 – *Ground Penetrating Radar for Archaeology*. AltaMira Press: Walnut Creek, CA, 203 p.
- Conyers L.B., 2004b – Moisture and Soil differences as related to the spatial accuracy of amplitudes maps at two archaeological tests sites. *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground-Penetrating Radar, Delf, The Netherlands*, 435-438.

- Conyers, L.B., 2006a – Ground-Penetrating Radar Techniques to Discover and Map Historic Graves. *Historical Archaeology*, 40(3), 64-73.
- Conyers, L.B., 2006b – Innovative Ground-Penetrating Radar Methods for Archaeological Mapping. *Archaeological Prospection*, 13(2), 139-141.
- Conyers, L.B., 2010 – Ground-penetrating radar for anthropological research. *Antiquity*, 84, 1-11.
- Conyers, L.B., 2011 – Discovery, mapping and interpretation of buried cultural resources non-invasively with ground-penetrating radar. *Journal of Geophysics Engineering*, 8, S13-S22.
- Conyers, L.B., 2012 – *Interpreting Ground-penetrating Radar for archaeology*. Left Coast Press. 220 p.
- Conyers L.B. & Cameron C.M., 1998 – Ground-Penetrating Radar techniques and three-dimensional computer mapping in the American Southwest. *Journal of Field Archaeology*, 25, 417-430.
- Conyers L.B. & Goodman, D., 1997 – *Ground-penetrating radar: An introduction for archaeologists*. AltaMira, Walnut Creek, California, 232 p.
- Conyers, L.B. & Leckebusch, J., 2010 – Geophysical archaeology research agendas for the future: Some ground-penetrating radar examples. *Archaeological prospection*, 7, 117-123.
- Conyers, L.B. & Osburn, T., 2006 – GPR Mapping to Test Anthropological Hypotheses: A Study from Comb Wash, Utah, American Southwest. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Ground Penetrating Radar*. Jeffrey J. Daniel (Ed.), 1-8.
- Conyers L.B. & Spetzler, H., 2002 – Geophysical exploration at Ceren. In *Before the Volcano Erupted*, Payson Sheets (editor). University of Texas Press, Austin, 24-32.
- Conyers L.B., Ernenwein, E.G. & Bedal L.A., 2002 – Ground-penetrating radar (GPR) mapping as a method for planning excavation strategies, Petra, Jordan. *Antiquity*, 76, 339–340.
- Cook, J. C., 1973 – Radar exploration through rock in advance of mining. *Transactions of the Society of Mineral Engineering, AIME*, 254, 140-146.
- Corsi, C., Taelman, D., De Dapper, M., Deprez, S., Verdonck, L. & Vermeulen, F., 2008 – Geoarchaeological Research in the Roman Town of Ammaia (Alentejo, Portugal). In: *Multidisciplinary Approaches to Classical Archaeology - Approcci Multidisciplinari per l'Archeologia Classica. Proceedings of the 17th International Congress of Classical Archaeology*, Rome 22-26 sept. 2008. Bollettino Archeologia Online: 58-70.
- Costa, A.J.V., 2009 – *Utilização do Georadar na caracterização de pavimentos rodoviários*. Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. 244 p.
- Costa, A., 2009a – About Portuguese experience in GPR road inspections. *Proceedings from the 5th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar*. Granada. Espanha. 243-245.
- Costa, A. & Gomes Correia, A., 2008 – Preliminary Results of a 2 GHz Horn Antenna GPR on a Pavement Section in Portugal. *Proceedings from the 3th European Pavement and Asset Management*. Coimbra. 9 p.
- Cruz, N., Tareco, H., Rocha, R., Gonçalves, F., Vieira Simões, E. & Hipólito, A., 2008 – Caracterização de Maciços Cársicos com base em prospecção com georadar. Um caso prático. *11º Congresso Nacional de Geotecnica*. Coimbra.

- Daniels, D.J., 1995, – Fundamentals of Ground Penetrating Radar. *Proceedings of the Symposium on the application of geophysics of Engineering and Environmental Problems*, 62-141.
- Daniels, D.J., 2004 – *Ground Penetrating Radar* – 2<sup>nd</sup> edition. Radar, Sonar, Navigation and avionics series 15, IEE, London, UK, 726p.
- Daniels, D.J., 2004a – GPR for landmine detection, an invited review paper. *In: Proceedings of the Tenth International Conference on Ground-Penetrating Radar*: June 21-24, Delf, The Netherlands, Evert Slob, Alex Yarovoy and Jan Rhebegen (eds). Delf University of technology, The Netherlands and the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Piscataway, New Jersey, 7-10.
- Daniels, D.J., 2007 – *Ground Penetrating Radar*, 2nd Ed., IET, London, 2007.
- Davenport, G.C., 2001a – *Where is it? Searching for buried bodies and hidden evidence*. SportWork Press, Church Hill, Md.
- Davenport, G.C., 2001b – Remote sensing applications in forensic investigations. *Historical Archaeology*, 35 (1), 87-100.
- David A., Cole M., Horsley T., Linford N., Linford P. & Martin L. 2004 - A hidden Stonehenge: geophysical survey at Stanton Drew, England. *Antiquity*, 78, 153–169.
- Davis, J.L. & Annan, A.P., 1989 – Ground-penetrating Radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysics*, 37, 531-551.
- Davis, J.L., Heginbotton, J.A., Annan, A.P., Daniels, S.R., Berdal, B.P., Bergan, T., Duncan K.E., Lewin P.K., Oxford, J.S., Roberts, N., Skehel, J.J. & Smith C.R., 2000 – Ground-penetrating radar surveys to locate 1918 Spanish flu victims in permafrost. *Journal of Forensic Science*, 45(1), 68-76.
- Davidson, D.A., & Shackley, M.L. (eds), 1976 – *Geoarchaeology: Earth Science and the Past*. London, Duckworth, Westview Press, 408 p.
- Deng, Shikun, Zhengrong, Z. & Wang, H., 1994 – The application of ground penetrating radar to detection of shallow faults and caves. *In: Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada, 1115-1133.
- Dérobot, X., Aubagnac, C., Abraham, O., 2002 – Comparison of NDT techniques on a post-tensioned beam before its autopsy. *NDT & E International*, 35, 541-548.
- Dérobot, X., Klysz, G., Balayssac, J.P., Lataste, J.F., 2003 – Cover concrete evaluation by electromagnetic and electric techniques – case study: empalot bridge. *Proceedings Structural faults and Repair, 10<sup>th</sup> international conference and Exhibition*, London, UK, 11 p.
- Dinis, A.P., 1986a – Castro do Crastoeiro - Mondim de Basto (Vila Real) 1984. *Informação Arqueológica*, 6, IPPC, Lisboa, 74 - 75.
- Dinis, A.P., 1986b - Castro do Crastoeiro - Mondim de Basto (Vila Real) 1985. *Informação Arqueológica*, 7, IPPC, Lisboa, 93 - 96.
- Dinis, A.P., 1987 – Castro do Crastoeiro - Mondim de Basto (Vila Real) 1986. *Informação Arqueológica*, 8, IPPC, Lisboa, 97 - 99.
- Dinis, A.P., 1993/1994 – Contribuição para o estudo da Idade do Ferro em Basto: o Castro de Crastoeiro. *Cadernos de Arqueologia*, 8/9, Braga, 261-278.
- Dinis, A.P., 1994 - Castro do Crastoeiro - Mondim de Basto (Vila Real) 1987. *Informação Arqueológica*, 9, IPPC, Lisboa, 33 - 34.

