



Universidade do Minho
Instituto de Ciências Sociais

Mafalda Sofia Duarte Alves

Da utilização e análise de dados de Geofísica em contextos arqueológicos: o Castro de Sapelos (Boticas) e o Seminário Conciliar de São Pedro e São Paulo (Braga).



Universidade do Minho
Instituto de Ciências Sociais

Mafalda Sofia Duarte Alves

**Da utilização e análise de dados de Geofísica
em contextos arqueológicos: o Castro de
Sapelos (Boticas) e o Seminário Conciliar de
São Pedro e São Paulo (Braga).**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Arqueologia

Trabalho efetuado sob a orientação do
Doutor Luís Fernando de Oliveira Fontes

Janeiro de 2016

AGRADECIMENTOS

A primeira pessoa a quem me cumpre agradecer não poderia deixar de ser o meu orientador, o Doutor Luís Fontes, que me deu não só o incentivo e o tempo para concretizar este trabalho, como a oportunidade de trabalhar no projeto PAVT, um projeto extraordinário a muitos níveis, mas sobretudo extraordinário pelas pessoas extraordinárias que me permitiu conhecer. O Doutor Fontes foi também responsável por, há uns anos a esta parte, me ter ensinado dois conceitos que considero fundamentais até hoje: ao primeiro é que a Arqueologia é uma profissão e que como tal, o seu exercício exige profissionalismo. O segundo é que é importante saber reconhecer, enquanto profissional, que nunca temos as respostas todas. Por tudo isto e por muito mais que isto, o Doutor Fontes é alguém por quem nutro verdadeiro respeito, estima e admiração.

À Professora Doutora Manuela Martins, a minha primeira orientadora, que acompanhou todo o meu percurso académico e que foi sempre uma inspiração pela sua capacidade de falar sobre Arqueologia em domínios muito mais amplos que os dos cacos e das pedras.

Ao Prof. Doutor José Meireles, coordenador do Mestrado em Arqueologia, que me deu todo o apoio necessário no âmbito institucional deste trabalho.

Ao Dr. Paulo Bernardes pelo fundamental apoio à revisão deste estudo, pelo incentivo, por todas as dúvidas que tive e às quais solícitamente me respondeu, e pelas “sessões” de brainstorming, fundamentais para que este navio chegasse a bom porto.

À equipa da Sinergeo, Lda., com os quais aprendi quase tudo sobre geofísica e dos quais sempre tive todo o apoio. Tenho muito a agradecer em particular ao Bruno Pereira, pela capacidade espetacular de explicar domínios que não são de fácil entendimento, pelo incentivo, pela revisão de aspetos essenciais desta dissertação e por ter acreditado sempre que seria capaz de fazer um bom trabalho.

À Fernanda, pelo apoio aos aspetos práticos do Mestrado e sobretudo, por toda a ajuda relativamente aos trabalhos de geofísica no Seminário de Santiago.

Aos meus colegas do *open space*, Francisco, Bruno, Mário, Sofia, Cristina, Jorge, Eurico, Maurício, Luís, Juliana, Fernanda e Ana, pela capacidade que temos de rir em conjunto, em especial em momentos de muito cansaço, pela entreatajuda, pela descoberta contínua e pela partilha, até de vírus!

Ao Bruno e ao Mário, muito mais do que colegas de trabalho, com os quais sei que posso contar para todas as “*bricolages*” da vida, com os quais partilho muito mais do que laços profissionais e que contribuem para que o trabalho seja algo de espetacular.

Ao Eduardo, orgulhosamente o meu companheiro de prospeções, pelas horas e pelo apoio e por me dizer sempre que os arqueólogos são tolos.

À minha Mariazinha, o meu oásis no deserto, por poder contar sempre com ela, por tudo o que fez para que eu pudesse ter tempo para estudar, sem nunca ter tido que lhe pedir, sem nunca me pedir nada em troca.

Aos meus amigos de todas as horas, a minha família emprestada, Marisa, Miguel, Alda, Sofia, Isabel e André, as minhas pessoas, as que estão sempre lá, com que partilhei os melhores e os piores momentos, que me disseram sempre tudo o que não quis ouvir e que me seguraram em pontas sempre que eu não o consegui fazer. Pessoas absolutamente extraordinárias, sem as quais a minha vida seria muitíssimo mais pobre. Se tivesse que escrever aqui sobre tudo o que de excepcional já partilhamos, com certeza conseguiria a proeza de ter uma secção de Agradecimentos mais extensa que a própria dissertação.

Aos meus pais e ao meu irmão, meus heróis de capa e espada, que me enchem de orgulho e me proporcionaram tudo para que chegasse a este momento. Foi com eles que aprendi a nunca desistir, mesmo quando o mundo parece anular-se à nossa frente, que só não há solução para uma coisa nesta vida e que para o resto, algo se arranja.

Ao Paulo, o meu mais sólido motivo para hoje estar aqui a escrever estas palavras, que me deu tempo e espaço para que pudesse realizar esta dissertação, aguentando a casa sozinho e sendo, muitas vezes, pai e mãe para a Ema ao longo deste mês e meio. É também dele todo este trabalho.

Para a Ema, a razão do meu alento, o meu Norte, que me mostra, diariamente, que a vida é uma coisa extraordinária pela qual vale a pena estar.

Finalmente deixo as minhas últimas palavras para a minha Madrinha, que me criou e me moldou, e que já não pôde ver a concretização desta etapa da minha vida.

A todos, o meu sincero obrigado.

RESUMO

Desde inícios do séc. XX que a possibilidade de “ver” o que não se vê, proporcionada pelo extraordinário avanço da ciência e da computação ao longo do século, entusiasma profissionais de várias áreas científicas num objetivo comum: o de produzir conhecimento sobre uma realidade não visível através da utilização de técnicas de deteção remota. A aplicação de métodos de Geofísica à Arqueologia acompanhou, em grande parte, o desenvolvimento da Geofísica, através de um denominador comum, o conhecimento das propriedades do subsolo que, de forma indireta, podem revelar marcadores de relevância arqueológica.

Esta dissertação procura debruçar-se, essencialmente, sobre as especificidades e utilidade do estudo geofísico de uma área de interesse arqueológico, mais concretamente, sobre a versatilidade da Tomografia por Resistividade Elétrica como ferramenta complementar direcionada para o solucionamento de problemáticas arqueológicas.

Desenvolvemos também, no âmbito desta dissertação, dois estudos de caso, o do Castro de Sapelos, em Boticas e o do Seminário Conciliar de São Pedro e São Paulo, em Braga, através dos quais procuraremos clarificar alguns aspetos quanto à metodologia de aquisição e também quanto à análise visual e gráfica dos dados de resistividade, através da utilização de *softwares* de código aberto, em particular do ParaView©¹.

Palavras-Chave: Geofísica, Arqueologia, Tomografia por Resistividade Elétrica

¹ © 2005-2008 Sandia Corporation, Kitware Inc.

ABSTRACT

Since the early 20th century that the possibility to "see" what cannot be seen has brought together professionals from several scientific areas towards a common goal: to produce knowledge using remote sensing techniques over a non-visible reality. The application of geophysical methods to Archaeology trailed the development of Geophysics itself, based upon a common denominator: the comprehension of a large set of subsurface physical properties that, indirectly, may reveal relevant archaeological markers.

This dissertation seeks to address the characteristics and usefulness of geophysical studies in sites with archaeological interest, specifically over the versatility of Electrical Resistivity Tomography as a complementary tool, oriented towards the resolution of archaeological issues.

We have also developed, as part of this dissertation, two case studies: the Castro de Sapelos, in Boticas, and the Seminário Conciliar de São Pedro e São Paulo, in Braga, through which we will seek to clarify some aspects regarding both the data acquisition specifications, as well as the visual and graphical analysis of resistivity data using open source software, specifically ParaView ©².

Keywords: Archaeology, Geophysics, Eletrical Resistivity Tomography

² © 2005-2008 Sandia Corporation, Kitware Inc.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Índice.....	xi
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas.....	xvi
1. Introdução.....	1
2. Da Arqueologia e da Geofísica.....	5
2.1 Da história da aplicação da Geofísica à Arqueologia.....	9
2.2 O panorama português.....	15
3. Prospeção geofísica por resistividade elétrica.....	19
3.1 Princípios Teóricos.....	21
3.1.1 Geoeletricidade.....	21
3.1.2 Geofísica por medição de resistividade elétrica.....	24
3.1.2.1 Arranjos eletródicos.....	30
3.1.2.2 Resistividade aparente e pseudosecções.....	36
4. Análise de dados em prospeção geoeletrica.....	39
4.1 Tomografia por resistividade elétrica.....	41
4.1.1 Inversão dos dados para modelação.....	42
4.1.2 Interpretação de dados em tomografia por resistividade elétrica.....	44
4.2 Processamento e análise de <i>ERTs</i> com recurso a ferramentas de visualização e computação gráfica.....	46
5. Estudos de Caso.....	49
5.1 Castro de Sapelos (Boticas, Portugal).....	51
5.1.1 Metodologia.....	54
5.1.2 Processamento dos dados de resistividade.....	55

5.1.3	Processamento e análise dos volumes escalares de resistividade	57
5.1.4	Discussão dos resultados.....	62
5.2	Seminário Conciliar de São Pedro e São Paulo (Braga, Portugal)	63
5.2.1	Metodologia.....	67
5.2.2	Processamento dos dados	68
5.2.3	Processamento e análise dos volumes escalares de resistividade	69
5.2.4	Discussão dos resultados.....	74
6.	Considerações Finais	75
7.	Bibliografia	83
	Apêndice I – Condução Elétrica: Princípios Gerais	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Memória fotográfica das prospeções geofísicas realizadas por A. Hesse em Braga, em 1977. Arquivo fotográfico MDDS.	16
Figura 2 - Planta das prospeções geofísicas levadas a cabo em Braga em 1977. Arquivo UAUM.	17
Figura 3 – Intervalos de resistividade/condutividade para alguns elementos geológicos comuns. Adaptado de Lowrie (2007, p. 256).	22
Figura 4- Representação gráfica, em corte horizontal e vertical, das linhas de campo elétrico (a azul) e superfícies equipotenciais (a laranja) de um eléctrodo de injeção de corrente (a verde), num meio homogéneo e isotrópico.	24
Figura 5 – Plano geométrico para a determinação da densidade de corrente $J_x(x, y, z)$ entre dois eléctrodos num meio uniforme. Adaptado de Lowrie (2007, p. 263).	27
Figura 6 – Vista, em corte vertical, das linhas de campo (azul) e superfícies equipotenciais (a amarelo) entre A e B, num meio semi-infinito, homogéneo e isotrópico. Adaptado de Halliday et al. (2008, p. 633)	29
Figura 7 – Onda elétrica em a) corrente contínua com inversão de polaridade e b) corrente alternada. Adaptado de Schmidt (2013, loc. 407).	29
Figura 8 – Representação gráfica de um arranjo eletródico de Wenner; onde o valor de α é igual para todos os eléctrodos. Adaptado de Schmidt (2013, loc. 633).....	31
Figura 9 – Representação gráfica de um arranjo eletródico de Wenner - Schlumberger; Adaptado de Loke (1996-2004, p.4)	32
Figura 10 – Representação gráfica de um arranjo eletródico de Schlumberger. Adaptado de Schmidt (2013, loc. 633).....	32
Figura 11 – Representação gráfica de um arranjo eletródico de Duplo Dipolo; Adaptado de Loke (1996-2004, p.4).....	33
Figura 12 – Exemplos de secções de sensibilidade para os arranjos de Wenner Alpha, Dipolo Duplo e Wenner-Schlumberger . Adaptado de Loke (1999-2004, pp. 30, 32 e 34).	34
Figura 13 – Abstração gráfica de um sistema de aquisição multieletródico. Adaptado de Møller, Sørensen, & Auken (2006, p. 80) e de SYSCAL R1 PLUS Switch-48 (Brochure) – ©IRIS Instruments.	35
Figura 14 – Pseudosecções de resistividade aparente sobre modelo de distribuição de resistividades (d) simulado em ambiente RES2MOD (Mod41.mod), para os arranjos de a)Wenner Alpha (a=12), b) Wenner-Schlumberger (a=12, n=1) e c) Dipolo Duplo (a=12, n=1), para uma preposição de 41 eléctrodos e	

espaçamento intereletródico de 1 m. Note-se que, por $n=1$, as pseudosecções de a) e b) diferem apenas na pseudopropriedade, tendo b) uma capacidade ligeiramente superior. O arranjo de que resulta c) é o que atinge a menor profundidade de investigação, apresentando contudo a maior capacidade para a resolução horizontal da distribuição. A segmentação foi computada por procedimento logarítmico. RES2MOD© Geotomo Software 2000-2014..... 38

Figura 15 – Esquema da relação entre modelo/medições em problemas diretos e problemas inversos. Adaptado de Santos, Silveira, & Matias (2014, p. 172)..... 42

Figura 16 – Diagrama do esquema de modelação inversa interativa. Adaptado de Samouëlian et al.(2005, p. 185). 43

Figura 17 – Localização do Castro de Sapelos no contexto geográfico do Noroeste Peninsular. ©Google 51

Figura 18 – Levantamento topográfico interpretado do Castro de Sapelos. Direitos reservados UAUM (vetor). Base ortofotográfica: ©Google..... 53

Figura 19 – Aspeto das estruturas de a) habitação comum e b) pano de muralha, identificadas na campanha arqueológica realizada no Castro de Sapelos em 2014. Direitos reservados UAUM..... 54

Figura 20 – Grelha de implantação dos perfis de resistividade. A amarelo encontram-se assinalados os perfis em eixo de X e a azul os realizados em eixo de Y. Adaptado de (Pereira & Azevedo, 2014, p. 4) Base ortofotográfica: ©Google. 55

Figura 21 – Inversão do perfil de resistividades 1 do Castro de Sapelos em Res2Inv, com um valor de RMS de 6.4. Dados reservados Sinergeo, Lda. e UAUM. 57

Figura 22 - Aspeto inicial do volume tomográfico de resistividades. Mantivemos, na composição visual, a localização dos pontos de aquisição. ©Paraview. 58

Figura 23 - Aspeto do volume tomográfico, depois de se ter estabelecido 27 000 Ohm/m para limite superior de resistividades. A preto encontram-se assinalados os pontos relativos a vestígios arqueológicos visíveis. ©ParaView. 59

Figura 24 - Aspeto do volume tomográfico limitado a 27 000 Ohm/m, evidenciando-se as anomalias de elevada resistividade, na escala de amarelo a vermelho, por manipulação do mapa cromático por índices de valor. A vermelho e a magenta encontram-se assinaladas as anomalias que consideramos terem potencial de interesse arqueológico, a verde as que serão derivadas de afloramentos de quartzo. A preto encontram-se as estruturas arqueológicas identificadas na superfície do castro. ©ParaView. 60

Figura 25 - Aspeto do volume tomográfico limitado a 29 000 Ohm/m, evidenciando-se as anomalias de elevada resistividade, na escala de laranja a vermelho, por manipulação do mapa cromático por índices

de valor. A vermelho e a castanho encontram-se assinaladas as anomalias que consideramos terem potencial de interesse arqueológico, a verde as que serão derivadas de afloramentos de quartzo. A roxo encontram-se as estruturas arqueológicas identificadas na superfície do castro. ©ParaView.	61
Figura 26 – Localização Seminário Conciliar de São Pedro e São Paulo no contexto geográfico do Noroeste Peninsular. Base ortofotográfica: ©Google.....	63
Figura 27 – Representação do Seminário de São Paulo em a) 1594 (pormenor de Nova Bracarae Augustae descriptio, de G. Braun e F. Hogenberg), b) em 1756 (pormenor de Mapa da Cidade de Braga Primas, de A. Soares) e c) em 1883-84 (pormenor da Planta Topográfica de Braga 1883-84, de F. Goullard, f. 15 e 20).	64
Figura 28 – O edifício do seminário num pormenor da fotografia aérea de Braga de 1936. SPLAL. Arquivo Cartográfico UAUM.....	65
Figura 29 Aspeto atual das ruínas romanas da chamada Domus de Santiago. Fotografia da autora. .	66
Figura 30 – Relação espacial entre o Seminário Conciliar e o Museu Pio XII. Base ortofotográfica: ©Google	66
Figura 31 – Áreas onde foram realizados estudos geofísicos. Base ortofotográfica: ©Google.....	67
Figura 32 - Implantação dos perfis de resistividade (a vermelho). Adaptado de Pereira & Alves (2015, p. 13) Base ortofotográfica: ©Google.....	67
Figura 33 – Pormenor da utilização de espumas fenólicas na aquisição de dados na área C.	68
Figura 34 - Inversão do perfil de resistividades 4 da área C (assinalado a amarelo na imagem de enquadramento), com um valor de RMS de 2.8. Dados reservados Sinergeo, Lda. e UAUM.....	69
Figura 35 - Aspeto inicial do volume tomográfico de resistividades. ©ParaView.....	69
Figura 36 - Volume tomográfico da escala de resistividades entre 1000 e 3322 Ohm/m. ©ParaView.	70
Figura 37 - Aspeto do volume tomográfico, depois de se ter estabelecido 1000 Ohm/m para limite superior de resistividades. ©ParaView.	70
Figura 38 - Aspeto do volume tomográfico interpretado a 1m de profundidade, limitado a 1000 Ohm/m, evidenciando-se as anomalias mais resistivas na escala de amarelo a vermelho, por manipulação do mapa cromático por índices de valor. A vermelho encontram-se assinaladas as anomalias que consideramos terem potencial de interesse arqueológico. ©ParaView.	71
Figura 39 - Aspeto do volume tomográfico interpretado a 1m de profundidade, limitado a 1000 Ohm/m, evidenciando-se as anomalias mais resistivas na escala de amarelo a vermelho, por manipulação do mapa cromático por índices de valor. A vermelho encontram-se assinaladas as anomalias que consideramos terem potencial de interesse arqueológico. ©ParaView.	71

Figura 40 – Perspetiva da distribuição das resistividades da área C em profundidade, a partir de um volume escalar com limite superior de resistividades estabelecido em 1000 Ohm/m.. ©ParaView. ...	73
Figura 41 – Projeção da malha urbana de Bracara Augusta (a branco) sobre a área C do estudo geofísico do Seminário Conciliar de São Pedro e São Paulo. Adaptado de Magalhães, 2010, p. 85.	74
Figura 42 – Expressão gráfica da direção do vetor E a partir de a) uma carga positiva e b) na direção de uma carga negativa. Adaptado de Halliday et al. (2008, p. 582).....	95
Figura 43- Representação gráfica, em corte horizontal, das linhas de campo (a azul) e respetivas superfícies equipotenciais (a bege) para a) um campo elétrico constante, b) um ponto de carga e c) um dipolo elétrico; num dipolo, as cargas elétricas têm o mesmo valor de magnitude, com polaridades opostas. Adaptado de Halliday et al.(2008, p. 633).	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Comparação entre os arranjos de Wenner, Wenner-Schlumberger e Duplo Dipolo. Adaptado de Samouëlian et al. (2005, p. 182).	34
---	----

“The problems of sensibly clustering related time and space transformations and of aligning such clusters to those respective axes are two of the main problems of archaeology.”

David Clarke

Analytical Archaeology, 1978, p. 44

1. INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Quando, pela primeira vez, nos confrontámos com a necessidade de entender a utilização de métodos de prospeção geofísica aplicados à Arqueologia, na sequência de projetos de investigação arqueológica desenvolvidos pela Unidade de Arqueologia da Universidade do Minho, deparámo-nos com o que Robert Laughlin identificou como “a opacidade da ciência moderna”³, não só pelo elevado grau de especialização da literatura científica a respeito do tema, mas essencialmente porque a linguagem da geofísica nos parecia, à primeira vista, demasiado distante da arqueológica.

A nossa participação nos trabalhos de prospeção geofísica realizados no âmbito do Projeto PoPaTERVA, em Boticas, e do estudo de *Bracara Augusta*, em Braga, proporcionaram a oportunidade de nos debruçarmos, justamente, sobre esta problemática, colocando-nos perante o desafio de ensaiarmos a “tradução” dessa linguagem.

A dissertação que aqui se apresenta procura então debruçar-se sobre a aplicabilidade, metodologias e mais-valias da utilização do método de prospeção geofísica por tomografia de resistividade elétrica em contexto de investigação arqueológica.

Numa primeira parte, desenvolvida no capítulo 2, são tecidas algumas considerações a respeito da natureza epistemológica das duas disciplinas de que é objeto esta dissertação, a par das quais se ensaia uma síntese historiográfica da evolução dos métodos de prospeção geofísica aplicados à Arqueologia, primeiramente numa perspetiva global e, em seguida, focando a nossa atenção no panorama português.

No capítulo 3 apresentam-se, de forma breve, os conceitos que considerámos essenciais para que se compreendam as características da condução geoeletrica e do método geofísico de aquisição de dados por resistividade elétrica. Neste capítulo serão tratados, também, os pressupostos técnicos de

³ “A opacidade da ciência moderna é um infeliz efeito secundário do profissionalismo e algo pelo qual nós, cientistas, somos muitas vezes punidos – e com razão” (Laughlin, 2005, p. 12).

configuração dos sistemas eletródicos de aquisição de dados de resistividade, analisando, com maior detalhe, as configurações de *Wenner*, *Schlumberger*, *Wenner-Schlumberger* e *Duplo Dipolo*.

No capítulo seguinte abordam-se os métodos de processamento e interpretação dos dados de eletrorresistividade, quando utilizados para a constituição de imagens tomográficas por resistividade elétrica (ERT), enunciando, de forma breve, algumas questões relativas ao Problema Inverso que constitui a composição de um modelo de resistividades, na sequência das quais serão tratados os aspetos que consideramos essenciais no respeitante à interpretação arqueológica dos dados em tomografia por resistividade elétrica. Neste capítulo são ainda tecidas algumas considerações em relação ao processamento e análise de ERTs através de ferramentas de visualização e computação gráfica, aplicadas à deteção de anomalias de resistividade/condutividade com potencial de valor arqueológico.

O capítulo 5 procurará ser a extensão prática da aplicação de ERTs sobre sítios arqueológicos, ensaiando-se o estudo e interpretação dos dados de resistividade adquiridos no Castro de Sapelos, em Boticas e no Seminário Conciliar de São Pedro e São Paulo, em Braga. Os dois sítios escolhidos integram contextos de ocupação do espaço completamente distintos, um rural e outro urbano. Da exposição sobre a análise e interpretação conduzida nestes dois locais pretende-se obter uma clarificação dos aspetos técnicos e interpretativos a considerar em face de contextos diferenciados, com dinâmicas de ocupação humana e formação morfosedimentar completamente distintos. Para cada estudo de caso enunciam-se os aspetos relativos à metodologia de aquisição, ao processamento e análise dos dados com recurso a ferramentas de computação visual e gráfica, reservando ainda espaço para a discussão dos resultados da interpretação dos volumes tomográficos.

Reservamos o capítulo final para uma reflexão sobre os ângulos essenciais do estudo desenvolvido nesta dissertação.

Não podemos terminar esta nota introdutória sem salientar uma circunstância que consideramos essencial a respeito do estudo que em seguida se apresenta e que diz respeito ao facto de esta ser uma tentativa honesta da autora, com formação de base em Ciências Sociais, de abordar domínios específicos da Física e da Geologia. O que inicialmente se constituiu como barreira à compreensão dos conceitos-chave, rapidamente se transformou num desafio aliciante, que esperamos despretenciosamente ter conseguido superar.

2. DA ARQUEOLOGIA E DA GEOFÍSICA

2. DA ARQUEOLOGIA E DA GEOFÍSICA

A Arqueologia é uma disciplina científica cujos objetos de estudo são, em primeiro plano, as evidências materiais resultantes das sociedades do passado. Contudo, à Arqueologia interessa mais do que a dimensão formal da matéria, porque matéria deve ser aqui entendida não só como a expressão das materialidades que resultam da presença humana, mas sobretudo como o significado que elas possam ter tido para o grupo/indivíduo que por elas foi responsável. Daqui se conclui que a Arqueologia parte da matéria para inferir o impalpável, ou seja, da ruína e da informação que recolhe sobre ela, infere as relações, as ações, as consequências e demais dimensões do comportamento social respeitantes ao grupo ou, mais raramente, indivíduo, a quem se associa o sítio/facto arqueológico (Lehoërf, A., & Giligny, 2005, p. 6).

A escavação arqueológica é, do amplo conjunto de técnicas utilizadas pela Arqueologia, a que mais vezes se utiliza e a que maior número de dados proporciona sobre um sítio arqueológico. Sendo uma técnica que introduz uma ação direta, seletiva e irrepitível sobre um conjunto sedimentar, a escavação arqueológica exige um conjunto metodológico de procedimentos de registo, que acompanham a subtração dos contextos deposicionais pós-abandono. O processo de registo, responsável pela criação do dado arqueológico, é já uma ação interpretativa de primeira base, na medida em que o arqueólogo só regista aquilo que vê e só vê, do ponto de vista arqueológico, aquilo que entende como elemento constituinte do sítio ou do contexto sedimentar que o envolve, consiga ou não atribuir-lhe causa ou função (Lucas, 2001, p. 3). Desta premissa deriva que qualquer sítio arqueológico que já tenha sido objeto de escavação só pode ser lido, e mesmo reinterpretado, sobre uma base de dados que se circunscrevem aos registados durante a intervenção, segundo a escala de importância então definida (Barker, 1977, p. 14).

A escavação arqueológica é, pois, um procedimento técnico indissociável do ónus da irrepitibilidade (Barker, 1977, p. 13), condição que, por si só, alicerça a importância da utilização de estudos não invasivos, como é o caso dos que são providos pelas várias técnicas da Geofísica. As linhas orientadoras estabelecidas pelas convenções europeias sobre o património recomendam que a intervenção arqueológica sobre um sítio tenha o mínimo impacte possível, sugerindo que se apliquem, sempre que

exequível, métodos não-destrutivos, e que as escavações arqueológicas se realizem na condição de existir uma sólida fundamentação científica que as justifique ou em caso de risco eminente de perda de património, salientando-se a importância de que, ainda que nessas circunstâncias, se deva evitar a intervenção de forma absoluta e total sobre o sítio arqueológico, conforme disposto pelo ICOMOS no art.º 5 da Carta Internacional para a Proteção e Gestão do Património Arqueológico (Lausanne, 1990) e no Art.º 3 da Convenção Europeia para a Proteção do Património Arqueológico (La Valetta, 1992 - revista), publicada em Resolução da Assembleia da República n.º 71/97 e ratificada pelo Decreto do Presidente da República n.º 74/97 de 16 de dezembro.

Respondendo a estas recomendações, a Arqueologia tem procurado integrar na sua *praxis* metodológica técnicas multidisciplinares que estudam, de forma indireta, o potencial arqueológico de um dado local. Um dos eixos desta cooperação multidisciplinar é proporcionado pela Geofísica, uma disciplina científica que estuda, de forma não invasiva, as propriedades físicas dos constituintes do subsolo, através de medições em vários espetros, que permitem identificar as anomalias provocadas por elementos divergentes, tenham eles origem natural ou antrópica. Ora, o sítio/facto arqueológico, atuando como elemento perturbador nos processos de deposição natural, provoca alterações das propriedades físicas dos depósitos sedimentares na sua envolvente próxima, sendo essas alterações o objeto de estudo da Geofísica aplicada à Arqueologia (Piro, 2009, p. 27).

Estas duas disciplinas científicas apresentam dados fortemente vinculados a processos descritivos e de medição que, em igual medida, carecem de interpretação e cuidadosa análise de escala, sendo, portanto, áreas do saber interpretativas, que se dedicam ao estudo das propriedades de elementos naturais uma, e antrópicos outra, presentes, sobretudo, no subsolo.

Tomando por princípio que o objeto físico da Arqueologia é um recurso não-renovável, o papel dos métodos geofísicos no estudo arqueológico assume uma importância crescente nos dias de hoje (Piro, 2009, p. 27).

Este estudo procurará debruçar-se não só sobre a aplicabilidade e especificidade dos métodos de Geofísica quando utilizados em estudos arqueológicos, mas fundamentalmente, sobre o grau de inteligibilidade dos dados daí resultantes para arqueólogos não especializados na área, aos quais falta, não raras vezes e em resultado de uma tradição académica orientada exclusivamente para as ciências sociais, a devida estrutura das ciências exatas, fundamental para compreender o espetro, parametrização e resultados de um estudo geofísico. Procuraremos dar um contributo para a

compreensão dos resultados de um estudo geofísico, essencialmente, sobre uma base de interpretação apoiada por ferramentas de computação gráfica e de visualização no domínio da imagiologia.

