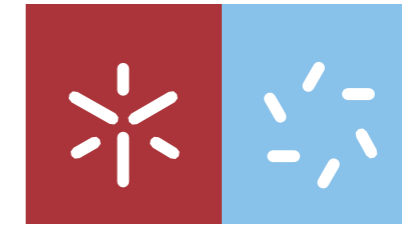




Prospeção geofísica aplicada a fins arqueológicos e geotécnicos. – Caso pratico da Nossa Senhora do Castelo,

UMinho | 2019

Márcio Rafael Amaral Macieira



Universidade do Minho

Escola de Ciências

Márcio Rafael Amaral Macieira

Prospeção geofísica aplicada a fins arqueológicos e geotécnicos – Caso pratico da Nossa Senhora do Castelo, Lourinhã

outubro de 2019



Universidade do Minho
Escola de Ciências

Márcio Rafael Amaral Macieira

Prospecção geofísica aplicada a fins arqueológicos e geotécnicos. – Caso pratico da Nossa Senhora do castelo, Lourinhã

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Geociências – Ramo Valorização de

Recursos Geológicos

Orientadores:

Professor Doutor Luís Miguel Barros Gonçalves

Mestre Geólogo Bruno Filipe de Oliveira Sameiro Pereira

Outubro de 2019



DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

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

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

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



Atribuição
CC BY

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



Agradecimentos

Não poderia começar a agradecer a ninguém que não fosse a minha família, os meus pais, António Fernando Brito Macieira, a minha mãe, Custodia da Silva Amaral e a minha irmã, Ana Marisa Amaral Macieira, pois foram sempre eles os primeiros a acreditar em mim, o que permitiu que hoje possa concluir esta caminhada. A eles, o meu muito obrigado, carregado de amor e afeto.

Agradeço também aos meus orientadores, que dedicaram horas das suas vidas para que a minha fique agora um pouco mais completa. Eles que, mais que ninguém, me ajudaram mais nesta etapa, instruindo quer a nível profissional quer a nível pessoal, deles levo, além de mentores, amigos que sei que posso contar, muito obrigado Bruno Pereira, muito obrigado professor Luís Gonçalves.

Com todas as horas que passei na Sinergeo, a estudar, trabalhar e aprender, não podia deixar de agradecer a todos os seus colaboradores, o meu muito obrigado por tudo a Andreia, ao Flávio, ao João, ao Jorge e a minha parceira de estágio Marta, porque todos me ensinaram algo e marcaram esta etapa.

À minha segunda família, os meus melhores amigos, Nosso Comando, Pinilla, Yuri, Sr. Engenheiro e Bonginho, que são sempre o motivo de umas gargalhadas. Eles tornaram este caminho sempre melhor, obrigado por poder contar sempre com vocês para conselhos ou uma simples conversa de treta.

Aos amigos que universidade me deu, Gomes, Miguel, Rui, Roberta e Pedro, muito obrigado por em momentos que eu estava mais distante se lembrarem de mim, quer o motivo fosse beber uns finos ou um jogo de monopólio.

A todos os docentes que de uma forma ou de outra marcaram esta minha etapa, aos meus colegas de licenciatura e mestrado e a todas as amizades que fiz durante estes anos, o meu muito obrigado por tudo.

Não podia também deixar cair no esquecimento a grande família do 660-Montariol, que foram companhia assídua destes anos, com um agradecimento especial aos meus “Patos Marrecos”, canhota forte a todos.



DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.



Índice

Agradecimentos	ii
Índice	iv
Índice de figuras.....	vi
Índice de tabelas.....	viii
Resumo.....	ix
Abstract	x
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento do estudo	1
2. Capítulo Métodos Geofísicos	2
2.1. Resistividade	2
2.1.1. Arranjos	4
2.1.1.1 Wenner	4
2.1.1.2 Schlumberger.....	6
2.1.1.3 Wenner-Schlumberger.....	6
2.1.1.4 Dipolo-Dipolo	7
2.1.1.5 Polo-Dipolo	7
2.2. Polarização induzida.....	8
2.3. Georadar	10
3. Enquadramento Geográfico e Geológico	13
4. Metodologia, Resultados e Discussão.....	14
4.1. Resistividade eléctrica.....	15
4.2. polarização induzida.....	29
4.3. Georadar	31
5. Conclusões.....	57



Bibliografia..... 59



Índice de figuras

Figura 1: ilustração do funcionamento da resistividade (Kerey P. et al, 2002)	3
Figura 2: Arranjo de Wenner	4
Figura 3: Arranjo de Schlumberger.....	6
Figura 4: Arranjo de Wenner-Schlumberger.....	6
Figura 5: Arranjo Dipolo-Dipolo	7
Figura 6: Arranjo Polo-Dipolo	8
Figura 7: Fenómeno do decaimento elétrico após corte de corrente (retirado de Kerey P. et al,2002).....	9
Figura 8: Fenomeno da Polarização induzida (Luis, 2005).....	10
Figura 9: Onda eletromagnética nos campos elétrico e magnético Polarizados (retirado de Gonçalves, 2013).....	11
Figura 10: Esquema da Lei de Snell aplicada ao Georadar.....	11
Figura 11: Relação entre a frequencia e consequente profundidade alcançada e a resolução dos dados (modificado de Sharma 1997).....	12
Figura 12: Enquadramento Geográfico e Geológico do local de estudo (modificado de Almeida C. et al, 2000 e de carta geológica 1:50000 da Lourinhã).....	14
Figura 13: Perfil de resistividade eletrica na face voltada a Este do Local	15
Figura 14: Ilustração dos locais onde foram realizados os perfis eletricos	16
Figura 15: Pseudosecção de resistividade do perfil L1	17
Figura 16: Pseudosecção de resistividade do perfil L2	17
Figura 17: Pseudosecção de resistividade do perfil L3	18
Figura 18: Pseudosecção de resistividade do perfil L4	18
Figura 19: Pseudosecção de resistividade do perfil L5	19
Figura 20: Pseudosecção de resistividade do perfil PE1	19
Figura 21: Pseudosecção de resistividade do perfil PE2.....	19
Figura 22: Pseudosecção de resistividade do perfil PE3.....	20
Figura 23: Pseudosecção de resistividade do perfil PE.....	20
Figura 24: Pseudosecção de resistividade do perfil PS1	21
Figura 25: Pseudosecção de resistividade do perfil PS2	21
Figura 26: Pseudosecção de resistividade do perfil PS3	22
Figura 27: Pseudosecção de resistividade do perfil PS4	22
Figura 28: Pseudosecção de resistividade do perfil PS4.....	23
Figura 29: Pseudosecção de resistividade do interior da igreja ao centro.....	23
Figura 30: Pseudosecção de resistividade no interior da igreja a Norte.....	24
Figura 31: Pseudosecção de resistividade no interior da igreja a Sul	24



Figura 32: Resistividade aparente em planta.....	25
Figura 33: Resistividades interpoladas com valores de resistividades inferiores a 100 ohm.m excluídos	26
Figura 34: Modelação 3D sobre os perfis de resistividade	27
Figura 35: Volumes gerados a partir da interpolação das secções bidimensionais obtidas a partir dos perfis de resistividade	28
Figura 36: Bloco diagrama representativo dos resultados de resistividade.....	29
Figura 37: Pseudosecção obtida para o perfil Lourinhã IP_1	30
Figura 38: Pseudosecção obtida para o perfil Lourinhã IP_2	30
Figura 39: pseudosecção obtida para o perfil Lourinhã IP_3.....	31
Figura 40: Mapa dos diferentes poligonos	32
Figura 41: Radargrama referente ao Polígono A	34
Figura 42: Radargrama referente ao polígono B.....	37
Figura 43: Radgrama referente ao Poligono D.....	38
Figura 44: Mapa com implantação das anomalias de Georadar.....	56



Índice de tabelas

Tabela 1: Cortes do polígono A com a antena de 400 MHz	32
Tabela 2: Cortes do polígono A com a antena de 200 MHz.....	33
Tabela 3: Cortes do polígono B com a antena de 400 MHz.....	35
Tabela 4: Cortes do polígono B com a antena de 200 MHz.....	36
Tabela 5: Cortes do polígono D com a antena de 400 MHz	37
Tabela 6: Cortes do polígono E_A com a antena de 200 MHz	39
Tabela 7: Cortes do polígono E_B com a antena de 200 MHz	40
Tabela 8: Cortes do polígono E_C com a antena de 200 MHz	41
Tabela 9: Cortes do polígono E_D com a antena de 200 MHz.....	43
Tabela 10: Cortes do polígono E_F com a antena de 200 MHz.....	44
Tabela 11: Cortes do polígono F com a antena de 200 MHz	46
Tabela 12: Cortes do polígono H com a antena de 400 MHz.....	47
Tabela 13: Cortes do polígono I com a antena de 400 MHz	47
Tabela 14: Cortes do polígono J com a antena de 400 MHz.....	48
Tabela 15: Cortes do polígono K com a antena de 400 MHz.....	49
Tabela 16: Cortes do polígono L com a antena de 400 MHz	50
Tabela 17: Cortes do polígono M com a antena de 200 MHz	50
Tabela 18: Cortes do polígono N com a antena de 200 MHz.....	51
Tabela 19: Cortes do polígono O com a antena de 400 MHz.....	51
Tabela 20: Cortes do polígono P com a antena de 400 MHz	52
Tabela 21: Cortes do polígono S com a antena de 400 MHz	53
Tabela 22: Cortes do polígono U com a antena de 200 MHz.....	54
Tabela 23: Cortes do polígono Y com a antena de 400 MHz.....	55



Resumo

Esta dissertação de mestrado assenta na aplicação de diferentes métodos geofísicos para pesquisas geotécnicas e arqueológicas na igreja da Nossa Senhora do Castelo, tendo por objetivo identificar a causa das fissuras nas paredes da igreja e identificar potencial arqueológico local.

No âmbito deste trabalho foram escolhidos três métodos de prospecção geofísicos, sendo eles Polarização induzida, resistividade elétrica e Georadar.

A prospecção pelo método de Resistividade elétrica e Polarização Induzida foi feita com recurso a um resistivímetro SYSCAL R1 Plus da marca IRIS Instruments e o tratamento de dados foi feito com recurso ao software RES2D INV. A prospecção geofísica com o georadar foi feita com duas antenas da GSSI, uma de 200 (MHz) e outra de 400 (MHz), o tratamento de dados foi feito no software ReflexW.

Nos perfis de resistividade, durante o tratamento dos dados foram usados vários métodos, tais como a aplicação de filtros de exclusão de resistividades, assim podendo estudar melhor os valores de resistividade alta e de resistividade baixa. Foram também criadas plantas de resistividade aparente.

Para os perfis de georadar, foram usados modelos tridimensionais, juntamente com os radargramas bidimensionais para o estudo local.

Da interpretação dos dados, obtidos com a utilização destas metodologias prospectivas, podemos concluir que o local possui interesse do ponto de vista arqueológico, uma vez que foram identificadas diversas estruturas soterradas de origem antrópica. Foi também identificada a possível causa das fissuras diagonais apresentadas nas paredes da igreja, sendo a causa das mesmas explicada por uma possível falha preenchida por argilas expansivas.

Palavras Chave: Georadar, GPR, Resistividade, Polarização Induzida, IP, Lourinhã.



Abstract

This master's dissertation is based on the application of different geophysical methods for geotechnical and archaeological research in the church of *Nossa Senhora do Castelo*, aiming to identify the cause of cracks in the church walls and identify local archaeological potential.

In this work three geophysical prospecting methods were chosen, namely induced polarization, electrical resistivity and GPR.

Prospecting by the method of Electrical Resistivity and Induced Polarization was made using an IRIS Instruments SYSCAL R1 Plus resistivimeter and data processing was performed using RES2D INV software. The geophysical survey with the georadar was done with two GSSI antennas, one of 200 (MHz) and another of 400 (MHz), the data processing was done in ReflexW software.

In the resistivity profiles, during the data processing several methods were used, such as the application of resistivity exclusion filters, thus being able to better study the values of high resistivity and low resistivity. Plants of apparent resistivity were also created.

For georadar profiles, three-dimensional models were used, together with two-dimensional radargrams for the local study.