- Dinis, A.P., 2001 – *O povoado da Idade do Ferro do Crastoeiro (Mondim de Basto), Norte de Portugal. Cadernos de Arqueologia – Monografias*, 13, UAUM, Braga. 200 p.
- Dinis, A.P., 2005 – A ocupação do Crastoeiro (Mondim de Basto, Norte de Portugal) no Ferro Inicial. Actas do Colóquio “Castro um lugar para habitar”. *Cadernos do Museu*, 11, Penafiel, 75 – 87.
- Dinis, A.P., 2009a – O Crastoeiro e a ocupação da vertente oeste do monte da Senhora da Graça, Mondim de Basto (Norte de Portugal). *Revista Aquae Flaviae*, n. 41, 209-217.
- Dinis, A.P., 2009b – *Carta arqueológica de Mondim de Basto*. Câmara Municipal de Mondim de Basto, 142 p.
- Dinis, A.P., 2009c – O monte Farinha ou da Senhora da Graça, Mondim de Basto: interpretações para a biografia de um “lugar”. in Bettencourt A.M.S. & Alves L.B. (eds.) *Dos Montes, das Pedras e das Águas. Formas de interação com o espaço natural da pré-história à actualidade*, CITCEM/APEQ, 77-94.
- Dinis, A.P., 2011 – O Santuário rupestre de Campelo, Mondim de Basto (Norte de Portugal). *Oppidum*, 6 (5), 11-26.
- Dinis, A.P. & Bettencourt, A.M.S., 2009 – A Arte Atlântica do Crastoeiro (Norte de Portugal): Contextos e significados. *Gallaecia*. 28. Universidade de Santiago de Compostela, 41-47.
- Dobrin, M.B., 1976 – *Introduction to Geophysical Prospecting*. McGraw-Hill, New York. 360 p.
- Doce, G.E., 2006 – *Las drogas em la Prehistoria. Evidencias arqueológicas del consume de sustancias psicoactivas en Europa*. Bellaterra arqueologia. Edicions Bellaterra. 530 p.
- Dolphin, L.T., Bollen, R.L. & Oetzel, G.N., 1976 – An underground electromagnetic sounder experiment. *Geophysics*, 39, 49-55.
- Doolittle, J.A., 1982 – Characterizing soil map units with the ground-penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 33, 101-108.
- Doolittle, J.A., & Miller W.F., 1991 – Use of Ground-Penetrating Radar Techniques in Archeological Investigations. In: *Applications of Space-Age Technology in Antropology Conference Proceedings*, Second Edition. NASA Science and Technology Laboratory, Stennis Space Center, Mississippi.
- Doolittle, J.A. & Asmussen, L.E., 1992 – Ten years of applications of ground penetrating radar by the United States Department of Agriculture. In: *Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar, June 8-13*. Rovaniemi, Finland. Pauli Hanninem and Sini Autio (editors). Geological Survey of Finland. Special Paper 16, 139-147.
- Doolittle, J.A. & Collins, M.E., 1995 – Use of soil information to determine application of ground penetrating radar. *Journal of applied Geophysics*, 33, 101-108.
- El-Baz, F., 1989 – Remote Sensing in Archaeology: A Case Study. *Sensors*, October 1989, 6 (10), 33-38.
- English Heritage, 2008 – *Geophysical survey in archaeological field evaluation*. English Heritage Publishing, 2<sup>nd</sup> edition, 59 p.
- Ernenwein E.G., 2006 – Imaging in the ground- penetrating radar near-field zone: a case study from New Mexico, USA. *Archaeological Prospection*, 13, 154–156.
- Evans, R., Frost, M., Stonecliffe-Jones, M. & Dixon, N., 2008 – A review of pavement assessment using ground penetrating radar (GPR). In *Proceedings of the Twelfth International Conference on Ground-Penetrating Radar*. Birmingham, UK, 10 p.

- Fabião, C. & Guerra A., 2008 – Mesas do Castelinho (Almodôvar), um projecto com vinte anos. *Grandes projectos da arqueologia portuguesa*, Al-Madan, 2ª Série, 16, 92-105.
- Fabião, C. & Guerra A., 2009 – Mesas do Castelinho (Almodôvar): um exemplo de urbanismo falhado no sul da Lusitânia. In: *Origen de la Lusitania romana (siglos I a.C.-I d.C.): VII mesa redonda internacional sobre la Lusitania Romana*. Toulouse, 8-9/11/2007). Gorges, J.G & Basarrate, T. N. (coord.), 459-488.
- Fernandes, F.M., 2006 – *Evaluation of two novel NDT techniques : microdrilling of clay bricks and ground penetrating radar in masonry*. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, 256 p.
- Fernandes, F., Pereira, M., Gomes Correia, A., Caldeira, L. & Lourenço, P., 2008 – Assessment of layer thickness and uniformity in railway embankments with ground penetrating radar. *1st International Conference on Transportation Geotechnics*. Nottingham, Reino Unido. 5 p.
- Ferreira, N., Dias, G., Meireles, C.A.P. & Braga, M.A.S., 2000 – Notícia explicativa da folha 5D - Braga. *Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50.000*. Instituto geológico e Mineiro. 68 p.
- Filipe, S. & Morgado, P., 2011 - Using GPR as a methodology of recording a heritage safeguard: case studies at the University of Coimbra. *Communication on the "3º seminário internacional ArchC\_3D"*, 31st January, Faculty of Architecture – Technical University of Lisbon, cd-rom. 10 p.
- Fisher, P.M., Follin, S.G.W. & Ulriksen, P., 1980 – Subsurface interface radar survey at Hala Sultan Tekke, Cyprus. In Applications of technical devices in archaeology. Peter. M. Fisher (editor). *Studies in Mediterranean Archaeology*, 63, 48-51.
- Flint, R.C., Jackson, P.D. & Mccann, D.M., 1999 – Geophysical imaging inside masonry structures. *NDT & E International*, 32, 469-479.
- Fontul, S., 2004 – *Structural evaluation of flexible pavements using non-destructive tests*. Tese de Doutoramento, Lisboa. <http://hdl.handle.net/10316/15738>.
- Forkmann, B. & Hellfried, P., 1989 – Principle and application of the ground penetrating radar for researching of the near surface range. *Freiberger Forschungshefte (Reihe), C*, Issue 432, 79 p.
- Fortunato, E.M.C., 2005 – *Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos Relativos à Capacidade de Carga*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, <http://hdl.handle.net/10216/11441>, 578 p.
- Fortunato, E.M.C., 2006 – *Caracterização Físico Mecânica de Plataformas Ferroviárias. 9o Ciclo de Palestras em Engenharia Civil*. U.N. Lisboa.
- Franco, D., 2010 – *Avaliação das potencialidades do Georadar em Engenharia Civil*. Tese de mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. 100 p.
- Franco, D., Cardoso, C., Machado, A. & Gonçalves R., 2012 – Application of the GPR in real-life situations in geotechnical engineering. *Proceedings of the 4th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization (ISC'4)*, Brazil, Digital support.
- Freeland, R. S., Yoder, R. E. & Ammons, J. T., 1998 – Mapping shallow underground features that influence site-specific agricultural production. *Journal of Applied Geophysics*, 40, 19-27.
- French, C., 2003 – *Geoarchaeology In Action. Studies in Soil Micromorphology and Landscape Evolution*. Routledge, London, 291 p.
- Fullagar, P.K., & Livleybrooks, D., 1994 – Trial of tunnel radar for cavity and ore detection in the Sudbury mining camp, Ontario. *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*, Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada, 883 – 894.