2.1 Da história da aplicação da Geofísica à Arqueologia

Nos finais do séc. XIX, Augustus Pitt-Rivers documentou pela primeira vez a utilização de um método de avaliação do reflexo acústico do subsolo, através de um procedimento tecnologicamente rudimentar, mas eficaz em determinadas circunstâncias: assumindo que a velocidade do som é constante e que a onda se propaga horizontalmente, a indução de ondas sonoras sobre o solo ressoará de forma constante se o solo for uniforme (Clark, 1996, p. 11). Se existirem elementos de perturbação, como é o caso dos arqueológicos, a onda sonora refletirá essa alteração, produzindo um som distinto, que pode ser identificado por um processo de audição de contacto simples (Rua, 2005, p. 23). A experiência de Pitt-Rivers consistiu em fazer vários testes acústicos, através da indução de uma onda sonora criada pela pancada de um martelo sobre a superfície e subsequente registo espacial dos pontos em que a resposta sonora se assemelhava a um baque surdo (Clark, 1996, p. 11). Esta técnica, que mais tarde viria a chamar-se de *bosing*, pode considera-se como a predecessora dos estudos de reflexão sísmica (Wynn, 1986, p. 247).

Em 1919, no âmbito do desenvolvimento da fotografia aérea associada ao reconhecimento militar, o Tenente-Coronel George Adam Beazeley identificou a traça da antiga cidade de Samarra, através das alterações do espectro visível nas propriedades do solo superficial provocadas pela ruína da cidade, que criaram uma imagem das estruturas enterradas, perceptível em escala aérea. Beazeley, precursor da fotogrametria e da teledeteção, escreveu na altura que *“had I not been in possession of these air photographs, the city would probably have been merely shown by meaningless low mounds, scattered here and there, for much of the detail was not recognizable on the ground, but was well shown up in the photographs, as the slight difference in the color of the soil came out with marked effect on the sensitive film (...)* (Beazeley, 1919, p. 330). A deteção remota de estruturas arqueológicas por fotografia aérea, pese embora possua um *corpus* metodológico próprio, pode considera-se como um método geofísico indireto, derivado da observação visual, na medida em que a marcação das áreas de interesse é feita pela identificação de alterações nas propriedades visíveis da superfície, como a cor ou a humidade, que possibilitam a identificação de marcas no solo ou na vegetação (Wynn, 1986, p. 247). Essas alterações

induzem uma variação da reflectância dos materiais, sendo essa a propriedade física passível de medição.

Desenvolveu-se também, no frenesim científico do primeiro Pós-Guerra, uma técnica de avaliação geoquímica, baseada na concentração de fosfatos (Clark, 1996, p. 11). A existência, na maioria dos locais de assentamento humano, de áreas com depósitos de lixo e de áreas de acumulação de excrementos, potencia a elevação dos teores de fosfatos, cuja deteção pode contribuir para a identificação de áreas funcionais ligadas à ocupação de um dado espaço (Clark, 1996, p. 11).

A problemática da identificação de sítios arqueológicos não-visíveis com recurso a técnicas de medição desenvolvidas por outros ramos da Ciência ganhou novos contornos a partir de finais da década de 30. Em 1938, em Williamsburg, E.U.A., Mark Malamphy realizou a primeira prospeção geofísica sistemática com recurso ao método de mapeamento por resposta de audiofrequência de equipotenciais, num estudo orientado para a deteção de estruturas em pedra relacionadas com uma igreja (Bevan, 2000, p. 51).

A experiência pioneira de Malamphy foi seguida, na Europa, já na década seguinte. Em 1946, em Dorchester, no Reino Unido, o arqueólogo Richard Atkinson realizou um teste de resistividade elétrica do solo, orientado para a deteção de interfaces de rutura, como poços e valas, uma experiência que ficaria para a História como a primeira verdadeiramente orientada sobre os princípios gerais da prospeção geofísica aplicada à arqueologia (Clark, 1996, p. 11). Por esta altura, a resistividade era uma técnica utilizada pela engenharia, sendo já utilizada como técnica de avaliação de solos no âmbito de obras de implantação de barragens. O cálculo da resistividade era feito com recurso a dispositivos portáteis de medição galvânica, sendo um dos mais conhecidos à época o *Megger Earth Tester* (Clark, 1996, p. 13). Atkinson reconheceu no princípio teórico do estudo da resistividade a aplicabilidade à identificação de elementos arqueológicos e, em conjunto com Sydney Evershed e Ernest Vignoles, os proprietários da empresa que produzia o *Megger*, realizou, em Dorchester-on-Thames, o primeiro estudo de deteção de elementos arqueológicos não visíveis por resposta de resistividade elétrica (Clark, 1996, p. 12). Quase em simultâneo, Helmut de Terra e Hans Lundberg realizaram em Tepexpan, no México, uma prospeção geofísica usando o método eletródico linear (Terra, 1947, p. 44), recuperando o método que Malamphy havia usado 10 anos antes para a empresa detida por Lundberg (Bevan, 2000, p. 51).

A década de 50 do séc. XX pode considerar-se como o primeiro grande *milestone* da aplicação de técnicas de medição de propriedades geofísicas a estruturas arqueológicas enterradas. De facto, depois

das primeiras experiências realizadas nos finais da década de 40 do mesmo século, e reconhecido o potencial de informação arqueológica suscetível de ser recolhida através de estudos geofísicos dedicados, a década de 50 ficou marcada pelo rápido desenvolvimento das técnicas e metodologias de deteção de anomalias geofísicas associadas a evidências arqueológicas e pelas primeiras produções científicas a respeito do tema. Dando continuidade ao estudo aplicado da resistividade, Atkinson publicou, em 1952, o primeiro capítulo de que há registo inteiramente dedicado ao assunto, intitulado “*Méthodes életriques de prospection en archeologie*” (Atkinson, 1952, pp. 59-70). Em 1956, Anthony Clark e John Martin desenvolveram um resistivímetro específico para a condução de prospeção geofísica aplicada à arqueologia, o então chamado Martin-Clark (Clark, 1996, p. 14).

Esta década foi ainda marcada pelo desenvolvimento de uma nova metodologia de prospeção geofísica aplicada, a magnetometria, baseada na medição de variações de suscetibilidade magnética no solo (Piro, 2009, p. 31). Em 1957, John Belshé desenvolveu, em Cambridge, um procedimento de datação de fornos antigos (*kilns*) a partir da comparação entre a magnetização termoremanente (TRM) do revestimento cerâmico das câmaras de cozedura e a curva direcional de referência do campo magnético terrestre, utilizando para isso um magnetómetro de precessão protónica (Belshé, 1957). O estudo da TRM parte da assunção de que os óxidos de ferro, quando expostos a temperaturas acima de 700°C e ao subsequente arrefecimento abaixo da temperatura de bloqueio, sofrem uma magnetização específica, que se alinha com a do campo magnético terrestre à data do efeito (Hartmann, Afonso, & Trindade, 2007, p. 447). Os óxidos de ferro estão presentes em grande proporção nas cerâmicas e nos pigmentos, daí o grande interesse do estudo da TRM para a Arqueologia.

Ainda em 1957, Graham Webster, tendo conhecimento do trabalho realizado por Belshé, entra em contacto com Martin Aitken⁴ e Edward Hall¹ no sentido de utilizarem o princípio da magnetização termoremanente para identificarem fornos de tipo *kiln* na área onde se pensava estar localizada a cidade romana de *Durobrivae* (Clark, 1996, p. 16). Os resultados foram bastante positivos, tendo sido identificado um *kiln*, assim como vários fossos, cuja suscetibilidade magnética foi impulsionada pelos vários processos de queima a que foram sujeitos (Clark, 1996, p. 17).

⁴ Research Laboratory for Archaeology and the History of Art, Oxford

Com um desenvolvimento inicial centrado nos círculos académicos britânicos, a partir de meados da década de 50 do séc. XX a geofísica aplicada à Arqueologia disseminou-se rapidamente pela Europa e Estados Unidos. Em 1954 foi fundada a *Sezione Prospezioni Archeologiche della Fondazione C. M. Lerici del Politecnico di Milano*, dirigida por Richard Linington, que se assumirá como um importante polo de formação e de divulgação da prospeção geofísica aplicada, promovendo, em 1966, a edição de uma revista dedicada à matéria, a *Prospezioni Archeologiche* (Clark, 1996, p. 19).

O avanço da ciência da computação entre finais da década de 50 e, sobretudo, na década de 60, elevou as várias técnicas da geofísica a um potencial de análise e resolução que ainda não conheceu limite. Em 1958, Irwin Scollar desenvolveu em Bona, Alemanha, um procedimento pioneiro no âmbito do cálculo micro-computacional aplicado ao processamento dos dados da Indução Eletromagnética (EMI), desenvolvendo para tal algoritmos de processamento e de filtragem espacial (Clark, 1996, p. 19). Em várias localizações do Mediterrâneo, Elizabeth Ralph, investigadora do *Museum Applied Science Center for Archaeology - MASCA*, Pennsylvania, desenvolveu diversos estudos de prospeção geofísica, reconhecidos pela excelência e pioneirismo, recorrendo, essencialmente, ao magnetómetro (Bevan, 1995, p. 89). Em França, o *Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)* criou um departamento dedicado ao estudo geofísico, o *Centre de Recherches Géophysiques*, em Garchy, França, a partir do qual Albert Hesse e Alain Tabbagh desenvolveram estudos geofísicos em vários sítios da Europa, inclusivamente em Braga, onde Hesse realizou um estudo geofísico sistemático do perímetro intramuralhado romano da Cidade de Baixo (Hesse, 1977).

Na década de 60 do séc. XX ocorreram grandes avanços do ponto de vista instrumental e metodológico, desenvolvidos, sobretudo, a partir de polos de investigação britânicos. Em 1964, John Alldred, do Oxford Laboratory, desenvolve o Gradiómetro Fluxgate, um aparelho mais portátil, capaz de uma maior aquisição de dados por hora, estando também equipado com um terceiro detetor, apto para identificar se as anomalias eram causadas por objetos subsuperficiais ou profundos (Clark, 1996, p. 19). Em 1967 foi criada a Secção de Geofísica do *Ancient Monuments Laboratory (AML)*, que contribuiu, entre outros avanços, para o desenvolvimento de dois arranjos de medição geoeletrica, o multi-eletródico e o quadrático (Clark, 1996, p. 22).

Nas duas décadas seguintes, a Geofísica beneficiou do avanço tecnológico exponencial da microcomputação e do desenvolvimento da computação gráfica, dando-se pela primeira vez, um grande destaque à formação específica em Geofísica aplicada à Arqueologia. Em 1971 foi criado, no seio do

Departamento de Física da Universidade de Bradford, o Departamento de Ciências Arqueológicas, dirigido por Arnold Aspinall; este departamento foi responsável, entre outros, pelo desenho do *Bradphys*, um resistivímetro desenvolvido para um arranjo de elétrodos duplos (Clark, 1996, p. 22).

Uma das grandes inovações técnicas que rapidamente integrou o *corpus* tecnológico da geofísica foi o Radar de Penetração no Solo, ou Georadar, mais conhecido pela sua correspondente sigla anglo-saxónica, GPR. O Georadar atua através da emissão de impulsos eletromagnéticos no solo, cuja velocidade e comportamento reagem às propriedades dielétricas dos materiais que atravessam (Annan, 2002, p. 254). Embora se conheçam experiências com ondas eletromagnéticas desde o início do séc. XX (Gonçalves, 2013, p. 10), foi em 1972 que a *NASA*, em fase de investigação preparatória para a missão *Apollo 17*, desenvolveu o primeiro protótipo de Georadar para o estudo das propriedades geofísicas da crosta lunar (Conyers, 2006, p. 133). Em 1974, Lambert Dolphin, Robert Bollen e George Oetzel (*Stanford Research Institute*) testaram, em minas de dolomite na Califórnia, o que designaram por “*lightweight, portable sounder for underground probing.*” (Dolphin et al., 1974, p. 360). No ano seguinte, em Chaco, Novo México, Lambert Dolphin repetiu o uso da nova sonda, com uma antena de 400 Mhz, mapeando com sucesso paredes de um sítio arqueológico datado de 600 d.C.. As discontinuidades detetadas na propagação da onda, então chamadas de ecos, eram visíveis na imagem do radargrama, impresso sobre papel eletrosensitivo (Kenyon, 1977, p. 51).

No início dos anos 80, o aparecimento de um microcomputador portátil (*Epson HX20*) potenciou o início de uma nova fase da geofísica, agora cada vez mais portátil, abrindo caminho a procedimentos de *data logging* mais expeditos, e à possibilidade de se visualizarem os dados durante os trabalhos de campo (Clark, 1996, p. 25). No Japão, os estudos sistemáticos desenvolvidos por Imai, Sakayama e Kanemori, levaram ao mapeamento de um conjunto de evidências relacionadas com uma comunidade do séc. VI d.C. (Imai et al., 1987). De entre os elementos arqueológicos registados surgiu a qualificação de *cultural layer*, isto é, horizontes de solo qualificáveis do ponto de vista crono-cultural; este conceito permitiu que o Georadar passasse a ser considerado para estudos mais amplos e já não só para escala de sítio, introduzindo-se então a possibilidade de análises de GPR contribuírem para a compreensão de um espaço cultural a uma escala de paisagem (Conyers, 2006, p. 134).

Nos anos 90, a Geofísica beneficiou do desenvolvimento de poderosos sistemas de processamento automático de dados, que acompanharam a rápida evolução dos componentes de *hardware*. Roger Walker, fundador da *Geoscan* e ele próprio produto da escola de Bradford, foi pioneiro no

desenvolvimento de equipamento e *software* de análise direcionado para um encurtamento das fases de recolha e tratamento dos dados, contribuindo para que a Geofísica aplicada à Arqueologia se tornasse, nos anos 90, economicamente viável enquanto técnica especializada de assessoria ao nível da minimização de impactes sobre o património arqueológico e arquitetónico (Clark, 1996, p. 25).

Ao longo desta década, a indústria do GPR, cada vez mais diversificada, desenvolveu sistemas de recolha digital dos dados de reflexão, alicerçados em computadores portáteis potentes, que permitiam uma rápida visualização e análise em tempo real. A visualização dos dados adquiriu uma importância crescente, na medida em que acompanhou a sofisticação proporcionada pelo desenvolvimento da computação visual. Os estudos de Dean Goodman e Yasushi Nishimura foram marcas de referência na criação de volumes escalares a partir de dados do GPR, através do processamento via algoritmos de filtragem e interpolação, que permitiam extrapolar para visualização 3D os dados resultantes do varrimento; às dimensões espaciais foi acrescentada a dimensão escalar, no caso, a amplitude, pelo que se tornaram precursores no desenvolvimento dos *amplitude slice maps* (Conyers, 2006, p. 135; Goodman & Piro, 2013, p. 3).

O avanço da imagiologia aplicada à Geofísica contribuiu também, ainda em meados desta década, para um substancial avanço na capacidade de interpretação dos dados resultantes de medições de resistividade elétrica. A interpretação dos dados resultantes da resistividade elétrica representa sempre um problema inverso, uma vez que se parte de um conjunto de dados adquiridos para a criação de uma representação matemática idealizada de uma secção do subsolo, capaz de traduzir a parametrização conferida pela gama de dados obtida inicialmente (Loke, 1996-2004, p. 12). O problema da inversão, identificado desde a década de 30, conheceu nesta altura e, mais uma vez, por benefício da capacidade de processamento computacional, resolução numérica, possibilitando o desenvolvimento da Tomografia de Resistividade Elétrica (Piro, 2009, p. 40; Loke, 1996-2004). O solucionamento computacional do problema de inversão permitiu ainda que a aplicação de técnicas de compilação de imagiologia se estendesse a praticamente todas as gamas de dados passíveis de serem obtidas pela Geofísica.

Atualmente, a investigação em Geofísica procura responder às necessidades de interpretação e análise de dados, mais que ao desenvolvimento de equipamentos e técnicas de medição, embora surjam com frequência melhoramentos que acompanham a evolução tecnológica global. A linha de investigação tende para a integração de várias técnicas de medição geofísica, no sentido de avaliar as características evidenciadas por cada um dos modelos de subsuperfície, que se obtêm por diferentes métodos: uma

vez que a medição captada por cada método reage a propriedades físicas particulares, teoricamente, da utilização integrada, vão obter-se leituras multidirecionais dos elementos divergentes existentes no subsolo, difíceis de obter pela utilização de um método único (Hesse, 1999, p. 58; Mozzi et al., 2015).

2.2 O panorama português

Não existindo, em Portugal, uma escola consolidada de geofísica aplicada em exclusivo à Arqueologia, o que em seguida se apresenta como resenha foi constituído, essencialmente, pelos trabalhos publicados a respeito desta temática no nosso país, antecipando-se portanto desde já, possíveis falhas de menção. Optámos também por não fazer a listagem exaustiva dos trabalhos arqueológicos que, em Portugal, promoveram estudos geofísicos, mas antes os momentos que considerámos essenciais para o desenrolar da disciplina no país.

Arriscar-nos-emos a avançar com a data de 1961 para o momento em que, pela primeira vez, se realizaram prospeções geofísicas aplicadas à arqueologia em Portugal. Nesse ano, os arqueólogos João Manuel Bairrão Oleiro e Luís Albuquerque e Castro realizaram, em Conímbriga, um pequeno ensaio com um aparelho de radiações MT-Scope (Santos & Esteves, 1966, p. 315), utilizado para detetar anomalias metálicas e, neste caso concreto, para prever o traçado de canalizações de chumbo relacionadas com o sistema de abastecimento de água da cidade romana (Oleiro & Castro, 1961, p. 9).

Três anos mais tarde e a convite do Instituto de Arqueologia da Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, Martin Aitken, Michael Tite e John Alldred realizaram, entre Setembro e Outubro de 1964, prospeções geofísicas com magnetómetro de protões e resistímetro em vários sítios arqueológicos do centro do país, entre os quais Casal do Zambujal, Cabeço da Amoreira, Porto do Sabugueiro, São Sebastião/ *Collipo*, Conímbriga e Chões de Alpompé (Alarcão, 1964, pp. 367-369). Em tudo inovadoras para a época, as demonstrações de Martin Aitken contaram com a presença de vários arqueólogos da nossa praça e por engenheiros do Serviço de Fomento Mineiro, tendo sido, mais que investigações de sítio, aquilo que hoje chamaríamos de *workshops* ou ações formativas, realizadas com o intuito de despertar o interesse da comunidade científica nacional para as potencialidades da aplicação de métodos geofísicos em arqueologia (Alarcão, 1964, pp. 368-369). Na sequência de uma conferência proferida em Coimbra (Alarcão, 1964, p. 369), Aitken escreveria na altura, “ não é necessário que o arqueólogo se torne um cientista, mas é essencial que tome a consciência das possibilidades novas que hoje existem e da confiança que podem merecer os resultados obtidos” (Aitken M. , 1964, p. 286).

Em 1966, o arqueólogo Manuel Farinha dos Santos e o engenheiro Joaquim Moura Esteves, especialista em geotecnia do então LNEC, realizaram, perto da gruta de São Tiago do Escoural (Santos & Esteves, 1966), aquele que terá sido, em Portugal, o primeiro grande estudo de resistividade elétrica para deteção de elementos arqueológicos, consideração que enquadrámos nas devidas proporções técnicas existentes à época. Este estudo, cuja publicação apresenta uma excepcional fundamentação teórica, contemplou uma área de aproximadamente 1200 m², sobre os quais se realizaram 5 perfis de resistividade e 3 sondagens geolétricas verticais; os resultados apresentaram-se num artigo que Farinha dos Santos e Moura Esteves publicaram na revista *Ethnos* no mesmo ano (Santos & Esteves, 1966, p. 331).

Em 1977, e numa altura em que, na generalidade dos países da Europa, crescia o entusiasmo a respeito das potencialidades da prospeção geofísica para a arqueologia, uma equipa do *Centre de Recherches Géophysiques* Garchy, Nièvre encabeçada por Albert Hesse, realizou em Braga, a convite do então diretor do Campo Arqueológico, Francisco Alves, uma campanha extensiva de prospeção por resistividade elétrica, fazendo também alguns estudos com magnetómetro (Figura 1) (Hesse, 1977). Da prospeção realizada resultou a identificação de um conjunto de anomalias geofísicas (Figura 2), cuja correspondência com ruínas se viria a confirmar através de sondagens arqueológicas realizadas pela Unidade de Arqueologia da Universidade do Minho, entre 1978 e 1983, que permitiram definir e caracterizar na Cividade de Baixo e na Quinta do Fujacal um troço da muralha baixo-imperial da cidade de *Bracara Augusta* (Figura 2), (Delgado et al., 1984, p. 101).



Figura 1 - Memória fotográfica das prospeções geofísicas realizadas por A. Hesse em Braga, em 1977. Arquivo fotográfico MDDS.

Na década de 90 assistimos, em Portugal, à formação de dois importantes centros de investigação dedicados, o Centro de Geofísica de Évora, associado da Universidade de Évora, e o Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro, que vieram juntar-se ao já existente Instituto Dom Luiz – Laboratório Associado da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa⁵. Estes centros têm

⁵ Para mais informações consultem-se as páginas institucionais dos respetivos departamentos: <http://www.cge.uevora.pt>; <http://www.ua.pt/geo/>; <http://idl.ul.pt/>



Figura 2 - Planta das prospeções geofísicas levadas a cabo em Braga em 1977. Arquivo UAUM.

promovido estudos de geofísica em contexto arqueológico, embora nenhum dos polos tenha por vocação o estudo exclusivo de dados associados a esta área de investigação.

Entre os primeiros trabalhos realizados pelo Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro contam-se as prospeções realizadas com georadar na Casa do Infante (Matias, 2003) e na Praça do Infante (Martins & Abranches, 2011). Cumpre-nos aqui destacar a ação formativa do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro, onde Manuel Senos Matias e Fernando Rocha de Almeida têm contribuído para a formação específica em Geofísica aplicada ao património, orientando ou arguindo teses direcionadas para temáticas arqueológicas⁶.

Tendo como parceiro a Universidade de Évora, decorreu na Ammaia, Portugal, entre 2009 e 2014, um dos mais importantes programas de investigação dedicados à avaliação não-intrusiva do potencial arqueológico: o projeto *Radio-Past*. O *Radio-Past* foi instituído em sistema de consórcio europeu, reunindo sete parceiros, e foi orientado para o desenvolvimento de programas concertados de avaliação não invasiva de sítios arqueológicos, bem como para a visualização dos dados resultantes desta primeira premissa⁷. Com o epíteto de *Radiograph the Past*, a cidade romana da Ammaia funcionou como *open lab*, um dos conceitos-chave do programa, e como um importante centro de formação, tendo procedido à organização de três cursos curtos de formação específica, dois deles na Ammaia⁸.

O Laboratório Hécules, criado em 2009 e associado do CGE, tem tido também um papel ativo no quadro da promoção de estudos geofísicos em arqueologia, tendo desenvolvido o projeto *IMAGOS - Innovative Methodologies in Archaeology, Archaeometry and Geophysics – Optimizing Strategies*, integrado no

⁶ Ver, a título de exemplo: Barraca (2013);Café (2014); Garcia (2009)

⁷ Para mais informações consulte-se a página institucional do projeto, em <http://www2.radiopast.eu>

último quadro de financiamento do QREN – InAlentejo⁸. No âmbito do *IMAGOS* desenvolveu-se o projeto *APOLLO*, que, nas palavras da instituição, se baseia “no desenvolvimento e aplicação de metodologias analíticas geofísicas de campo não destrutivas, e na investigação *in-situ* de sítios arqueológicos. Em particular, o projeto APOLLO pretende adotar uma abordagem totalmente integrada, que combina atividades arqueológicas e geofísicas, análise química *in situ* e interpretação e integração da pesquisa com as ciências naturais e a gestão/conservação do património” (em <http://www.hercules.uevora.pt/projetos/apollo.php>, consultado em 17-11-2015).

Entendemos que também deverá salientar-se, sobre esta matéria, o fato de existir um número progressivo de empresas de arqueologia que, com frequência crescente, integram no seu quadro de operações estudos geofísicos, como é o caso da Era Arqueologia ou da Morph – Grupo Dryas Octopetala.

O exposto permite-nos concluir que a investigação arqueológica do subsolo com técnicas de Geofísica tem vindo, lentamente, a incorporar-se no tecido científico nacional, visível no número crescente de projetos de investigação que incluem estas temáticas e no crescimento do número de entidades públicas e privadas que, em Portugal, se aplicam nesta matéria, sendo visíveis com mais ou menos vigor mediático em projetos como o da Fábrica de Vidros do Covo (Garcia, 2009) ou o do Povoado de Perdigões, em Reguengos de Monsaraz (Valera, et al. 2010).

⁸ <http://www.hercules.uevora.pt/projetos/apollo.php>

3. PROSPEÇÃO GEOFÍSICA POR RESISTIVIDADE ELÉTRICA

3. PROSPEÇÃO GEOFÍSICA POR RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A resistividade elétrica é uma propriedade física, relativa ao campo elétrico de um material, e simultaneamente o nome dado à técnica da Geofísica que se ocupa da descrição dessa propriedade para avaliar as características do subsolo, podendo surgir também, na literatura da especialidade, referenciada pelos termos eletrorresistividade ou prospeção geoelétrica.

A resistividade elétrica é um método geofísico ativo, que pela injeção de corrente no subsolo, induz a criação de um campo físico, o campo elétrico, sobre o qual então se operam os registros (Demoule et al., 2005, p. 51).

3.1 Princípios Teóricos

O que em seguida se expõe aborda apenas os conceitos básicos e gerais da condução geoelétrica e do método geofísico de aquisição de dados por resistividade elétrica. Os conceitos globais relativos às características da condução elétrica podem ser consultados no Anexo I deste documento.

3.1.1 GEOELETRICIDADE

O comportamento da corrente elétrica nos solos é forçosamente distinto do que ocorre em condutores ou materiais em que o circuito de corrente é unidimensional e fechado, como um fio metálico, onde a condução é dita eletrônica (ver Anexo 1) (Schmidt, 2013, Cap.I, loc. 375⁹; Lowrie, 2007, p. 254).

No solo, a corrente é transportada por moléculas carregadas, iões, que se libertam através da dissolvença de sais minerais em soluções aquosas; a presença de um campo elétrico numa solução

⁹ A obra referenciada foi consultada em versão *e-book* da *Kindle*[®] (ISBN 978-0-7591-2293-2), pelo que se apresenta a referência ao capítulo e localização *Kindle*[®] (loc.).

^{*} *Kindle and all related logos are trademarks of Amazon.com, Inc. or its affiliates.*

aquosa faz com que os iões com carga positiva, chamados catiões, atraiam elétrodos negativos, chamados cátodos e que iões com carga negativa, aniões, sejam atraídos por elétrodos com carga positiva, ditos ânodos, gerando-se corrente e passando a solução a ser eletrolítica; ao processo de migração de catiões para cátodos e de aniões para ânodos por influência de um campo elétrico dá-se o nome de eletrólise (Lowrie, 2007, p. 255; Schmidt, 2013, Cap., loc. 375).

A condução de corrente em meio terrestre diz-se, portanto, eletrolítica e depende tanto do grau de mineralização dos seus componentes líquidos, quanto do teor de humidade presente no subsolo (Schmidt, 2013, Cap., loc. 375; Santos F., 2006, Cap. 2, p. 5).

No caso dos solos, a resistividade elétrica constitui o impedimento que o meio terrestre faz à condução eletrolítica, estando diretamente dependente da percentagem de água existente no meio condutor e do seu teor de mineralização (Schmidt, 2013, Cap., loc. 375). O teor de humidade nos solos é influenciado pela matriz micromorfológica dos sedimentos e das rochas, em relação proporcional com o volume disponível de soluções aquosas (Schmidt, 2013, Cap., loc. 375; Lowrie, 2007, p. 255; Loke, 1996-2004, p. 1). Com relativa frequência, em estudos geoeletricos a resistividade dos materiais geológicos é estudada pelo seu recíproco, a condutividade (Figura 3).

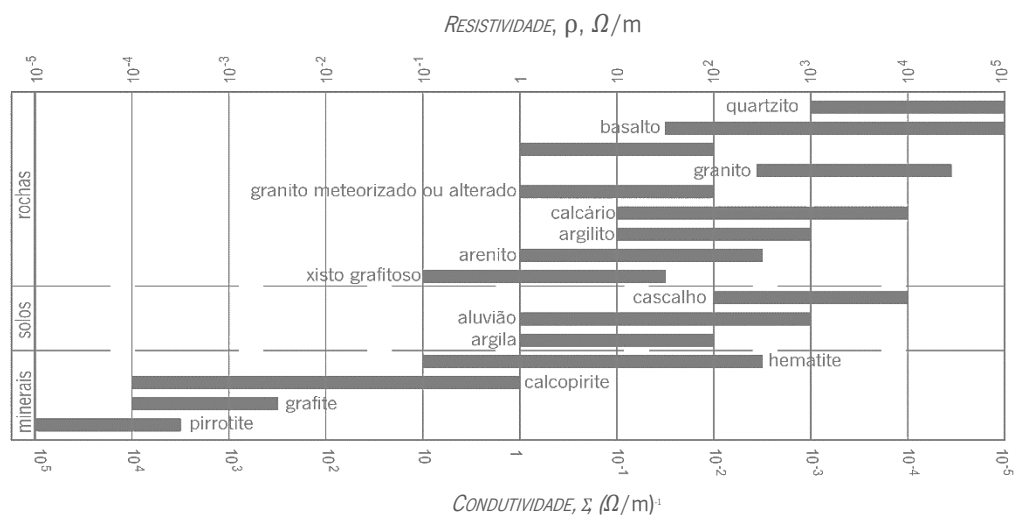


Figura 3 – Intervalos de resistividade/condutividade para alguns elementos geológicos comuns. Adaptado de Lowrie (2007, p. 256).