From the interpretation of the data obtained through the use of these prospective methodologies, we can conclude that the site is of interest from an archaeological point of view, since several buried structures of anthropic origin were identified. The possible cause of the diagonal cracks in the church walls was also identified as a possible fault with expansible clay minerals

Keywords: GPR, Resistivity, Induced Polarization, IP, Lourinhã



1. Introdução

1.1. Enquadramento do estudo

A prospeção geológica sempre acompanhou o desenvolvimento das sociedades humanas dado que, desde o paleolítico, o ser humano procura materiais geológicos para a produção de ferramentas e afins. Por sua vez, as sociedades humanas sempre se desenvolveram em torno de zonas ricas em recursos hídricos, que são outro tipo de recurso geológico. A obtenção de todos estes elementos era feita nos locais onde estes apareciam à superfície. Para fazer face ao aumento da procura de recursos geológicos, foi necessário desenvolver métodos de extração em profundidade, o que foi acompanhado pelo desenvolvimento de métodos de prospeção que identificassem esses recursos. Atualmente, à procura de recursos minerais estão subjacentes modelos conceptuais, posteriormente comprovados com o auxílio de métodos geofísicos.

A geofísica é a ciência responsável pelo estudo do interior da terra, na sua totalidade ou em pequenas porções, por sua vez a geofísica aplicada é estudo da crosta a baixas profundidades para fins práticos e muitas vezes económicos (Reynolds, 2011) Pela sua versatilidade e importância, estes métodos são também muito utilizados em estudos de arqueologia, geotecnia, engenharia civil, investigações forenses, explorações planetárias, explorações de cariz ambiental, entre outros (Reynolds, 2011).

Dada a grande variedade de propriedades físicas que os materiais geológicos de interesse podem apresentar, os métodos geofísicos exibem uma grande diversidade e multiplicidade de aplicações. Em contraste com as propriedades físicas do material envolvente, as propriedades físicas dos materiais de interesse geológico utilizadas para prospeção geofísica podem ser de natureza diversa: gravítica, magnética, elétrica, sísmica, entre outras. Estes métodos permitem a obtenção de informação em profundidade sem a necessidade de escavação ou remoção de tarolos. Por este motivo, apresentam vantagens aparentes: são métodos rápidos, baratos e precisos, quando associados a uma correta aplicação.

A necessidade de caracterização das estações arqueológicas com recurso a métodos não destrutivos e não intrusivos, dá uma importância de relevo às técnicas de prospeção geofísica (Gonçalves, L. 2013), com particular ênfase ao Georadar e aos métodos elétricos e magnéticos. A aplicação destas metodologias possibilita a definição da estratigrafia do subsolo e a deteção, identificação e mapeamento de estruturas arqueológicas soterradas.

A existência de edifícios em diversos estados de deterioração em locais nobres das nossas cidades levou a um aumento do investimento na reabilitação desses mesmos edifícios, muitas vezes o diagnóstico do estado de conservação e da geotécnia local são insuficientes e para colmatar a informação são utilizados métodos não destrutivos entre os quais se encontra o GPR (Fernandes,



2007). Os materiais geológicos apresentam uma grande variedade de propriedades físicas, sendo a resistividade uma delas. E de acordo com o volume 67 do *Journal of Applied Geophysics* (Sudha et al 2009) esta propriedade é utilizada em associação com ensaios geotécnicos para investigações geológicas.

O local em estudo é marcado por uma longa historia e poucos registos escritos, sendo o conhecimento popular deveras importante nestes casos, sabe-se a muito que o local é de extrema importância arqueológica e parte deste estudo passa por, utilizando métodos não destrutivos identificar possíveis locais de maior interesse arqueológico, para que este passe a estar identificado, podendo assim ser preservado. É também importante ressaltar que o património existente apresenta sinais de instabilidade (fissuras diagonais) e os métodos geofísicos são de extrema importância para colmatar a informação obtida previamente, para que assim uma futura intervenção neste local saiba quais os problemas e qual a melhor maneira de os resolver.

2. Capítulo Métodos Geofísicos

Quando se realiza um trabalho de prospeção geofísica devemos ter em conta todos os possíveis métodos a utilizar, devemos também procurar saber quais métodos se aplicam ao tipo de prospeção que ira ser realizada. O trabalho realizado na igreja da Nossa Senhora do castelo na Lourinhã foi era um trabalho de prospeção arqueológica e Geotecnia para estes tipos de prospeção podiam se aplicar Resistividade, Georadar, polarização induzida (apenas geotecnia) e magnética. Para o trabalho, no entanto, foram apenas realizados os métodos da Resistividade, Polarização e Georadar. Isto por dois motivos, um, estávamos num meio urbano e a utilização da magnética seria muito difícil devido a presença de muitos materiais que iriam provocar dificuldades na obtenção de dados. O segundo motivo é que este trabalho foi realizado em empresa logo, devemos ter em conta que é necessário ser pragmático e economicamente viável. A aplicação de mais um método iria obrigar a mais dias de trabalho e mais deslocações. O que torna isto um método não economicamente viável.

2.1. Resistividade

A prospeção geofísica com recurso à resistividade, desenvolveu-se inicialmente em meados do século XX. Tornou-se popular na década de 1970, principalmente devido à existência de computadores para processamento e análise da informação. Este método é extensivamente utilizado para fins geológicos, arqueológicos e de engenharia. Em geologia é utilizado, essencialmente, para procurar água e monitorizar focos de poluição de águas subterrâneas; na área da engenharia é utilizado para encontrar cavidades, falhas e fissuras, solos permanentemente gelados ou galerias de minas. Por sua vez, a utilização deste método na arqueologia está

relacionada com o mapeamento de estruturas subterrâneas, tais como edifícios e fundações. (Kearey *et al.*, 2002).

A resistividade é um método que mede a capacidade que um objeto tem de resistir a ser atravessado por uma corrente elétrica, assim sendo, qualquer diferença na porosidade, preenchimento ou até constituição de materiais irá influenciar a resistividade, assim sendo, este método é atualmente muito utilizado para a prospeção arqueológica, geotécnica entre outras, podendo ser até considerado um dos métodos geofísicos mais versáteis.

Este método é extensivamente utilizado na prospeção de águas, minerais metálicos, monitorização de poluição de lençóis freáticos, etc. (Reynolds J. M., 2011). Esta utilização deve-se à propriedade física que a resistividade mede, a resistividade de um material é definida como a resistência em Ohms entre as faces opostas de um cubo de material (Figura 1). Para um cilindro condutor a Resistência (δR), comprimento (δL) e a superfície transversal (δA) a resistividade ρ é dada por (ohm/m):

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

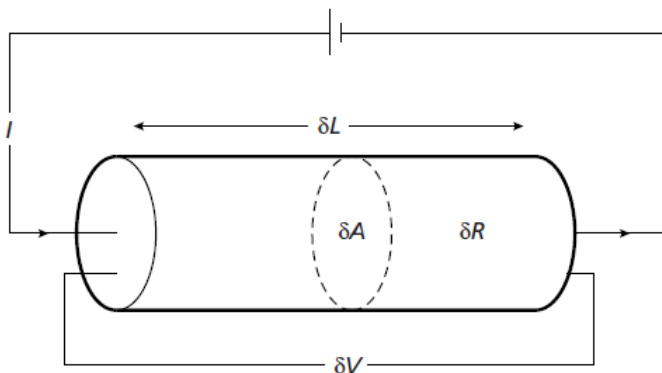


Figura 1: ilustração do funcionamento da resistividade (Kerey P. *et al.*, 2002)

O inverso da resistividade é a condutividade (unidades Siemens (S) por metro: $-1=1\text{ohm}^{-1}\text{m}^{-1}$).

Resistividade é uma das mais versáteis propriedades físicas. Alguns minerais, tal como os metais nativos e a grafite, conduzem eletricidade devido a passagem de elétrons (condução eletrónica). No entanto, a maioria das formações rochosas são isoladores e a eletricidade passa através da água em poros (transporte eletrolítico).

A eletricidade pode atravessar as rochas de três modos diferentes: condutividade eletrolítica, condutividade eletrónica e condutividade dielétrica. A condução eletrolítica é feita por

movimentos lentos dos iões num eletrólito e depende do tipo de iões que estão a fazer o transporte, da sua concentração e da sua mobilidade; condução eletrónica é um processo no qual iões metálicos permitem o movimento rápido de eletrões; condução dielétrica ocorre em materiais muito pouco condutores quando se aplica uma corrente que faz com que os eletrões mudem ligeiramente a sua posição. Quando esta condução é feita existe uma queda de potencial (V) devido a resistividade elétrica (R) do material atravessado

Na maior parte das rochas a condução de eletricidade é feita por fluídos presentes em porosidades que servem como eletrólitos. Os minerais pouco, ou nada, contribuem a menos que estes tenham uma alta condutividade. Assim sendo, os efeitos dos processos geológicos na condutividade/resistividade elétrica podem ser explicados em termos do seu efeito nos caminhos de condução. Se a porosidade e a permeabilidade aumentarem é espectável que a condutividade aumente, processos que reduzam estes parâmetros, tal como a compactação, diagénese e metamorfismo, aumentam a resistividade. Em geral, processos de meteorização aumentam a porosidade e a permeabilidade, mas a criação de minerais de argila podem ter o efeito oposto (Dentith M. & Mudge S., 2014).

2.1.1. Arranjos

O valor da resistividade aparente depende da geometria dos arranjos usados, de acordo com o fator geométrico K.

Existem pelo menos 102 tipos de arranjos, diferentes, reconhecidos. Embora a maior parte deles não sejam utilizados, existem três que se destacam, nomeadamente Wenner, Schlumberger e Dipolo-Dipolo (Reynolds, 2011)

Quando escolhemos o arranjo a ser utilizado devemos ter em conta as vantagens e desvantagens de cada um. Os fatores a ter em conta são variados e entre estes podem estar a experiência prévia do utilizador com o arranjo, a disponibilidade de cabo e de software assim como as especificações do local em estudo tal como o espaço disponível para implantar o arranjo, a intensidade de trabalho de cada método, sensibilidade a variações laterais inhomogéneas e variações verticais.

2.1.1.1 Wenner

A figura 2 representa o arranjo de Wenner.

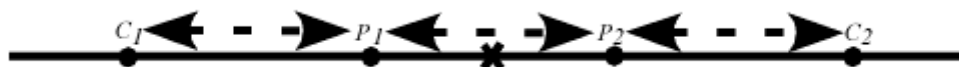


Figura 2: Arranjo de Wenner



O arranjo de Wenner é constituído por quatro eléctrodos, dois de corrente (C1,C2) e dois de potencial (P1,P2). A geometria deste método é marcada pela equidistância entre os quatro eléctrodos, sendo que este método é mais sensível a variações verticais de resistividade é preferencialmente utilizado para a deteção de estruturas horizontais. Este método é muito sensível às inhomogeneidades laterais e possui uma profundidade de penetração baixa (Loke, 1999). Este arranjo é muito usado com CST (separação constante). A resistividade aparente deste arranjo é dada por:

$$\rho_a = 2\pi aR$$

2.1.1.2. Schlumberger

A figura 3 representa o arranjo de Schlumberger.

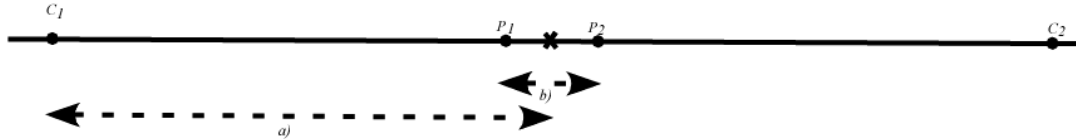


Figura 3: Arranjo de Schlumberger

O arranjo de Schlumberger é constituído por quatro eléctrodos, dois de corrente (C1,C2) e dois de potencial (P1,P2), possuindo uma geometria marcada por possuir distancias diferentes entre os eléctrodos de potencial (b) e os eléctrodos de corrente (a), este método adequa-se à deteção de estruturas verticais. O arranjo de Schlumberger possui uma sensibilidade a inomogeneidades laterais não muito forte, mas em contrapartida a profundidade de penetração é moderada (Loke, 1999). A resistividade aparente deste arranjo é dada por:

$$\rho_a = \frac{\pi a^2}{b} \left[1 - \frac{b^2}{4a^2} \right] R$$

2.1.1.3. Wenner-Schlumberger

A figura 4 representa o arranjo de Wenner-Schlumberger.

Trata-se de um arranjo relativamente recente e é um híbrido, entre os arranjos de Wenner e Schlumberger, é constituído por dois eléctrodos de corrente (C1,C2) e dois de potencial (P1,P2) (Figura 4).