- Gaffney, C., 2008 – Detecting trends in the prediction of the buried past: A review of geophysical techniques in archaeology. *Archaeometry*, 50, 313-336.
- Gallagher, G.P., Leiper, Q., Williamson, R., Clark, M.R. & Ford, M.C., 1999 – The application of time domain ground penetrating radar to evaluate railway track ballast. *NDT & International*, 32, 463-468.
- Garcia, P., 2009 – *Prospecção na Quinta do Covo*. Tese de Mestrado. Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro. 83 p.
- Goldberg, P., & Macphail, R.I., 2006 – *Practical and Theoretical Geoarchaeology*. Oxford, Blackwell Publishing, 454 p.
- Gonçalves L., Sampaio H.A, Alves M.I.C. & Bettencourt A.M.S., 2008 – Ground Penetrating Radar Mapping in rescue archaeology. A study from Pego Late Bronze Age Settlement, Braga (NW Portugal). In *Abstracts of Proceedings of the 12th International Conference on Ground Penetrating Radar, Birmingham, UK*, 4 p.
- Gonçalves L., Sampaio H.A, Bettencourt A.M.S. & Alves M.I.C., 2012 – GPR Surveys for Archaeological Investigation in a Bronze Age site from NW Portugal. *EGU General Assembly, Vienna, Austria, Geophysical Research Abstracts*, Vol. 14, EGU2012-12438. <http://hdl.handle.net/1822/20971>.
- González Ruibal, A. (2006-2007) – *Galaicos. Poder y Comunidad en el Noroeste de la Península Ibérica (1200 a.C.-50 d.C.)*. Brigantium vols. 18-19. A Coruña: Museo Arqueológico e Histórico da Coruña.
- Goodman, D. & Nishimura Y., 1993 – A ground-radar view of Japanese burial mounds. *Antiquity*, 67, 349-354.
- Goodman, D., 1994 – Ground-penetrating radar in engineering and archaeology. *Geophysics*, 59, 224-232.
- Goodman, D., 1996 – Comparison of GPR time slices and archaeological excavations. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Ground Penetrating Radar*, Department of Geoscience and Technology, Tohoku University, Sendai, Japan. 77-82.
- Goodman, D., 2011 – *GPR-Slice V7.0 Manual*. From <http://gpr-survey.com>, Abril de 2011. 340 p.
- Goodman, D., Nishimura Y. & Rogers, J.D., 1995 – GPR time-slices in archaeological prospection. *Archaeological Prospection*, 2, 85-89.
- Goodman, D., Nishimura Y., Hongo, H. & Maasaki, O., 1998 – GPR Amplitude rendering in archaeology. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Ground Penetrating Radar*, May 27-30, 1998. University of Kansas, USA. Radar systems and Remote Sensing Laboratory, University of Kansas, 91-92.
- Goodman, D., Piro, S., Nishimura Y., Patterson, H. & Gaffney, V., 2004 – Discovery of a 1<sup>st</sup> century AD Roman Amphitheatre and other structures at the Forum Novum by GPR. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 9, 35-41.
- Goodman, D., Piro, S., Nishimura Y., Schneider, K., Hongo, H., Higashi, N., Steinberg, J. & Damiat, B., 2009 – GPR Archaeometry. In: *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Harry M. Jol (Editor). Elsevier, 479-508.
- Goodman, D., Steinberg, J., Damiata, B., Nishimura Y., Schneider, K., Hiromichi, H., & Higashi, N., 2006 – GPR overlay analysis for archaeological prospection. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar*, Columbus, Ohio, USA. CD-ROM, 4 p.
- Grangeia, C. & Matias, M.S., 2004 – Técnicas de georadar em prospecção arqueológica: Ançã e S. Martinho de Árvore. *Revista Portuguesa de Arqueologia*, 7 (2), 427-434.

- Grangeia, C., Matias, M., Figueiredo, F., Hermosilha, H., Carvalho, P. & Silva, R., 2011 – A multi-method high-resolution geophysical survey in the Machado de Castro museum, central Portugal. *Journal of Geophysics and Engineering*, 8, 351-365.
- Grasmueck, M., Weger, R. & Horstmeyer, H., 2004a – Full-resolution 3D Imaging for Geoscience and Archeology. *Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar*, 21-24 June, Delft, The Netherlands, 1, 329-332.
- Grasmueck, M., Weger, R. & Horstmeyer, H., 2004b – Three-dimensional ground- penetrating radar imaging of sedimentary structures, fractures, and archaeological features at submeter resolution. *Geology*, 32 (11), 933-936.
- Grasmueck, M., Weger, R. & Horstmeyer, H., 2005 – Full-resolution 3D GPR imaging. *Geophysics*, 70 (1), K12-K19.
- Grealy, M., 2006 – Resolution of Ground Penetrating Radar Reflections at Differing Frequencies. *Archaeological Prospection*, 13(2), 142-148.
- Gustafsson J, & Alkarp M., 2007 – Array GPR investigation of the cathedral of Uppsala. *Near Surface Geophysics*, 5, 203– 207.
- Hecht, E., 2002 – *Óptica*. 2a Edição. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- Hermosilha, H., Filipe S. & Morgado, P., 2008 – GPR and Archaeology on Urban Areas: two case studies on the University of Coimbra (Portugal). *Proceedings of 12th International Conference on Ground Penetrating Radar*, 16-19 June, Birmingham, UK. CD-ROM. 4 p.
- Hertz, N. & Garrison, E.G., 1998 – *Geological methods for archeology*. – Oxford University Press, Oxford, 343 p.
- Hesse, A., 2000 – Count Robert Du Mesnil Du Buisson (1895-1986), a French precursor in geophysical survey for archaeology. *Archaeological Prospection*, 7, 43-49.
- Hugenschmidt, J., 2002 – Concrete bridge inspection with a mobile GPR system. *Construction and Building Materials*, 16, p. 147-154.
- Huggenberger, P., Meier, E. & White, H., 1994 – Three-dimensional geometry of fluvial gravel deposits from GPR reflections patterns; a comparison of results of three different antenna frequencies. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*, Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada. 805-815.
- Hülsenbeck & Co., 1926 – *German patent 489 434*. In: “Conyers L.B. 2004 – *Ground Penetrating Radar for Archaeology*. AltaMira Press: Walnut Creek, CA, 203 p.”
- Huston, D., Hu, J.Q., Maser, K., Weedon, W. & Adam, C., 2000 – GIMA ground penetrating radar system for monitoring concrete bridges decks. *Journal of Applied Geophysics*, 43, 139-146.
- Imai, T., Sasaki, T. & Kanemori, T., 1987 – Use of ground-probing radar and resistivity surveys for archaeological investigations. *Geophysics*, 52, 137-150.
- Ivashov, S.I., Vyacheslav, R.E., Sheyko, A.P. & Vasilev, I.A., 1998 – GPR for detection and measurement of filled up excavations for forensic applications. In: *Proceedings of the Seventh International Conference on Ground-penetrating Radar*, May 27-30, University of Kansas, Lawrence Kansas, USA. Radar Systems and Remote Sensing Laboratory, University of Kansas, 87-89.
- Jackson, J.D., 1962 – *Classical Electrodynamics*, John Wiley and Sons, New York. In: “Conyers L.B. 2004 – *Ground Penetrating Radar for Archaeology*. AltaMira Press: Walnut Creek, CA, 203 p.”