As rochas têm características de comportamento elétrico particulares, que dependem de múltiplos fatores, entre os quais a condutividade da matriz, a textura e distribuição dos poros ou as características condutivas do líquido intersticial e o seu grau de viscosidade; este último, por sua vez, responde a

parâmetros relacionados com a temperatura da fase líquida da rocha, influenciando a velocidade de movimento das cargas iónicas, um parâmetro conhecido por mobilidade (Santos F., 2006, Cap.2, p. 2).

Em função do estudo comportamental das propriedades eléctricas das rochas considera-se, de uma forma geral, que, de entre os grupos de formação rochosa, as rochas sedimentares são aquelas onde se proporciona maior índice de condutividade eléctrica, por oposição às eruptivas, que são as mais resistivas; as rochas metamórficas apresentam valores intermédios, quando comparados com os dois grupos referidos, sendo que neste caso, a condutividade eléctrica é inversamente proporcional ao grau de metamorfismo existente (Santos F., 2006, Cap.2, p. 5).

A resistividade efetiva de uma rocha com teor de saturação variável pode ser matematicamente deduzida pela Lei de Archie, através do seguinte:

$$\rho = \frac{a}{\phi^m S^n} \rho_w$$

(E) 1

(Lowrie, 2007, p. 256; Miranda et al., s/d, p. 137) onde ϕ representa a porosidade da rocha, S é a fração de poros que se encontram saturados com água, ρ_w é a resistividade do líquido intersticial e a , m e n são parâmetros empíricos que se avaliam em função do tipo de rocha, podendo ser considerados no intervalo entre 0.5 e 2.5 para a , 1.3 e 2.5 para m e aproximado de 2 para n , quando em percentagem de saturação dos poros acima de 30% (Lowrie, 2007, p. 256; Miranda et al., s/d, p. 137). O valor de a deriva da razão entre o volume dos poros e o volume total da rocha, o valor de m do seu grau de compactação, e o de n da relação entre o volume total de poros e o número de poros preenchidos com líquido (Miranda et al., s/d, p. 137).

Outro aspeto de consideração geral é o que se prende com a presença de argilas que, por se caracterizarem por índices de baixa porosidade e por apresentarem uma superfície com capacidade de troca iónica, dita eletricamente ativa, proporcionam a formação de uma superfície com carga eléctrica, à qual está associada uma zona de difusão, denominada por camada dupla de difusão, que, por apresentar uma maior percentagem iónica, se configura mais condutiva que a maioria das soluções aquosas intersticiais (Santos F., 2006, pp. 5-6).

Todas estas considerações gerais apresentam, expectavelmente, exceções e especificidades, cujo detalhe pode ser consultado em obras de âmbito específico, como em Parkhomenko (1967), ou em Zhadanov & Keller, (1994, visto em Santos F., 2006).

3.1.2 GEOFÍSICA POR MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Como referimos anteriormente, a aquisição de dados geofísicos por medição de resistividades elétricas constitui um método de prospeção ativo, baseado na injeção de corrente elétrica no solo através de elétrodos dispostos numa determinada configuração geométrica.

Uma das formas geralmente utilizadas para estudar as consequências da configuração geométrica dos elétrodos é a que deriva da consideração dos efeitos de distribuição de corrente através do potencial de um único elétrodo, num meio homogéneo e isotrópico (Schmidt, 2013, Cap. II, loc. 461).

Partindo então de uma situação inicial em que 1) é injetada corrente elétrica (I) através de um elétrodo posto num ponto A , numa configuração em que o elétrodo de receção B está a uma distância tal que não interfere na distribuição de potencial eléctrico em A e 2) o meio condutor é um solo homogéneo e isotrópico, chegamos à consideração da Figura 4. É-nos possível observar na Figura 4 que a corrente se dispersa de forma simétrica e radial a partir de A (Lowrie, 2007, p. 260; Schmidt, 2013, Cap. II, loc. 461). Como a Terra é um meio semi-infinito e o solo em consideração é uniforme, as linhas de campo eléctrico são dirigidas radialmente do ponto de emissão para o exterior, configurando superfícies equipotenciais hemisféricas (Lowrie, 2007, p. 260). Neste caso particular, a densidade de corrente é dada pela razão entre a corrente I e a área de superfície; o valor do campo eléctrico a uma distância r do ponto de injeção de corrente é dado pela relação entre o potencial, V , a corrente, I , e o raio entre duas superfícies equipotenciais, em que a segunda superfície se constitui como $r + dr$ (Lowrie, 2007, p. 260; Schmidt, 2013, Cap. II, loc. 461).

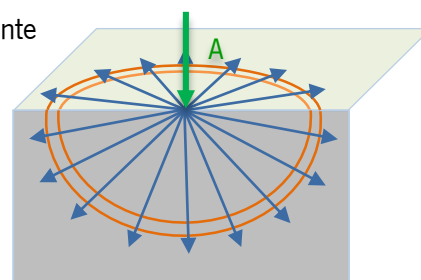


Figura 4- Representação gráfica, em corte horizontal e vertical, das linhas de campo eléctrico (a azul) e superfícies equipotenciais (a laranja) de um elétrodo de injeção de corrente (a verde), num meio homogéneo e isotrópico.

Considerando que a área de uma semiesfera é dada por:

$$A = 2\pi r^2$$

(E) 2

que, neste caso, a densidade de corrente j é dada por:

$$j = \frac{I}{A} = \frac{I}{2\pi r^2}$$

(E) 2.1

E que resistividade do meio condutor¹⁰ é dada por:

$$E = \rho j = \rho \frac{I}{2\pi r^2}$$

(E) 2.2

então, a diferença de potencial elétrico entre estas duas superfícies equipotenciais é, por integração:

$$dV = \frac{\rho I}{2\pi r^2} dr$$

(E) 2.3

(Lowrie, 2007, p. 260; Schmidt, 2013, Cap. II, loc. 477). Como se assume, como condição de fronteira, que em $r = \infty$ o potencial elétrico é 0, então podemos considerar que:

$$V_{\vec{r}} = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

(E) 2.4

por onde estabelece que o potencial elétrico de um ponto \vec{r} de um meio homogêneo e semi-infinito é inversamente proporcional à distância de r ao eletrodo de injeção de corrente, e que, portanto, quanto maior for a distância de r , menor será o potencial elétrico medido (Schmidt, , 2013, Cap.II, loc. 477; Santos F. , 2006, Cap. 3, p. 3). O campo elétrico de um único eletrodo pode ser considerado em polaridade positiva (*source*), caso em que o potencial elétrico V diminui com o aumento da distância r ,

¹⁰ (apresentada no Anexo I - (E)).

ou em polaridade negativa (*sink*), onde inversamente V aumenta na proporção em que r diminui (Lowrie, 2007, p. 261).

A partir destas considerações gerais do comportamento elétrico num solo homogêneo considerando uma fonte de corrente, pode estimar-se então o comportamento da corrente elétrica introduzindo um outro eletrodo.

Num perfil de resistividade realizado sobre um meio semi-infinito e uniforme, a corrente distribui-se lateralmente para cada um dos lados do perfil, atingindo uma profundidade de penetração que depende da capacidade de condução elétrica do meio e da disposição geométrica dos eletrodos (Lowrie, 2007, p. 262). Então, para um distanciamento L entre os eletrodos de injeção de corrente A e B , o campo elétrico tem um referencial geométrico inerente que, neste caso pode ser expresso através do sistema cartesiano de X , Y , e Z (Lowrie, 2007, p. 262; Schmidt, 2013, Cap., loc. 364).

Assim, quando se considera o potencial de energia (V) de um ponto \vec{r} no campo elétrico que se distribui entre dois eletrodos de injeção de corrente A e B , separados entre si por uma distância L , em que \vec{r} está a uma distância r_1 de A e a uma distância r_2 de B , em que num se acumulam as cargas positivas e no outro as negativas respectivamente, então:

$$V_{\vec{r}} = \left(\frac{\rho I}{2\pi r_1} \right) + \left(\frac{-\rho I}{2\pi r_2} \right) = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

(E) 3

onde para o ponto central de L , $V=0$; a distância radial a qualquer um dos eletrodos é dada por:

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} \quad (E) 4$$

onde i pode ser r_1 ou r_2 ; sendo x_2 , a sua posição tem que ser considerada como $x_2 = L - x_1$ (Schmidt, 2013, Cap. II, loc. 560) (Figura 5).

Segundo Schmidt (2013, Cap. II, loc. 560), para que se determine o potencial de energia de \vec{r} a uma dada profundidade z , é necessário que se considere a densidade de corrente inerente ao campo elétrico criado pelos elétrodos de injeção, A e B .

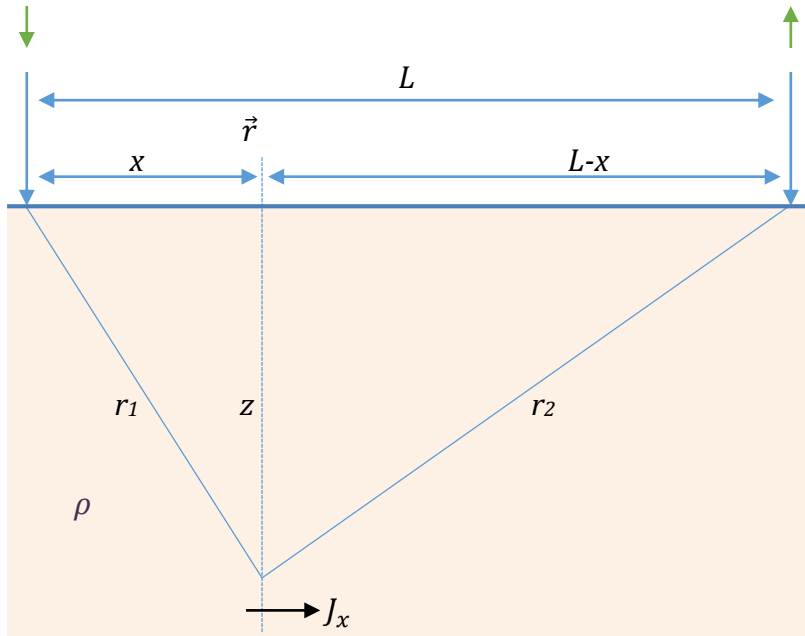


Figura 5 – Plano geométrico para a determinação da densidade de corrente $J_x(x, y, z)$ entre dois elétrodos num meio uniforme. Adaptado de Lowrie (2007, p. 263).

A densidade de corrente (\vec{j}) de \vec{r} é uma grandeza vetorial, cujas componentes vetoriais são dadas por:

$$\vec{j} = J_x \vec{i} + J_y \vec{j} + J_z \vec{k}$$

(E) 5

(Santos F., 2006, Cap.3, p.2), por onde se estabelece a densidade de corrente para \vec{r} a uma dada profundidade z em:

$$\vec{j} = \frac{I}{2\pi} \left[\left(\frac{x}{r_1^3} - \frac{(x-L)}{r_2^3} \right) \vec{i} + y \left(\frac{1}{r_1^3} - \frac{1}{r_2^3} \right) \vec{j} + z \left(\frac{1}{r_1^3} - \frac{1}{r_2^3} \right) \vec{k} \right]$$

(E) 5.1

(Santos F., 2006, Cap.3, p.2).

Consideremos que o ponto central da distância L tem as coordenadas cartesianas de $L/2, 0, 0$, em que, por $L/2$ ($x1=x2$ e $r1=r2$), num ponto com as coordenadas $x=L/2, y, z$, a densidade de corrente a uma determinada profundidade z é dada através de:

$$J_x = \frac{IL}{2\pi} \frac{1}{((L/2)^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}$$

(E) 6

(Lowrie, 2007, p. 263; Santos F., 2006, Cap.3, p.2); por onde se estabelece que em $L/2, 0, z$, o valor de j no eixo de z para cada um dos elétrodos terá a mesma magnitude em polaridade inversa, pelo que o fluxo neste ponto é inteiramente horizontal e idêntica a j_x (Schmidt, 2013, Cap.II, loc. 553). Se avaliarmos os resultados de (E) 6 redefinindo apenas a componente z do ponto, será possível observar que a taxa de variação da densidade é inversamente proporcional à profundidade (Santos F., 2006, Cap.3, p.2; Schmidt 2013, Cap. II, loc. 560).

A corrente horizontal dI_x ao longo de $dydz$ no meio do plano vertical é $dI_x = J_x dydz$ (Lowrie, 2007, p. 263). A fração de corrente I_x que atravessa o meio do plano acima da profundidade z é dada por integração:

$$\frac{I_x}{I} = \frac{L}{2\pi} \int_0^z dz \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dy}{((L/2)^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}$$

(E) 7

$$\frac{I_x}{I} = \frac{L}{\pi} \int_0^z \frac{dz}{((L/2)^2 + z^2)}$$

(E) 7.1

$$\frac{I_x}{I} = \tan^{-1} \frac{2z}{L}$$

(E) 7.2

por onde se demonstra que I_x depende do espaço intereletródico L (Lowrie, 2007, p. 263).

Pelo exposto, é possível considerar que a expressão da corrente entre A e B , num meio semi-infinito e homogéneo, assume uma forma semelhante à de um dipolo elétrico (Figura 6) (Lowrie, 2007, p. 263).

Pela natureza eletrolítica da corrente elétrica em meio terrestre, conjugada com o fato de

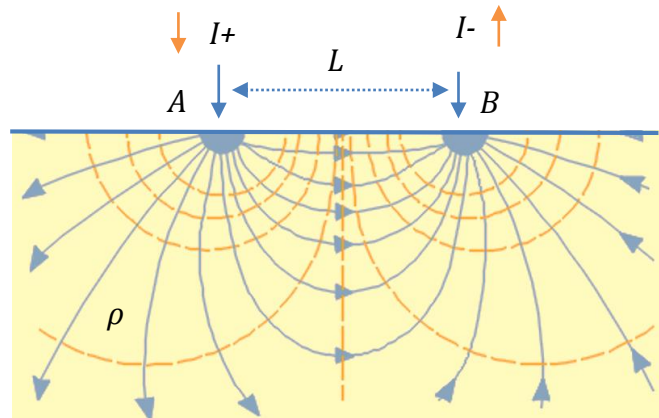


Figura 6 – Vista, em corte vertical, das linhas de campo (azul) e superfícies equipotenciais (a amarelo) entre A e B , num meio semi-infinito, homogéneo e isotrópico. Adaptado de Halliday et al. (2008, p. 633)

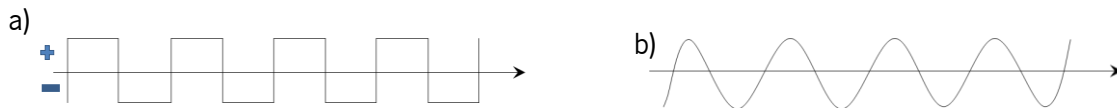


Figura 7 – Onda elétrica em a) corrente contínua com inversão de polaridade e b) corrente alternada. Adaptado de Schmidt (2013, loc. 407).

os elétrodos de injeção serem os terminais de condução de um meio semi-infinito, onde o limite é estabelecido pela superfície, sucede que os iões se concentram naturalmente nos respetivos pontos de injeção, criando nuvens de polarização também conhecidas por resistências de contacto, que acabam por determinar a interrupção da corrente elétrica (Schmidt 2013, Cap. II, loc. 405). Segundo Schmidt (2013), uma das formas utilizadas para evitar as resistências de contacto é a inversão constante da polaridade em corrente contínua (*Switch DC*), o que faz com que a corrente elétrica inverta/reverta a sua direção, sem contudo alterar a sua magnitude (Figura 7).

A utilização quer de comutadores de corrente contínua, quer de corrente alternada pode provocar indução, um fenómeno de polarização que ocorre na condução eletrolítica em rochas porosas (polarização de membrana) ou em rochas ou solos com presença de minerais metálicos (polarização de elétrodo) (Lowrie, 2007, p. 266)¹¹.

¹¹ Mais a este respeito pode ser consultado em Kiberu, (2002).

3.1.2.1 Arranjos eletródicos

O método de prospeção geofísica por resistividade elétrica baseia-se na avaliação da distribuição da corrente elétrica no subsolo, que realiza pela medição de diferenças de potencial elétrico entre elétrodos. Para este estudo, serão consideradas as técnicas de aquisição por elétrodos múltiplos, cuja constituição teórica se formula a partir das características de dispositivos de quatro elétrodos, dispostos numa dada geometria, onde um par (A e B) injeta corrente e o outro faz a leitura de potencial (M e N); os elétrodos em par funcionam, para as medições de resistividade no solo, como os extremos de um circuito elétrico (Loke, 1996-2004, p. 1; Schmidt, 2013, Cap.II, loc.486).

Os resultados das medições de resistividade dependem, em grande medida, das condições e características do meio geológico condutor, e em medida quase proporcional, da configuração geométrica dos elétrodos (Schmidt, 2013, Cap. II, loc. 461). Mais uma vez, os estudos que consideram os efeitos da disposição geométrica dos elétrodos são feitos sobre a preposição de que o meio condutor é semi-infinito, homogêneo e isotrópico (Lowrie, 2007, p. 262).

Considerando então os elétrodos de injeção A , com polaridade positiva e B , com polaridade negativa, a diferença de potencial medível nos elétrodos de leitura M e N será dada por:

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \right]$$

(E) 8

(Miranda et al., s/d, p. 140; Schmidt, 2013, Cap. II, loc. 622), a partir de onde se pode estabelecer a resistividade do meio:

$$\rho = 2\pi \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \right]^{-1} \frac{\Delta V}{I}$$

(E) 8.1

(Miranda et al., s/d, p. 141). O resultado das operações realizadas entre AM , BM , AN e BN , representa o fator geométrico k do dispositivo eletródico, medido em metros [m] pelo SI (Miranda et al., s/d, p. 141; Schmidt, 2013, Cap. II, loc. 622).

Segundo Schmidt (2013, Cap. II, loc. 633), os arranjos geométricos para pares eletródicos podem ser divididos, no fundamental, entre arranjos do *Tipo A* e arranjos do *Tipo B*.

Nos arranjos de *Tipo A*, a configuração eletródica caracteriza-se pela disposição dos elétrodos de leitura, *M* e *N* entre os elétrodos de corrente, *A* e *B* (Schmidt, 2013, Cap. II, loc. 633). São arranjos de Tipo A aqui considerados as configurações de *Wenner Alpha*, *Schlumberger* e *Wenner-Schlumberger* (Loke, 1996-2004, p. 4; Lowrie, 2007, p. 262; Schmidt 2013, Cap. II, loc. 633).

Nos arranjos de *Tipo B*, a configuração geométrica é determinada pelo posicionamento sequencial dos elétrodos de corrente e de leitura, intervalados entre si e entre pares por uma distância *a* e *na*, respectivamente (Schmidt, 2013, Cap. II, loc. 695). Dos arranjos de *Tipo B*, será aqui considerado o arranjo *Duplo Dipolo*¹².

No arranjo de *Wenner* (Figura 8), os quatro elétrodos estão dispostos em plano colinear, com um espaçamento equidistante, onde $b = 3a$, de forma que o fator geométrico, *k*, é a constante dada por $2\pi a$. A resistividade do meio ρ , para esta configuração, é dada por:

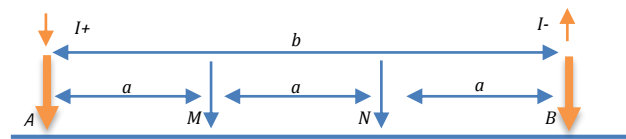


Figura 8 – Representação gráfica de um arranjo eletródico de *Wenner*, onde o valor de a é igual para todos os elétrodos. Adaptado de Schmidt (2013, loc. 633).

$$\rho = 2\pi \left[\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} \right) - \left(\frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right) \right]^{-1} \frac{\Delta V}{I}$$

(E) 9

Logo, pelo arranjo de Wenner,

$$\rho = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$$

(E) 9.1

(Lowrie, 2007, p. 262; Schmidt 2013, Cap. II, loc. 633). Este arranjo é sensível a alterações verticais na resistividade por baixo do centro eletródico, mas menos sensível às alterações horizontais (Loke, 1996-

¹² Mais a respeito de configurações eletródicas pode ser consultado, por exemplo, em Dahlin & Zhou (2004).

2004, p. 29). A profundidade atingida por este dispositivo é de aproximadamente 0.5 vezes o valor de a (Loke, 1996-2004, p. 29).

O arranjo *Schlumberger* é também simétrico e colinear em relação ao ponto central do dispositivo eletródico; os elétrodos de injeção A e B encontram-se a uma distância b , simétrica em relação ao ponto central do dispositivo, sendo que idealmente se deverá considerar a aproximação métrica segundo a qual $b \geq 5a$

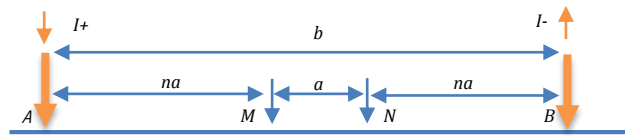


Figura 9 – Representação gráfica de um arranjo eletródico de *Wenner - Schlumberger*, Adaptado de Loke (1996-2004, p.4)

Os elétrodos de leitura, M e N , posicionam-se também em relação ao centro da configuração, com um espaçamento mais curto, a . Neste arranjo, o fator geométrico k é dado por $\pi/a \left[\left(\frac{b}{2} \right)^2 - \left(\frac{a}{2} \right)^2 \right]$ (Gandolfo, 2007, visto em Café, 2014, p. 36).

Assim, segundo a disposição geométrica deste arranjo, a resistividade é dada por:

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \left[\left(\frac{2}{b-a} - \frac{2}{b+a} \right) - \left(\frac{2}{b+a} - \frac{2}{b-a} \right) \right]^{-1} = \frac{\pi \Delta V}{4I} \left(\frac{b^2 - a^2}{a} \right) = \frac{\pi \Delta V}{4I} \left(\frac{b^2}{a} \right)$$

(E) 10

(Lowrie, 2007, p. 261; Schmidt 2013, Cap. II, loc. 678). Pela medição do campo elétrico que potencia ao centro do arranjo, este dispositivo apresenta boa resolução vertical e melhor resolução espacial que a avançada pelo dispositivo de Wenner (Okpoli, 2013, p. 12; Bhattacharya & Patra, 1968, p. 9).

O arranjo Wenner-Schlumberger é, segundo Loke, 1996-2004, um método híbrido, cuja disposição geométrica de espaçamento constante aglutina características dos dois arranjos que lhe dão nome. O fator geométrico deste arranjo, k , é dado por $\pi n + (n+1) a$, em

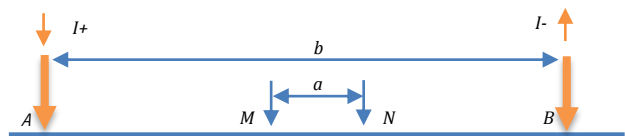


Figura 10 – Representação gráfica de um arranjo eletródico de *Schlumberger*. Adaptado de Schmidt (2013, loc. 633)

que n é dado pela razão entre o intervalo BM e o valor de a ; para aumentar a profundidade de investigação, o valor de n pode ser incrementado em razão integral até 6 vezes (Loke, 1996-2004, p. 29). Quando $n = 1$, o espaçamento entre AM , MN e NB é dado pelo mesmo valor, mimetizando assim as características do arranjo Wenner; quando o valor de n conhece um incremento acima de 2, este arranjo

passa a conhecer uma configuração de tipo Schlumberger (Geotomo Software, 2010, p. 58). Este arranjo tem uma boa cobertura horizontal e vertical, atingindo até mais 10% de profundidade que o arranjo Wenner (Loke, 1996-2004, p. 33).

O arranjo Duplo Dipolo, ou Dipolo-Dipolo, é uma configuração do tipo B, em que os elétrodos de corrente *A* e *B*, estão à distância *a* dos elétrodos de leitura *M* e *N*. O espaçamento entre *AB* e *MN* é definido por *a*,

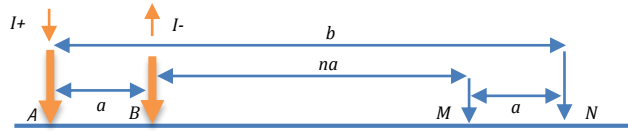


Figura 11 – Representação gráfica de um arranjo eletródico de Duplo Dipolo; Adaptado de Loke (1996-2004, p.4)

sendo a distância entre os pares, *na*, geralmente maior que *a* (Lowrie, 2007, p. 262). Neste arranjo *n* é, normalmente, um valor integral, que reflete a distância entre o primeiro elétrodo de injeção de corrente, *A*, e o primeiro elétrodo de leitura, *M*. (Geotomo Software, 2010, p. 55). Este valor, também conhecido por fator de separação do dipolo, pode conhecer um incremento integral até o máximo aconselhável de 6; acima de 6 estimam-se níveis muito elevados de ruído, uma vez que o valor do potencial medido em *M* e *N* é inversamente proporcional ao aumento de *n* (Geotomo Software, 2010, p. 55). O fator geométrico deste arranjo, *k*, é dado por $\alpha = \pi n + (n+1)(n+2) a$ (Loke, 1996-2004, p. 4). Segundo a disposição geométrica deste arranjo, a resistividade é dada por:

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \left[\left(\frac{1}{na} - \frac{1}{na-a} \right) - \left(\frac{1}{na+a} - \frac{1}{na} \right) \right] = \pi \frac{\Delta V}{I} \left(\frac{na(na^2 - a^2)}{a^2} \right)$$

(E) 11
(Lowrie, 2007, p. 262).

A escolha do arranjo deverá ter em consideração os objetivos e o pormenor que se pretendem atingir, assim como as características geomorfológicas do meio (Loke, 1996-2004, p. 24). A comparação entre arranjos deverá ter em consideração a profundidade de investigação, a sensibilidade do arranjo às alterações horizontais e verticais na resistividade do meio, à cobertura horizontal dos dados à força do sinal (Tabela 1)¹³.

¹³ Estes aspetos são amplamente discutidos. Entre vários artigos sobre este tema podem consultar-se Loke (1996-2004); Dahlin & Zhou (2004) e Okpoli (2013).

Tabela 1 - Comparação entre os arranjos de Wenner, Wenner-Schlumberger e Duplo Dipolo. Adaptado de Samouëlian et al. (2005, p. 182).

	Wenner	Wenner-Schlumberger	Duplo Dipolo
Sensibilidade para estruturas horizontais	++++	++	+
Sensibilidade para estruturas verticais	+	++	++++
Profundidade de investigação	+	++	+++
Cobertura horizontal de dados	+	++	+++
Força do sinal	++++	+++	+

Classificação de (+ = fraca sensibilidade) a (++++ = elevada sensibilidade).

A sensibilidade do arranjo e a profundidade de investigação são parâmetros que podem ser matematicamente avaliados pela mesma função (Loke, 1996-2004, p. 24). A função da sensibilidade avalia a influência das alterações na distribuição das resistividades da subsuperfície sobre o potencial elétrico, sendo a gradação do seu valor diretamente proporcional aos efeitos do meio sobre as medições (Figura 12) (Loke, 1996-2004, p. 24). A sensibilidade de um arranjo 2D é matematicamente avaliada pela derivada de Frechet:

$$F_{2D}(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(x-a) + y^2 + z^2}{[x^2 + y^2 + z^2]^{1.5} [(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{1.5}} dy$$

(E) 12

(Loke, 1996-2004, p. 28); no mesmo autor pode ser vista em detalhe a solução para esta equação, que é apresentada de forma analítica sobre integrais elípticas.