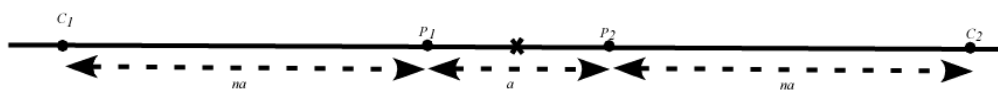


Figura 4: Arranjo de Wenner-Schlumberger

Este arranjo possui uma maior sensibilidade a baixo dos elétrodos de potencial, isto faz com que este método seja moderadamente adequado a estruturas verticais e horizontais. Em locais em que se ocorram estruturas em vários sentidos, este é um bom compromisso entre os arranjos de Wenner e Dipolo-Dipolo, a profundidade atingida é 10% maior que a profundidade do arranjo de Wenner (Loke, 1999). A resistividade aparente deste arranjo é dada por:

$$\rho a = \pi \times n \times (n + 1) \times a \times R$$

2.1.1.4. Dipolo-Dipolo

O arranjo dipolo-dipolo é um arranjo constituído por dois polos moveis de dois elétrodos cada, sendo um desses polos constituído por dois elétrodos de corrente (C1,C2) e o outro polo por dois elétrodos de potencial (P1,P2) (Figura 5).

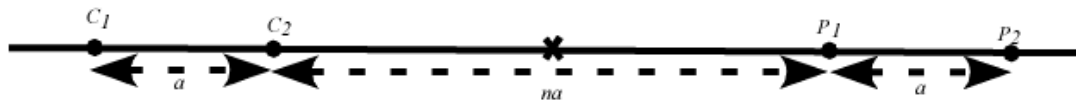


Figura 5: Arranjo Dipolo-Dipolo

Este método possui uma resolução vertical muito baixa e uma profundidade de penetração elevada. Este arranjo é muito usado com CST (separação constante). Este método possui maior sensibilidade a variações horizontais de resistividade entre elétrodos de cada um dos dipolos e, portanto, adequa-se a encontrar estruturas verticais. A grande desvantagem deste arranjo é a baixa intensidade de sinal para valores elevados de n (Loke, 1999). A resistividade aparente deste arranjo é dada por:

$$\rho a = \pi n(n + 1)(n + 2)aR$$

2.1.1.5. Polo-Dipolo

O arranjo polo-dipolo é uma variação do dipolo-dipolo, este método é assimétrico, possui uma base fixa e um polo que ira ser móvel, adequando-se assim a CST. Este arranjo só necessita de três elétrodos, um de corrente (móvel) (C1) e dois de potencial (estacionados) (P1, P2) (Figura 6).

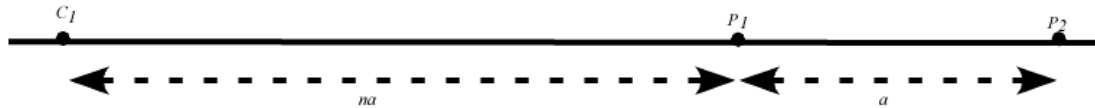


Figura 6: Arranjo Polo-Dipolo

À semelhança do dipolo-dipolo, este método, possui uma boa cobertura horizontal, mas possui uma intensidade de sinal superior quando comparado com o dipolo-dipolo (Loke, 1999). A resistividade aparente deste arranjo é dada por:

$$\rho a = 2\pi n(n + 1)aR$$

2.2. Polarização induzida

A polarização induzida (IP) foi notada pela primeira vez por Conrad Schlumberger em 1913 e o efeito de sobre tensão é conhecido desde o século XIX. Este método tem sido utilizado desde 1942, sendo que foi desenvolvida durante a segunda grande guerra como parte de um projeto da marinha Norte Americana. A partir de 1950 houve um aumento do interesse neste método pelas indústrias mineiras e do petróleo. Em 1970 ocorreu um progresso na instrumentalização do IP, devido a existência de novos computadores, cada vez mais pequenos e mais potentes. Em 1983 foram exportados para a china equipamentos de IP, tal terá conduzido a um grande desenvolvimento da técnica especialmente para a área mineira, no entanto este desenvolvimento só ficou acessível para o público em geral em 1998, quando Luo e Zhang fizeram uma publicação em inglês (Kearey *et al.*, 2002).

A Polarização induzida mede a cargabilidade dos materiais atravessados, este tipo de propriedade física é muito utilizado para fins de prospeção geológica, na identificação de jazigos minerais, prospeção geotécnica, na identificação de bancos de argila, no entanto para prospeção arqueológica não é um método usual (Zeid *et al.*, 2016).

A polarização induzida consiste num fenómeno que quando uma diferença de potencial é aplicada a uma rocha, cargas de polarizações opostas se concentram em partes diferentes da mesma, fazendo com que a mesma apresente um comportamento idêntico a um condensador (Dentith & Mudge, 2014). Assim, quando cortamos corrente elétrica num arranjo para resistividade observamos que a tensão entre os elétrodos de potencial não cai imediatamente para zero, em vez disso, o que acontece é que vai caindo gradualmente, após um decaimento inicial acentuado,

podendo até demorar alguns segundos até atingir o valor de zero (como observado na figura 7), à semelhança do que acontece quando introduzimos a corrente elétrica nesse mesmo arranjo (Kearey *et al.*, 2002).

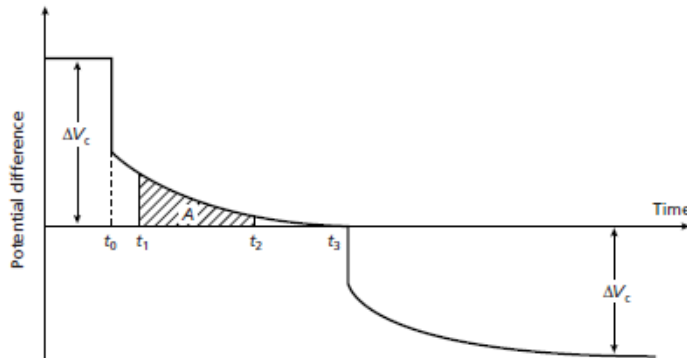


Figura 7: Fenómeno do decaimento elétrico após corte de corrente (retirado de Kerey P. et al,2002)

Atualmente este método é utilizado principalmente para prospecção de minerais metálicos disseminados, especialmente em depósitos porphyry coppers, sulfuretos associados a depósitos de ouro e com menor relevância para prospecção de água e explorações geotermiais (Reynolds, 2011).

Existem dois mecanismos através dos quais o comportamento de condensador ocorre naturalmente, sendo estes: polarização de membrana e polarização de eletrodo.

Polarização de membrana: A maior parte dos minerais possuem cargas negativas na sua superfície. Quando estes grãos formam paredes de poros, iões negativos são repelidos e iões positivos são atraídos, criando uma camada ou membrana de iões. Quando o poro fica suficientemente estreito os iões positivos criam uma barreira ao longo de toda a sua largura impedindo o movimento dos iões negativos ao longo dos poros. A polarização de membrana desenvolve-se com maior sucesso onde o a carga da superfície do grão é maior, logo como minerais de argila e minerais fibrosos possuem cargas de superfície particularmente fortes, com a presença destes minerais a membrana desenvolve-se com maior sucesso (Dentith & Mudge, 2014).

Polarização de eletrodo: Este tipo de polarização é idêntico à polarização de membrana, sendo que neste caso existe a presença de materiais metálicos e parte do fluxo da corrente é em parte feito por condução eletrónica. Este fenómeno ocorre quando um mineral condutor está em contacto com a água e a intensidade da polarização é definido pela área de contacto e não pelo volume do condutor (Milsom & Eriksen, 2011). A corrente irá circular na água e quando encontra o mineral condutor irá ocorrer o fenómeno de acumulação de cargas positivas de um lado e cargas

negativas do outro lado do mineral, quando ΔV exterior é desligado ocorre um fenómeno denominado sobretensão que é a difusão gradual dos iões acumulados (figura 8) (Telford *et. al.*, 1990).

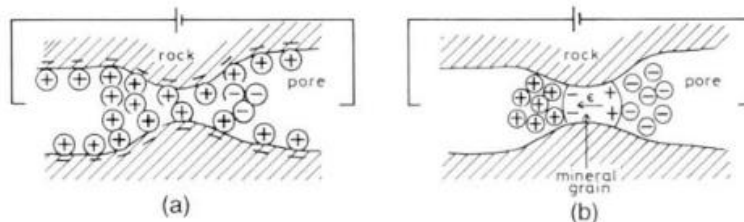


Figura 8: Fenomeno da Polarização induzida (Luis, 2005)

2.3. Georadar

A história deste método inicia-se em 1904 com a primeira utilização de ondas eletromagnéticas por Hulsmeyer para encontrar objetos subterrâneos (Daniels, 2007), sendo que a primeira publicação sobre o método se deu apenas em 1910 por Leinback e Lowy (Reynolds, 1997).

Em 1929 ocorreu a primeira utilização do que se pode designar um Georadar, esta aconteceu na Áustria (Conyers, 2004), no mesmo ano ocorreu um grande desenvolvimento da tecnologia devido a sua potencialidade para detetar aviões, na Suécia ocorreram também os primeiros trabalhos de georadar na exploração mineira.

No ano de 1934 surge o termo RADAR (RADio Detection And Ranging), termo que designa todos os equipamentos que através da emissão de ondas radio sejam capazes de detetar objetos e definir a sua distância (Buderi, 1998). No decorrer da segunda guerra mundial houve, uma vez mais, um grande desenvolvimento na tecnologia devido à sua capacidade de deteção de submarinos.

No final da década de 50 foram realizadas as primeiras observações do efeito das ondas RADAR em calotes polares. Devido a uma das vantagens do georadar que é poder ser operado remotamente, em 1967 a NASA constrói um protótipo de georadar que enviou numa missão não tripulada a Lua. A partir da década de 60 o georadar começou a ser utilizado para o estudo de características glaciológicas e estruturas geológicas, tais como aquíferos, estratigrafias entre outros. Em 1971 foi lançado o primeiro equipamento de Georadar e em 1974 foi comercializado o primeiro equipamento portátil de georadar (Assunção, 2016).

O georadar é constituído por uma antena emissora de uma onda eletromagnética (figura 9), esta onda irá penetrar no solo com uma determinada velocidade, sendo esta definida pela constante

dielétrica do meio e quando houver uma diferença na velocidade de propagação provocada por diferentes valores de constante dielétrica e condutividade, há uma reflexão e uma aproximação a origem (figura 10), obedecendo a lei de Snell (Paiva R. 2014). A mesma antena que emitiu a onda eletromagnética irá captar o sinal, o tempo entre a emissão e a receção do sinal será indicador da profundidade das anomalias encontradas.

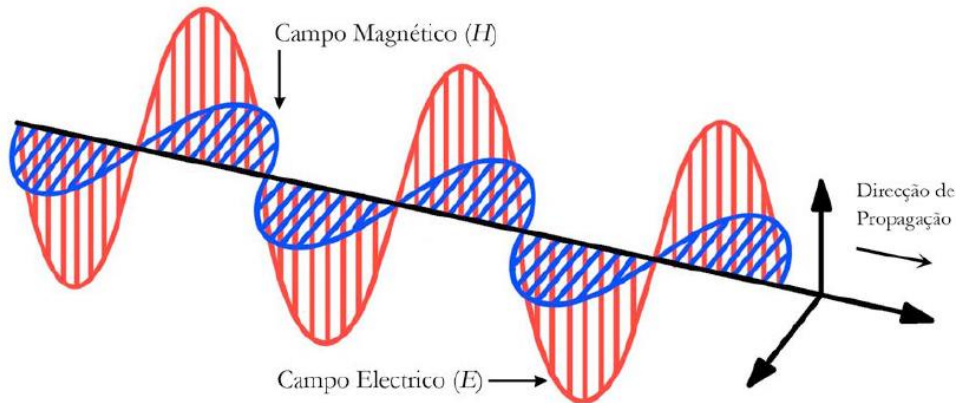


Figura 9: Onda eletromagnética nos campos elétrico e magnético polarizados (retirado de Gonçalves, 2013)