- Jackson, R.S., 2008 – *Whine Science. Principles and applications*. Academic Press. 770 p.
- Johnson, R.W., Glaccun, R. & Wotasinski, R., 1980 – Application of ground penetrating radar to soil survey. *Soil Crop Science Society Proceedings* 39, 68-72.
- Jol, H.M., 2009 – *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier, 600 p.
- Jol, H.M. & Smith, D.G., 1992 – Ground Penetrating Radar of northern lacustrine deltas. *Canadian Journal of Earth Science*, 28, 1939-1947.
- Jol, H.M., Smith, D.G. & Meyers, R.A., 1996 – Digital ground penetrating radar (GPR) – A new geophysical tool for coastal barrier research (examples from the Atlantic, Gulf and Pacific Coasts U.S.A.). *Journal of Coastal Research*, 12, 959-968.
- Jol, H.M. & Bristow, C.S., 2003 – GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. In: *Ground Penetrating Radar in sediments*. Jol, H.M. & Bristow, C.S., (Editors). Geological Society Special Publication, n.º211, The Geological Society, London, 9-27.
- Kenyon, J.F., 1977 – Ground-penetrating radar and its application to a historical archaeological site. *Historical archaeology*, 11, 48-55.
- Kenyon, J.L. & Bevan, B., 1977 – Ground-penetrating radar and its application to a historical archaeological site. *Historical Archaeology*, 11, 48-55.
- Kvamme, K.L., 2003 – Geophysical surveys as landscape archaeology. *American Antiquity*. 63 (3), 435-457.
- Lacroix D., 2009 – *Computing simulations facilitating archaeological interpretations of ground-penetrating radar field data*. MSc thesis. Department Archaeology. University of Calgary, Alberta, Canada. 256 p.
- Leckebusch, J., 2003 – Ground-penetrating radar: A modern three-dimensional prospecting method. *Archaeological Prospection*, 10, 213-240.
- Leckebusch, J., 2005a – Precision real-time positioning for fast geophysical prospecting. *Archaeological Prospection* 12 (3), 199-202.
- Leckebusch, J., 2005b – Use of antenna arrays for GPR surveying in archaeology. *Near Surface Geophysics*, 107-111.
- Leckebusch, J. & Peikert, R., 2001 – Investigating the True Resolution and Three-dimensional capabilities of Ground-penetrating radar data in archaeological surveys: Measurements in a sand box. *Archaeological Prospection*, 10, 213-240.
- Leckebusch J. & Rychener J., 2007 – Verification and topographic correction of GPR data in three dimensions Near Surf. *Geophysics*, 5, 395-403.
- Lehmann, F. & Green, A.G., 1999 – Semiautomated georadar data acquisition in three dimensions. *Geophysics*, 64(3), 719-731.
- Lima, J.A.P., 1948 – *Estudos Etnográficos, Filológicos e Históricos*, vol. III, Junta Provincial do Douro Litoral, Porto. In: Moreira, A.B., 2006 – Castro do Monte do Padrão. Projecto de estudo, valorização e dinamização. *A Cultura Castrexa: Acciões e estratexias para o seu aproveitamento socio-cultural.*, vol. Castrenor: cultura castrexa no noroeste peninsular. Actas do Seminário Final, 129-145.
- Lorenzo, H. & Arias, P., 2005 – A Methodology for rapid archaeological site documentation using Ground-Penetrating Radar and Terrestrial Photogrammetry. *Geoarchaeology: An International Journal*, 20 (5), 521-535

- Lorenzo, H., Arias, P., Pereira, M., Rial, F., & Tejada, A., 2004 – Use of GPR to map Prestige fuel layers below sand on the beaches of Galicia. *Proceedings from the 10th International Conference on Ground Penetrating Radar*, 2, 597-600.
- Lorenzo, H., Arias, P., Rial, F. & Pereira, M., 2004 – Imaging prestige fuel layers below sand using in-situ radar sensors. *Proceedings from the 11th SPIE International Symposium on Remote Sensing*. SPIE. V. 5574A, 351-360.
- Lorenzo H., Pérez-Gracia V., Novo A., & Armesto J., 2010 – Forestry applications of ground-penetrating radar. *Forest Systems*, 19(1), 5-17.
- Lorenzo, H., Rial, F.I., Arias P. & Armesto J., 2009 - Fighting against coastal oil spill pollution by means of ground-based radar. *Journal of Coastal Research*, 56, 841 – 845.
- Loureiro, L., 2007 – *Relatório final da escavação dos monumentos 1 e 2 de Vale do Chão, Pedralva, Braga. Desvio da linha aérea Alto do Lindoso – Riba d’Ave 1, a partir do apoio P101 para a subestação de Pedralva*. Braga, 23 p.
- Lourenço V., Caldeira, B., Rocha, J.P., Bezzeghoud, M. & Borges, J.F., 2009 – Utilização do Radar de Penetração nos Solos (GPR) na detecção de estruturas no âmbito nas Ciências Forenses. *Actas do IV Encontro de Pós-graduação em Ciências Físicas e da Terra da Universidade de Évora*, Universidade de Évora, Évora (18-19 de Setembro de 2009), 47-48.
- Lualdi, M., Zanzi, L. & Binda, L., 2003 – Acquisition and processing requirements for high quality 3D reconstructions from GPR investigation. *Proceedings of the International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, September 16-19, Berlin. 13p.
- Lualdi, M., Zanzi, L. & Sosio, G., 2006 – A 3D GPR Survey Methodology for Archaeological Applications. *Eleventh International Conference on Ground Penetrating Radar*, June 19-22, 2006, Columbus, Ohio, USA. CD-ROM.
- Lück, E. & Eisenreich M., 1999 – Geophysical Prospection of Archaeological Sites in Brandenburg, Germany. *Archaeological Prospection*, 6(3), 125-133.
- Luís J., 2005 – *Georadar*. Universidade do Algarve, [http://w3.ualg.pt/~jluis/files/folhas\\_cap5.pdf](http://w3.ualg.pt/~jluis/files/folhas_cap5.pdf), 4 p.
- Lunt, I.A., Hubbard, S.S. & Rubin, Y., 2005 – Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data. *Journal of Hydrology*, 307, 254-269.
- Maierhofer, C. & Leipold, S., 2001 – Radar investigation of masonry structures. *NDT & E International*, 34, 139-147.
- Maierhofer, C., Leipold, S. & Wiggenhauser, H., 1998a – Investigations of the influence of moisture and salt content on the dielectric properties of brick material using radar. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Ground-penetrating Radar, May 27-30*, University of Kansas, Lawrence Kansas, USA. Radar Systems and Remote Sensing Laboratory, University of Kansas, 477-484.
- Maierhofer, C., Roiling, M. & Wiggenhauser, H. 2003a – Detection of shallow voids in concrete structures with impulse thermography and radar. *NDT & E International*, 36, 257-263.
- Maierhofer, C. & Wostman, J., 1998b – Investigation of dielectric proprieties of moisture and salt content using a microwave impulse technique at very high frequencies. *NDT & E International*, 31(4), 259-263.
- Maierhofer, C., Wöstmann, J., Krause, M., Milmann, B., Behrendt, B. & Müller, H.S., 2003b – Non destructive characterization of mortar layers for concrete repair using radar and ultrasonics. *Proceedings International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, Berlin, Germany, 9 p., CD-ROM.