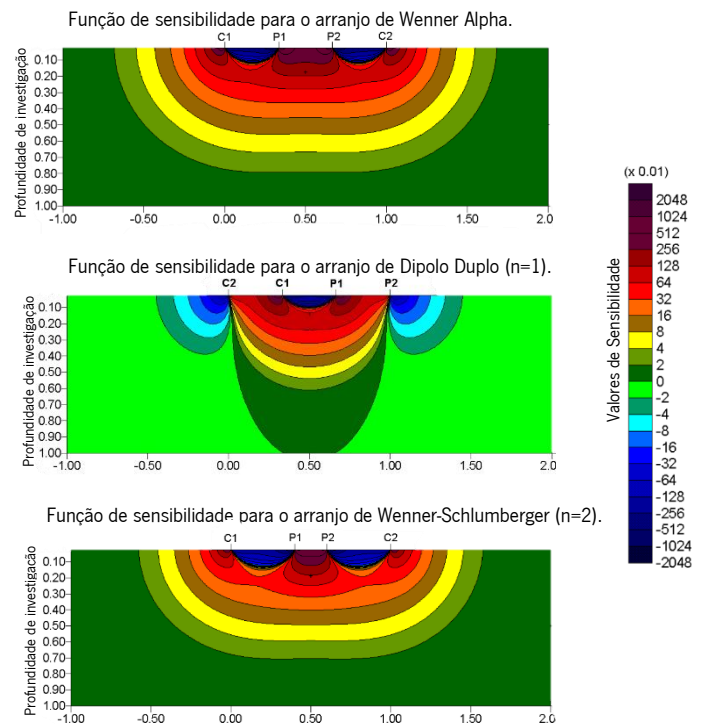


Figura 12 – Exemplos de secções de sensibilidade para os arranjos de *Wenner Alpha*, *Dipolo Duplo* e *Wenner-Schlumberger*. Adaptado de Loke (1999-2004, pp. 30, 32 e 34).

A força do sinal é um parâmetro inversamente proporcional ao fator geométrico do arranjo, k , sendo um fator relevante se o meio a avaliar contiver elementos que, pela sua natureza, possam introduzir ruído nos resultados da medição (Samouëlian et al., 2005, p. 181).

Os arranjos de quatro elétrodos referidos podem ser utilizados para a realização de perfis laterais ou de sondagens elétricas verticais¹⁴ (SEVs) em plano unidimensional, onde se observam em especial as variações horizontais (Lowrie, 2007, p. 262). Se conjugarmos vários perfis unidimensionais de uma determinada área, é possível mapear as suas variações horizontais, através da combinação de vários valores de resistividade numa dada secção de profundidade (Lowrie, 2007, p. 262).

Se considerarmos a utilização de sistemas multieletródicos sobre os princípios geométricos de medição atrás descritos, então, a imagem criada da distribuição de resistividades do subsolo diz-se 2D, produzindo informação quer sobre as variações horizontais, quer sobre as verticais, em proporção concordante com as características do arranjo selecionado (Samouëlian et al., 2005, p.180). Para que se configure um arranjo multieletródico, os elétrodos de corrente e de leitura são mantidos a uma distância fixa e constante ao longo de uma linha, ao longo da qual as medições vão sendo realizadas de forma progressiva, de acordo com a configuração do arranjo (Figura 13) (Samouëlian et al., 2005, p.180).

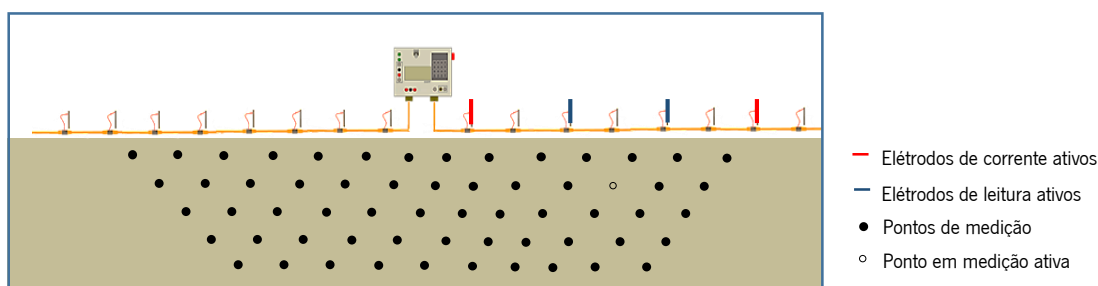


Figura 13 – Abstração gráfica de um sistema de aquisição multieletródico. Adaptado de Møller, Sørensen, & Auken (2006, p. 80) e de SYSCAL R1 PLUS Switch-48 (Brochure) – ©IRIS Instruments.

Um perfil 2D, também conhecido por sondagem elétrica vertical contínua (SEVC) utiliza, em metodologia combinada, aspetos relativos a técnicas de aquisição quer de perfis laterais, quer de SEVs; o sistema de aquisição requer então a disposição de um número amplo de elétrodos em linha, dispostos em intervalo regular, ligados por conectores a um ou mais cabos de núcleos múltiplos, por sua vez conectados a um

¹⁴ Mais a respeito das SEVs pode ser consultado, por exemplo, em Bhattacharya & Patra (1968).

aparelho de medição, o resistivímetro, que nas versões atuais estabelece, de forma automatizada, a ordem e a sequência de medição/leitura de potencial para cada par de elétrodos de acordo com a geometria pré-determinada (Møller et al., 2006, p. 79; Dahlin, 1996, p. 275). Os dados resultantes das medições são processados em *softwares* específicos, em forma algorítmica selecionada, cujo resultado se expressa, num primeiro momento pela constituição de pseudosecções.

Para efeitos deste estudo, só serão considerados perfis 2D.

3.1.2.2 Resistividade aparente e pseudosecções

Os exemplos que até este ponto se observaram foram considerados sobre a preposição de que o meio de condução fosse homogêneo e isotrópico. No entanto, as condições gerais de formação das camadas do subsolo estão naturalmente distantes desta preposição (Lowrie, 2007, p. 263). O subsolo é composto por elementos e estruturas não homogêneos, com interfaces e relações complexas, que determinam a variação dos valores de resistividade (Lowrie, 2007, p. 263). Cada valor de resistividade medido num meio heterogêneo constitui-se assim como a projeção de uma relação complexa entre a tridimensionalidade do meio e as suas características de condução/oposição à passagem de corrente elétrica, que por sua vez é parametrizada pela geometria do dispositivo eletródico (ver 3.1.2.2) (Piro, 2009, p. 39).

Nestas circunstâncias é introduzido então o conceito de resistividade aparente, ρ_a , medido em Ohms/metro [Ω/m] pelo SI (Piro, 2009, p. 39).

A resistividade aparente é uma medida qualitativa, que conjuga os padrões de distribuição de corrente em pseudopropriedade de forma a apresentar o valor esperado para esses parâmetros caso o meio condutor fosse homogêneo e isotrópico (Schmidt, 2013, Cap. 3, loc. 772; Samouëlian et al., 2005, p. 183).

Os dados resultantes de um perfil 2D de resistividade elétrica são constituídos numa imagem que representa a segmentação do modelo de resistividades do meio; a esta imagem dá-se o nome de pseudosecção (Loke, 1996-2004, p. 21). A pseudosecção não constitui uma representação real da subsuperfície, antes uma imagem aproximada da distribuição de resistividades sobre o meio; a geometria sobre a qual se constitui a segmentação das resistividades está diretamente dependente da relação entre

o arranjo eletródico e as resistividades efetivas do subsolo (Figura 14) (Loke, 1996-2004, p. 21). Desta forma, a imagem criada pelos valores de resistividade aparente sobre uma pseudosecção, constitui uma distorção do modelo efetivo do subsolo (Andrew et al. 1995, visto em Samouëlian et al., 2005, p. 183). A imagem que constitui uma pseudosecção devolve as variações horizontais e verticais das resistividades aparentes do meio, pelo que a profundidade de investigação expressa numa pseudosecção não é também a profundidade real, mas sim o resultado da relação entre a distribuição das resistividades efetivas e a configuração geométrica escolhida, pelo que recebe o nome de pseudopropriedade (Samouëlian et al., 2005, p. 180).

A Figura 14 representa pseudosecções de resistividade aparente sobre modelo de distribuição de resistividades simulado. Podem ser observadas as diferenças obtidas para cada arranjo específico.

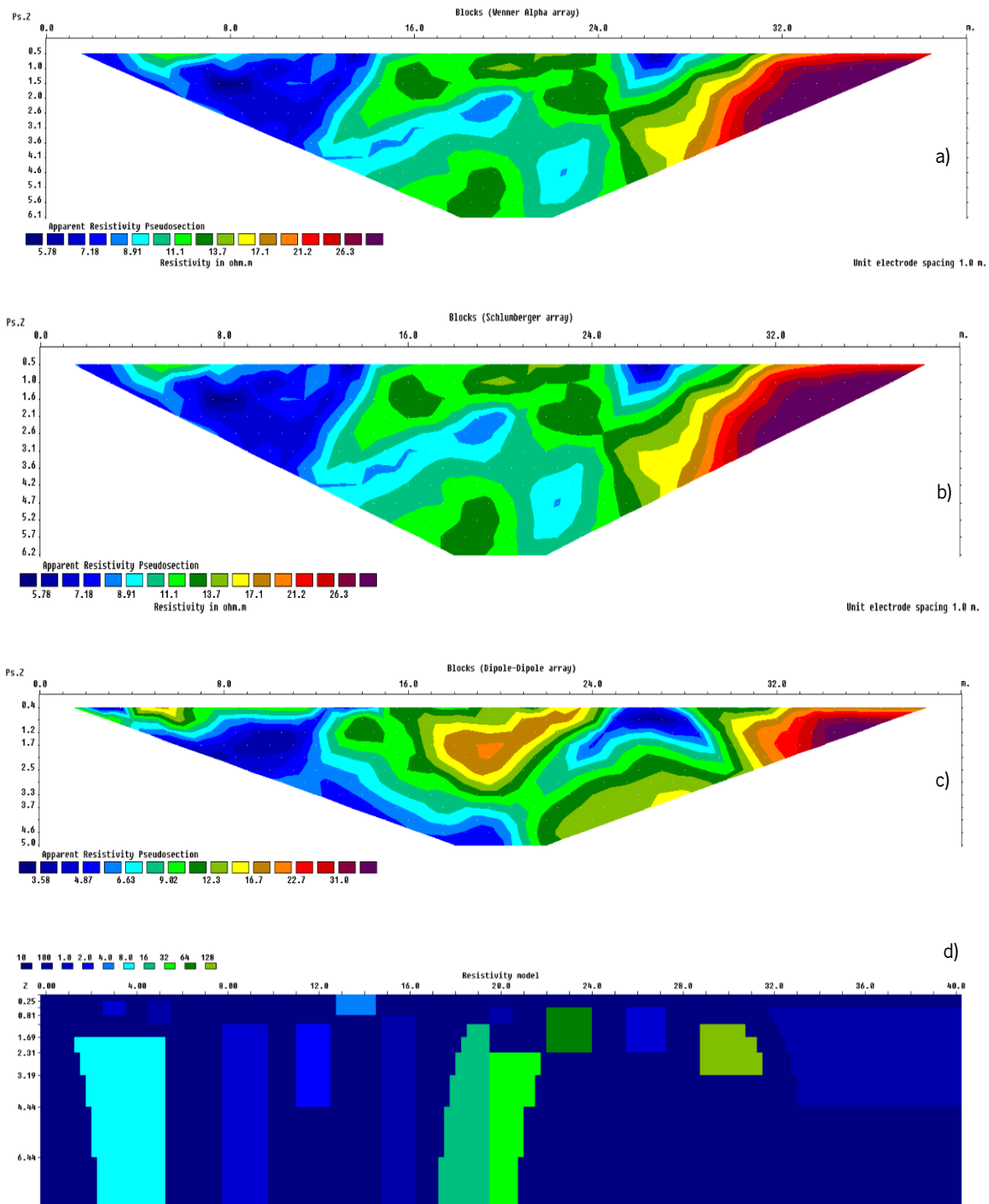


Figura 14 – Pseudoseções de resistividade aparente sobre modelo de distribuição de resistividades (d) simulado em ambiente RES2MOD (Mod41.mod), para os arranjos de a) *Wenner Alpha* ($a=12$), b) *Wenner-Schlumberger* ($a=12$, $n=1$) e c) *Dipolo Duplo* ($a=12$, $n=1$), para uma disposição de 41 elétrodos e espaçamento intereletrodico de 1 m. Note-se que, por $n=1$, as pseudoseções de a) e b) diferem apenas na pseudopropfundidade, tendo b) uma capacidade ligeiramente superior. O arranjo de que resulta c) é o que atinge a menor profundidade de investigação, apresentando contudo a maior capacidade para a resolução horizontal da distribuição. A segmentação foi computada por procedimento logarítmico. RES2MOD© Geotomo Software 2000-2014.

4. Análise de dados em prospeção geolétrica

4. ANÁLISE DE DADOS EM PROSPEÇÃO GEOELÉTRICA

Até este ponto centrámos a nossa atenção nas particularidades da aquisição de dados de resistividade, não obstante, sem interpretação, sem que se lhes atribua um significado e uma escala espacial, os dados geoeletricos tornam-se valores opacos, sem expressão contextual.

4.1 Tomografia por resistividade elétrica

A tomografia por resistividade elétrica, também conhecida pela sua correspondente sigla anglo-saxónica ERT (*Electrical Resistivity Tomography*) é uma forma de representação dos dados de resistividade por ferramentas do domínio da Imagiologia. A metodologia de que resulta a tomografia elétrica combina as técnicas de aquisição multieletródicas, realizadas segundo uma disposição específica, com ferramentas de computação analítica e gráfica para realizar uma composição volumétrica escalar da distribuição das resistividades na subsuperfície.

A maioria dos modelos tomográficos de resistividade são realizados sobre dados adquiridos em perfis 2D paralelos entre si com um intervalo regular, dispostos preferencialmente de forma perpendicular em relação às estruturas esperadas, de forma a possibilitar a interpolação dos pontos de resistividade aparente para a constituição de uma volumetria com intervalo de confiança, dita quase-3D (Tsokas et al., 2009, p. 95; Samouëlian et al., 2005, p. 181).

É também possível chegar à constituição de um ERT através da aquisição por sistema multieletródico em arranjo quadrático, contudo, esta metodologia é mais exigente quer do ponto de vista da aquisição de medições no terreno, quer do ponto de vista do processamento computacional dos dados recolhidos (Samouëlian et al., 2005; Dahlin, 2001, p. 1025). A aquisição de dados de resistividade neste sistema é dita 3D, no entanto, em resultado das especificidades técnicas que se prendem com esta metodologia serem mais morosas, esta técnica é normalmente preterida em prol da aquisição de perfis 2D paralelos entre si (Günther & Rücker, 2012, p. 33; Samouëlian et al., 2005; Dahlin, 2001, p. 1025).

A constituição do modelo e da imagem do modelo geofísico num ERT só se tornou possível via resolução do chamado problema inverso, que por sua vez esteve dependente do extraordinário avanço na capacidade de processamento computacional a que assistimos desde, grosso modo, meados do séc. XX.

4.1.1 INVERSÃO DOS DADOS PARA MODELAÇÃO

A constituição de um modelo geofísico de distribuição de resistividades é um processo analítico e interpretativo, onde se procuram relacionar os resultados obtidos com parâmetros físicos que lhes possam corresponder (Santos F. , 2006, Cap.8, p. 1), concretizando uma idealização matemática que pretende ser representativa de uma secção do subsolo (Loke1999-2004, p.12).

Neste sentido, a formulação de um modelo geofísico constitui um problema inverso, uma vez que se parte de um conjunto de valores físicos para a estimação dos parâmetros e fenómenos que possam justificar a ocorrência desses valores (Santos et al., 2014, p. 171). Assim, num problema inverso não conhecemos as condições de contexto, mas um conjunto de efeitos que delas derivam (Santos F. , 2006, Cap.8, p. 1). Por oposição, num problema direto, os efeitos são calculado a partir do conhecimento antecipado das condições de contexto (Figura 15) (Santos F. , 2006, Cap.8, p. 1; Santos et al., 2014, p. 172).

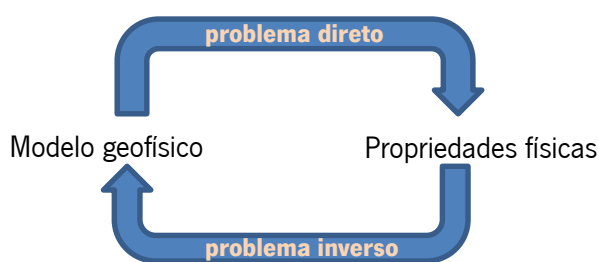


Figura 15 – Esquema da relação entre modelo/medições em problemas diretos e problemas inversos. Adaptado de Santos et al. (2014, p. 172).

A definição da “direção” do problema não depende, pois, da essência das propriedades físicas que se observam, tão pouco dos parâmetros definidos, mas sim da relação teórica colocada entre causa e efeito, que, neste sentido, é determinada pela perspectiva do observador (Velho, 2001, p. 63).

O problema inverso é, pela ótica matemática, um problema mal-posto¹⁵, uma vez que para ele não existe uma solução única e os seus dados correspondem, geralmente, a observações limitadas, ou finitas, (Velho, 2001, p. 64; Santos F., 2006, Cap. 8, p. 2-4). Num estudo geofísico o problema inverso é, regra geral, não-linear, podendo a sua dimensionalidade ser 1-D¹⁶, 2-D¹⁷ ou 3-D¹⁸ (Santos F., 2006, Cap.8, p. 2).

Os parâmetros do modelo geofísico representam os aspetos físicos que devem ser estimados em função dos dados observados. Sobre estes parâmetros são criados conjuntos de dados sintéticos, que resultam das relações matemáticas estabelecidas para a resolução do problema inverso; estes dados constituem o que é conhecido como a resposta do modelo (Loke M. , 1996-2004, p. 12). A resolução do problema inverso é portanto também um procedimento técnico de interpretação, que deverá ser encarado com a maior atenção, para que o modelo não resulte sobre-parametrizado¹⁹ ou sobre-ajustado²⁰ (Santos F. , 2006, Cap.8, p. 3).

A relação matemática entre os parâmetros e a resposta do modelo pode ser estabelecida através dos métodos de diferenças finitas ou elementos finitos, ou através da modelação pelo método dos momentos (Loke, 1996-2004, p. 12; Samouëlian et al., 2005, p. 185).

Passando por um procedimento de cálculo algorítmico bastante especializado, onde inicialmente se utiliza um modelo de condição inicial (*guess model*) que vai sendo atualizado interactivamente através de um procedimento de otimização para as observações iniciais, o resultado final deverá ser aquele que melhor corresponda à explanação dos dados observados (Figura 16) (Samouëlian et al., 2005, p. 185).

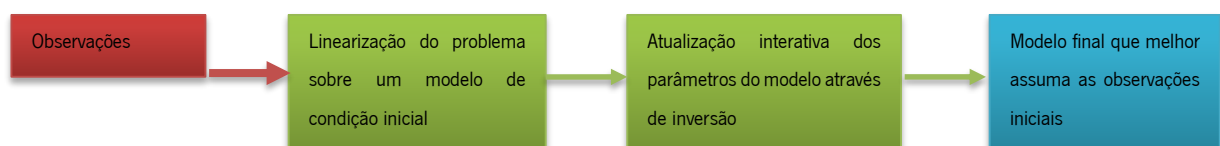


Figura 16 – Diagrama do esquema de modelação inversa interativa. Adaptado de Samouëlian et al.(2005, p. 185).

¹⁵ Segundo a definição de classes estabelecida para o assunto por Jacques Hadamard (Velho, 2001, p. 64).

¹⁶ A resistividade é função de z (Santos F., 2006, Cap.8, p. 2).

¹⁷ A resistividade é função numa secção vertical x, z (Santos F., 2006, Cap.8, p. 2).

¹⁸ A resistividade é função numa secção vertical x, y e z (Santos F., 2006, Cap.8, p. 2).

¹⁹ Um modelo diz-se sobre-parametrizado quando se procuram avaliar elementos que não se encontram representados no conjunto de observações iniciais (Santos F., 2006, Cap.8, p. 3).

²⁰ Um modelo diz-se sobre-ajustado quando inclui elementos que não representam as observações realizadas, mas antes os erros de construção do modelo, que podem estar relacionados com a definição da profundidade de investigação e com a sensibilidade do arranjo (Santos F., 2006, Cap.8, p. 3).

O modelo geofísico considera a distribuição das resistividades aparentes no meio através da discretização dos valores observados em unidades individuais, consideradas de acordo com as variáveis relevantes do meio (Samouëlian et al., 2005, p. 185).

O problema inverso pode ser resolvido de várias maneiras, devendo a solução ser robusta e estável (Santos et al., 2014, p. 175). A mais comumente utilizada em geofísica é a do método dos mínimos quadrados (Santos F., 2006, Cap.8, p. 9; Samouëlian et al., 2005, p. 185; Loke, 1996-2004, p. 12). A solução do problema inverso compreenderá um determinado grau de incerteza, pela essência das observações iniciais e dos erros que lhes possam estar associados, que, na opinião de Santos et al. (2014, p. 175) deve ser assumida e fornecida pelo Geofísico no seu estudo.

Segundo Samouëlian et al. (2005, p. 189), a inversão pode facilmente conduzir a equívocos ou ambiguidades pela possibilidade de oferecer mais do que uma solução para o mesmo conjunto de observações iniciais, pelo que, para o mesmo autor, deverá existir *à priori* um conhecimento relevante do meio que se pretende simular, sendo esse fator significativo para o procedimento de inversão²¹.

4.1.2 INTERPRETAÇÃO DE DADOS EM TOMOGRAFIA POR RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A interpretação de dados arqueológicos em tomografia elétrica é um processo difícil, intrincado, que subjaz na qualidade do contraste resultante da complexa relação entre o(s) elemento(s) arqueológico(s) e o seu contexto geológico imediato.

O objetivo de um ERT, quando aplicado a contextos geológicos onde se esperam existir elementos arqueológicos, é o de identificar anomalias de resistividade cuja escala e distribuição espacial façam sentido no quadro das assunções arqueológicas existentes para a área prospectada.

Santos et. al (2014, p. 173) definem anomalia como “ a diferença entre o valor observado e o valor considerado normal”, ou seja, e como pode ser visto na literatura da especialidade, a consideração de uma anomalia resistiva ou condutiva num ERT advém da força da diferença escalar presente entre duas

²¹ A resolução do problema inverso em geofísica é matematicamente complexa e poderá ser consultada em maior detalhe em Loke (1996-2004) ou em Santos et al.(2014).

realidades com capacidade de condução eletrolítica distintas, expressa graficamente pelo contraste existente entre os seus interfaces (Schmidt, 2009, p. 69).

Como referimos em 4.1 e em 4.1.1, uma larga fatia das tomografias por resistividade elétrica que atualmente se realizam resultam de inversões obtidas de perfis 2D equidistantes. Ora, a interpolação dos perfis 2D para a constituição de volumes tridimensionais pode conduzir à composição de artefactos escalares²², resultantes de desajustes na inversão de cada perfil 2D ou dos próprios resultados da interpolação volumétrica, já que, por este método, se chega à constituição de um volume a partir de superfícies biplanares (Tsokas et al., 2009, p. 95).

Normalmente com uma escala menor que a das ocorrências geológicas, os elementos arqueológicos quando identificados num ERT dizem-se anomalias de contraste negativo, se mais condutivos que a matriz deposicional envolvente, ou anomalias de contraste positivo, se se revelarem mais resistentes que a envolvente (Schmidt, 2009, p. 70). A força do contraste depende, em grande medida, das condições meteorológicas no período da aquisição dos dados, que por sua vez têm uma grande influência sobre o teor de humidade dos constituintes do subsolo, fundamental para que haja condução eletrolítica (Schmidt, 2009, p. 70). Para que o contraste entre estruturas arqueológicas e a sua envolvente seja claro num ERT o teor de humidade deve estar equilibrado, uma vez que o contraste se reduz visivelmente em terrenos muito secos e, de igual forma, se anula se estes estiverem saturados com água (Schmidt, 2009, p. 70).

A interpretação arqueológica de dados provenientes da prospeção geoeletrica, assim como de outros métodos geofísicos, embora fundamentada por uma extensa base teórica e uma metodologia cientificamente validada, é sempre um processo subjetivo na atribuição do significado. É pois necessário que o arqueólogo que interpreta os dados compreenda a forma estrutural pela qual foram adquiridos e a lógica algorítmica pela qual estes foram transformados em imagem, ou volume. Este é um aspeto que consideramos fundamental e que muitas vezes carece de clarificação: as imagens obtidas por ERT têm por objetivo primeiro a demonstração visual da distribuição de resistividades na subsuperfície e não a identificação de elementos arqueológicos: a deteção de anomalias de resistividade/conductividade que se

²² Num ERT, os artefactos resultam das discrepâncias que podem decorrer da extrapolação matemática de um volume 3D a partir da inversão de dados 2D (Nimmer et al., 2008, p. 59). Tsokas et al. (2009, p. 95) sugerem que, para que se reduzam os artefactos visuais, os perfis se implementem em duas orientações distintas, X e Y, ou que se apliquem algoritmos de inversão 3D aos dados obtidos em 2D.

faz a partir desta leitura inicial é o que verdadeiramente nos pode conduzir, de forma indireta, à proposição da presença de elementos de valor arqueológico no subsolo.

4.2 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE ERTs COM RECURSO A FERRAMENTAS DE VISUALIZAÇÃO E COMPUTAÇÃO GRÁFICA

São várias as ferramentas de computação gráfica que podem ser utilizadas para visualizar e analisar as pseudosecções ou volumes escalares que resultam da inversão dos dados de resistividade elétrica. *Res2Inv*²³, *ZondRes2D*²⁴ ou *ERTLab*²⁵ são alguns dos programas atualmente disponíveis do mercado para visualização e inversão de dados provenientes de prospeção geoeletrica.

As imagens ou volumes criados após o procedimento de inversão são ditos escalares, ou seja, são triangulados a partir de pontos com coordenada tridimensional (x, y, z) que armazenam um valor na escala real que serve à segmentação da imagem (d). A segmentação da imagem é realizada pela constituição de isosuperfícies - entidades gráficas tridimensionais que representam a agregação de valores de magnitude semelhante num volume espacial, ou seja, “níveis constituídos por uma função contínua, cujo domínio é um espaço 3D”²⁶.

Estes programas são fundamentais para o procedimento de análise e inversão. Contudo, a pseudosecção ou o volume escalar que resultam deste processo podem ser analisadas noutros contextos de processamento de imagem, nomeadamente através de aplicações de visualização multiplataforma em código aberto, como o *ParaView*²⁷, o *VolView*²⁸ ou através de livrarias de código para sistemas de software, como o VTK- *The Visualization Toolkit*²⁹.

²³ © Geotomo Software

²⁴ © Zond Software

²⁵ © Multi-Phase Technologies, LLC

²⁶ Definição consultada em Latham (1991, p. 70). Tradução da autora.

²⁷ © 2005-2008 Sandia Corporation, Kitware Inc.

²⁸ ©1999-2011 Kitware, Inc. All rights reserved.

²⁹ © 1993-2008 Ken Martin, Will Schroeder, Bill Lorensen. All rights reserved.

Os dados resultantes das inversões podem ser exportados para formatos numéricos, em coordenada com valor escalar (x, y, z, d), em formato *comma separated values (.csv)* ou texto (*.txt*), para que sejam utilizados pelas aplicações de código aberto para a modelação tridimensional. Uma outra possibilidade é de exportar diretamente o volume escalar criado no software de inversão para um formato gráfico compatível com as aplicações de código aberto, como a extensão de *VTK Legacy Files (.vtk)*. Constituído o volume escalar, os dados podem ser analisados com recurso a um vasto conjunto de ferramentas de segmentação e filtragem, que podem constituir-se como instrumentos valiosos para a visualização de anomalias com potencial arqueológico, muitas vezes mascaradas pelos fenómenos geológicos envolventes ou pelo ruído que este possam causar.

Neste trabalho abordaremos em maior detalhe as possibilidades da utilização do ParaView© para análise de tomografias por resistividade elétrica.

5. ESTUDOS DE CASO

5. ESTUDOS DE CASO

5.1 CASTRO DE SAPELOS (BOTICAS, PORTUGAL)

O Castro de Sapelos localiza-se no concelho de Boticas, distrito de Vila Real, no limite SE do vale superior do rio Terva (Figura 17).

O vale superior do rio Terva pertence ao contexto geológico do segmento Varisco do Noroeste Peninsular, mais concretamente à zona paleogeográfica da Galiza-Trás-os-Montes (Pereira & Rodrigues, 2010, p. 18).

O Castro de Sapelos encontra-se implantado sobre o topo e vertente de um relevo

montanhoso que, na bordadura do vale, se encontra na transição entre a Serra de Lapabar e a Serra da Pastoria. O *plateau* da cumeada é atravessado por veios de quartzo, que afloram em orientação NNE-SSW, em concomitância com a direção da falha Régua-Verin (Martins, 2009, p. 192). Os solos de Sapelos são compostos por depósitos graníticos pouco espessos, que, de modo geral, são compostos por areias de alteração granítica, com blocos e calhaus de quartzo envoltos na massa. Os veios de quartzo encontram-se estratificados em sistema *Pinch and Swell* (Pereira & Azevedo, 2014, p. 3).