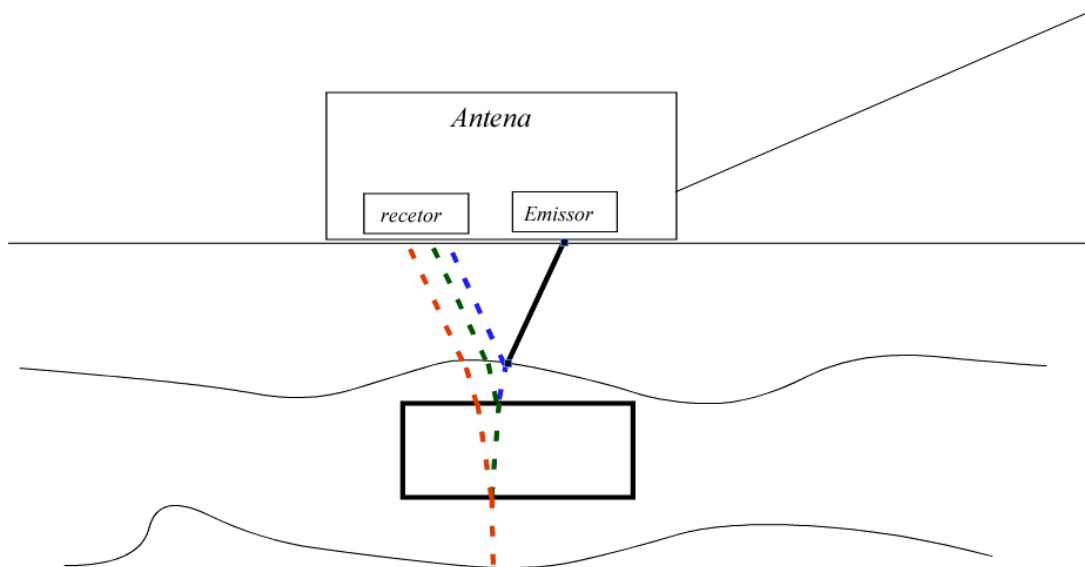


Figura 10: Esquema da Lei de Snell aplicada ao Georadar

As antenas de georadar abrangem um intervalo de frequências bastante amplo desde 10Hz a 1016 Hz, diferentes intervalos de frequência permitem nos obter diferentes profundidades e diferentes qualidades de imagem (Figura 11). Para fins geológicos normalmente é mais importante a

profundidade alcançada do que a resolução, então são frequentemente usadas antenas com frequências inferiores a 500 Hz. Para fins de engenharia civil e arqueologia são utilizadas frequências superiores a 500 Hz. A relação entre a profundidade e a resolução é nos dada pela figura 11

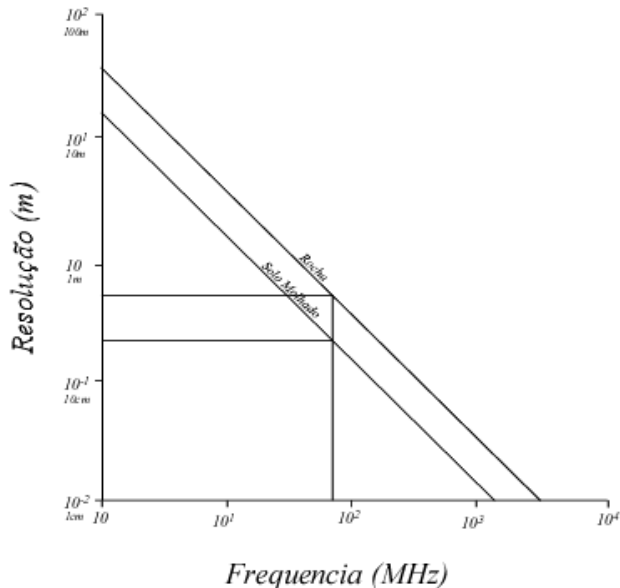


Figura 11: Relação entre a frequência e consequente profundidade alcançada e a resolução dos dados (modificado de Sharma 1997)

A utilização do Georadar torna-se possível devido à existência de propriedades eletromagnéticas favoráveis, nomeadamente a condutividade elétrica (σ), a permeabilidade magnética (μ) e a permissividade elétrica (ϵ), estas propriedades são fundamentais e influenciam a maneira como as ondas se propagam.

A condutividade influencia a penetração das ondas uma vez que esta provoca dissipação e absorção das ondas, sendo inversamente proporcional.

A permeabilidade influencia a penetração das ondas, mas só adquire importância quando no solo existem minerais ferro magnesianos em percentagem superior a 5%.

A permissividade elétrica é a propriedade que descreve a capacidade de um material armazenar e libertar energia eletromagnética sob a forma de cargas elétricas. Esta propriedade está relacionada com a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas logo, a permissividade é inversamente proporcional à velocidade de propagação das ondas RADAR (Radio Detection And Ranging).



3. Enquadramento Geográfico e Geológico

O Local onde se realizou o estudo localiza-se na Lourinhã, junto ao parque de Nossa Senhora do Castelo, Lourinhã, , nas coordenadas 39°14'35.26"N; 9°18'57.27"W (WGS84, graus, minutos e segundos). A área de estudo, identificada na figura X esta coberta pela folha 30A-Lourinhã, da carta geológica de Portugal a escala 1:50000 (figura 12).

A zona estudada fica na orla ocidental (mais concretamente na bacia Lusitanica), esta zona da geologia portuguesa foi formada a quando da abertura do atlântico. Constituído por formações detríticas datadas do Jurássico (dai a existência de vários fósseis de dinossáurios na zona da Lourinhã), a formação mais antiga corresponde a formação dos Grés de Silves (Triássico) e o local estudado esta situado na formação da Lourinhã que é datada do Jurássico superior (de Margas, Argilas e Grés do Sobral) . No local de estudo é de notar também a presença de formações quaternárias (Aluviões) (modificado de Almeida et al, 2000 e carta geológica 1:50000 da lourinhã)

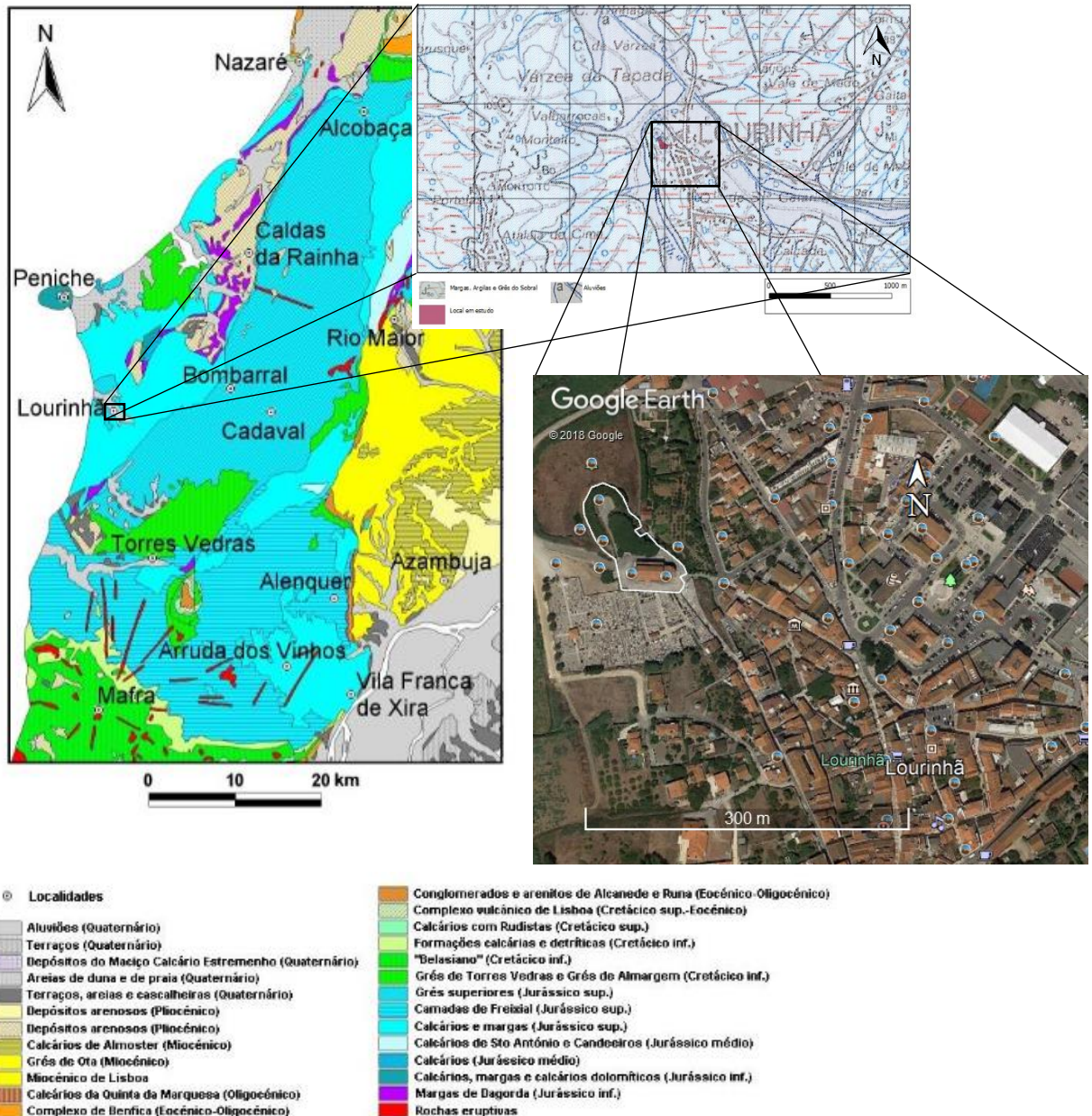


Figura 12: Enquadramento Geográfico e Geológico do local de estudo (modificado de Almeida C. et al, 2000 e de carta geológica 1:50000 da Lourinhã)

4. Metodologia, Resultados e Discussão

Para a realização desta tese foram utilizados os dados do estudo geofísico do parque de nossa senhora do castelo, Lourinhã (Pereira B. et al, 2018). Este estudo teve como objetivo avaliar o potencial arqueológico do local e obtenção de dados de apoio a uma intervenção geotécnica.

Para a realização deste estudo foram feitos 479 perfis de Georadar, entre antenas de 200 e 400 MHz, 20 perfis de Resistividade e 3 perfis de Polarização Induzida ao longo de três semanas.

4.1. Resistividade eléctrica

A prospeção geofísica por resistividade neste local foi feita com recurso a um equipamento resistivímetro, SYSCAL R1 Plus da marca IRIS Instruments e de eléctrodos metálicos, com um espaçamento interelectródico de 1 metro (figura 13).



Figura 13: Perfil de resistividade elétrica na face voltada a Este do Local

O tratamento de dados, nomeadamente a inversão geofísica, foi feito com recurso ao software RES2D INV.

A implantação dos perfis foi projetada sobre a base topográfica de maneira a reconhecer e intersectar em profundidade as estruturas presentes na área em estudo, com varrimentos omnidirecionais.

O arranjo utilizado foi o arranjo de Wenner-Schlumberger devido a sua adequação a deteção de anomalias estruturas verticais e horizontais.

Na figura 14 podemos observar os locais onde foram efetuados os ensaios de resistividade

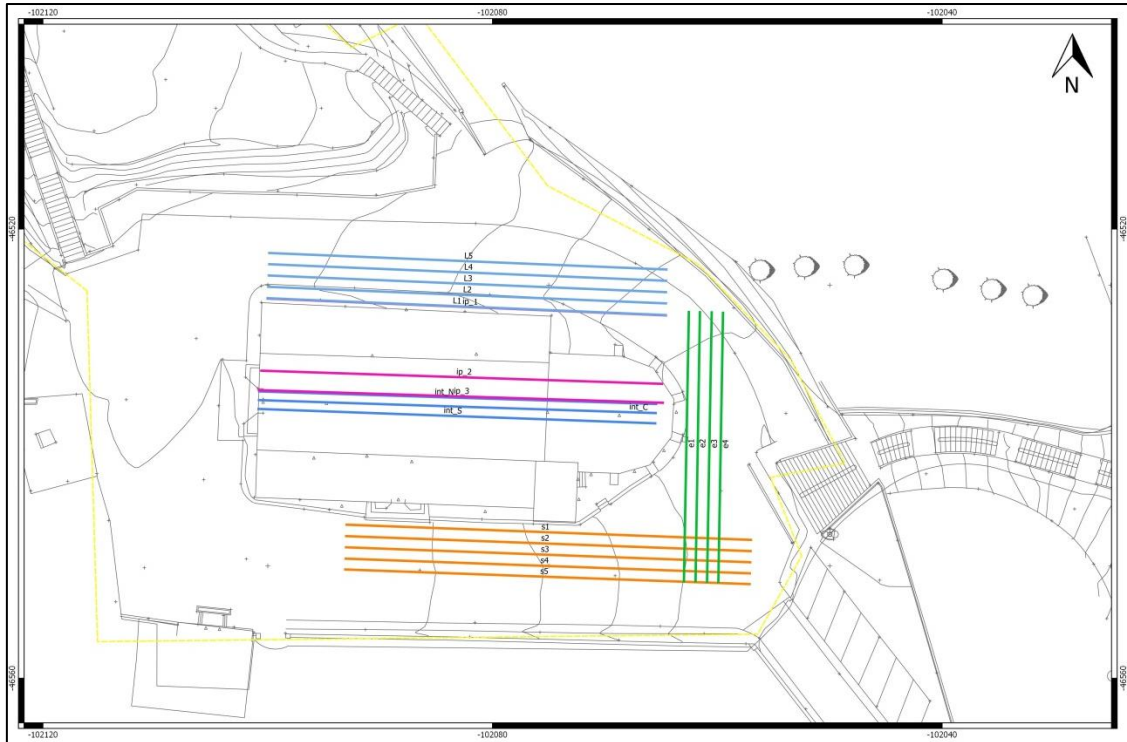


Figura 14: Ilustração dos locais onde foram realizados os perfis eletricos

Os valores de resistividade obtidos através da inversão geofísica possuíam uma grande amplitude, variando entre o mínimo de 1 Ohm/m e um máximo de 10957 ohm.m. Essa amplitude tornou inviável a utilização de toda a gama de valores. Foi dessa forma utilizado um filtro em que foram excluídos os valores de resistividade acima de 100 Ohm.m, encarados como pouco representativos, no âmbito específico deste trabalho, sendo aliás explicáveis com a presença de raízes e/ou espaços vazios. Foi também feita a filtragem inversa

Seguidamente foi atribuída uma escala de cores consentânea com a evidência e fácil visualização de anomalias de resistividade, atribuíveis à eventual presença de estruturas enterradas.