- Márquez, J., Suaréz, J., Mata, E., Jiménez, V. & Caro, J.L., 2011 – Actividades arqueológicas de la Universidad de Málaga en el complejo arqueológico dos Perdigões (Reguengos de Monsaraz, Portugal). Triénio 2008-2010. *Apontamentos de arqueologia e património*. Era-arqueologia, Núcleo de investigação arqueológica. 7. 33-40.
- Martins, C.B., Carvalho, J., Almeida, F. & Cavalheiro, A., 2011 – Aplicação do Geo-Radar no reconhecimento de uma estrutura no complex mineiro de Três Minas, Vila Pouca de Aguiar, Vila Real. In: Martins, C.B., Bettencourt, A.M.S., Martins, J.I.F.P. & Carvalho, J. (eds.) *Povoamento e Exploração de Recursos Mineiros na Europa Atlântica Ocidental*. CITCEM, APEQ. 521-533.
- Martins, M., 1985 – Sondagens arqueológicas no Castro de Monte Padrão em Santo Tirso. *Cadernos de Arqueologia*, Série II (2), 217-230.
- Martins, M. & Jorge, S.O., 1992 – Substrato cultural das etnias pré- romanas do Norte de Portugal. "Paleoetnologia de la Peninsula Iberica", *Actas de la Reunión celebrada en la Facultad de Geografía e Historia de la Universidad Complutense de Madrid*, 13-15 Diciembre de 1989, Complutum, n.º 2-3, Madrid, 347-372.
- Maser, K.R. & Richter, C., 1993 – Ground penetrating radar surveys to characterize pavement layer thickness variations at GPS sites. *Proceedings Transportation Research Board 72nd Annual Meeting, Washington D.C.*
- Matias, S., Moura, R., Gomes, P. & Teixeira, R., 1995 – Geophysical Investigations Inside the "Casa do Infante", Oporto, Portugal. *Proceedings from the 1st meeting EEGS*, Turim, Itália, 493-494.
- Matias, S., Marques da Silva, M., Cabral, B., & Tareco, H., 2000 – An EM and GPR survey to study and monitor aquifers contamination by a landfill. *European Association of Geoscientists and Engineers, Extended Abstracts*. Glasgow, V. 2, 106.
- Mccavitt, N. & Forde, M.C., 1993 – Numerical simulation of impulse radar through masonry. *Proceedings 5th International Conference on Structural Faults and Repair*, Edinburgh, Scotland, 289-295.
- McGeary, S., Daly, J.F. & Krantz, D.E., 1998 – High resolution imaging of Quaternary coastal stratigraphy using ground penetrating radar. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Ground-penetrating Radar, May 27-30*, University of Kansas, Lawrence Kansas, USA. Radar Systems and Remote Sensing Laboratory, University of Kansas, 273-277.
- Milsom, J. & Eriksen, A., 2011 – *Field Geophysics*. John Willey & Sons, Ltd. Fourth Edition. 287 p.
- Moffat, D.L. & Puskar, R.J., 1976 – A subsurface electromagnetic pulse radar. *Geophysics*, 41, 506-518.
- Moreira, A.B., 1991 – Elementos para a carta arqueológica do concelho de Santo Tirso. O Monte Padrão, *Santo Tirso Arqueológico*, I, Câmara Municipal de Santo Tirso, 28-34.
- Moreira, A.B., 1991a – *Relatório de escavações. Estação Arqueológica de Monte Padrão* (Pad. 91), Santo Tirso (policopiado).
- Moreira, A.B., 1997 – Vidros romanos no noroeste Português. Estudos monográficos de Tongobriga e Alvarelhos, *Santo Tirso Arqueológico*, n.º 1, II Série, Porto, 14-82.
- Moreira, A.B., 2005 – O Castro do Monte do Padrão. Património e Identidade. *Actas do Congresso "Castro, um lugar para habitar"*, Penafiel, 5 e 6 de Novembro de 2004, Cadernos do Museu, Penafiel, n.º 11, 255-276.
- Moreira, A.B., 2005a – *O Castro do Monte do Padrão. Do Bronze Final ao fim da Idade Média*. Câmara Municipal de Santo Tirso, 77 p.

- Moreira, A.B., 2006 – Castro do Monte do Padrão. Projecto de estudo, valorização e dinamização. *A Cultura Castrexa: Acciões e estratexias para o seu aproveitamento socio-cultural*, vol. Castrenor: cultura castrexa no noroeste peninsular. Actas do Seminário Final, 129-145.
- Moreira, A.B. 2007 – *Museu Municipal Abade Pedrosa: Coleção arqueológica*. Câmara Municipal de Santo Tirso, 184 p.
- Moreira, A.B., 2008 – Castro do Monte do Padrão. Projecto de estudo, valorização e dinamização, *Actas do Seminario Final "CASTRENOR: cultura castrexa no noroeste peninsular"*, Mondariz 22 e 23 de Xuño de 2006, Santiago de Compostela, 129-145.
- Moreira, A.B., 2010 – "*Castellum Madiae*" formação e desenvolvimento de um "aglomerado urbano secundário" no ordenamento do povoamento romano entre Leça e Ave. Santiago de Compostela: Universidade. Servizo de Publicacións e Intercambio Científico. 1154 p.
- Moura, R.M. & Matias, M.J.S., 1999 – Radar de Penetração (GPR: Ground Penetrating Radar) aplicado ao estudo de fracturação em mármore do anticlinal de Extremoz (Alentejo-Portugal). *Comunicações do Instituto Geológico e Mineiro*, t. 86, 289-300.
- Neal, A., 2004 – Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, 66, 261–330.
- Neubauer, W., Eder-Hinterleitner, A., Seren, S., Melichar, P., 2002 – Georadar in the Roman Civil town Carnuntum, Austria. An approach for archaeological interpretation of GPR data. *Archaeological Prospection*, 9, 135–156.
- Nishimura, Y., 2001 – Geophysical prospection in archaeology. *In: Handbook of Archaeological Sciences*, D.R. Brothwell & A.M. Pollard (orgs.), John Wiley & sons, 543-553
- Nobes, D.C., 1999 – Geophysical survey of burial sites: A case study of the Oaro Urupa. *Geophysics* 64 (2), 357-367.
- Novo, A., 2009 – *3D GPR Imaging for archaeological prospection*. PhD Thesis, University of Vigo, 167 p.
- Novo, A., Grasmueck M., Viggiano D.A., Lorenzo H., 2008a. – 3D GPR in Archaeology: What can be gained from dense Data Acquisition and Processing? *Proceedings of 12th International Conference on Ground Penetrating Radar*, 16-19 June, Birmingham, UK. CD-ROM. 5 p.
- Novo, A., Lorenzo H., Rial F.I., Pereira M. & Solla M., 2008b – Ultra-dense grid strategies for 3D GPR in Archaeology. *Proceedings of 12th International Conference on Ground Penetrating Radar*, 16-19 June, Birmingham, UK. CD-ROM. 4 p.
- Novo, A., Lorenzo H., Rial F.I., Pereira M. & Solla M., 2010. – From pseudo-2D to full-resolution GPR imaging in archaeology: a complex roman site in Lugo, Spain. *Proceedings of 13th International Conference on Ground Penetrating Radar. Lecce, Italy. 64-67.*
- Nuzzo, L., Leucci, G., Negri, S., Carrozzo, M.T. & Quarta, T., 2002 – Application of 3D visualization techniques in the analysis of GPR data for archaeology. *Annals of Geophysics*, 45 (2), 321-338.
- Nuzzo, L., Pringle, J.K., Jarvis, J., Cassella, J.P. & Cassidy, 2008 – Combined time-lapse 3D GPR and resistivity investigations on simulated clandestine burials in complex urban environments. *Proceedings of 12th International Conference on Ground Penetrating Radar*, 16-19 June, Birmingham, UK. CD-ROM. 6 p.
- Olhoeft, G.R., 1998 – Electrical, magnetic and geomagnetic properties that determine ground penetrating radar performance. *Proceedings of the 7th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 98)*, USA, 477-483.