O vale superior do rio Terva constitui uma paisagem cultural integrada, que tem sido palco, desde 2010, de um amplo programa de investigação multidisciplinar enquadrado, entre 2010 e 2013, pelo *Projeto de Estudo, Conservação, Valorização e Divulgação do Complexo Mineiro Antigo do Vale Superior do Rio Terva, Boticas* (Fontes et al., 2013; Fontes & Alves, 2014) e, desde 2013, pelo projeto *Povoamentos e*

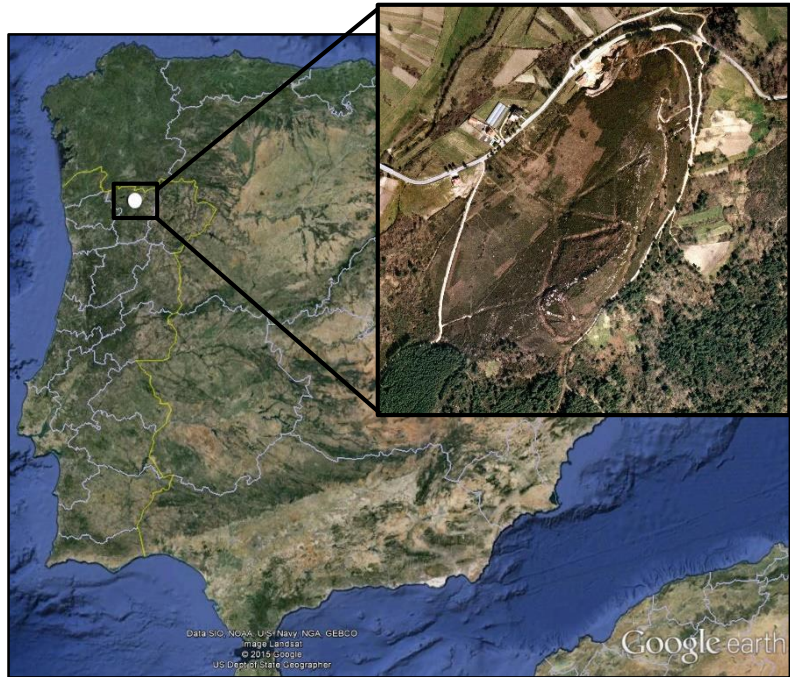


Figura 17 – Localização do Castro de Sapelos no contexto geográfico do Noroeste Peninsular. ©Google

Paisagens no Vale Superior do Rio Terva, Boticas (PoPaTERVA 2013-2016) (Fontes & Alves, 2014, p. 116).

O Castro de Sapelos faz parte do conjunto de nove povoados fortificados identificados, até à data, nos limites montanhosos do vale superior do rio Terva (Fontes & Andrade, 2010). Esta moldura de ocupação, associada, grosso modo, à Idade do Ferro no seu espectro cronológico mais lato, constitui, ainda hoje, um dos mais evidentes marcadores de paisagem do vale do Terva.

Esta pequena área, com uma expressão inferior a 70 km², parece ter conhecido um aumento exponencial da sua população ao longo da Idade do Ferro, a julgar pela implantação e desenvolvimento de comunidades nas vertentes que delimitam a veiga, a meia altitude; a ênfase posta no aumento da ocupação do território para este período cronológico é aqui dada não só pela comparação com os elementos conhecidos de povoamento em épocas anteriores, como pelo elevado rácio entre povoados tipologicamente associados à Idade do Ferro e área disponível, se considerarmos que, em algum momento deste período, estas comunidades possam ter coabitado num território pequeno e delimitado por uma morfologia da paisagem circunscrita por barreiras naturais. O aumento de assentamentos nesta fase parece-nos estar associado aos recursos minerais existentes no vale, nomeadamente aos auríferos, que serão explorados, de forma intensiva, no período crono-cultural seguinte (Fontes et al., 2013; Fontes & Alves, 2014).

Os fenómenos do povoamento da Idade do Ferro neste vale são alvo de interesse científico desde os anos 70, pela mão de Santos Júnior, que lhes dedicou na década seguinte, bem como aos restantes castros do concelho de Boticas, um estudo pioneiro (Júnior et al., 1983; Júnior et al., 1986). Atualmente, os processos de povoamento e marcação da paisagem na Idade do Ferro servem de temática de investigação a Bruno Delfim Osório, no âmbito da sua dissertação de Mestrado em Arqueologia³⁰.

O Castro de Sapelos, coroando a entrada Nascente do vale de quem vem por Sul, destaca-se pela sua posição e, sobretudo, pela rara conformação geométrica que lhe é imposta por um conjunto articulado

³⁰ Bruno Osório é, à semelhança da signatária, bolseiro de investigação da Unidade de Arqueologia da Universidade do Minho, afeto ao projeto PoPaTERVA 2013-2016. Atualmente desenvolve investigação aplicada ao conhecimento da Idade do Ferro, intitulada “Os Povoados Fortificados da Idade do Ferro no vale superior do rio Terva”, com vista à obtenção de grau de Mestre em Arqueologia pela Universidade do Minho.

de grandes fossos, que envolvem o povoado numa configuração complexa, tendencialmente triangular, que converge para um esquema deltoide na vertente poente (Figura 18) (Osório & Guerreiro, 2015, p. 188). A área de assentamento do castro é definida por duas linhas de muralha, uma que define o entorno da plataforma superior e uma outra que parece limitar o povoado numa cota mais baixa, em relação com o sistema de fossos (Osório & Guerreiro, 2015, p. 188). No estudo que atualmente desenvolve, Bruno Osório categoriza o Castro de Sapelos, relativamente à tipologia formal do sistema de muralhas e à morfologia dos

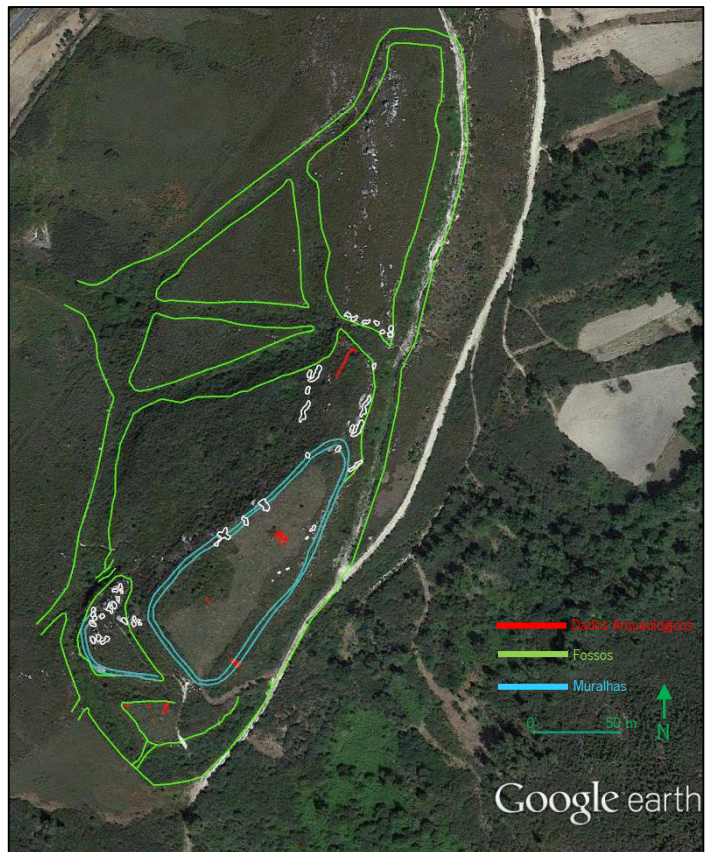


Figura 18 – Levantamento topográfico interpretado do Castro de Sapelos. Direitos reservados UAUM (vetor). Base ortofotográfica: ©Google.

componentes de defesa, como sendo de Tipo II - B (Osório & Guerreiro, 2015, p. 188).

A complexidade das modalidades de assentamento do povoado, visíveis de forma imediata na expressão de um sistema defensivo bastante sofisticado e completamente distinto dos demais povoados fortificados do vale, realçou a necessidade de entender, em maior detalhe, a dispersão e modalidades relativas à habitação comum, pelo que foi realizada, em toda a extensão da plataforma superior, prospeção geofísica destinada à obtenção de uma imagem tomográfica por resistividade elétrica (Alves et al., 2015, pp. 95350T-3). Os resultados da prospeção geofísica realizada assessoraram o desenvolvimento do programa de estudo arqueológico do castro, que incluiu o desenvolvimento de sondagens de avaliação arqueológica, desenvolvidos entre 2014 e 2015, estando programada uma nova campanha para 2016, no âmbito do projeto PoPaTERVA 2013-2016 (Fontes et al., 2015).

Os resultados das campanhas arqueológicas de 2014 revelaram a existência, no centro da plataforma superior, de um edifício de habitação de planta circular, coberto por um volume pouco espesso de sedimentação, cuja morfologia e disposição se constituía como uma anomalia microtopográfica, indiciadora da presença de edificações (Fontes et al., 2015, p. 11). Foi possível também identificar e

caracterizar um troço da primeira linha de muralha. O contexto arqueológico registado nas duas campanhas já realizadas aponta para uma utilização do espaço entre os séculos II a.C. e I d.C (Fontes et al., 2015, p. 13).



Figura 19 – Aspeto das estruturas de a) habitação comum e b) pano de muralha, identificadas na campanha arqueológica realizada no Castro de Sapelos em 2014. Direitos reservados UAUM.

5.1.1 METODOLOGIA

A aquisição de dados de resistividade elétrica foi realizada por Bruno Pereira, João Azevedo, Jorge Oliveira e Celso Silva, geólogos da Sinergeo, Lda., após discussão de abordagem metodológica com a equipa de arqueologia, tendo os trabalhos de prospeção geofísica decorrido ao longo do mês de Julho de 2014.

Foi implantada uma grelha de aquisição de resistividades (Figura 20), composta por 37 perfis latitudinais, em eixo de x, com equidistância de 4 m e espaçamento intereletródico de 1m, e por 5 perfis longitudinais, em eixo de y, com equidistância de 10 m e espaçamento intereletródico de 1 m (Pereira & Azevedo, 2014, p. 4).

Os perfis foram numerados de acordo com a ordem de aquisição no terreno. Foi utilizado o resistivímetro Syscal R1Plus³¹, num esquema multieletródico composto por 72 elétrodos em arranjo de *Wenner-Schlumberger* (Pereira & Azevedo, 2014, pp. 4-5). De acordo com o arranjo multieletródico estabelecido, os dados foram adquiridos a partir de 0.5 m de profundidade, tendo alcançado uma profundidade estimada de 4m.

Os testes de contacto (*RS Check*) realizados para cada perfil revelaram valores acima do ideal, pelo que se humedeceu o solo com água salgada na envolvente dos elétrodos, uma técnica utilizada para reduzir as resistividades de contacto (Tsokas et al., 2009, p. 98).

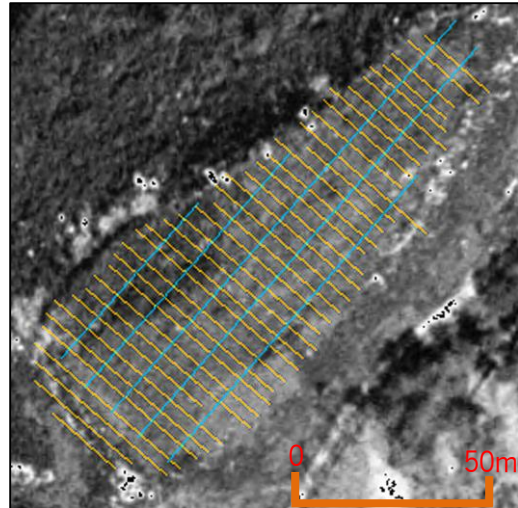


Figura 20 – Grelha de implantação dos perfis de resistividade. A amarelo encontram-se assinalados os perfis em eixo de X e a azul os realizados em eixo de Y. Adaptado de (Pereira & Azevedo, 2014, p. 4) Base ortofotográfica: ©Google.

5.1.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS DE RESISTIVIDADE

Depois da aquisição, os dados de resistividade foram processados em Res2Inv³². Foi utilizado um algoritmo de inversão que utiliza método de mínimos quadrados com suavização restrita (*smoothness-constrained least-squares method*), desenvolvido a partir dos trabalhos de deGroot-Hedlin & Constable (1990), Sasaki, (1992) e Loke et al. (2003). Este método é matematicamente definido pelo seguinte (Geotomosoft Solutions; Geotomo Software PTY Ltd., 2015):

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T g - \lambda F q_k$$

(E) 13

$$\text{onde } F = \alpha_x C_x^T C_x + \alpha_z C_z^T C_z$$

(E) 13.1

em que C_x = aos filtros de asperidade horizontal (*horizontal roughness*),
 C_z = filtros de asperidade vertical (*vertical roughness*),

³¹ ©Iris Instruments

³² ©Geotomo Software

J = matriz jacobiana de derivadas parciais,

J^T a transposição de J ,

λ = fator de amortecimento (*damping factor*),

q = vetor de mudança do modelo,

g = vetor de desajuste dos dados,

Segundo os seus autores, o procedimento de otimização proporcionado por este método tende a reduzir a diferença entre os valores de resistividade aparente medidos e os que são calculados, fazendo-se o ajuste da resistividade dos blocos do modelo através dos filtros de suavização restrita, com um número variável de iterações da rotina de inversão, que normalmente deve processar-se entre 3 e 5 vezes (Figura 21) (Geotomosoft Solutions; Geotomo Software PTY Ltd., 2015). A diferença entre a resistividade aparente medida e a calculada é dada pelo erro do valor eficaz (*Root Mean Square – RMS*); a existência de um erro de valor eficaz muito baixo deve ser considerada com atenção, uma vez que não traduz necessariamente o melhor modelo de representação dos fenómenos geológicos e pode introduzir variações irrealistas no modelo (Geotomo Software, 2010). Uma solução que os autores consideram prudente é a da escolha de um erro de valor eficaz que seja coerente com o apresentado entre a 3ª e a 5ª iteração do modelo, porque se assume que o erro esteja estável nesta fase de processamento (Geotomosoft Solutions; Geotomo Software PTY Ltd., 2015).

Uma das vantagens apresentadas para o método de mínimos quadrados com suavização restrita reside na possibilidade de se ajustarem os filtros do fator de amortecimento e os de asperidade para responderem a diferentes tipos de dados (Geotomosoft Solutions; Geotomo Software PTY Ltd., 2015). O fator de amortecimento ou de Marquardt, como também é conhecido, aplica uma restrição sobre o intervalo de valores parametrizado por Δq , sendo estabelecido inicialmente no algoritmo $E(13)$ e depois reduzido de forma automática para menos metade depois de cada iteração; os autores do *software* aconselham a que se utilize um fator de amortecimento com uma proporção adequada ao ruído apresentado no conjunto de dados: assim deverá usar-se um fator de amortecimento mais amplo para dados com maior grau de ruído (por exemplo 0.3) e mais reduzido para dados em que o ruído é igualmente menor (por exemplo 0.1) (Geotomosoft Solutions; Geotomo Software PTY Ltd., 2015; Loke M. , 1996-2004, p. 13). No caso concreto do levantamento do Castro de Sapelos, o fator de amortecimento inicial foi definido em 0.15 e o mínimo em 0.02.

O processamento realizado para os perfis de Sapelos integrou a correção topográfica dos modelos de inversão.

Um dos aspetos imediatamente visíveis nos dados de Sapelos foi o facto de os valores de resistividade aparente se apresentarem muito elevados, como consequência da natureza litológica do substrato e dos depósitos, com uma forte percentagem de quartzo, um dos minerais mais resistentes, com índices que se aproximam dos $4 \times 10^{10} \Omega\text{m}$ (Telford et al., 1990, p. 287). A forte presença de quartzo criou um efeito máscara, devido ao ruído que introduziu sobre as leituras, mais evidente na imagem tomográfica, de que falaremos em detalhe no ponto seguinte.

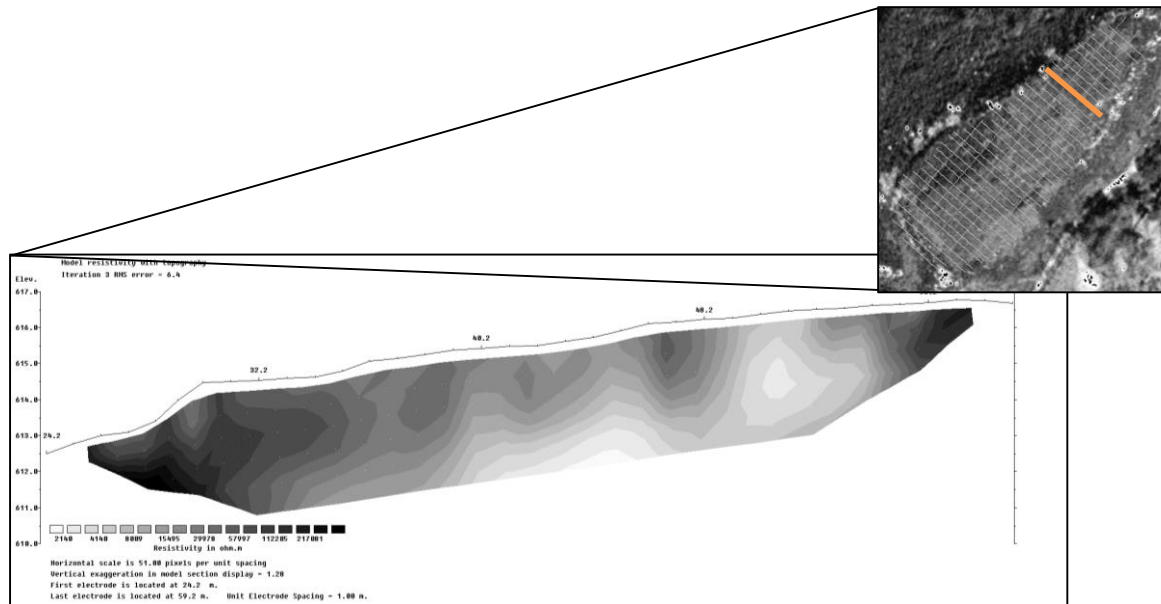


Figura 21 – Inversão do perfil de resistividades 1 do Castro de Sapelos em Res2Inv, com um valor de RMS de 6.4. Dados reservados Sinergeo, Lda. e UAUM.

5.1.3 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS VOLUMES ESCALARES DE RESISTIVIDADE

A inversão dos perfis 2D foi tratada para obtenção de isovolumetria escalar em ambiente Voxler® pela equipa da Sinergeo, Lda., através da conversão dos modelos de inversão para um ficheiro alfanumérico composto pelas coordenadas tridimensionais (X, Y, Z) e escalar (resistividade) (Pereira & Azevedo, 2014, p. 15). Foi utilizado o método do Inverso da Distância das Potências (*Inverse Distance to a Power*) para a construção do modelo de isosuperfícies, mantendo o volume dentro dos limites mínimos e máximos dos valores iniciais, permitindo também a especificação do valor de anisotropia (GoldenSoftware, 2015). Este método pressupõe a criação de isovolumes através de *gridding*, um processo que cria os volumes através da interpolação de isosuperfícies sobre uma matriz de composição estruturada, onde a relação de X, Y e Z é sempre cúbica e equipotencial.

Ora, o levantamento realizado no Castro de Sapelos tem uma geometria de fronteira poligonal, pelo que o método de *gridding* automaticamente estabelece valores de coordenada para o espaço que se cria entre a fronteira dos dados e o limite cúbico escalar, utilizando os valores escalares do limite dos dados para realizar a extrapolação aos limites do cubo. Uma das possibilidades avançadas por alguns autores para contornar esta situação passa por atribuir, ainda na base de dados X, Y, Z, Ω , os valores de coordenada física para o espaço entre o limite de dados e o espaço cúbico necessário para os enquadrar, atribuindo valor de NoData ou de 0 às coordenadas escalares destes pontos, criando o que chamam de *dummy readings* (Schmidt, 2013, Cap.VI, loc. 1946). Neste estudo de caso, não tivemos oportunidade de realizar esta filtragem numérica, face ao número elevado de dados que seria necessário processar, em relação com o tempo disponível que tínhamos ao dispor, pelo que fizemos a análise do cubo escalar criado automaticamente de forma estruturada, utilizando para enquadramento a posição dos pontos de aquisição na composição de linha visual (Figura 22).

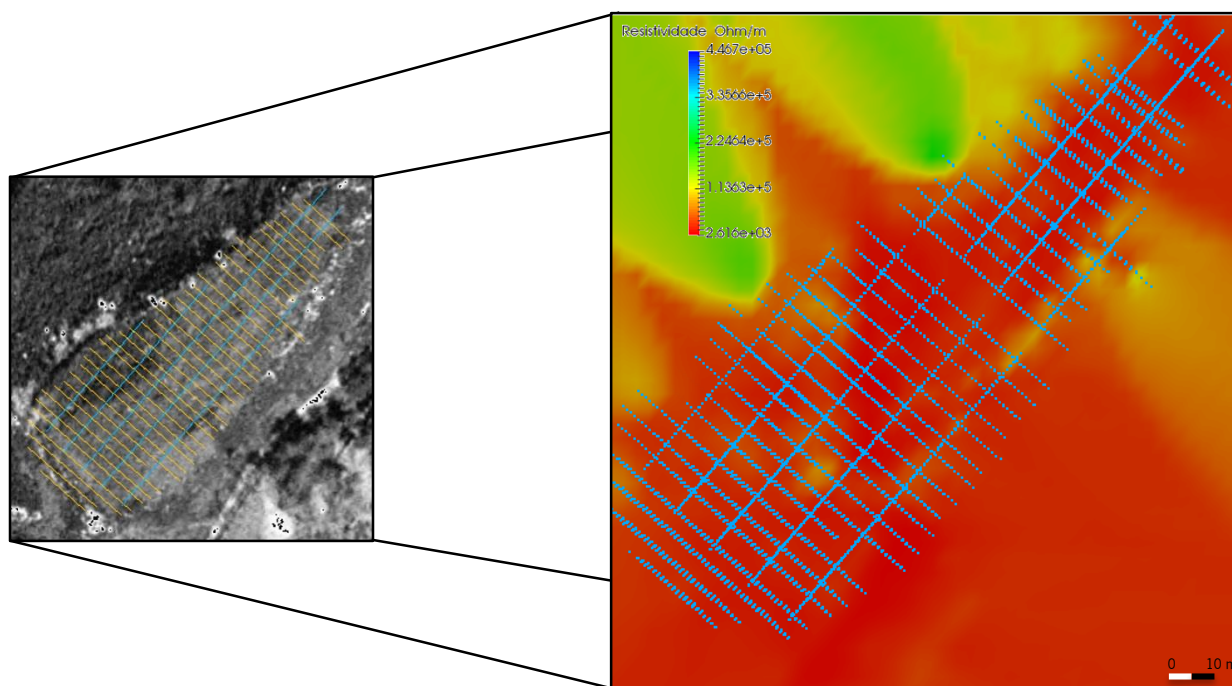


Figura 22 - Aspeto inicial do volume tomográfico de resistividades. Mantivemos, na composição visual, a localização dos pontos de aquisição. ©Paraview.

A criação do isovolume permitiu-nos então realizar uma análise da distribuição de resistividades na subsuperfície do Castro com o objetivo de identificar anomalias concomitantes com estruturas

arqueológicas. Este processo de análise e filtragem foi realizado, para esta dissertação, em ParaView®, sobre a base de isovolume em extensão *VTK Legacy Files*³³.

A primeira questão com que nos confrontámos foi com os índices muito elevados de resistividade do modelo, introduzidos pela abundância de quartzo na matriz geológica do sítio, que funcionaram como uma máscara de ocultação de anomalias mais pequenas e com menos contraste e, portanto, mais suscetíveis de representarem elementos com interesse arqueológico (Figura 22).

O primeiro passo que demos no sentido de reduzir graficamente o ruído criado pelo quartzo foi da segmentação da informação escalar em níveis de classes. Para perceber quais as classes de maior valor para o estudo arqueológico, começámos por cruzar a informação escalar com pontos X,Y,Z onde, à superfície, se identificaram vestígios de ruínas para as quais era expectável existir alguma continuidade vertical, na pretensão de que esta interseção pudesse proporcionar a identificação de *clusters* de interesse arqueológico (Alves et al. 2015). Através deste cruzamento de dados, definimos o valor superior de resistividades entre $2.900e+04$ Ohm/m e $2.700e+04$ Ohm/m, chegando ao volume que compõe a Figura 23. Nesta Figura são já visíveis, em nossa opinião, várias anomalias de resistividade que, pela

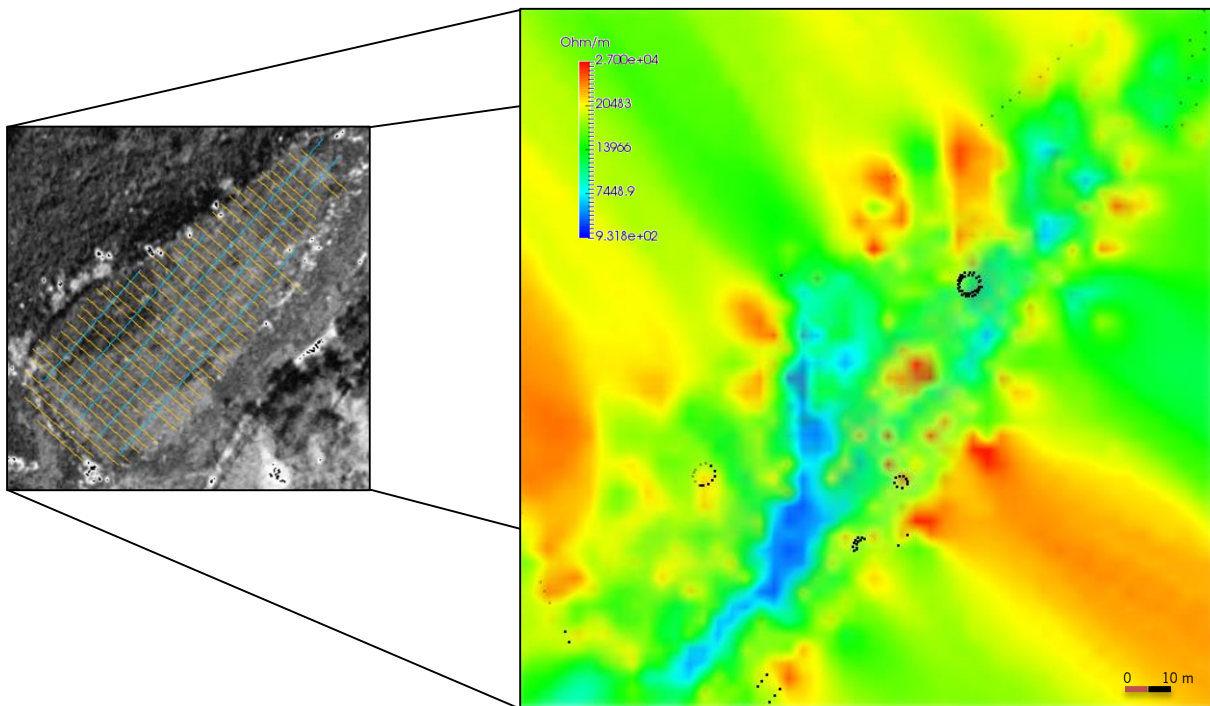


Figura 23 - Aspeto do volume tomográfico, depois de se ter estabelecido 27 000 Ohm/m para limite superior de resistividades. A preto encontram-se assinalados os pontos relativos a vestígios arqueológicos visíveis. ©ParaView.

³³ Num outro contexto, conduzimos, em coautoria com Paulo Bernardes, Luís Fontes, Manuela Martins e Joaquim Madeira, uma primeira abordagem ao tema da visualização e interpretação de anomalias de interesse arqueológico em ERTs, recorrendo ao VTK – The Visualization Toolkit © (Alves, Bernardes, Fontes, Martins, & Madeira, 2015).

sua posição, morfologia e escala de representação, poderão constituir elementos de interesse arqueológico. Chamamos aqui a atenção para o fato de as anomalias de resistividade elétrica não devolverem, normalmente, imagens onde se consiga perceber claramente a distinção entre diferentes tipos de estruturas em deposição, se o material que as compõe tiver as mesmas características de condutividade eletrolítica: por exemplo, não será perceptível num ERT o interface entre uma parede e o respetivo derrube, se o derrube estiver sobre ou encostado à parede.