A figura 15 representa a inversão obtida para o perfil L1. Assinalam-se anomalias de baixa e alta resistividade com linha tracejada preta. Existem zonas de baixa resistividade cuja geometria e/ou assinatura geofísica é compatível com a assinatura geofísica de estruturas do tipo falha (geometria linear e baixa resistividade relativa).

Assinalam-se, também, anomalias de baixa resistividade, com geometria elipsoidal cuja origem não é clara, podendo dever-se à presença de cavidades preenchidas com argilas condutivas, ou estruturas de origem antrópica, tais como sepulturas.

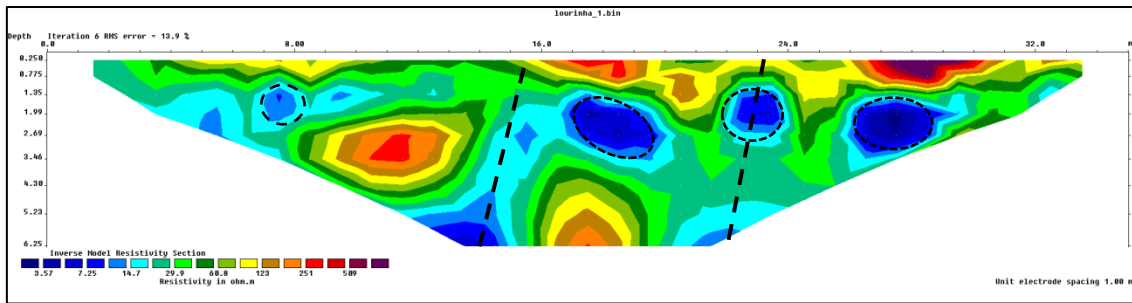


Figura 15: Pseudosecção de resistividade do perfil L1

A figura 16 representa a pseudosecção de resistividade obtida para o perfil L2. O seu comportamento é semelhante o exibido pela secção L1, sendo assinaladas anomalias lineares atribuíveis à presença de estruturas do tipo falha. Também se assinalam anomalias de baixa resistividade de geometria elipsoidal, cuja assinatura geofísica é consentânea com a presença de cavidades preenchidas com argilas condutivas, ou estruturas antrópicas, como por exemplo, sepulturas.

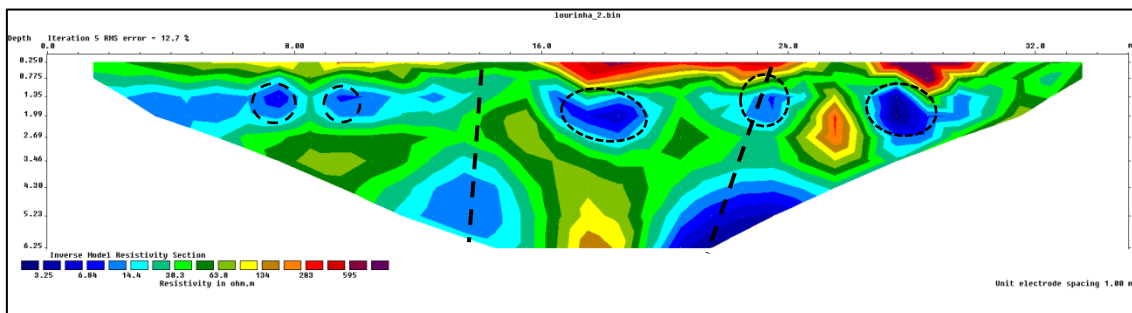


Figura 16: Pseudosecção de resistividade do perfil L2

A Figura 17 representa a pseudosecção de resistividade obtida para o perfil L3. A assinatura geofísica exibida é similar à das secções observadas anteriormente, havendo, no entanto, uma maior amplitude no valor da resistividade aparente (cerca de 5000 ohm.m de amplitude). O valor elevado de resistividade eléctrica aparente, que se assinala em elipse na origem da pseudosecção é consentâneo com a presença de uma raíz (a madeira é um mau condutor eléctrico) ou de uma cavidade oca. Assinalam-se também o que poderá ser a expressão de estruturas do tipo falha.

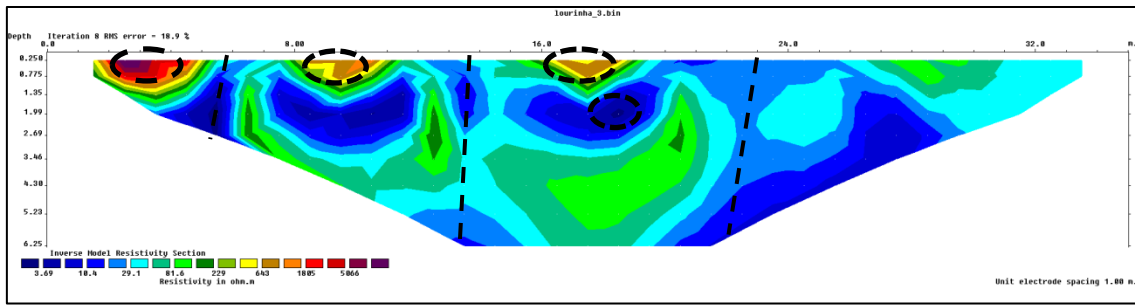


Figura 17: Pseudosecção de resistividade do perfil L3

A Figura 18 representa a pseudosecção de resistividade obtida para o perfil L4. O comportamento geoelectrico exibido é muito similar ao do perfil L3, havendo, no entanto, uma maior amplitude nos valores de resistividade aparente registados (cerca de 10000 ohm.m). Tal como no perfil L3, o valor elevado de resistividade eléctrica aparente, que se assinala em elipse na origem da pseudosecção é consentâneo com a presença de uma raíz (a madeira constituinte da raíz é um mau condutor eléctrico) ou de uma cavidade oca.

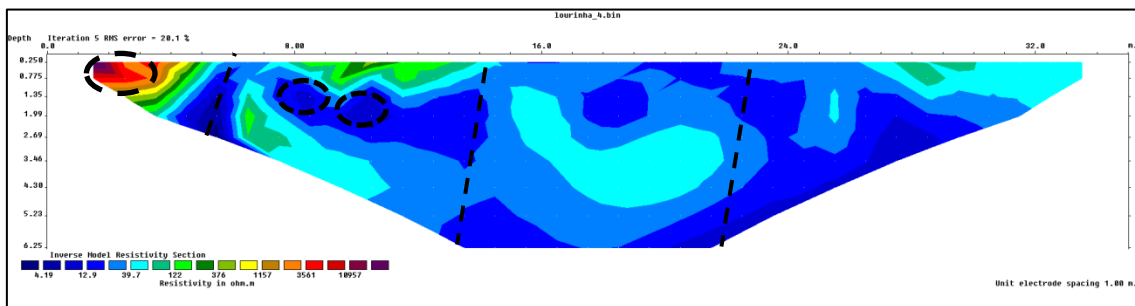


Figura 18: Pseudosecção de resistividade do perfil L4

A Figura 19 representa a pseudosecção de resistividade obtida para o perfil L5. O comportamento geoelectrico exibido é muito similar ao dos perfis L3 e L4, havendo, no entanto, uma maior amplitude nos valores de resistividade aparente registados (cerca de 10000 ohm.m). Tal como no perfil L3, o valor elevado de resistividade eléctrica aparente, que se assinala em elipse na origem da pseudosecção é consentâneo com a presença de uma raíz (a madeira é um mau condutor eléctrico) ou de uma cavidade oca.

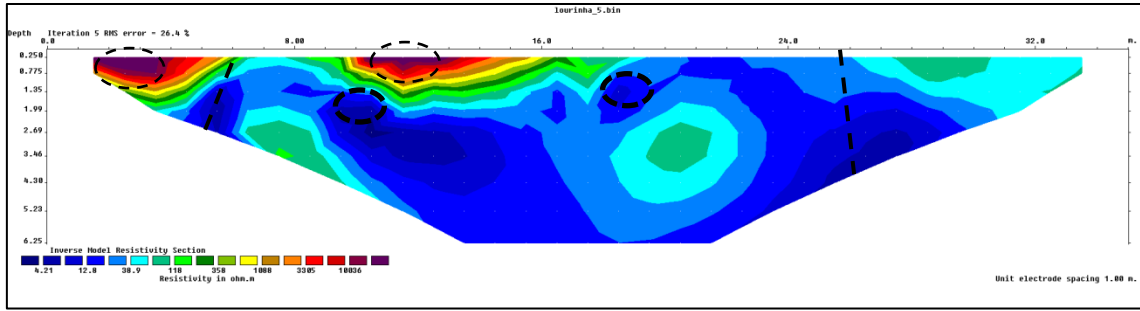


Figura 19: Pseudosecção de resistividade do perfil L5

A Figura 20 representa a pseudosecção de resistividade obtida para o perfil PE1. Observa-se como aspecto mais relevante a presença de uma “camada” menos resistiva, que se assinala, a tracejado. A assinatura geofísica exibida é compatível com a presença de uma camada de argilas condutivas e/ou uma falha com uma caixa argilosa. A presença deste tipo de estrutura é susceptível de provocar danos estruturais semelhantes aos observados na igreja Matriz.

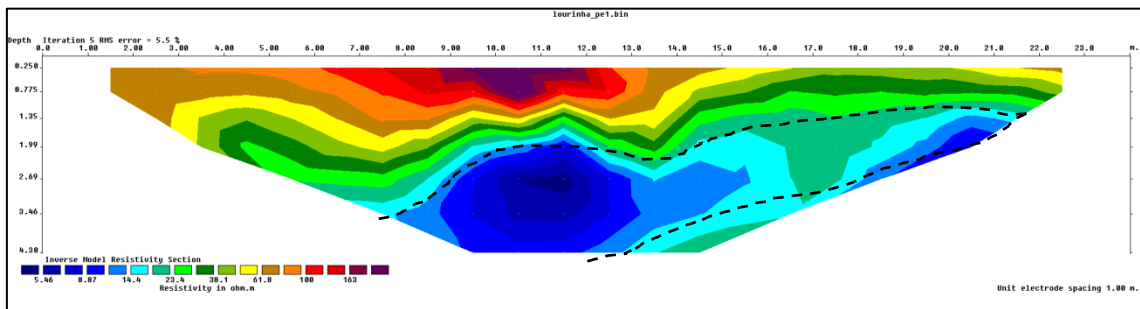


Figura 20: Pseudosecção de resistividade do perfil PE1

A Figura 21 representa a pseudosecção de resistividade obtida para o perfil PE2. A assinatura geofísica é similar à do perfil PE1.

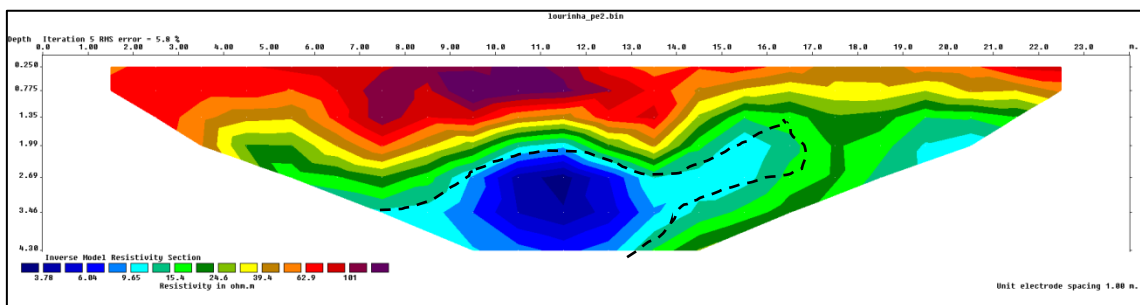


Figura 21: Pseudosecção de resistividade do perfil PE2

A Figura 22 representa a pseudosecção de resistividade obtida para o perfil PE3. A assinatura geofísica é similar à dos perfis PE1 e PE 2.