- Olhoeft, G.R., 2000 – Maximizing the information return from ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 43, 6, 175-187.
- Oliveira, M., Mun, M. & Genin, S., 2003 – Prospecção por radar sobre as abóbadas da igreja do Mosteiro dos Jerónimos. *3o Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios*. Lisboa.
- Olson, C.G. & Doolittle, J.A., 1985 – Geophysical techniques for reconnaissance investigation of soils and superficial deposits in mountainous terrain. *Soil Science Society of America*. Journal 49, 1490-1498.
- Ortyl, L. & Balut, A., 2006 – Application of a RTK-GPS technique in the process of 3-D location of georadar profile traces. *Proceedings of the Geodesy and Environmental Engineering Commission, Geodesy*. 42, 27-44.
- Pedrosa, M.J.N., 2009 – *Caracterização da fundação de infra-estruturas de transporte com recurso ao Georadar. Identificação das camadas de apoio*. Tese de Mestrado. 86 p.
- Pereira, E. (Coord.), 1989 – Folha 10-A – Celorico de Basto. *Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50.000*. Serviços Geológicos de Portugal.
- Pereira, E., 1989 - Notícia Explicativa da Folha 10-A – Celorico de Basto. *Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50.000*. Serviços Geológicos de Portugal, 53 p.
- Pereira, E., Ribeiro, A., Gaspar de Carvalho, Noronha, F., Ferreira, N. & Hipólito Monteiro, J., 1992 – *Notícia Explicativa da Folha 1. Carta Geológica de Portugal, Escala 1/200000*. Serviços Geológicos de Portugal. 83 p.
- Pimentel, A., 1902 – *Santo Thyrso de Riba D’Ave*, Club Thyrsense, Santo Tirso. In: Moreira, A. B., 2006 – Castro do Monte do Padrão. Projecto de estudo, valorização e dinamização. *A Cultura Castrexa: Acções e estratégias para o seu aproveitamento socio-cultural*, vol. Castrenor: cultura castrexa no noroeste peninsular. Actas do Seminário Final, 129-145.
- Pipan, M., Baradello, L., Forte, E., Prizzon, A. & Finetti, I., 1999 – 2-D and 3-D processing and interpretation of multi-fold ground penetrating radar: A case history from an archaeological site. *Journal of Applied Geophysics*. 41: 271-292.
- Pollard, A. M., 1999 – Geoarchaeology: an introduction. In: Pollard, A.M. (ed), *Geoarchaeology: exploration, environments, resources*. Geological Society, London, Special Publications, 165, 7-14.
- Porsani, J.L., 1999 – *Ground penetrating radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado – SP*. Tese de Doutoramento, Instituto de Geociências e Ciências Exactas, UNESP, Campus de Rio Claro, SP. 145 p.
- Qiang, B., Chang, Y., 1985 – Experimental underground radar for historical archaeology. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 359- 361.
- Queiroga, F.M.V.R., 1992 – *War and Castros. New approaches to the northwestern Portuguese Iron Age*. Tese inédita. Universidade de Oxford. In: González Ruibal, A. (2006-2007) – *Galaicos. Poder y Comunidad en el Noroeste de la Península Ibérica (1200 a.C.-50 d.C.)*. Brigantium vols. 18-19. A Coruña: Museo Arqueológico e Histórico da Coruña.
- Ralha, S.S., 2004 – *Sondagem de avaliação do potencial arqueológico da Escavação de Empréstimo de Pego – Lugar de Souto – Cunha – Braga*. Relatório Final, Archeo’estudos. Investigação Arqueológica, Lda., Relatório Policopiado.
- Ramos, R., Freitas, M.C., Bristow, C., Andrade, C., Hermosilha, H., Grangeia, C. & Senos Matias, M., 2011 – Sedimentary architecture of the Santo André transverse dunes (Portugal) interpreted from

- ground-penetrating radar. *Journal of Coastal Research*, SI 57 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), Szczecin, Poland. 303-307.
- Rapp, G.R., Jr. & Hill, C., 1998 – *Geoarchaeology: The Earth-Science Approach to Archaeological Interpretation*, London: Yale University Press, 274 p.
- Rapp, G.R., Jr. & Hill, C., 2006 – *Geoarchaeology*. (revised ed.), New Haven, Connecticut, Yale University Press, 339 p.
- Redman, J.D., 2009 – Contaminant mapping. In *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Harry M. Jol (Ed.). Elsevier, 247-270.
- Renfrew, C., 1976 – Archaeology and the earth sciences, In: Davidson, D.A., & Shackley, M.L., eds. *Geoarchaeology: Earth Science and the Past*. London, Duckworth, p. 1–5.
- Reppert, P.M., Dale Morgan, F., Nafi Toksoz, M., 2000 – Dielectric constant determination using ground-penetrating radar reflection coefficients. *Journal of applied geophysics*, 43, 189-197.
- Rey Castineira, J. & Soto-Barreiro, M.J., 2001 – El arte rupestre de Crastoeiro (Mondim de Basto – Portugal) y la problemática de los petroglifos en castros, in A. Dinis (ed), O Povoado da Idade do Ferro do Crastoeiro (Mondim de Basto, Norte de Portugal), *Cadernos de Arqueologia* -13, Braga, Univ. do Minho, 159 - 200.
- Reynolds, J.M., 2002 – *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons, Chichester, 796 p.
- Ríos González, S., 2000 – Consideraciones funcionales y tipológicas en torno a los baños castreños del Noroeste de la Península Ibérica. *Gallecia*, 19, 93-124
- Robert, A., 1998 – Dielectric permittivity of concrete between 50Mhz and 1 Ghz and GPR measurements for building materials evaluation. *Journal of applied geophysics*, 40, p. 89-94.
- Rodrigues, F., 1991 – *Aplicação de métodos sísmicos e electromagnéticos (radar) em engenharia*. LNEC, Lisboa.
- Rodrigues, F., Oliveira, M. & Coelho, M., 1991 – Radar de penetração. Aplicações em geotecnia. 1o Congresso Nacional de Geotecnia. Lisboa.
- Romero, J., Valera, A., Becker, H., Jáimez, V. & Padilla, J., 2011 – El Complejo Arqueológico dos Perdigos (Reguengos de Monsaraz, Portugal). *Prospecciones Geofísicas - Campañas 2008-09. Trabajos de Prehistoria*, 68 (1), enero-junio, 175-186.
- Roth K., Schulin R., Flühler H. & Attinger W., 1990 – Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Research*, 26, 2267-2273.
- Saarenketo, T., 1996 – Using Ground penetrating radar and dielectric probe measurements in pavement quality control. *Proceedings Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., U.S.A.
- Saarenketo, T., 1998 – Electrical properties of water in clay and silty soils. *Journal of Applied Geophysics*, 40, 73-88.
- Saarenketo, T., 2009 – NDT transportation. In: *Ground penetrating Radar Theory and Applications*. Harry M. Jol (Ed.), Elsevier, 395-435.
- Sampaio, H.A., Bettencourt, A.M.S., Barbosa, R., Dinis, A. & Cruz, C., 2008 – A importância do Povoado do Pego no Bronze Final do Noroeste de Portugal. In: E. Ramil Rego (Ed.). *1º Congresso Internacional de Arqueologia de Vilalba*. Férvedes, 5, Vilalba, Lugo, 227-233.