Evidenciando a escala cromática de resistividades mais elevadas, é possível esclarecer a forma e a posição de anomalias com interesse arqueológico (Figura 24). Chegámos à composição que se apresenta na Figura 24 através da redução da proeminência visual da classe de resistividades intermédias, situada entre 6500 e 19000 Ohm/m. As anomalias com potencial de interesse arqueológico, assinaladas a vermelho³⁴ e a magenta³⁵ na figura, encontram-se a profundidades que variam entre 1 e 1.5 m, em

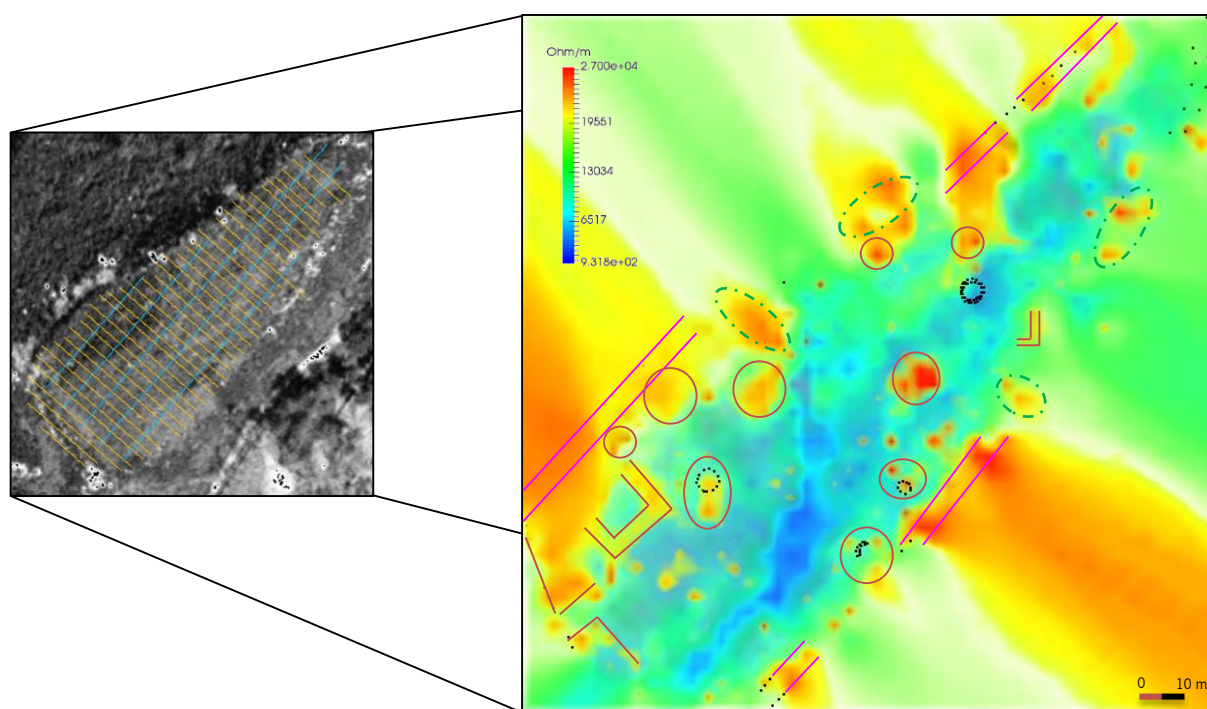


Figura 24 - Aspecto do volume tomográfico limitado a 27 000 Ohm/m, evidenciando-se as anomalias de elevada resistividade, na escala de amarelo a vermelho, por manipulação do mapa cromático por índices de valor. A vermelho e a magenta encontram-se assinaladas as anomalias que consideramos terem potencial de interesse arqueológico, a verde as que serão derivadas de afloramentos de quartzo. A preto encontram-se as estruturas arqueológicas identificadas na superfície do castro. ©ParaView.

³⁴ A vermelho assinalámos as anomalias que podem estar relacionadas com estruturas de habitação do povoado.

³⁵ A magenta assinalámos as anomalias que podem estar relacionadas com a muralha do povoado.

relação às cotas de aquisição, que relembramos, se iniciam a uma média de 0.5 m de profundidade em relação à superfície topográfica. A verde encontram-se assinaladas as anomalias que podem representar a ocorrência de veios de quartzo, identificadas à superfície do Castro.

Continuando a análise do volume tomográfico, reduzimos a visibilidade das resistividades mínimas e médias, chegando à composição que apresentamos na figura 25, que nos parece apresentar de forma mais evidente as anomalias que consideramos terem interesse arqueológico.

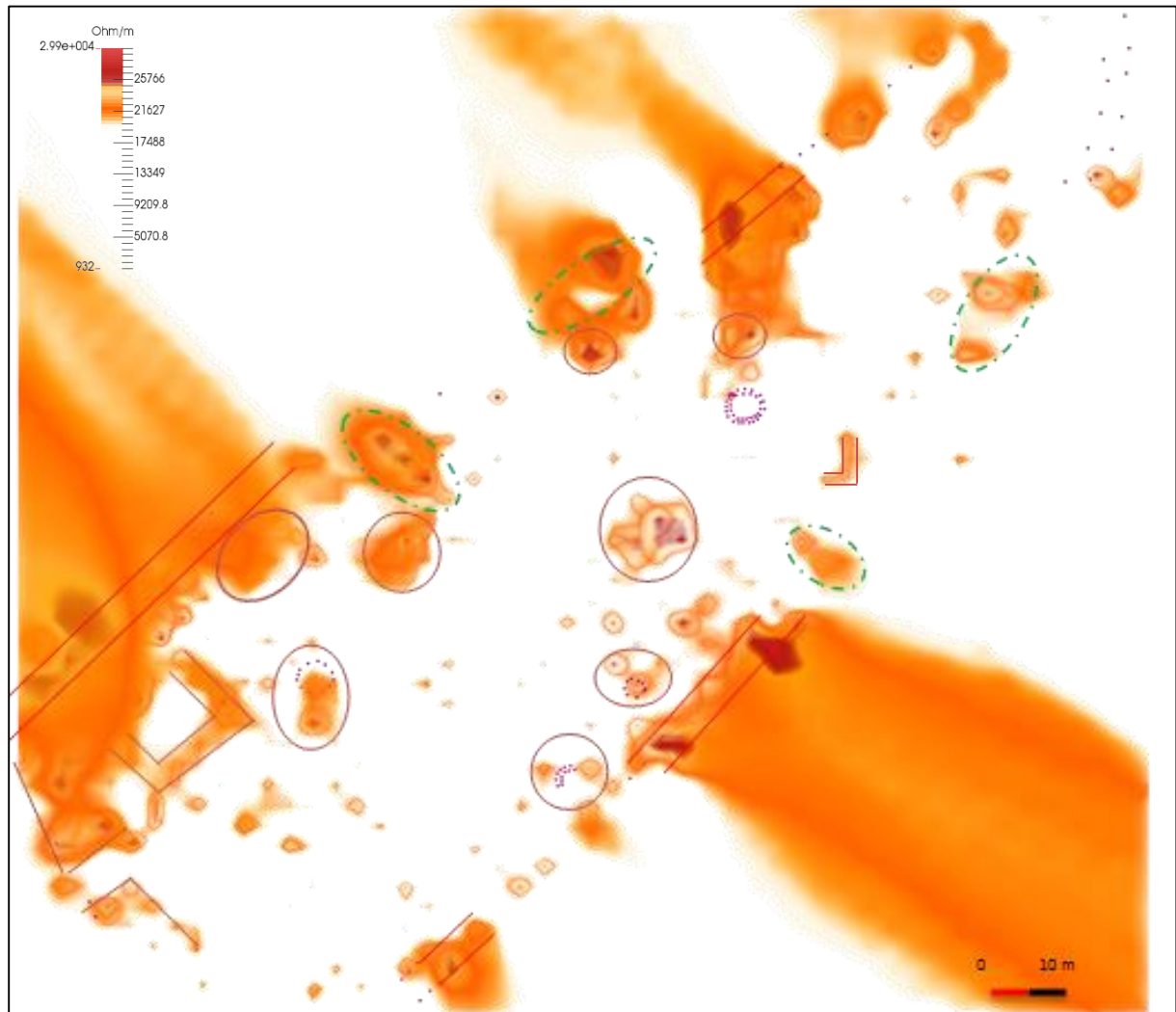


Figura 25 - Aspeto do volume tomográfico limitado a 29 000 Ohm/m, evidenciando-se as anomalias de elevada resistividade, na escala de laranja a vermelho, por manipulação do mapa cromático por índices de valor. A vermelho e a castanho encontram-se assinaladas as anomalias que consideramos terem potencial de interesse arqueológico, a verde as que serão derivadas de afloramentos de quartzo. A roxo encontram-se as estruturas arqueológicas identificadas na superfície do castro. ©ParaView.

5.1.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A muralha que delimita a plataforma superior do castro é um caso particular deste estudo, daí que tenhamos identificado as anomalias que possam estar relacionadas com esta infraestrutura com uma simbologia distinta das demais anomalias que considerámos de interesse arqueológico.

Através dos resultados das sondagens arqueológicas realizadas numa secção da muralha, sabemos que a muralha é composta por duas paredes de alvenaria de granito, dispostas de forma paralela com equidistância de aproximadamente 3,5m. O miolo da muralha, depositado entre as paredes de alvenaria, é composto por blocos de quartzo e de granito envoltos numa massa sedimentar. Ora, quando realizámos a filtragem de classes que conduziu à imagem tomográfica mostrada na Figura 23, abdicámos da visualização de uma gama de valores de elevada resistividade, que ajudariam a evidenciar o reflexo da muralha, cujas características construtivas a tornam um elemento altamente resistivo. Ainda assim, são perceptíveis áreas de resistividade elevada que nos parecem poder estar em relação com a estrutura da muralha.

Um outro aspeto que condicionou a visualização arqueológica do ERT foi a resolução espacial do volume escalar, que resultou da configuração estabelecida para a aquisição geofísica. Com efeito, embora o espaçamento intereletrodico seja suficiente para uma boa resolução por perfil, o distanciamento entre perfis (4 m) diminuiu substancialmente a resolução da interpolação entre as isosuperfícies dos perfis e, conseqüentemente, dos isovolume que daí resultaram. Por outro lado, os resultados dos trabalhos arqueológicos que atualmente se desenvolvem sobre o povoado demonstraram-nos que uma importante fatia da informação arqueológica disponível se encontra dentro dos primeiros 50 cm de depósitos sedimentares, uma faixa ausente do volume tomográfico em consequência da configuração eletródica escolhida, cujo primeiro nível de profundidade estimada ocorre exatamente no limiar dos 50 cm.

Ainda assim, consideramos que este estudo contribui, de forma válida, para a identificação de anomalias com valor para o entendimento arqueológico do Castro de Sapelos.

5.2 SEMINÁRIO CONCILIAR DE SÃO PEDRO E SÃO PAULO (BRAGA, PORTUGAL)

O Seminário Conciliar de São Pedro e São Paulo localiza-se na União de Freguesias de Maximinos, Sé e Cidade, concelho e distrito de Braga (Figura 26), ocupando uma área geológica que se integra no Maciço Hespérico, integrando a unidade tectono-estratigráfica correspondente à Zona Centro-Ibérica (Ferreira A. M., 2000, p. 40). A área de estudo desenvolve-se sobre uma base litológica formada por

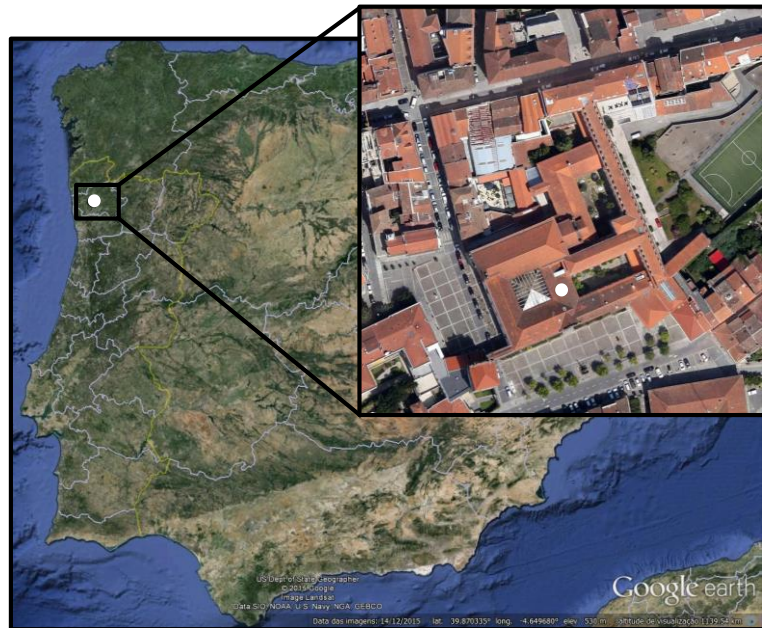


Figura 26 – Localização do Seminário Conciliar de São Pedro e São Paulo no contexto geográfico do Noroeste Peninsular. Base ortofotográfica: ©Google

movimentos hercínicos, apresentando fracturação intensa e pouco permeável, destacando-se a formação do chamado *Granito de Braga*, em orientação coerente com a do cisalhamento da falha de Régua-Verin (Martins, et al., 2012, pp. 25-26). Segundo Ferreira et al. (2000, pp.44-45 visto em Martins, et al. (2012, p. 26), a região que enquadra o perímetro urbano de Braga apresenta valores anuais elevados de precipitação, rondando em média 1515 mm/ano.

O conjunto de edifícios onde hoje se estabelece o Seminário Conciliar de São Pedro e São Paulo começa a desenhar-se no séc. XVI, por iniciativa do Arcebispo D. Diogo de Sousa, que, em 1509 funda o Colégio de São Paulo, para albergar os Estudos Públicos da cidade, que só viriam a funcionar em 1531 (Soares, 2011, p. 547). O Seminário sofreu obras de ampliação nas prelaturas do Cardeal Infante D. Henrique (1533-40) e D. Frei Baltasar Limpo (1550-58), tendo sido doado por D. Frei Bartolomeu dos Mártires aos Jesuítas em 1561 (Costa, 1984, p. 163). Em 1567 começa a construção da igreja de São Paulo, que receberia o Santíssimo Sacramento em 1588, ainda sem estarem concluídas as obras da igreja (Guerreiro, Pinto, & Leandro, 2011, p. 15).

Em 1594, no chamado *Mapa de Braunio*³⁶, o edifício do Seminário, então *Collegio dos Estudos Públicos de Braga*, surge representado por um conjunto articulado de edifícios, que desenhavam uma planta em U, fechado a Norte pela igreja de São Paulo, e a Sul pela muralha fernandina de Braga. Na mesma representação é visível um grande pátio interior, do qual o claustro atual será porventura um traço remanescente (Figura 27 a). Podemos ainda observar uma edificação mais pequena que parece adossar ao tardo do edifício nascente do Colégio. É ainda de destacar a representação, no extremo nordeste da igreja de São Paulo, de um edifício de dimensões modestas, cujas empenas se encontram coroadas por Cruzes, algo que o autor parece reservar aos espaços clericais - em nossa opinião, esta pode ser a representação da antiga capela de S. Paulo (Guerreiro, Pinto, & Leandro, 2011, p. 15), cujas reduzidas dimensões motivaram a construção da igreja atual, cerca de três décadas antes da publicação desta representação cartográfica. Por volta de 1756, André Soares³⁷ representa já o Seminário com a fachada “sobreposta” à muralha, basicamente como a conhecemos hoje, com exceção do portal de entrada pelo Largo de Santiago, que só viria a integrar o edifício mais tarde, depois da assimilação do colégio de São Pedro, donde procede a estrutura do portal³⁸ (Figura 27-b).

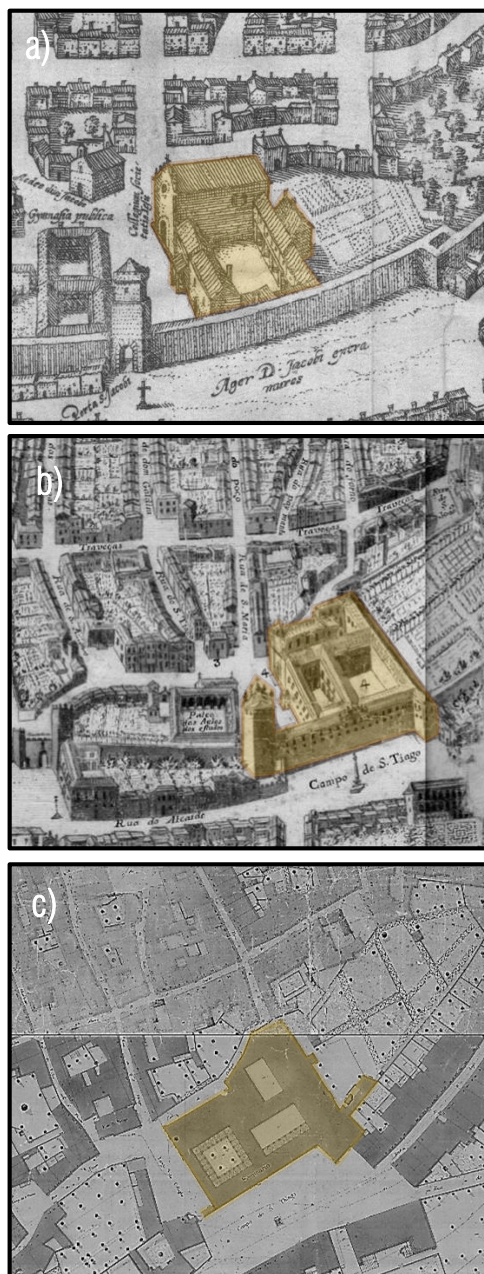


Figura 27 – Representação do Seminário de São Paulo em a) 1594 (pormenor de *Nova Bracaræ Augustæ descriptio*, de G. Braun e F. Hogenberg), b) em 1756 (pormenor de *Mapa da Cidade de Braga Primas*, de A. Soares) e c) em 1883-84 (pormenor da Planta Topográfica de Braga 1883-84, de F. Goullard, f. 15 e 20). Arquivo Cartográfico UAUM.

³⁶ Braun, Georg; Hogenberg, Frans (1594) “Nova Bracaræ Augustæ descriptio”, *Civitates orbis terrarum*, Liber 5. Coloniae Agrippinae. Obtido de <http://cartotecadigital.icc.cat> ; Drets: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/deed.ca>

³⁷ Soares, André *Mappa da Cidade de Braga Primas*. Arquivo Cartográfico UAUM

³⁸ Informação constante no *Dossier de Enquadramento* fornecido pelo Seminário Conciliar à equipa de Geofísica.

Após a extinção da Companhia de Jesus, em 1759, a tutela dos edifícios do Colégio de S. Paulo conhece várias mudanças, tendo funcionado entre 1785 e 1878 como colégio feminino da Ordem das Ursulinas (Guerreiro, Pinto, & Leandro, 2011, p. 11). Em 1880, na prelatura de D. João Crisóstomo, o Colégio de São Pedro, até então situado no Campo da Vinha, é transferido para o edifício do Colégio de São Paulo, passando este então a chamar-se de Seminário Conciliar de S. Pedro e S. Paulo (Costa, 1984, p. 164). Da junção deriva a decisão de restaurar os edifícios do Colégio, que ameaçavam ruína (Ferreira M. J., 1935, p. 223), algo que já vinha a ser pedido pelo Arcebispo D. Frei Caetano Brandão desde 1805 (Costa, 1984, p. 164). Em 1880, D. João Crisóstomo procedeu ao restauro dos edifícios e, em 1884, com a promulgação do edital que passaria a obrigar, a partir de 7 de Julho do mesmo ano, ao regime de internato dos alunos do seminário, D. António Freitas Honorato “ampliou largamente o seminário” (Costa, 1984, p. 164).

Entre 1883-84, Francisco Goullard produz um volume de folios cartográficos de representação cadastral da cidade, com rigor métrico reconhecido. Nesta planta cartográfica, podemos constatar que não terá existido uma alteração muito significativa do edificado desde a representação realizada por André Soares no século anterior (Figura 27-c). De facto, pese embora a disparidade gráfica induzida pela diferença da perspetiva e pela menor proporcionalidade existente no mapa de 1755, quando comparada a posição dos marcadores-chave deste conjunto, a igreja e a *rua do Collegio*, ambas sensivelmente a Norte, e a fachada do seminário, virada ao campo de Santiago, constata-se que a posição dos principais espaços é coincidente.

A alienação dos bens da Igreja decorrente da implantação da República também teve efeitos sobre este espaço, pois entre 1911 e 1940 o edifício do Seminário foi ocupado pelo Regimento de Infantaria 29 (Costa, 1984, p. 165). Na fotografia aérea de 1936 é possível constatar já o avanço do edificado do seminário sobre a *rua do Collegio* cujo espaço ocupou, ao mesmo tempo que se percebe já a estruturação da Rua Afonso Henriques (Figura 28), assim nomeada em 1944 (Oliveira, 1982, p. 38). A grande obra da estruturação desta rua decorreu entre as décadas de 80 e 90 do séc. XIX, tendo a sua abertura resultado no recuo das fachadas das antigas ruas de Santa Maria, do Coelho e



Figura 28 – O edifício do seminário num pormenor da fotografia aérea de Braga de 1936. SPLAL. Arquivo Cartográfico UAUM.

de São João, que passou a incorporar, chamando-se então de rua d'El-Rei (Bandeira, 2003, p. 7). Contemporânea da obra da Rua Afonso Henriques será todo o conjunto norte do atual Seminário, com as fachadas organizadas sobre o limite da rua.

Devolvido à Igreja em 1948, o edifício recebe novas obras de recuperação nos finais dos anos 60. É no âmbito destas obras que o Cônego Luciano dos Santos, reitor do Seminário e fundador do Museu Pio XII (1957), realiza, em 1967, escavações arqueológicas no claustro, identificando os vestígios de um peristilo romano datado de finais do séc. III, existindo no espaço elementos de uma fase anterior, que remontará ao séc. I (Figura 29) (Magalhães, 2010, p. 87).



Figura 29 | Aspeto atual das ruínas romanas da chamada Domus de Santiago. Fotografia da autora.



Figura 30 – Relação espacial entre o Seminário Conciliar e o Museu Pio XII. Base ortofotográfica: ©Google

Desenvolve-se atualmente o projeto de implantação do “Centro de Interpretação da *Domus* de Santiago”, no âmbito do qual se promoveu um amplo estudo geofísico do Claustro, Igreja e Jardim do Seminário Conciliar, englobando ainda o jardim que atualmente pertence ao Museu Pio XII, que ocupa, desde 1957, uma parte do espaço do Seminário (Figura 30). Foram realizadas prospeções geofísicas nas áreas assinaladas na Figura 31, integrando o programa de investigação arqueológica sob direção científica de Manuela Martins, Luís Fontes e Fernanda Magalhães.

O estudo geofísico foi realizado com recurso à aquisição de dados de resistividade para composição tomográfica nas áreas C e D. Nas áreas A, B e B-s a prospeção foi realizada com recurso a Georadar (Figura 31).

No âmbito da presente dissertação foram selecionados os dados adquiridos para a área C.



Figura 31 – Áreas onde foram realizados estudos geofísicos.
Base ortofotográfica: ©Google

5.2.1 METODOLOGIA

A aquisição de dados de resistividade elétrica foi realizada por Bruno Pereira, João Azevedo e Celso Silva, geólogos da Sinergeo, Lda., de acordo com abordagem metodológica definida em conjunto com a equipa de arqueologia, tendo os trabalhos de prospeção geofísica decorrido entre 30 de Setembro e 9 de Outubro de 2015 (Pereira & Alves, 2015, p. 5).

O estudo geofísico do Seminário Conciliar de São Pedro e São Paulo beneficiou da experiência adquirida pelas equipas de geofísica e de arqueologia no Castro de Sapelos. Assim, uma das questões tidas em consideração desde início foi a da resolução espacial necessária para a obtenção de isovolumes com maior intervalo de confiança. Desta forma, a aquisição de resistividades foi projetada sobre 18 perfis latitudinais em eixo de x, com equidistância e espaçamento intereletrodico de 0.5 m (Figura 32). Foi utilizado o resistímetro Syscal R1Plus, num esquema multieletrodico composto por 50 eléctrodos em arranjo de *Wenner-Schlumberger* (Pereira & Alves, 2015, p. 13).

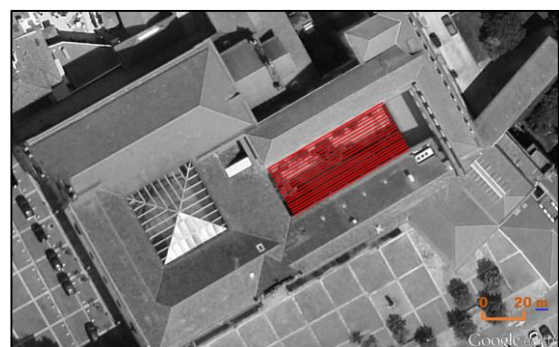


Figura 32 - Implantação dos perfis de resistividade (a vermelho). Adaptado de Pereira & Alves (2015, p. 13)
Base ortofotográfica: ©Google.

De acordo com o arranjo multieletródico estabelecido, os dados foram adquiridos a partir de 0.26 m de profundidade, tendo alcançado uma profundidade estimada de 4.3 m. Os perfis foram numerados no sentido SSO-NNE.

A área em questão apresentava uma secção de pavimento em laje de granito no extremo Poente, pelo que, na impossibilidade de furar a laje para introduzir os eléctrodos, a equipa de geofísica optou por usar blocos de espuma fenólica, saturados em água com adição sal (Figura 33).



Figura 33 – Pormenor da utilização de espumas fenólicas na aquisição de dados na área C.

Dados reservados Sinergeo, Lda. e UAUM.

Os testes de contacto (*RS Check*) realizados para cada perfil revelaram valores dentro da gama

normal, pelo que entendemos que a utilização da espuma fenólica foi uma boa solução para resolver a questão da não afetação do pavimento, não tendo provocado alterações nos níveis de contacto da aquisição.

5.2.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS

O processamento dos dados de resistividade da área C para construção de um volume tomográfico obedeceu exatamente ao mesmo esquema metodológico utilizado para o Castro de Sapelos, explicado em detalhe no ponto 5.1.2 deste documento, pelo que, para a clarificação deste procedimento remetemos para a leitura da mesma secção.

O fator de amortecimento utilizado para a inversão dos perfis da área C foi de 0.15 para limite superior e 0.02 para limite inferior.

As resistividades aparentes medidas na área C variaram entre 41 e 3321 Ω/m .

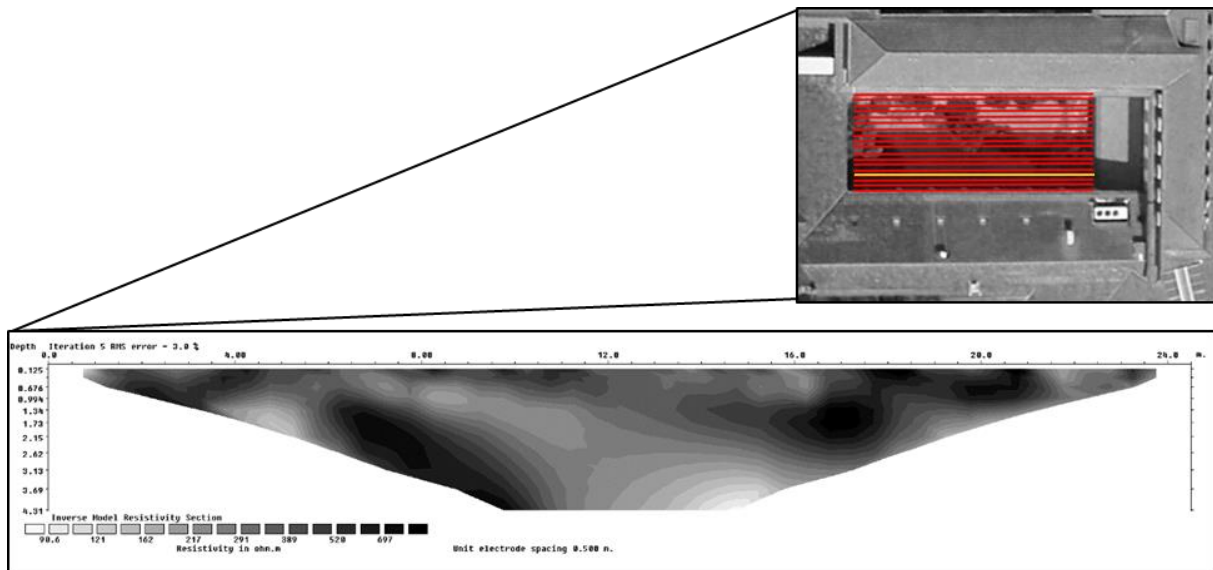


Figura 34 - Inversão do perfil de resistividades 4 da área C (assinalado a amarelo na imagem de enquadramento), com um valor de RMS de 2.8. Dados reservados Sinergeo, Lda. e UAUM.

5.2.3 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS VOLUMES ESCALARES DE RESISTIVIDADE

À semelhança do caso de estudo de Sapelos, a inversão dos perfis 2D foi tratada para obtenção de isovolumetria escalar em ambiente Voxler® pela equipa da Sinergeo, Lda., através da conversão dos modelos de inversão para um ficheiro alfanumérico composto pelas coordenadas tridimensionais (X, Y, Z) e escalar (resistividade), usando o método do Inverso da Distância das Potências (*Inverse Distance to a Power*) para a construção do modelo de isosuperfícies.