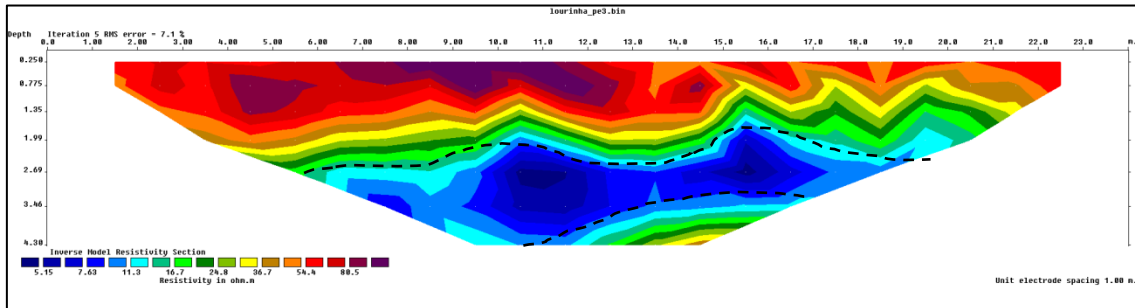


Figura 22: Pseudosecção de resistividade do perfil PE3

A Figura 23 representa a pseudosecção de resistividade obtida para o perfil PE. A assinatura geofísica é similar à dos perfis PE1 e PE2 e PE3.

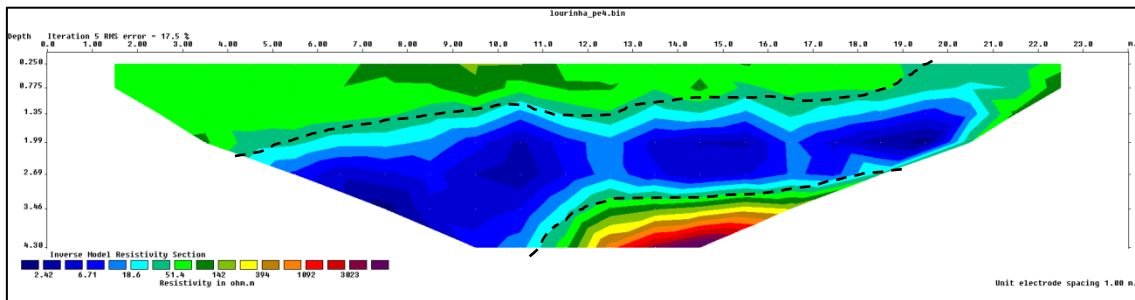


Figura 23: Pseudosecção de resistividade do perfil PE

A Figura 24 representa a pseudosecção obtida para o perfil PS1. Os valores de resistividade são bastante baixos, indicando que os materiais que compõem o subsolo são bastante condutivos. Assinalam-se anomalias de baixa resistividade, com geometria elipsoidal, compatíveis com a presença de cavidades preenchidas com materiais condutivos e/ou, estruturas de origem antrópicas tais como sepulturas.

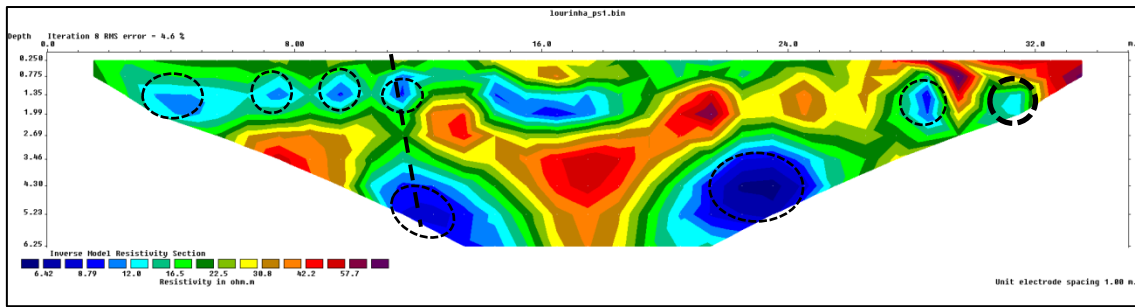


Figura 24: Pseudosecção de resistividade do perfil PS1

A Figura 25 representa a pseudosecção obtida para o perfil PS2. O seu comportamento, em termos de zonamento geoelectrico é muito similar ao do perfil PS1. Assinalam-se anomalias de baixa resistividade, com geometria elipsoidal, compatíveis com a presença de cavidades preenchidas com materiais condutivos e/ou, estruturas de origem antrópica tais como sepulturas. Assinala-se também o que poderá ser uma estrutura do tipo falha/camada condutiva, potencialmente argilosa.

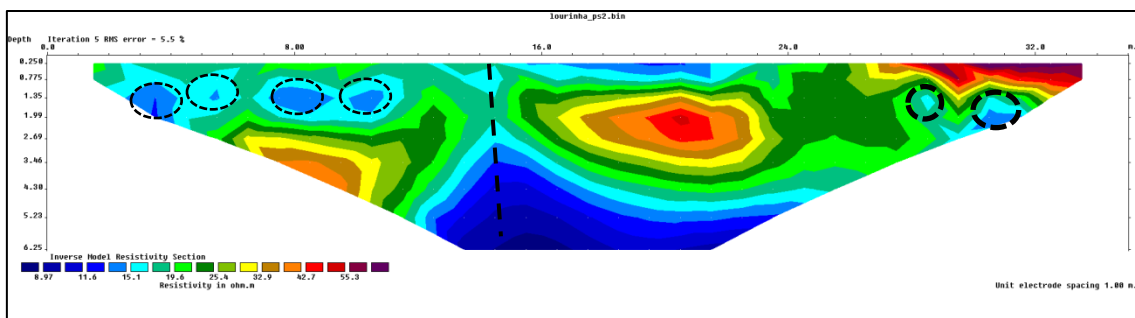


Figura 25: Pseudosecção de resistividade do perfil PS2

A Figura 26 representa a pseudosecção obtida para o perfil PS3. O seu comportamento, em termos de zonamento geoelectrico é muito similar ao dos perfis PS1 e PS2. Assinalam-se anomalias de baixa resistividade, com geometria elipsoidal, compatíveis com a presença de cavidades preenchidas com materiais condutivos e/ou, estruturas de origem antrópica tais como sepulturas. Assinala-se também o que poderá ser uma estrutura do tipo falha/camada condutiva, potencialmente argilosa.

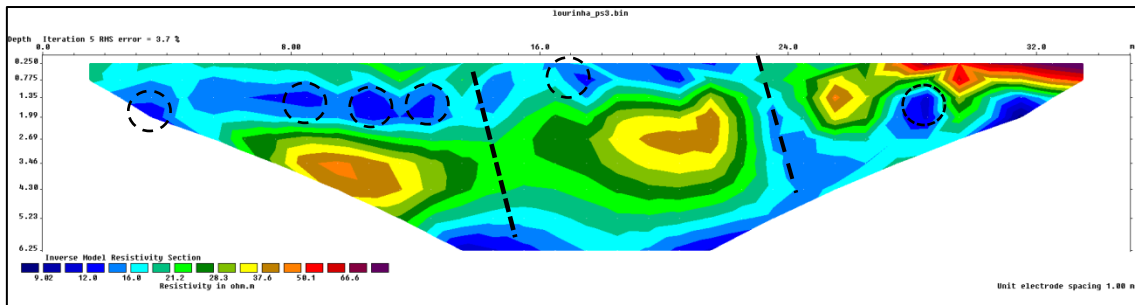


Figura 26: Pseudoseção de resistividade do perfil PS3

A Figura 27 representa a pseudoseção obtida para o perfil PS4. O seu comportamento, em termos de zonamento geoelectrico é muito similar ao dos perfis PS1, PS2 e PS3. Assinalam-se anomalias de baixa resistividade, com geometria elipsoidal, compatíveis com a presença de cavidades preenchidas com materiais condutivos e/ou, estruturas de origem antrópica tais como sepulturas. Assinala-se também o que poderá ser uma estrutura do tipo falha/camada condutiva, potencialmente argilosa.

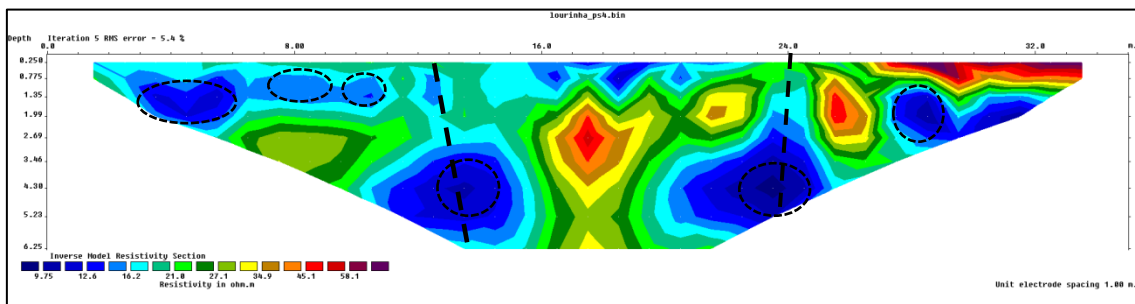


Figura 27: Pseudoseção de resistividade do perfil PS4

A Figura 28 representa a pseudoseção obtida para o perfil PS5. O seu comportamento, em termos de zonamento geoelectrico é muito similar ao dos perfis PS1, PS2, PS3. Assinalam-se anomalias de baixa resistividade, com geometria elipsoidal, compatíveis com a presença de cavidades preenchidas com materiais condutivos e/ou, estruturas de origem antrópica tais como sepulturas. Assinala-se também o que poderá ser uma estrutura do tipo falha/camada condutiva, potencialmente argilosa. Existe, no entanto uma menor profusão de anomalias elipsoidais.

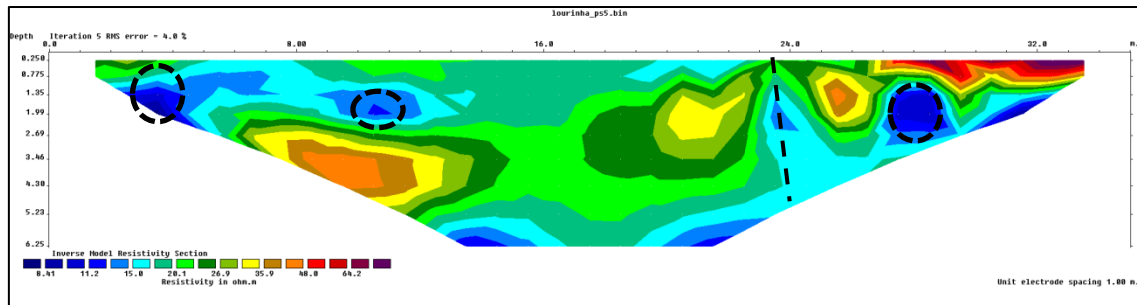


Figura 28: Pseudoseção de resistividade do perfil PS4

A Figura 29 representa a pseudoseção obtida para o perfil “In Centro”, realizado no interior da Igreja. O seu comportamento, em termos de zonamento geoelectrico é análogo ao dos perfis PS1, PS2 e PS3. Assinalam-se anomalias de baixa resistividade, com geometria elipsoidal, compatíveis com a presença de cavidades preenchidas com materiais condutivos e/ou, estruturas de origem antrópica tais como sepulturas.

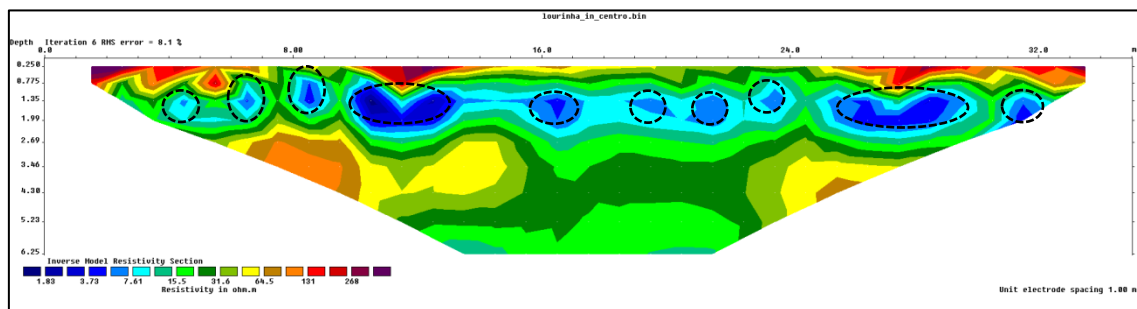


Figura 29: Pseudoseção de resistividade do interior da igreja ao centro

A Figura 30 representa a pseudoseção obtida para o perfil “In Norte”, realizado no interior da Igreja. O seu comportamento, em termos de zonamento geoelectrico é análogo ao dos perfis PS1, PS2 e PS3. Assinalam-se anomalias de baixa resistividade, com geometria elipsoidal, compatíveis com a presença de cavidades preenchidas com materiais condutivos e/ou, estruturas de origem antrópica tais como sepulturas.