- Sampaio, H.A. & Bettencourt, A.M.S., 2011 – Produção e práticas metalúrgicas da Idade do Bronze no noroeste português: o caso do Pego, Braga. *In: Martins, C.B.; Bettencourt, A.M.S.; Martins, J.I.F.P. & Carvalho, J. (eds.) Povoamento e Exploração de Recursos Mineiros na Europa Atlântica Ocidental*. CITCEM, APEQ, 391-407.
- Sandmeier, K. J., 2007 – *Reflexw manual ver. 4.5*. Sandmeier Scientific Software. 435p.
- Santamarina, J.C., Rinaldi V.A., Fratta D., Klein K.A., Wang Y.H, Cho G.C & Cascante G., 2005 – A survey of elastic and electromagnetic properties of near-surface soils. *In Near-Surface Geophysics*. Ed. Dwain K. Butler, Society of Exploration Geophysics, Tulsa, 71-87.
- Sheets, P.D., Loker, W.M., Spetzler, H.A.W. & Ware, R.W., 1985 – Geophysical exploration for ancient Maya housing at Ceren, El Salvador. *National Geographic Research Reports*, 20, 645-656.
- Shih, S.F. & Doolittle, J.A., 1984 – Using radar to investigate organic soil thickness in the Florida Everglades. *Soil Science Society of America, Journal* 48, 651-656.
- Simmons, G., D. W. Strangway, L. Bannister, R. Baker, D. Cubley, G. La Torraca e R. Watts, 1972 – The surface electrical properties experiment. *In: Lunar Geophysics: Proceedings of a Conference at the Lunar Science Institute*, Houston, Texas, 18-21 October 1971, Kopal, Z. & Srangway, D. W. (editors). Reidel, Dordrecht, 258-271
- Slob, E., Groenenboom, J. & Fokkema, J., 2003 – Automated Acquisition and Processing of 3D GPR Data for Object Detection and Characterization. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*. 4 (1), 5-18.
- Smith, D.G. & Jol, H.M., 1995 – Ground Penetrating Radar: Antenna frequencies and maximum probable depths of penetration in Quaternaries sediments. *Journal of Applied Geophysics*, 33, 93-100.
- Smythe, W.R., 1989 – *Static & Dynamic Electricity*. Taylor & Francis, A SUMMA book.
- Sousa, R., Soares, M., Oliveira, M., Pereira, C., 2000 - Análise do comportamento estrutural do túnel rodoviário sob a pista do Aeroporto Sá Carneiro. *6o Congresso Nacional de Geotecnia*. Lisboa.
- Sousa, R., Silva Domingues, C., Oliveira, M. & Carrilho, F., 2002 - Metodologias de inspeção de túneis. *8o Congresso Nacional de Geotecnia*. Lisboa.
- Souza, M.M., 2005 – *Uso do Georadar (GPR) em investigações ambientais*. Tese de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 120 p.
- Stern, W., 1929 – Versuch einer elektrodynamischen dickenmessung von gletschereis. *Beitrage zur Geophysics*, 33: 209-225. *In: Conyers L.B. 2004 – Ground Penetrating Radar for Archaeology*. AltaMira Press: Walnut Creek, CA, 203 p.
- Sternberg, B.K. & McGill J.W., 1995 – Archaeological studies in southern Arizona using ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 33, 209-225.
- Stoutos, M. M., Bungey, J. H., Millard, S. G., Shaw, M. R. & Patterson, A., 2001 – Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing. *NDT & International*, 34, 419-425.
- Stove, G.C. & Addyman, P.V., 1989 - Ground probing impulse radar: an experiment in archaeological remote sensing at York. *Antiquity*, 63 (239), 337-342.
- Strongman, K. B., 1992 – Forensic applications of ground-penetrating radar. *In: Ground-Penetrating Radar*, J. Pilon (editor), Geological Survey of Canada, Paper 90-4, 203-211.

- Sundberg, K. & Hedström, F. H., 1934 – Structural investigations by electromagnetic methods. *Proc., World petroleum conference*, Institute of Petroleum Technologists, 102-110. In: Conyers L.B. 2004 – *Ground Penetrating Radar for Archaeology*. AltaMira Press: Walnut Creek, CA, 203 p.
- Sundberg, K., 1931 – Gerlands Beitr. Geoph., Ergänzungs-Hefte, 1, 298-269. In: Conyers L.B. 2004 – *Ground Penetrating Radar for Archaeology*. AltaMira Press: Walnut Creek, CA, 203 p.
- Taffe, A. & Maierhofer, C., 2003 – Guidelines for NDT methods in civil engineering. In *Proceedings of the International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, Berlin, Germany, 6p., CD-ROM.
- Tavares, J.T., Cavalheiro, A., Almeida, F., Carvalho, J. & Garcia, P., 2011 – Prospecção geofísica na avaliação do potencial arqueológico da Fábrica de Vidros do Covo (Oliveira de Azeméis). In: Martins, C.B., Bettencourt, A.M.S., Martins, J.I.F.P. & Carvalho, J. (eds.) *Povoamento e Exploração de Recursos Mineiros na Europa Atlântica Ocidental*. CITCEM, APEQ, 535-550.
- Teixeira, C. & Medeiros, A., 1965 – *Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50000 : notícia explicativa da folha 9-A, Póvoa de Varzim*. Serviços Geológicos de Portugal. 52 p.
- Teixeira, C. & Medeiros, A., 1969 – *Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50000 : notícia explicativa da folha 5-C, Barcelos*. Serviços Geológicos de Portugal. 49 p.
- Teixeira, E., Machado, J. & Crispim, J.A., 2004 – Diferenças entre dois Métodos de Aquisição de Dados na Detecção de Cavidades Cársicas com GPR. *Actas do 1º Simpósio de GPR*, Fortaleza, Brasil.
- Topczewski, L., Fernandes, F., Cruz, P., Lourenço, P. & Ramos, L., 2006 – Radar investigation on civil structures using 3D data reconstruction and transmission tomography. *11th International Conference and Exhibition Structural Faults and Repairs*. Edimburgo, Escócia.
- Trigger, B.G., 1992 – *Historia del pensamiento arqueológico*. Barcelona: Ed.Crítica, 475 p.
- Trinks, I., Nissen, J., Johansson, B., Emilsson, J., Gustafsson, C., Friberg, J. & Gustafsson, J., 2008 – Pilot study of the new multichannel GPR system MIRA for large scale, high-resolution archaeological prospection at the site of the Viking town Birka in Sweden. *ISAP News*, 16, 4-7.
- Tyson, P., 1994 – Noninvasive excavation. *Technology Review*, February/March 1994, 20-21.
- Ulriksen, C.P., 1982 – *Application of impulse radar to civil engineering*: PhD Thesis, Department of Engineering Geology, Lund University of Technology, 175 p.
- Urbini, S., Cafarella, L., Marchetti, M., Chiarucci, P. & Bonini, D., 2007 – Fast geophysical prospecting applied to archaeology: results at “Villa ai Cavallacci” (Albano Laziale, Rome) site. *Annals of Geophysics*, 50 (3), 291-299.
- Valdes, J.A. & Kaplan, J., 2000 – Ground-penetrating radar at the Maya site of Kaminaljuyu, Guatemala. *Journal of Field Archaeology*, 27 (3), 329-342.
- Valera, A.C., Márquez, J.E., Becker, H., Jiménez, V. & Suárez, J., 2010 – O Complexo Arqueológico dos Perdigões: nova imagem e novos problemas proporcionados pela prospecção geofísica”, *Xelb, Actas do 8º Encontro de Arqueologia do Algarve*, Silves, C.M.S. 20 p.
- van Heteren, S., Fitzgerald, D. M. & McKinlay, P. S., 1994 – Application of ground-penetrating radar in coastal stratigraphic studies. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada. 869-881.