Neste caso específico, os dados foram adquiridos dentro de uma área retangular, pelo que o volume bloco escalar corresponde exatamente ao definido pelos pontos de aquisição (Figura 35).

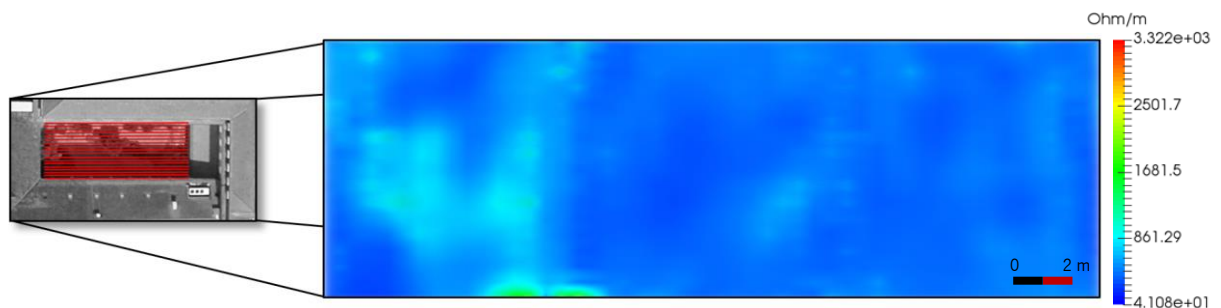


Figura 35 - Aspeto inicial do volume tomográfico de resistividades. ©ParaView.

O conhecimento da orientação preferencial de construção e das cotas de interesse³⁹ proporcionadas pelo estudo realizado por Magalhães (2010, p.87) sobre as ruínas do claustro do Seminário Conciliar serviram de apoio à análise do volume. Embora o histórico da ocupação deste espaço seja muito denso e ultrapasse, em larga medida, o período romano (ver 5.2), a preposição deste marcador espacial serviu de bitola à interpretação dos dados de resistividade, à falta de evidências arqueológicas visíveis na superfície. No volume escalar não filtrado, tal como apresentado na figura 35, são perceptíveis já variações de resistividade, em especial no primeiro terço do volume⁴⁰.

A análise deste volume permitiu-nos perceber que a classe de resistividades entre 1000 e 3321 correspondia a duas áreas de distribuição pequenas, situadas também no primeiro terço (Figura 36).

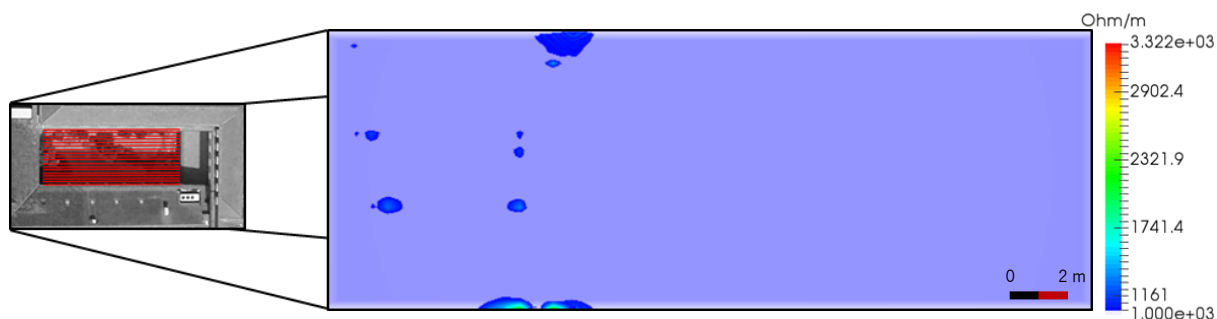


Figura 36 - Volume tomográfico da escala de resistividades entre 1000 e 3322 Ohm/m. ©ParaView.

Ao reduzir a distribuição escalar para um volume com limite superior definido em 1000 Ohm/m, percebemos não só que a visualização destas anomalias se manteve, como se elevou a visualização de outros elementos de contraste (Figura 37).

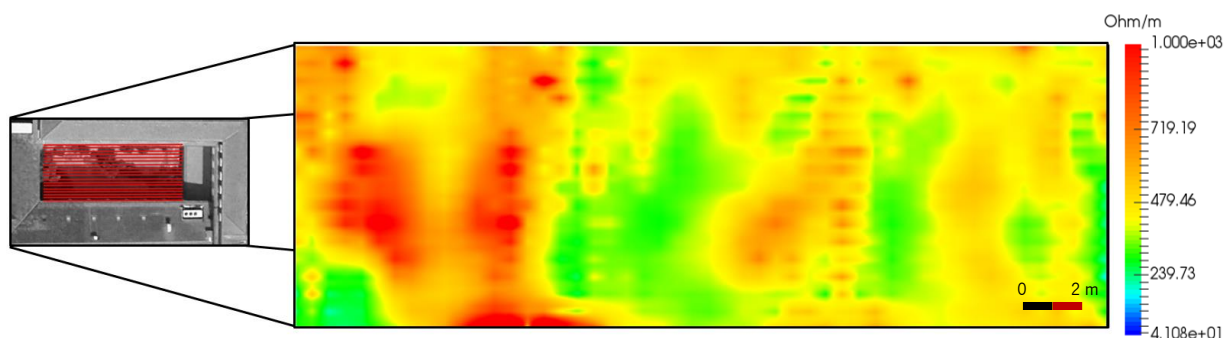


Figura 37 - Aspeto do volume tomográfico, depois de se ter estabelecido 1000 Ohm/m para limite superior de resistividades. ©ParaView.

³⁹ Entre 1.70 m e 2 m em relação à cota de circulação atual.

⁴⁰ Leitura realizada da direita para a esquerda e do limite inferior para o superior.

A redução da gama escalar realçou os contrastes existentes no intervalo definido, sendo assim possível uma análise mais refinada da distribuição das anomalias de resistividade. Neste sentido, e retomando a ideia das cotas de interesse como bitola para a interpretação escalar, fizemos cortes pela secção horizontal, no eixo da profundidade do volume. Optámos por realizar o primeiro corte a 1 m de profundidade estimada, esperando desta forma retirar da visualização anomalias de resistividade que, em nosso entender, estariam mais certamente relacionadas com as infraestruturas do edifício atual (Figura 38).

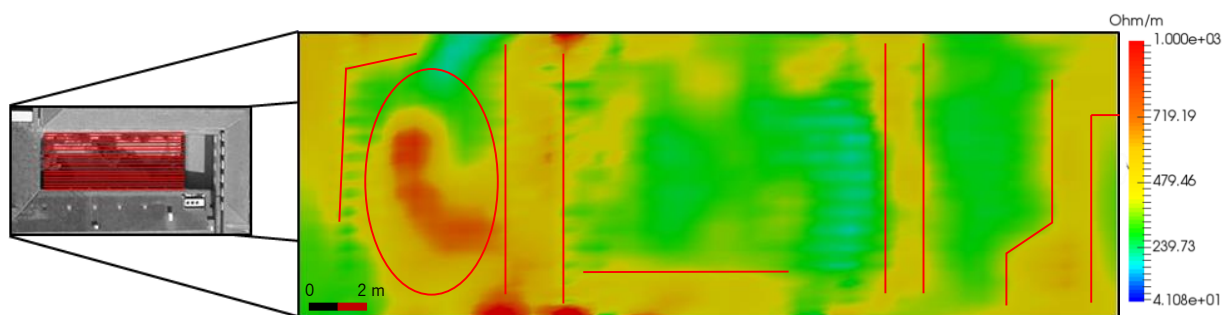


Figura 38 - Aspeto do volume tomográfico interpretado a 1m de profundidade, limitado a 1000 Ohm/m, evidenciando-se as anomalias mais resistivas na escala de amarelo a vermelho, por manipulação do mapa cromático por índices de valor. A vermelho encontram-se assinaladas as anomalias que consideramos terem potencial de interesse arqueológico. ©ParaView.

A Figura 38 apresenta então o corte do volume a 1 m de profundidade estimada, sendo aqui perceptíveis várias anomalias que consideramos de interesse arqueológico, não sendo no entanto possível determinar, pela via geofísica, qual o respetivo significado cronológico ou funcional destas ocorrências.

No fatiamento realizado a 1.5 m de profundidade estimada persistem, de modo geral, as anomalias identificadas no plano de profundidade anterior (Figura 39).

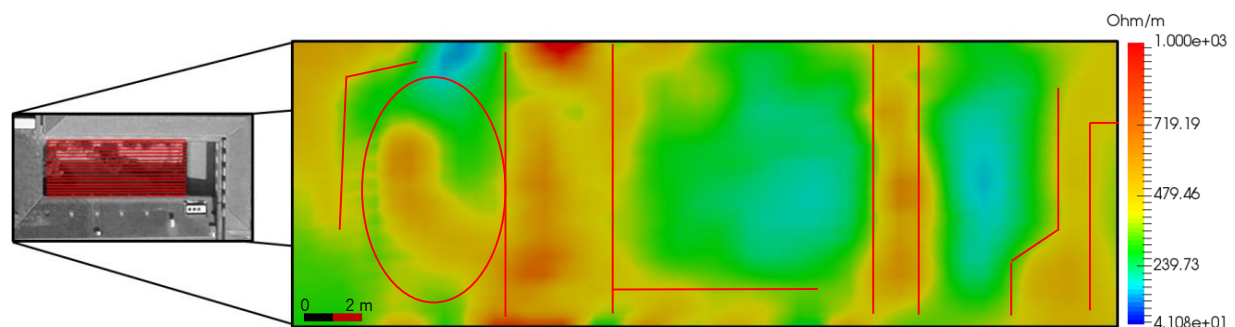


Figura 39 - Aspeto do volume tomográfico interpretado a 1.5 m de profundidade, limitado a 1000 Ohm/m, evidenciando-se as anomalias mais resistivas na escala de amarelo a vermelho, por manipulação do mapa cromático por índices de valor. A vermelho encontram-se assinaladas as anomalias que consideramos terem potencial de interesse arqueológico. ©ParaView.

A partir dos 2m de profundidade estimada os volumes anómalos reduzem-se na proporção do bloco, contudo, apresentam um contraste mais evidente, cuja área de intensidade vai crescendo gradualmente até ao limite do volume escalar. Entre os 3.5 m e os 4 m de profundidade surge, junto do limite inferior do volume, uma área com resistividades com valores abaixo de 100 Ohm/m, sugestivas de uma bolsa com grande acumulação de humidade ou até mesmo de um pequeno aquífero. Uma perspetiva da evolução sequencial da distribuição de resistividades neste bloco pode ser vista na Figura 40.

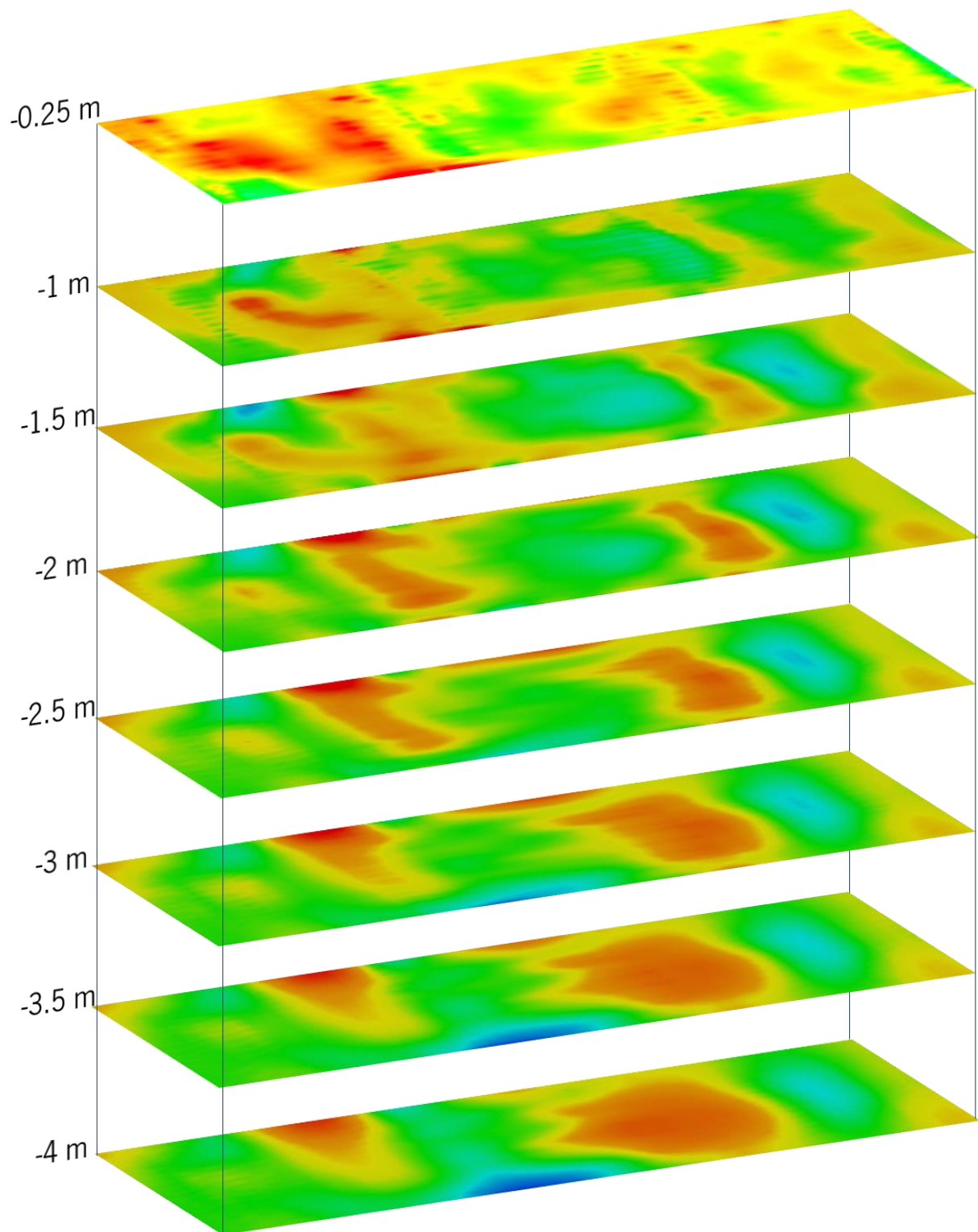


Figura 40 – Perspetiva da distribuição das resistividades da área C em profundidade, a partir de um volume escalar com limite superior de resistividades estabelecido em 1000 Ohm/m.. ©ParaView.

5.2.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O caso específico da área C do Seminário Conciliar de São Pedro e São Paulo, sendo totalmente distinto, em forma e matéria, do Castro de Sapelos, obrigou-nos a uma abordagem formal e analítica também ela distinta.

Neste caso particular, não tínhamos, como em Sapelos, evidências de superfície que nos permitissem fazer a triagem dos valores de resistividade através do cruzamento entre os dados geofísicos e os dados arqueológicos para uma mesma coordenada física.

Assim, optámos por utilizar uma cota de referência, uma espécie de bitola para um nível que à partida, se existissem ruínas, as demonstraria. A definição desta bitola foi encontrada nos estudos arqueológicos já realizados sobre as ruínas romanas do claustro do Seminário por Fernanda Magalhães em 2010 (p.85), simultaneamente codiretora dos trabalhos arqueológicos que enquadraram o estudo geofísico, situando as cotas de interesse, para a época romana, entre o 1.70 m e os 2 m de profundidade em relação ao nível de superfície.

No decurso da análise do volume escalar foi-nos possível verificar que o bloco escalar que melhor realçou os isovolumes de interesse arqueológico foi o que se estabeleceu por limite superior de 1000 Ohm/m, através do qual conseguimos identificar uma clara sobreposição de volumes de contraste escalar, principalmente, no primeiro terço do bloco. Confrontados com esta realidade, em tudo natural em meio urbano, optámos por realizar fatiamento em secção horizontal, com equidistância no eixo de Z de 0.5 m, uma escala vertical que, em função de vários testes, considerámos adequada para o registo de planos de anomalias escalares.

As anomalias identificadas, sobretudo, a partir de 1 m de profundidade estimada parecem estar, em nossa opinião, relacionadas de forma geral com a distribuição espacial urbana de *Bracara Augusta*, coincidindo com as projeções existentes para a malha de ordenamento da cidade, segundo as quais a área C seria cruzada, quase ao eixo central, por um *cardus* da urbe romana (Figura 41) (Magalhães, 2010; Martins M. , *Bracara Augusta*. Cidade Romana., 2000).

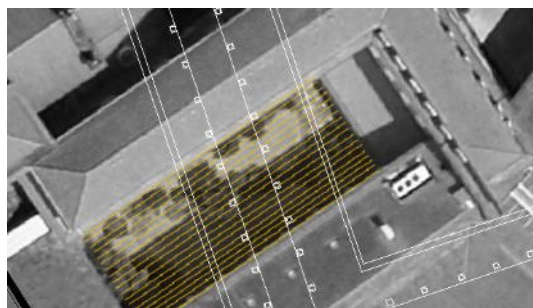


Figura 41 – Projeção da malha urbana de Bracara Augusta (a branco) sobre a área C do estudo geofísico do Seminário Conciliar de São Pedro e São Paulo. Adaptado de Magalhães, 2010, p. 85.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para finalizar, não podemos deixar de tecer algumas breves considerações que entendemos poderem concretizar a súmula do que até este momento se expôs.

A Geofísica e a Arqueologia, disciplinas científicas cujos registos carecem de interpretação, têm em comum o facto de os seus respetivos objetos de estudo se encontrarem, não raras vezes, sob a superfície⁴¹ e portanto, *invisíveis* ao olhar comum. Para suplantar esta incapacidade ante a *invisibilidade* do seu objeto, o arqueólogo determina, através de um conjunto diversificado de ferramentas e metodologias, qual a área do subsolo em que vai intervir para que possa ter acesso ao seu objeto.

Ora a Geofísica, enquanto ‘ferramenta auxiliar’ no cenário de intervenção arqueológica, procura contribuir para que se possa conhecer, de forma mais eficiente, a composição desta área da subsuperfície sobre a qual, à partida, existe uma problemática arqueológica. As ferramentas de que se serve não implicam, por regra, qualquer afetação das condições iniciais do seu objeto de estudo, sendo portanto uma disciplina que produz, de forma remota, conhecimento sobre o seu objeto. No entanto, e como bem o definiu Michael Aitken, seria um erro considerar a expressão desta interdisciplinaridade como um mero apoio científico, uma vez que os proveitos da cooperação podem resultar positivos para ambas as disciplinas (Aitken M. , 1961, p. v).

Quando utiliza dados obtidos por ferramentas da Geofísica, o arqueólogo, não tendo que ser um especialista nessa matéria, deverá no entanto compreender, de forma geral, os pressupostos principais que conduziram à obtenção dos dados, para que estes não sejam sobre nem subestimados no quadro da interpretação arqueológica. É importante que o arqueólogo, não devendo substituir o geofísico, participe ativamente no processo de escolha da metodologia de aquisição, que deverá ser definida em

⁴¹ A Arqueologia, enquanto disciplina, não se reduz à capacidade de entender como objetos de estudo os que se encontram sob o subsolo, sendo frequentes os estudos arqueológicos que se debruçam sobre outros domínios, como os de que se ocupa a chamada Arqueologia da Arquitetura.

função da problemática que quer satisfazer e que seja também proactivo na interpretação arqueológica dos dados obtidos.

Os casos de estudo que apresentamos foram analisados com a mesma ferramenta, a Tomografia por Resistividade Elétrica (ERT). No entanto, por pertencerem a realidades conjunturais distintas, a análise dos dados recolhidos em cada sítio foi adaptada às condições iniciais apresentadas pelas respetivas problemáticas arqueológicas.

No Castro de Sapelos utilizámos a informação arqueológica disponível para realizar uma espécie de triagem dos valores de resistividade, conseguindo, por essa via, reduzir com sucesso, em nosso entender, o ruído criado pelas características litológicas do local. No entanto, foi-nos possível constatar, durante o processo de análise do volume tomográfico, que o estudo deveria ter sido planeado de forma a obter uma maior resolução tomográfica e uma conseqüente profundidade de investigação mais próxima da superfície topográfica.

Com efeito, sabemos agora, na sequência dos trabalhos arqueológicos realizados no local, que existirá uma quantidade considerável de dados arqueológicos relativos à ocupação do povoado na faixa dos primeiros 50 cm de formação sedimentar, que não foram pesquisados pelo varrimento geoelectrico por causa da configuração multieletródica determinada para o estudo. Ainda assim, consideramos que os resultados obtidos da leitura arqueológica realizada sobre os dados de resistividade são suscetíveis de acrescentar valor à interpretação do povoado, podendo contribuir seguramente para um planeamento mais informado das próximas campanhas arqueológicas.

As questões colocadas pela resolução do modelo de Sapelos permitiram-nos planear, em conjunto com a equipa de geofísicos da Sinergeo, Lda., as prospeções geofísicas realizadas no Seminário Conciliar de São Pedro e São Paulo de forma mais eficiente face ao registo esperado.

Não sendo evidentes vestígios arqueológicos sobre a superfície da área, como acontecia em Sapelos, beneficiámos no entanto da experiência dos quase 40 anos de trabalhos arqueológicos desenvolvidos pela Unidade de Arqueologia da Universidade do Minho no perímetro urbano de Braga. Utilizámos então o conhecimento do registo arqueológico bracarense, proporcionado pelos investigadores do projeto de *Bracara Augusta*, para definir alvos de interesse relacionados com as cotas de ocupação conhecidas para o período romano em sítios arqueológicos com proximidade espacial, como acontece com as ruínas do claustro do Seminário, cujo projeto de valorização motivou o estudo geofísico. Entendemos que a

abordagem à visualização do volume tomográfico contribuiu para a identificação de anomalias de resistividade coerentes com as propostas de interpretação consensualmente aceites para a organização da cidade romana.

Assim, esperamos com este trabalho ter contribuído para o esclarecimento da utilização de dados de Tomografia por Resistividade Elétrica aplicada em contextos de valor arqueológico, que, enquanto ferramenta de deteção remota, pode produzir informação de forma não invasiva, contribuindo assim para que o arqueólogo possa conhecer melhor o seu objeto de estudo sem que tenha que intervir diretamente sobre ele.

7. BIBLIOGRAFIA

7. BIBLIOGRAFIA

- Aitken, M. (1961). *Physics and Archaeology*. New York: Interscience Publishers.
- Aitken, M. (1964). A aplicação dos métodos da Física à Arqueologia (Trad. Jorge Alarcão). *Trabalhos de Antropologia e Etnologia, XIX (3-4)*, 285-297.
- Alarcão, J. (1964). Demonstrações do uso do magnetómetro e do resistímetro na prospecção de vestígios arqueológicos, realizadas em Portugal pelo Dr. M. J. Aitken. *Revista Guimarães, LVXXIV 3-4*, 367-369. Obtido em Novembro de 2015, de http://www.csarmento.uminho.pt/docs/ndat/rg/RG074_24.pdf
- Alves, M., Bernardes, P., Fontes, L., Martins, M., & Madeira, J. (2015). Feature enhancement from electrical resistivity data in an archaeological survey: the Sapelos hillfort experiment (Boticas, Portugal). Em D. G. Hadjimitsis, K. Themistocleous, S. Michaelides, & G. Papadavid (Ed.), *Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2015)*. Proc. SPIE 9535, pp. 95350 1-8. Paphos, Cyprus: SPIE. doi:10.1117/12.2192568
- Annan, A. P. (2002). GPR - History, Trends and Future Developments. *Subsurface Sensing Technologies and Applications, 3:4*, 253-270.
- Atkinson, R. (1952). Méthodes elétriques de prospection en archéologie. Em Laming, Annete (Ed.), *La découvert du passé* (pp. 59-70). Paris: Picard.
- Bandeira, M. S. (1993). O espaço urbano de Braga em meados do séc. XVIII. *Revista da Faculdade de Letras - Geografia, 1ª Série, Vol. IX*, 101-223. Obtido de <http://ler.letras.up.pt/uploads/ficheiros/1533.pdf>
- Bandeira, M. S. (2003). A expropriação colectiva de habitação na renovação urbana de Braga na segunda metade do séc. XIX. *Scripta Nova, VII 146(018)*. Obtido de [http://www.ub.edu7sn/sn-146\(018\).htm](http://www.ub.edu7sn/sn-146(018).htm)
- Barker, P. (1977). *Techniques of Archaeological Excavation* (3th - 1993 rev. ed.). London: B.T. Batsford, Ltd.
- Barraca, N. R. (2013). *Aplicação da técnica Georadar à reabilitação de património edificado*. Aveiro: Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica apresentado à Universidade de Aveiro.
- Beazeley, G. A. (1919). Air Photography in Archaeology. *The Geographical Journal, 53 - 5*, 330-335. doi:10.2307/1779474
- Belshé, J. (1957). Recent magnetic investigations at Cambridge University. *Advances in Physics, 6:22*, 192-193. doi:0.1080/00018739700101561
- Bevan, B. (1995). Geophysical Prospecting. *American Journal of Archaeology, 99:1*, 88-90. doi:10.2307/506880
- Bevan, B. (2000). An Early Geophysical Survey at Williamsburg, USA. *Archaeological Prospection, 7*, 51-58.

- Bhattacharya, P. K., & Patra, H. P. (1968). *Direct Current Geoelectric Sounding. Principles and Interpretation* (Vols. Methods in Geochemistry and Geophysics, 9). Amsterdam: Elsevier.
- Café, L. D. (2014). *Desenvolvimento de um sistema de aquisição de resistividade eléctrica : análise conjunta entre geofísica-geoquímica no Castro de Ul*. Aveiro: Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica apresentado à Universidade de Aveiro.
- Clark, A. (1996). *Seeing Beneath the Soil. Prospecting methods in Archaeology*. London: Routledge.
- Clarke, D. (1978). *Analytical Archaeology* (2nd revised ed.). London: Methuen & Co Ltd.
- Conyers, L. B. (2006). Ground-Penetrating Radar. Em Johnson, & J. K. (Edits.), *Remote Sensing in Archaeology. An Explicitly North American Perspective*. (pp. 131-159). Tuscaloosa, Alabama: The University of Alabama Press.
- Costa, P. A. (1984). Arquidiocese de Braga. Síntese da sua História. Em *Dicionário de História da Igreja em Portugal* (Vols. III - Sep., pp. 163-166). Lisboa.
- Dahlin, T. (1996). 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break*, 14, 275-283.
- Dahlin, T. (2001). The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences*, 27, 1019-1029.
- Dahlin, T., & Zhou, B. (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 52, 379-398. doi:10.1111/j.1365-2478.2004.00423.x
- deGroot-Hedlin, C., & Constable, S. (1990). Occams' inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55 (12), 1613-1624.
- Delgado, M., Dias, L. A., Lemos, F. S., & Pascoal, A. G. (1984). Intervenções na área urbana de Bracara Augusta (1983). (UAUM, & MDDS, Edits.) *Cadernos de Arqueologia, Série II, Vol. I*, 95-116.
- Demoule, J.-P., Giligny, F., Lehoërf, A., & Schnapp, A. (2005). *Guide des méthodes de l'archéologie*. Paris: La Découvert.
- Dolphin, L. T., Bollen, R. L., & Oetzel, G. N. (1974). An underground electromagnetic sounder experiment. *Geophysics*, 39:1, 49-55.
- Ferreira, A. M. (2000). *Dados Geoquímicos de Base de Sedimentos Fluviais de Amostragem de Baixa Densidade de Portugal Continental: Estudo de Factores de Variação Regional*. Aveiro: Dissertação de Doutoramento em Geociências. Universidade de Aveiro. Obtido de http://www.lneg.pt/CienciaParaTodos/edicoes_online/teses/antonio_ferreira
- Ferreira, M. J. (1935). *Fastos Episcopales da Igreja Primacial de Braga (Sécs. III-XX)* (Vol. IV). Braga: Mitra Bracarense.
- Fontes, L. F., & Alves, M. S. (2014). O Parque Arqueológico do Vale do Terva. Um projeto de paisagem cultural. *Atas do Simpósio Internacional Paisagens Mineiras Antigas na Europa Ocidental. Investigação e Valorização Cultural* (pp. 113-142). Boticas: Câmara Municipal de Boticas. Obtido de <http://hdl.handle.net/1822/30113>

- Fontes, L. F., & Andrade, F. (2010). Revisão do inventário arqueológico do concelho de Boticas : relatório final. *Trabalhos arqueológicos da UAUM/memórias*, 8. Obtido de <http://hdl.handle.net/1822/11043>
- Fontes, L. F., Osório, B. D., & Alves, M. S. (2013). O projeto PAVT (Boticas, Portugal) : estudo, valorização e divulgação de uma paisagem cultural. Em J. M. Arnaud, A. Martins, & C. Neves (Edits.), *Arqueologia em Portugal: 150 anos* (pp. 213-217). Lisboa: Associação dos Arqueólogos Portugueses. Obtido de <http://hdl.handle.net/1822/26833>
- Fontes, L. F., Osório, B. D., & Alves, M. S. (2015). Povoamento e paisagens no Vale Superior do Rio Terva, Boticas: projecto de investigação plurianual em arqueologia (PoPaTERVA 2013-2016): trabalhos arqueológicos no Castro de Sapelos: relatório 2014. (L. F. Fontes, & M. M. Martins, Edits.) *T.A.U.A.U.M./ Memórias*, 56. Obtido de <http://hdl.handle.net/1822/38988>
- Gaffney, C. F. (1990). *The Schlumberger array in geophysical prospection for Archaeology*. Bradford: PHD Thesis submitted to the Department of Archaeological Sciences of the University of Bradford. Obtido de <http://hdl.handle.net/10454/3373>
- Garcia, P. M. (2009). *Prospecção na Quinta do Côvo*. Aveiro: Dissertação de mestrado em Engenharia Geológica apresentado à Universidade de Aveiro. Obtido de <http://ria.ua.pt/handle/10773/2727>
- Geotomo Software. (February de 2010). Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. *RES2DINV ver. 3.59*. Obtido em 17 de Outubro de 2015, de <http://web.gps.caltech.edu/classes/ge111/2010Data/Resistivity/Res2dinv%202.pdf>
- Geotomosoft Solutions; Geotomo Software PTY Ltd. (October de 2015). Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. *RES2DINVx64 ver. 4.05 Manual: Geoelectrical Imaging 2D & 3D*.
- GoldenSoftware. (2015). *Voxler@4. Full User's Guide*. Obtido de <http://www.goldensoftware.com/home/voxler-full-pdf-users-guide>
- Gonçalves, L. M. (2013). *Estudo geoarqueológico com Georadar. Aplicação aos contextos arqueológicos da Pré-História recente à Proto-História do NW de Portugal*. Braga: Tese de Doutoramento em Ciências, especialização em Geologia, apresentada à Universidade do Minho.
- Goodman, D., & Piro, S. (2013). *GPR Remote Sensing in Archaeology*. Springer.
- Grangeia, C., & Matias, M. S. (2004). Técnicas de georadar em prospeção arqueológica: Ançã e São Martinho de Árvore. *Revista Portuguesa de Arqueologia*, 427-434.
- Guerreiro, S., Pinto, L., & Leandro, J. (2011). *A Igreja de São Paulo - Braga*. (C. J. Abreu, Ed.) Braga.
- Günther, T., & Rücker, C. (2012). Electrical Resistivity Tomography (ERT) in geophysical applications - state of the art and future challenges. Em C. H. Adler, & W. Lionheart (Edits.), *100 Years of Electrical Imaging* (pp. 33-36). Paris: Presses des Mines.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2008). *Fundamentals of Physics* (8th ed.). New York: Wiley.