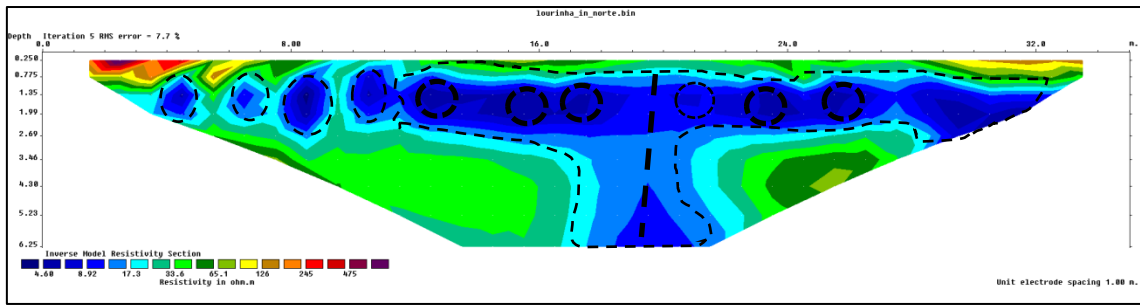


Figura 30: Pseudosecção de resistividade no interior da igreja a Norte

A Figura 31 representa a pseudosecção obtida para o perfil “In Sul”, realizado no interior da Igreja. O seu comportamento, em termos de zonamento geoelectrico é análogo ao dos perfid in_norte e in_centro. Assinalam-se anomalias de baixa resistividade, com geometria elipsoidal, compatíveis com a presença de cavidades preenchidas com materiais condutivos e/ou, estruturas de origem antrópica tais como sepulturas. Destaca-se uma anomalia de baixa resistividade sub-vertical, com expressão métrica

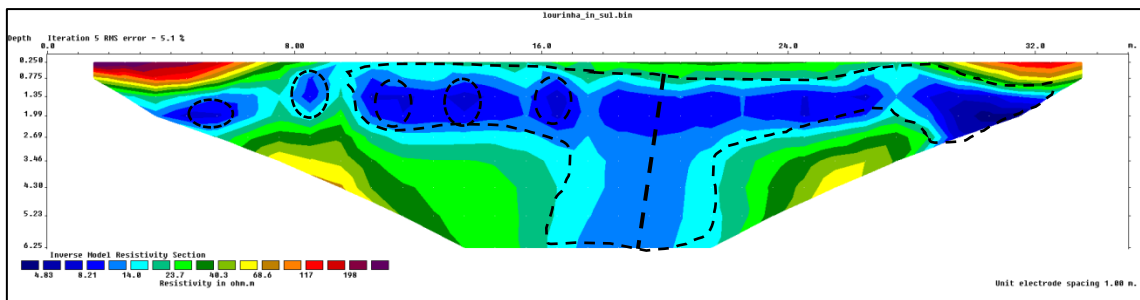


Figura 31: Pseudosecção de resistividade no interior da igreja a Sul

Para uma melhor compreensão dos dados procedeu-se a realização de modelos 3D com os dados referentes a resistividade.

O software de modelação tridimensional permite a obtenção de imagens segundo distintos planos no espaço, o que permite a obtenção de imagens compostas, facilitadoras da percepção da expressão geométrica das anomalias nas três dimensões espaciais. A Figura 32 representa uma vista em sobre o modelo geofísico de resistividades aparentes, em planta, para uma profundidade de um metro. Assinalam-se com setas vermelhas, as anomalias de alta resistividade aparente relativa, entendidas como indicadoras da presença de estruturas com origem antrópica. Verifica-se uma preponderância da direcção Norte-Sul nas anomalias definidas. As anomalias de baixa resistividade relativa permitem obter o zonamento dos materiais mais condutivos, no caso em apreço, materiais constituídos sobretudo por argilas. Confirma-se a presença de uma zona muito pouco resistiva, nos termos em que foi definida nas secções bidimensionais anteriormente descritas.

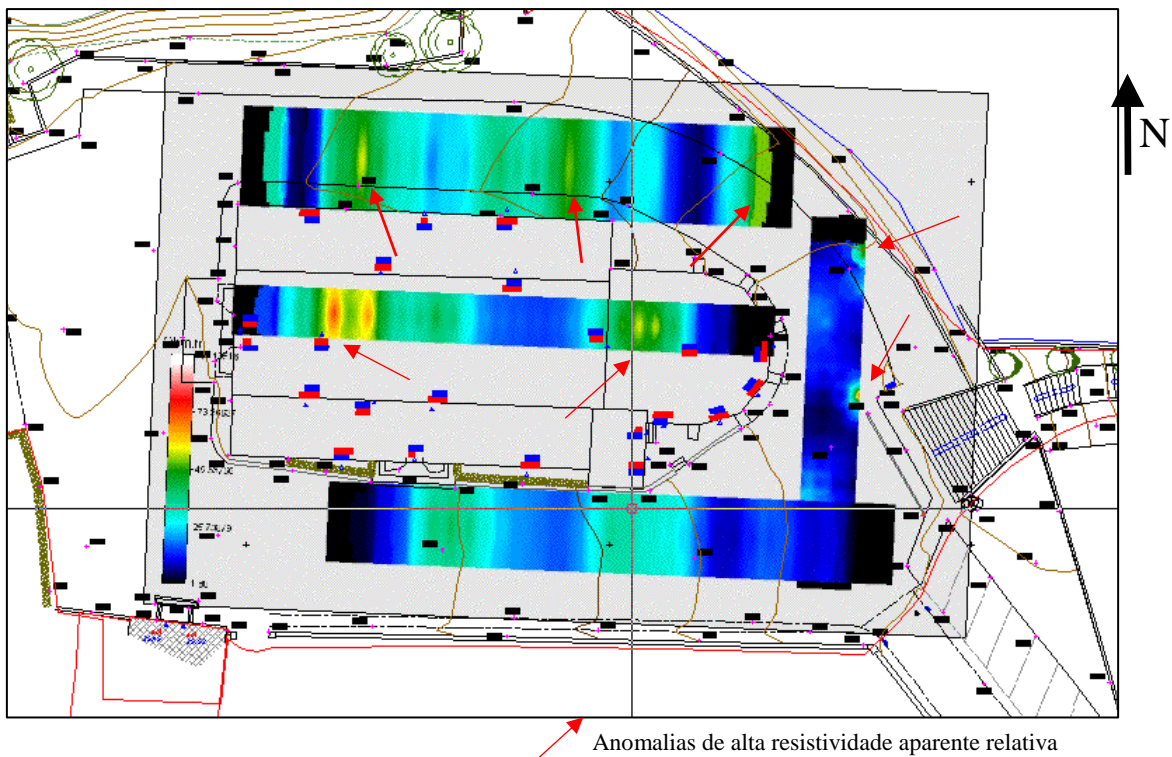


Figura 32: Resistividade aparente em planta

A Figura 33 representa uma vista Sudoeste-Nordeste das secções de resistividade interpoladas. Através da aplicação de um filtro, foi possível excluir os valores de resistividade inferiores a 100 ohm.m, de modo a isolar as anomalias de alta resistividade aparente relativa. Observa-se a ausência da secção correspondente à zona a Sula da Igreja, devido às muito baixas resistividades observadas. As anomalias assinaladas são interpretadas como ocos e raízes de árvores. A presença de raízes de pinheiro é particularmente conspícua no sector Norte (polígono A da campanha de prospeção com recurso a Georadar. A anomalia do sector Oriental deverá ser provocada por um vazio ou cavidade de natureza desconhecida, mas que poderá conter significado, sob o ponto de vista da presença de estruturas antrópicas.

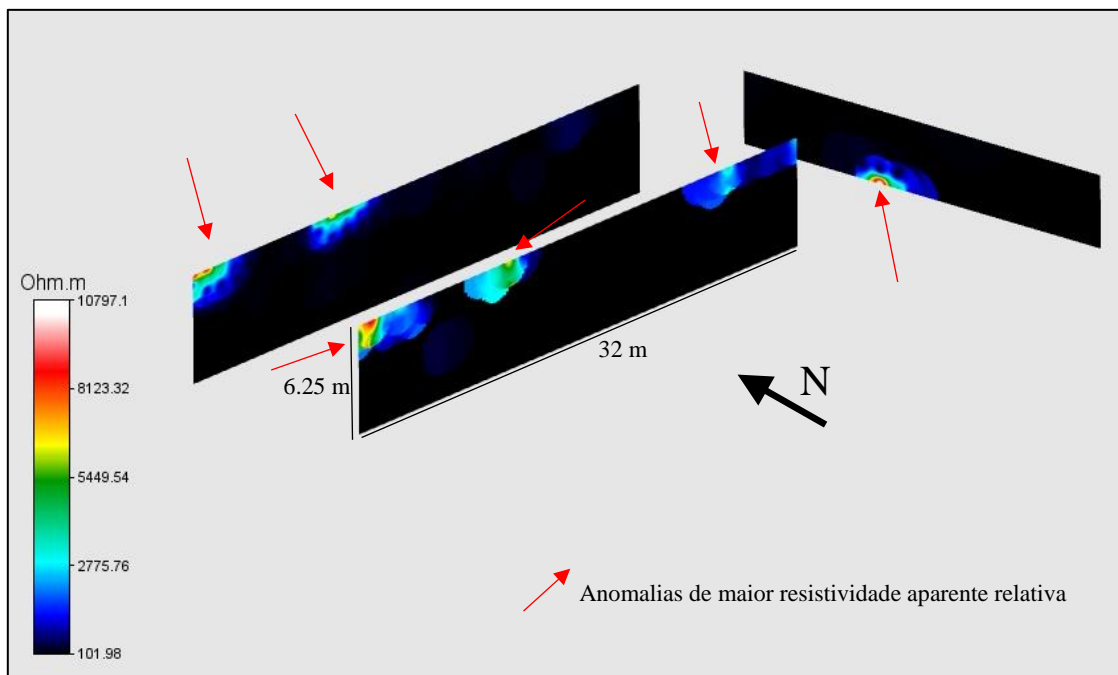


Figura 33: Resistividades interpoladas com valores de resistividades inferiores a 100 ohm.m excluídos

A Figura 34 representa a modelação 3D efetuada sobre os perfis de geofísica, numa vista em perspetiva a partir de Sudeste. Assinalam-se as principais anomalias de alta resistividade observadas, e que são sobreponíveis com as anomalias detetadas com recurso a Georadar. O valor de corte de resistividade é, neste caso é de 100 ohm.m, ou seja, foram excluídos todos os valores acima deste. No sector norte observa-se uma elevada profusão de anomalias de alta resistividade aparente relativa, consentâneas com as anomalias de alta amplitude de sinal obtidas nos radargramas aí também efetuados e com os quais há sobreposição espacial. Nos restantes sectores assinalam-se também anomalias de alta resistividade aparente relativa., entendidas como indicadores da presença de estruturas com origem antrópica (materiais contrastantes com a envolvente geológica). Esta interpretação parte do princípio de que os materiais de construção das estruturas antrópicas seriam sobretudo constituídos por calcários, cuja resistividade é expectavelmente superior ao meio geológico envolvente.