- van Leest, A.J., 1998 – Pavement surveying with Euroradar. High speed measurements of layer thickness and defects, experiences on roads and airfields in Holland. *Proceedings of the fifth International Conference on the Bearing capacity of roads and airfields*. Trondheim, Norway. 4 p.
- van Overmeeren, R.A., 1994 – High speed georadar data acquisition for groundwater exploration in the Netherlands. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*. Waterloo Centre for Groundwater Research, Waterloo, Canada. 1057-1073.
- van Overmeeren, R.A., 1998 – Radar facies of unconsolidated sediments in The Netherlands: A radar stratigraphy interpretation method for hydrogeology. *Journal of Applied Geophysics*, 40, 1-18.
- Vaughan, C.J., 1986 – Ground-penetrating radar surveys used in archaeological investigations. *Geophysics*, 40, 1-18.
- Verdonck, L. & Vermeulen, F., 2011 – 3-D Survey with a modular Ground-Penetrating Radar system at the Roman town Mariana (Corsica). *Proceedings 2011 6th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*. Aachen, Germany. 6 p.
- Verdonck, L., Simpson D., Cornelis W.M., Plyson A., Bourgeois J., Docter R. & Van Meirvenne M., 2009 – Ground-Penetrating Radar Survey Over Bronze Age Circular Monuments on a Sandy Soil, Complemented with Electromagnetic Induction and Fluxgate Gradiometer Data. *Archaeological Prospection*, 16(3), 193-202.
- Verdonck, L., Taelman, D. & Vermeulen, F., 2008 – Ground-penetrating radar survey at the Roman town of Ammaia (Portugal). *Recent work in archaeological geophysics*. 35-36.
- Verhegge, J., Schmidt, A., Gaffney, C., Vermeulen, F. & Verdonck, L., 2010 – Enhancing magnetic survey interpretation of roman cities: geophysical data combination and archaeological feedback on Ammaia. *Recent work in archaeological geophysics*, 45-48
- Vermeulen, F., Corsi, C. & De Dapper, M., 2011 – Surveying the Townscape of Roman Ammaia in Portugal: An Integrated Geoarchaeological Investigation of the Forum Area. *Geoarchaeology: An International Journal*. 27, 123-139.
- Vermeer, G.J.O., 2002 – *3-D Seismic Survey Design*. SEG Geophysical Reference series, 12, 205 p.
- Vickers R., Dolphin L. & Johnson D., 1976 – Archaeological investigations at Chaco Canyon using subsurface radar. In: Lyons, Thomas R. (edt.), *Remote sensing experiments in cultural resource studies*. Chaco Center, USDI-NPS and the University of New Mexico, 81-101.
- Vickers, R.S. & Dolphin, L.T., 1975 – A Communication on an Archaeological Radar Experiment at Chaco Canyon, New Mexico, *MASCA Newsletter*, vol. 11, no. 1.
- Vilas Boas, L. & Bettencourt, A.M.S., (no prelo) – Vale de Chãos 1, Braga. Um tumulus da Idade do Bronze no Noroeste português, *II International Congresso of Transition of Archaeology: Death Archaeology, Évora, April 29th – May 1st. Livro de resumos. Évora*. Universidade de Évora.
- Von Hippel, A.R., 1954 – *Dielectrics and Waves*. MIT press, Cambridge, Massachusetts, 210 p.
- Wachsmann, S., Dunn, R. K., Hale, J. R., Hohlfelder, R. L., Conyers, L. B., Ernenwein, E. G., Sheets, P., Blot, M. L. P., Castro F. & Davis, D., 2009 – The Paleo-Environmental Contexts of Three Possible Phoenician Anchorages in Portugal. *The International Journal of Nautical Archaeology*. 38(2): 221-253.
- Weaver, W., 2006 – Ground-penetrating radar mapping in clay: Success from South Carolina, USA. *Archaeological Prospection*. 13, 147-150.

- Weise, F. & Schaurich, D., 2003 – A novel combination of NDT methods for assessment of moisture conditions in structural members – a case study of the Berlin Zeughaus. *Proceedings International Symposium Non-destructive testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, Berlin, Germany, 9 p., CD-ROM.
- Wensink, W.A., 1993 – Dielectric properties of wet soils in the frequency range 1-3000 MHz. *Geophysical Prospecting*, 41, 671-696.
- Weymouth, J.W., & Bevin, B.W., 1983 – Combined magnetic and ground penetrating radar survey of an archaeological site in Oklahoma: *Digest.1983 International Geoscience and Remote Sensing Symp.*(IGARSS '83), 1, 1-4.
- White, R., 2009 – *Understanding vineyard soils*. Oxford University Press. 240 p.
- Whiting, B.M. & Orvald, T.O., 2004 – GPR Investigations of a Prehistoric Native American Village Site, Idaho, USA. *In: Proceedings of the 10th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Delft, The Netherlands, 451-454.
- Wilkins, D. E. & Clement, W. P., 2007 – Paleolake shoreline sequencing using ground penetrating radar: Lake Alvord, Oregon, and Nevada. *In: Baker, G.S. & Jol, H.M., eds, Stratigraphic Analysis using GPR: Geological Society of America, Special Paper 432*, 103-110.
- Worsfold, R.D., Parashar, G.R. & Perrott T., 1986 – Depth profiling of peat deposits with impulse radar. *Canadian Geotechnical Journal*, 23, 142-154.
- Yarovoy, A., 2009 – Landmine and unexploded ordnance detection and classification with Ground penetrating Radar. *In: Ground penetrating Radar Theory and Applications*. Harry M. Jol (Ed.), Elsevier, 445-473.

### **Cartografia impressa**

*Carta Militar de Portugal*, Série M888, 1/25.000, Instituto Geográfico do Exército, Lisboa:

Folha 57 – Póvoa de Lanhoso, Edição 2, 1996;

Folha 69 – Barcelos, Edição 2, 1997;

Folha 87 –Vilar de Ferreiros (Mondim de Basto), Edição 2, 1997;

Folha 98 – Santo Tirso, Edição 2, 1997.

*Carta Geológica de Portugal*, 1/50.000, Lisboa:

Folha 5C – Barcelos, Edição 2, Serviços Geológicos de Portugal, 1969.

Folha 5D – Braga, Edição 2, Instituto Geológico e Mineiro, 2000.

Folha 9D – Guimarães, Edição 1, Serviços Geológicos de Portugal, 1989.

Folha 10A – Celorico de Basto. Edição 1, Serviços Geológicos de Portugal, 1987.