- Hartmann, G., Afonso, M., & Trindade, R. (2007). Arqueomagnetismo e datação arqueomagnética: princípios e métodos. *Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia*, 17, 445-459.
- Hesse, A. (1977). *Braga (Portugal). Reconnaissance archéologique du site par prospection électrique*. CNRS, Centre de Recherches Géophysiques. Garchy: UAUM, policopiado.
- Hesse, A. (1977). *Reconnaissance archeologique du site romain par prospeccion elétrica*. CNRS, Centre de Recherches Géophysiques - Garchy. Braga: policopiado.
- Imai, T., Sakayama, T., & Kanemori, T. (1987). Use of ground-probing radar and resistivity surveys for archaeological investigations. *Geophysics*, 52:2, 137-150. doi:doi:10.1190/1.1442290
- Júnior, A. M., Santos, J. N., & Júnior, J. R. (1983). Castros do Concelho de Boticas. *Trabalhos de Antropologia e Etnologia*, 22 (3), Sep.
- Júnior, A. M., Santos, J., & Júnior, J. (1986). Castros do Concelho de Boticas - II. *Anais da Faculdade de Ciências do Porto, LXVI (1-4)*, Sep.
- Kenyon, J. L. (1977). Ground-Penetrating Radar and Its Application to a Historical Archaeological Site. *Historical Archaeology*, 11, 48-55.
- Latham, R. (1991). *The Dictionary of Computer Graphics, Technology and Applications*. New York: Springer-Verlag.
- Laughlin, R. B. (2005). *Um Universo diferente. Reinventar a Física na Era da Emergência*. (M. Marques, Trad.) Lisboa: Gradiva.
- Lehoërf, A., & Giligny, F. (2005). Avant-Propos. Em J. P. Demoule, F. Giligny, Lehoërf, A., & A. Schnapp, *Guide des méthodes de l'archéologie* (pp. 5-7). Paris: Éditions La Découverte.
- Loke, M. (1996-2004). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. *Revised*. Obtido em janeiro de 2014, de https://pangea.stanford.edu/research/groups/sfmf/docs/DCResistivity_Notes.pdf
- Loke, M. H., Acworth, I., & Dahlin, T. (2003). A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2-D electrical imaging surveys. *Exploration Geophysics*, 34 (3), 182-187.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Lucas, G. (2001). *Critical Approaches to Fieldwork. Contemporary and historical archaeological practice*. London: Routledge.
- Magalhães, F. (2010). *Arquitectura doméstica em Bracara Augusta*. Braga: Dissertação de Mestrado em Arqueologia apresentada à Universidade do Minho.
- Martins, B. M. (2009). *A depressão de Régua-Chaves-Verin. Contributo para a análise do risco de ravinamento*. Coimbra: Tese de Doutoramento em Letras, especialidade em Geografia, apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra. Obtido de <https://estudogeral.sib.uc.pt>
- Martins, C. M., & Abranches, P. B. (2011). Memória (I) material da Praça do Infante, Porto. (CITCEM, Ed.) *CEM Cltura, Espaço e Memória*, 95-119.
- Martins, M. (2000). *Bracara Augusta. Cidade Romana*. Braga: UAUM.

- Martins, M., Meireles, J., Fontes, L., Ribeiro, M. d., Magalhães, F., & Braga, C. (2012). *Água. Um Património de Braga*. Braga: UAUM e CITCEM.
- Matias, M. J. (2003). Electrical methods in archaeological exploration. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 44, 3-4, 193-207.
- Møller, I., Sørensen, K. I., & Auken, E. (2006). Geoelectrical methods. Em *Groundwater Resources in Buried Valleys. A Challenge for Geosciences* (BurVal Working Group ed., pp. 77-88). Hannover: Leibniz Institute for Applied Geosciences (GGA-Institut).
- Nimmer, R. E., Osiensky, J. L., Binley, A. M., & Williams, B. C. (2008). Three-dimensional effects causing artifacts in two-dimensional, cross-borehole, electrical imaging. *Journal of Hydrology*, 59-70. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.06.022
- Okpoli, C. c. (2013). Sensitivity and Resolution Capacity of Electrode Configurations. *International Journal of Geophysics*, 2013, 12 pp. doi:10.1155/2013/608037
- Oleiro, J. M., & Castro, L. d. (1961). Pequeno ensaio de um aparelho M-Scope na prospecção de elementos arqueológicos em Conímbriga. *Boletim de Minas*, 12, 9.
- Oliveira, E. P. (1982). Estudos Bracarenses I: As alterações toponímicas (1380-1980). *Museu*, 3ª Série, 1. Braga: Aspa.
- Osório, B. D., & Guerreiro, M. M. (2015). O povoamento proto-histórico no vale superior do rio Terva (Boticas, Norte de Portugal). *Férvades*, 8, 183-189.
- Parkhomenko, E. I. (1967). *Electrical Properties of Rocks*. (G. V. Keller, Trad.) New York: Plenum Press.
- Pereira, B. S., & Alves, M. S. (Novembro de 2015). *Estudo Geofísico do Seminário Conciliar de São Pedro e São Paulo, Braga. Relatório Final*, policopiado. Braga: Sinergeo, Lda. e UAUM.
- Pereira, B., & Azevedo, J. (2014). *Prospecção geofísica e modelação tridimensional do Castro de Sapelos*. Sinergeo, Lda. Braga: policopiado.
- Pereira, E., & Rodrigues, J. (2010). Caracterização geológica do NW de Trás-os-Montes (Chaves, Montalegre e Boticas). Em C. M. Martins (Ed.), *Mineração e Povoamento na Antiguidade no Alto Trás-os-Montes Ocidental* (pp. 17-26). Porto: CITCEM.
- Piro, S. (2009). Introduction to geophysics for archaeology. Em S. Campana, & S. Piro (Edits.), *Seeing the Unseen. Geophysics and Landscape Archaeology* (pp. 27-64). London: CRC Press.
- Ribeiro, M. d. (2008). *Braga entre a época romana e a Idade Moderna: uma metodologia de análise para a leitura da evolução da paisagem urbana*. Braga: Dissertação de Doutoramento. Universidade do Minho, Instituto de Ciências Sociais. Obtido de <http://hdl.handle.net/1822/8113>
- Rua, H. (2005). *Síntese dos Métodos de Levantamento Arquitectónico no Domínio da Arqueologia*. Instituto Superior Técnico. Lisboa: ICIST.
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., & Richard, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research*, 83, Issue 22, 173-193. doi:doi:10.1016/j.still.2004.10.004

- Santos, F. (2006). *Manual de Prospecção Geofísica I*. Lisboa: Instituto Dom Luiz - Laboratório Associado. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Obtido de <http://idl.ul.pt/downloads>
- Santos, F. A., Silveira, G., & Matias, L. (2014). Resolver o Problema Inverso para encontrar recursos e investigar o interior da Terra. Em F. Costa, J. T. Pinto, & J. Buescu (Edits.), *Matemática do Planeta Terra* (2.ª ed., pp. 167-206). Lisboa: ISTPRESS.
- Santos, M. F., & Esteves, J. M. (1966). Possibilidades de aplicação do método da resistividade eléctrica na prospecção arqueológica. *Ethnos: Revista do Instituto Português de Arqueologia, História e Etnografia*, 313-335.
- Sasaki, Y. (1992). Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40 (4), 453-463.
- Schmidt, A. (2009). Electrical and magnetic methods in archaeological prospection. Em S. Piro, & S. Campana (Edits.), *Seeing the Unseen* (pp. 67-82). London: Taylor & Francis Group.
- Shanks, M., & Tilley, C. (1988). *Social Theory and Archaeology*. Albuquerque: University of New Mexico Press.
- Soares, N. d. (2011). O Arcebispo de Braga D. Diogo de Sousa "Pricipe Umanizzato" do Renascimento e o seu projecto Educativo Moderno. *Humanitas*, 63, 527-561.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Terra, H. (1947). Preliminary note on the discovery of the fossil man at Tepexpan, in the valley of Mexico. *American Antiquity*, 13 - 1, pp. 40-44. doi:10.2307/275752
- Tsokas, G. N., Tsourlos, P. I., & Papadopoulos, N. (2009). Electrical resistivity tomography: a flexible technique in solving problems of archaeological research. Em S. Campana, & S. Piro (Edits.), *Seeing the Unseen* (pp. 83-104). London: Taylor & Francis Group.
- 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 21-23 Outubro*. Silves: Câmara Municipal de Silves (no prelo). Obtido de https://www.academia.edu/548738/O_Complexo_Arqueol%C3%B3gico_dos_Perdig%C3%B5es_nova_imagem_e_novos_problemas_proporcionados_pela_prospec%C3%A7%C3%A3o_geof%C3%ADsica_in_print
- Velho, H. F. (2001). Problemas Inversos: conceitos básicos e aplicações. Notas para o Mini-Curso apresentado durante o IV Encontro de Modelagem Computacional em Nova Friburgo (RJ). *Anais do IV Encontro de Modelagem Computacional em Nova Friburgo (RJ)* (pp. 63-79). Rio de Janeiro: IPRJ -UERJ.
- Vickers, R. S., & Dolphin, L. T. (May de 1975). A communication on an archaeological radar experiment at Chaco Canyon, New Mexico. *MASCA newsletter*, 11:1.
- Weymouth, J., & Huggins, R. (1985). Geophysical surveying of archaeological sites. Em G. Rapp, & A. Gifford (Edits.), *Archaeological geology* (pp. 191-235). New Haven: Yale University Press.

Wynn, J. C. (1986). A review of geophysical methods used in archaeology. *Geoarchaeology*, 1 - 3, 245-257. doi:10.1002/gea.3340010302

Zhadanov, M. S. (2009). *Geophysical Eletromagnetic Theory and Methods. Methods in Geochemistry and Geophysics*, 43. Amsterdam: Elsevier.

Zhadanov, M. S., & Keller, G. V. (1994). *The geoelectrical methods in geophysical exploration*. Elsevier.

Legislação Consultada:

ICOMOS, Carta Internacional para a Proteção e Gestão do Património Arqueológico, Lausanne: 1990.

Obtido de <http://www.patrimoniocultural.pt/pt/patrimonio/cartas-e-convencoes-internacionais>

Convenção Europeia para a Proteção do Património Arqueológico, La Valetta: 1992 – revista. Publicada em Resolução da Assembleia da República n.º 71/97 e ratificada pelo Decreto do Presidente da República n.º 74/97 de 16 de dezembro.

Obtido de <http://www.patrimoniocultural.pt/pt/patrimonio/cartas-e-convencoes-internacionais>

APÊNDICE I – CONDUÇÃO ELÉTRICA: PRINCÍPIOS GERAIS

APÊNDICE I – CONDUÇÃO ELÉTRICA: PRINCÍPIOS GERAIS

O que em seguida se apresenta aborda, de forma breve e genérica, o que consideramos serem as bases teóricas, no espectro da Física, sobre os quais se desenvolveram os métodos de prospecção geoeletrica. Uma análise mais detalhada dos conceitos apresentados pode ser encontrada em várias obras de referência, como em Halliday et al., 2008 ou em Zhadanov, 2009.

A intensidade de corrente elétrica (I , uma grandeza escalar medida em Amperes [A] pelo Sistema Internacional de Unidades - SI) é causada pelo movimento de partículas com carga, que, em metais é feita por elétrons, portadores de carga negativa, e, em líquidos, é realizada por íons, moléculas carregadas que, em presença de um campo elétrico, alinham no sentido do respectivo vetor elétrico (positivo ou negativo) (Clark, 1996, p. 27; Schmidt, 2009, p. 68).

A carga elétrica (Q , medida em Coulomb [C], pelo SI) é uma propriedade fundamental destas partículas, sendo o que proporciona o seu movimento numa dada direção (Schmidt, , 2013, Cap.I, loc. 157). Para que a corrente (I) ocorra, é necessário que se aplique um potencial elétrico (V) por unidade de carga entre A e B, o que determina o movimento ordenado destas partículas (q) numa determinada direção ou polaridade (Schmidt, 2009, p. 68; Weymouth & Huggins, 1985, p. 219).

A corrente elétrica pode definir-se matematicamente por:

$$I = q/t$$

(E) 14

onde t é o tempo, em segundos, que a carga elétrica q demora a percorrer o circuito AB (Schmidt, 2013, Cap.I, loc. 157), que na sua forma derivada se estabelece por:

$$I = dq/dt$$

(E) 14.1

(Halliday et al., 2008, p. 683). Qualquer carga q , positiva ou negativa, pode ser descrita através de

$$q = ne$$

(E) 14.2

Onde n é uma incógnita e e é a carga de um elétron e simultaneamente uma das mais importantes constantes da Física, sendo estabelecida por:

$$e = 1.602 \times 10^{19} C$$

(E) 14.3

(Halliday et al., 2008, p. 572).

A direção da corrente elétrica (I) estabelece-se como sendo idêntica à do fluxo das cargas positivas, ou seja, na direção oposta à da deslocação dos elétrons livres (Halliday et al., 2008, p. 684; Lowrie, 2007, p. 253).

A força que induz atração ou repulsão e define a direção do movimento das partículas com carga é denominada por força electrostática; a força electrostática determina que partículas com polaridades distintas se atraem e partículas com polaridades iguais se repelem (Halliday, Resnick, & Walker, 2008, p. 563). Regida pela Lei de Coulomb, a força electrostática pode ser considerada como:

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

(E) 15

onde \hat{r} é um vetor ao longo do eixo que se estende entre duas partículas, q_1 e q_2 , r é a distância entre q_1 e q_2 , e k é a constante electrostática (Halliday et al., 2008, p. 566).

Uma das formas de entender a força eletrostática entre duas partículas de carga elétrica é assumir que cada carga (q) é geradora de um campo elétrico (\vec{E}) no seu entorno, o qual determina a ação da força eletrostática (\vec{F}) em função da distância entre as duas partículas (Halliday et al., 2008, p. 596). Assim, para um dado ponto, podemos estabelecer que

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

(E) 16

onde q_0 é uma carga de teste positiva, introduzida sobre o ponto para determinar a presença e a direção de \vec{E} (Halliday et al., 2008, p. 581). O campo elétrico de um dado ponto é uma grandeza vetorial, medida

pelo SI em Newtons/ Coulomb [N/C] ou em Volts/metro [V/m⁻¹] (Halliday et al., 2008, p. 58; Schmidt, 2013, Cap.I, loc. 168).

Dos trabalhos realizados por Michael Faraday no séc. XIX surge a consideração de que o vetor de um campo elétrico pode ser representado através de linhas de campo elétrico, como uma imagem abstrata de um ponto com carga, cuja polaridade faz atrair ou derivar n de linhas de força (Halliday et al., 2008, p. 582). Se o ponto de carga que originar as linhas de campo tiver polaridade positiva, as linhas de campo estendem-se no sentido oposto ao ponto de origem; se o ponto de carga tiver polaridade negativa, as linhas de campo dirigem-se para o ponto de origem (Figura 42) (Halliday et al., 2008, p. 582).

Em qualquer ponto, a direção de uma linha de campo reta ou a direção da tangente a uma linha de

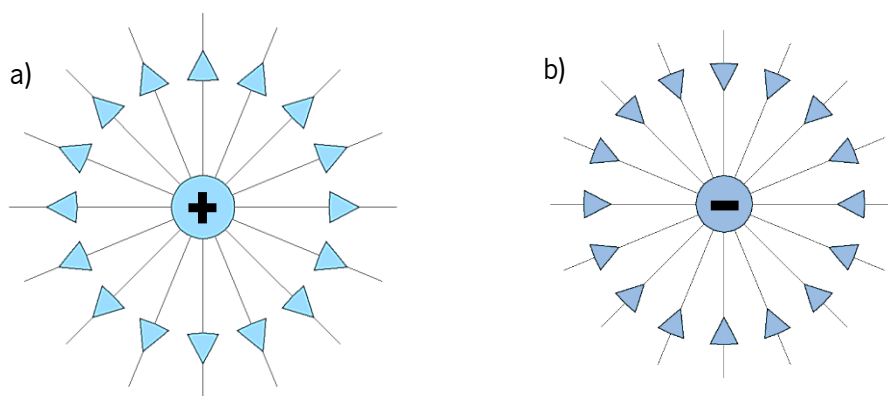


Figura 42 – Expressão gráfica da direção do vetor \vec{E} a partir de a) uma carga positiva e b) na direção de uma carga negativa. Adaptado de Halliday et al. (2008, p. 582).

campo curva devolve a direção de \vec{E} no ponto considerado (Halliday, Resnick, & Walker, 2008, p. 582). As linhas de campo são desenhadas de forma que o número de linhas por unidade de área, medido num plano que lhes seja perpendicular, seja proporcional à magnitude de \vec{E} ; assim, o campo elétrico E é maior onde existir uma maior proximidade de linhas de campo e proporcionalmente menor onde as linhas se apresentarem mais espaçadas (Halliday et al., 2008, p. 582).

Quando introduzimos o conceito de força electrostática aplicada a um sistema com número de partículas superior a dois, podemos introduzir o conceito potencial de energia elétrica, U (Halliday et al., 2008, p. 631).

O potencial de energia elétrica (U) representa um sistema constituído por um conjunto de partículas com carga e o seu respetivo campo elétrico, sendo medido em Joules [J] pelo SI (Halliday et al., 2008, p.

631). A mudança que ocorre no campo elétrico quando as cargas se movem entre dois pontos, i e f , pode ser matematicamente representada por:

$$\Delta U = U_f - U_i = -W,$$

(E) 17

(Halliday et al., 2008, p. 629), onde W representa a influência da força electrostática sobre um sistema de partículas com carga durante a deslocação de i para f , sendo que W é uma força conservativa e portanto o seu trabalho é constante independentemente da trajetória pela qual as cargas se deslocaram (Halliday, Resnick, & Walker, 2008, p. 629).

É importante distinguir potencial de energia elétrica (U) do conceito de potencial elétrico (V , medida em Volts [V] pelo SI), já referido a propósito de (E)14; o potencial elétrico é uma propriedade escalar que traduz o potencial de energia por unidade de carga num ponto n do campo elétrico, sendo independente da carga q da partícula, onde:

$$V = \frac{U}{q'}$$

(E) 18

(Halliday et al., 2008, p. 629). Introduzido o conceito de influência da força electrostática W , podemos estabelecer a diferença de potencial elétrico como:

$$\Delta V = V_f - V_i = -\frac{W}{q}$$

(E) 19

(Halliday et al., 2008, p. 631), onde o potencial de diferença entre dois pontos é apresentado como o negativo do valor de W para mover uma unidade de carga de i para f (Halliday et al., 2008, p. 631).

A conjunção de pontos com o mesmo potencial elétrico possibilita a consideração de superfícies equipotenciais, ou seja, planos escalares com valor de potencial constante, perpendiculares às linhas de campo e, por conseguinte, ao vetor do campo elétrico \vec{E} (Halliday et al., 2008, p. 632). Quando representadas em corte, as superfícies de potencial escalar constante podem ser apresentadas como linhas, que se dizem também equipotenciais (Figura 43).

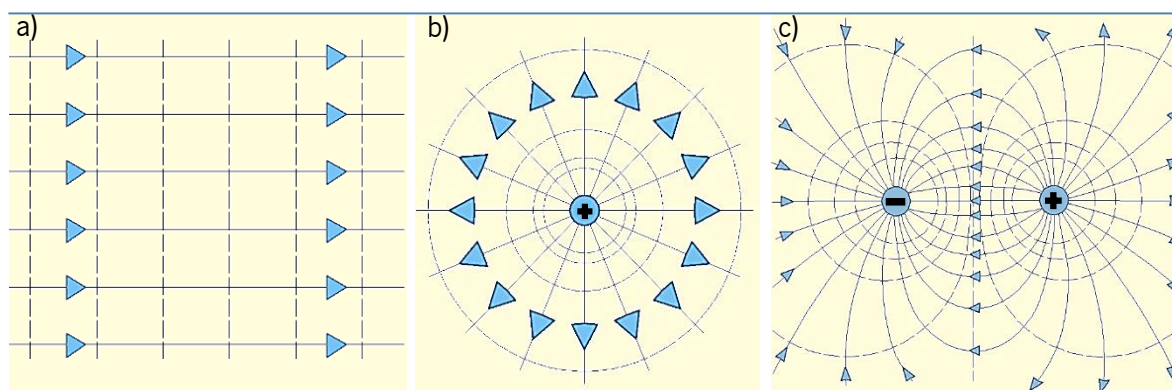


Figura 43- Representação gráfica, em corte horizontal, das linhas de campo (a azul) e respectivas superfícies equipotenciais (a bege) para a) um campo elétrico constante, b) um ponto de carga e c) um dipolo elétrico; num dipolo, as cargas elétricas têm o mesmo valor de magnitude, com polaridades opostas. Adaptado de Halliday et al.(2008, p. 633).

O princípio fundamental sobre o qual assentam os estudos de prospecção geolétrica é o que determina que a corrente elétrica, quando injetada num meio homogêneo e isotrópico tende a percorrer um caminho ótimo entre o ponto de entrada, A, e o ponto de saída, B, estando o tempo de percurso e a intensidade de potência dependente da oposição criada pelo meio condutor (Schmidt, 2009, p. 67). Se encontrar obstáculos que impeçam a passagem da corrente, o percurso ideal é alterado, criando uma anomalia de distribuição (Schmidt, 2009, p. 67). Assim, quando injetamos uma determinada voltagem $[U]$ entre A e B, a intensidade de corrente gerada (I) dependerá do valor de oposição que encontrará no condutor (Schmidt, 2013, Cap., loc. 168). Ao valor de oposição criado pelo condutor à passagem de corrente numa extensão L chamamos resistência elétrica (R , medida em Ohms $[\Omega]$ pelo SI), pelo que se estabelece a seguinte relação:

$$R = \Delta V / I$$

(E) 20

(Schmidt, 2013, Cap., loc. 168).

Então, se aplicarmos uma determinada voltagem V sobre os pontos A e B de um condutor elétrico, chegamos ao valor da resistência elétrica através da medição da corrente que daí resulta, donde:

$$R = V/I$$

(E) 20.1

(Halliday et al., 2008, p. 638).

Matematicamente, a resistência (R) pode ser reconsiderada nas seguintes possibilidades:

$$V = R I$$

(E) 20.2

Ou

$$I = V / R$$

(E) 20.3

Por onde se estabelece que a corrente I é inversamente proporcional à resistência R (Clark, 1996, p. 27).

Em determinados condutores, chamados *ôhmicos*, a resistência elétrica (R) é considerada linear, sendo uma constante independente da corrente (I); nestes casos, aplica-se a Lei de Ohm, que determina que a corrente elétrica (I) entre dois pontos um condutor que seja mantido a uma temperatura constante, é sempre diretamente proporcional à voltagem (V) aplicada sobre o condutor, donde se estabelece que:

$$R = V/I$$

(E) 20.4

(Schmidt, 2013, Cap., loc. 168; Weymouth & Huggins, 1985, p. 219). É importante distinguir a proposição da Lei de Ohm, que se aplica apenas condutores ôhmicos e onde a resistência é uma propriedade independente que não resulta de uma relação de proporcionalidade com a voltagem aplicada (V), do conceito de resistência elétrica exposto em (E) 20 – 20.3, uma proposição geral aplicável a qualquer condutor (Halliday et al., 2008, p. 693; Schmidt, 2013, Cap., loc. 185).

Para estudar um fluxo de corrente num determinado ponto de uma dada secção de um condutor, utiliza-se o conceito de densidade de corrente (J , medido em amperes/m² [A/m²] (Halliday et al., 2008, p. 685). A direção e velocidade de J será igual à das partículas de carga, se estas tiverem carga positiva, e oposta, se tiverem carga negativa; J é então o vetor de magnitude igual à corrente por unidade de carga que passa pela secção determinada, secção esta que é perpendicular ao elemento condutor (Halliday et al., 2008, p. 685). Desta definição, podemos determinar a densidade de corrente (J) como:

$$I = \int \vec{J} \cdot d\vec{A}$$

(E) 21

(Halliday et al., 2008, p. 685). Para analisar os valores de oposição à corrente em materiais, a ênfase passa a estar na relação entre o valor campo elétrico (E) e a densidade de corrente (J) num dado ponto; desta relação entre vetores surge o conceito de resistividade elétrica (ρ , medido em Ohms/m [Ω/m]), uma propriedade escalar dada por:

$$\rho = \frac{E}{J}$$

(E) 22

(Halliday et al., 2008, p. 689). A relação apresentada em (E)22 aplica-se exclusivamente a materiais cujas propriedades elétricas sejam iguais em todas as direções, ditos materiais isotrópicos (Halliday et al., 2008, p. 689).

A resistividade elétrica (ρ) é uma resistência específica que, sendo uma propriedade intrínseca de um material, determina que a resistência elétrica (R) de um condutor homogêneo e de secção transversal constante seja proporcional ao seu comprimento (L) e inversamente proporcional à área da sua secção transversal (A), dependendo da temperatura e do material de que se constitui o condutor, logo:

$$\rho = R \frac{A}{L}$$

(E) 22.1

(Halliday et al., 2008, p. 690; Schmidt, 2013, Cap., loc. 241).

Analisando o movimento das cargas elétricas de forma a enfatizar a permissividade que um dado condutor ou material faz à passagem da corrente, chegamos aos conceitos de condutância (G) e condutividade (σ), que representam os recíprocos da resistência e da resistividade, respectivamente e na mesma ordem se aplicam a objetos uma e a materiais a outra (Halliday et al., 2008, p. 689; Schmidt, 2013, Cap., loc. 291).

A condutância (G , medida em Siemens [S] pelo SI) é dada por:

$$G = 1/R$$

(E) 23

(Halliday et al., 2008, p. 690; Schmidt, 2013, Cap., loc. 241). A condutividade (σ , medida pelo recíproco da resistividade em $(\text{Ohm}/\text{metro})^{-1}$ $[(\Omega/\text{m})^{-1}]$ ou em Siemens/metro [S/m] pelo SI) é dada por

$$\sigma = 1/\rho$$

(E) 23.1

(Halliday et al., 2008, p. 690; Schmidt, 2013, Cap., loc. 241).