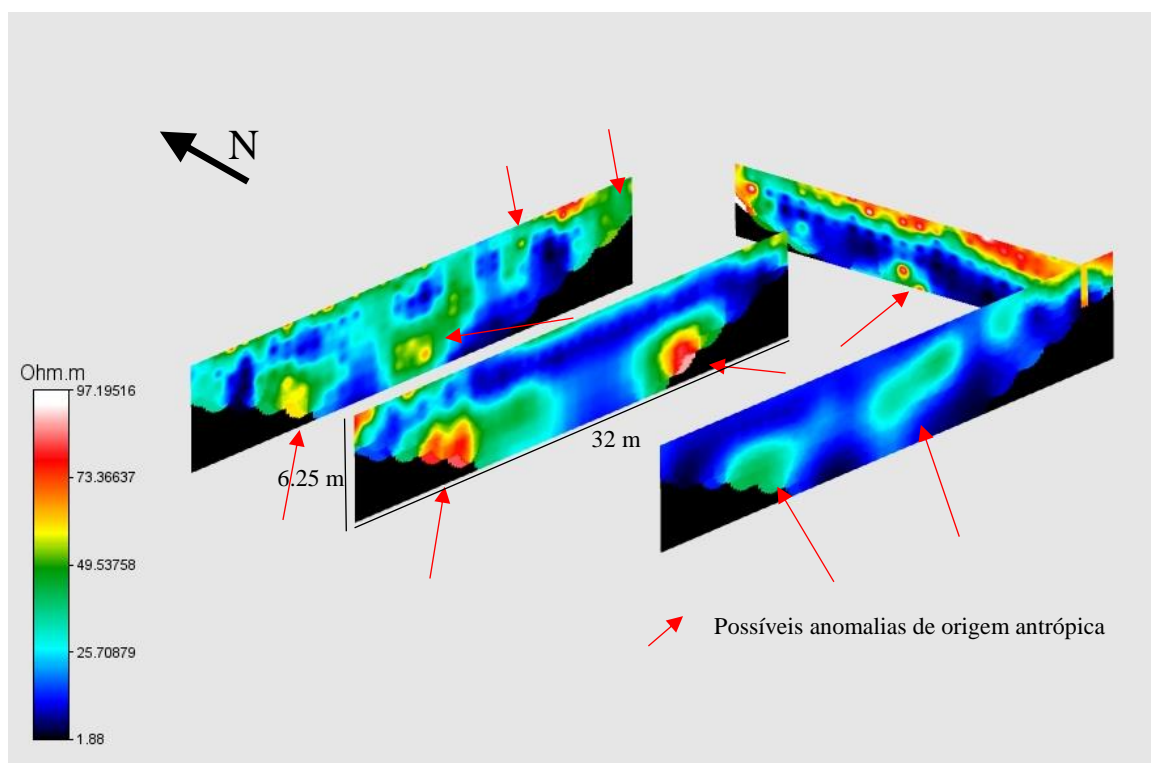


Figura 34: Modelação 3D sobre os perfis de resistividade

Os valores de baixa resistividade observados são típicos dos materiais geológicos descritos e também observados no âmbito deste trabalho, na área estudada.

A Figura 35 representa os volumes gerados a partir da interpolação das secções bidimensionais obtidas a partir dos perfis de resistividade. A apresentação dos dados em volume permite uma

melhor percepção do comportamento geoelectrico da área de estudo, em profundidade. Verifica-se continuidade de zonas de alta resistividade aparente relativa, na direção aproximada de Norte-Sul.

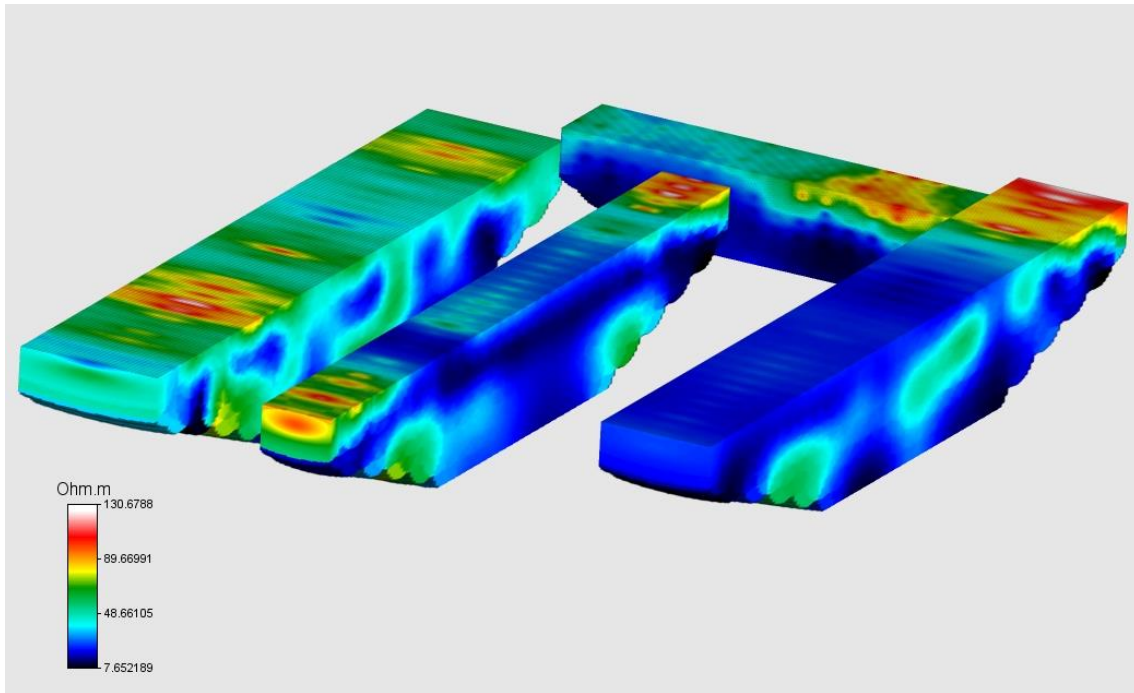


Figura 35: Volumes gerados a partir da interpolação das secções bidimensionais obtidas a partir dos perfis de resistividade

Os resultados obtidos, tanto nos perfis de prospeção por electrorresistividade e polarização induzida, como nos que foram realizados com recurso ao GPR, permitiram a deteção de estruturas de provável origem antrópica. Outrossim, foi também possível definir a geometria aproximada de uma estrutura que poderá ser uma falha e/ou camada argilosa, suscetível de provocar os danos estruturais observados na Igreja, resultantes de assentamento diferencial e também descritos em relatório do DGPC. A Figura 36 representa um bloco diagrama exemplificativo da presença de camada condutiva (provavelmente constituída por argilas montmoriloníticas), detetada pela prospeção geoelectrica

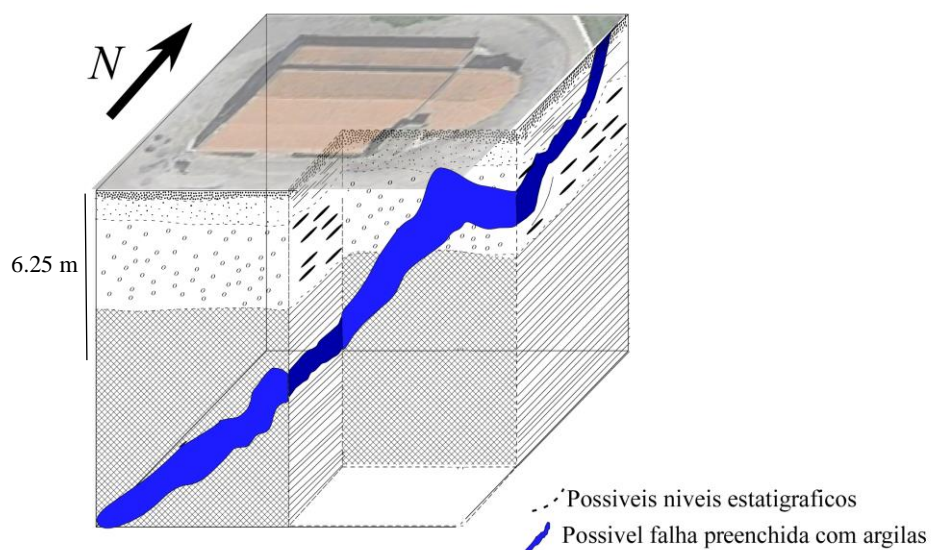


Figura 36: Bloco diagrama representativo dos resultados de resistividade

4.2. polarização induzida

As Figuras seguintes representam as pseudosecções conjuntas de IP e resistividade realizadas, obtidas após inversão.

A Figura 37 representa a pseudosecção obtida para o perfil Lourinhã IP_1. A Pseudosecção de resistividade, acima, exhibe um comportamento geoelectrico similar às secções dos perfis L1 a L5. Verifica-se uma sobreposição espacial entre resultados de baixa resistividade relativa e alta cargabilidade relativa. Merece menção a anomalia de alta cargabilidade relativa que está

espacialmente relacionada com uma anomalia de baixa resistividade relativa, possivelmente provocada por argilas saturadas em água.

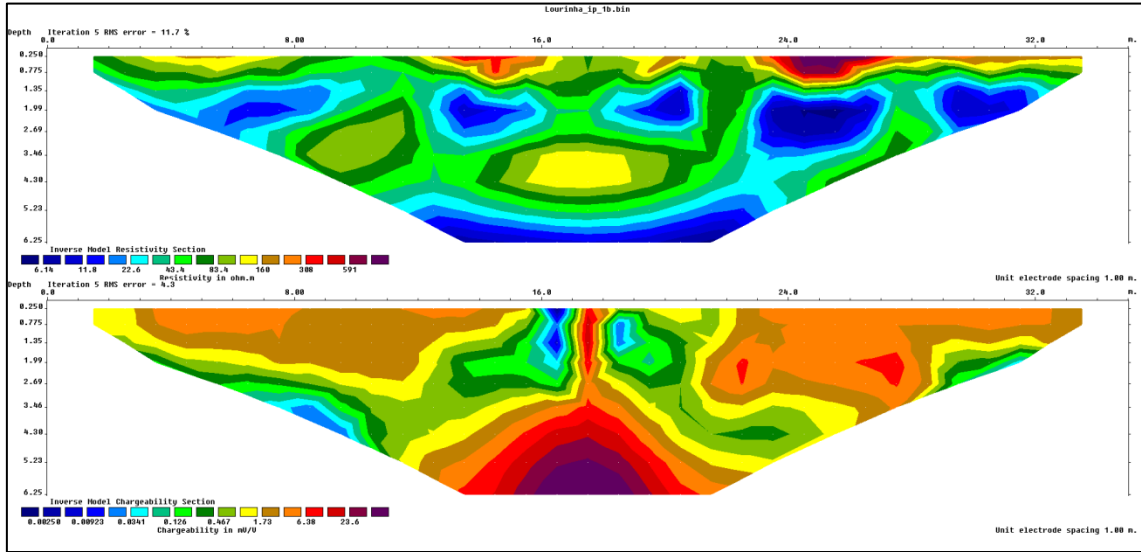


Figura 37: Pseudosecção obtida para o perfil Lourinhã IP_1

A Figura 38 representa a pseudosecção obtida para o perfil Lourinhã IP_2. A Pseudosecção de resistividade, acima, exibe um comportamento geoelectrico similar às secções dos perfis L1 a L5. Verifica-se alguma sobreposição espacial entre resultados de baixa resistividade relativa e alta cargabilidade relativa.

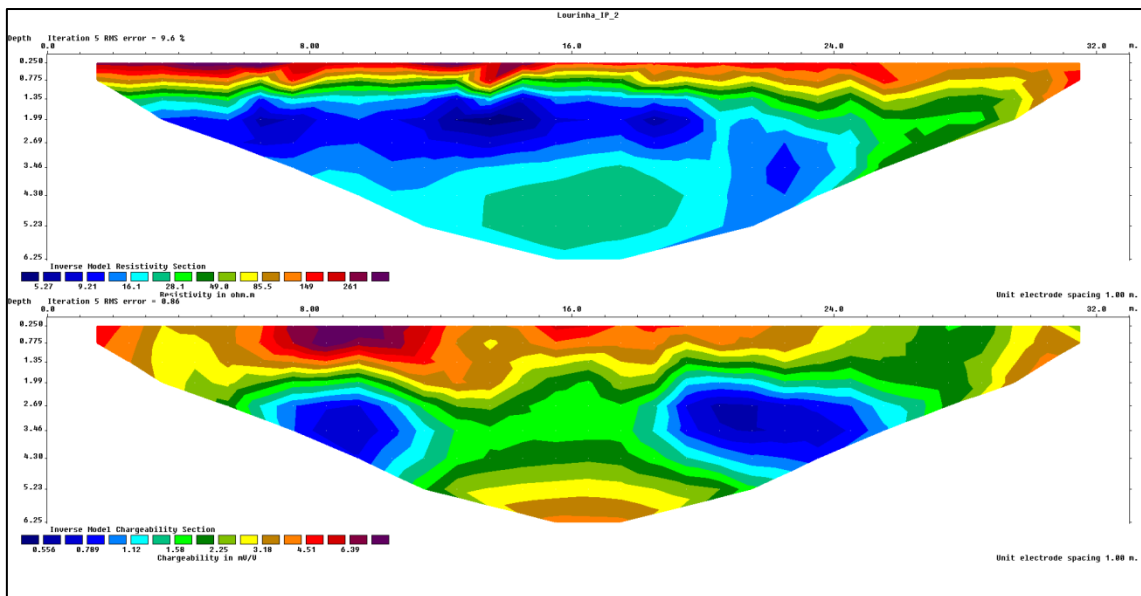


Figura 38: Pseudosecção obtida para o perfil Lourinhã IP_2

A Figura 39 representa a pseudosecção obtida para o perfil Lourinhã IP_3. A Pseudosecção de resistividade, acima, exhibe um comportamento geoelectrico similar às secções dos perfis in_centro, in_norte e in_sul. Verifica-se alguma sobreposição espacial entre resultados de baixa resistividade relativa e alta cargabilidade relativa.

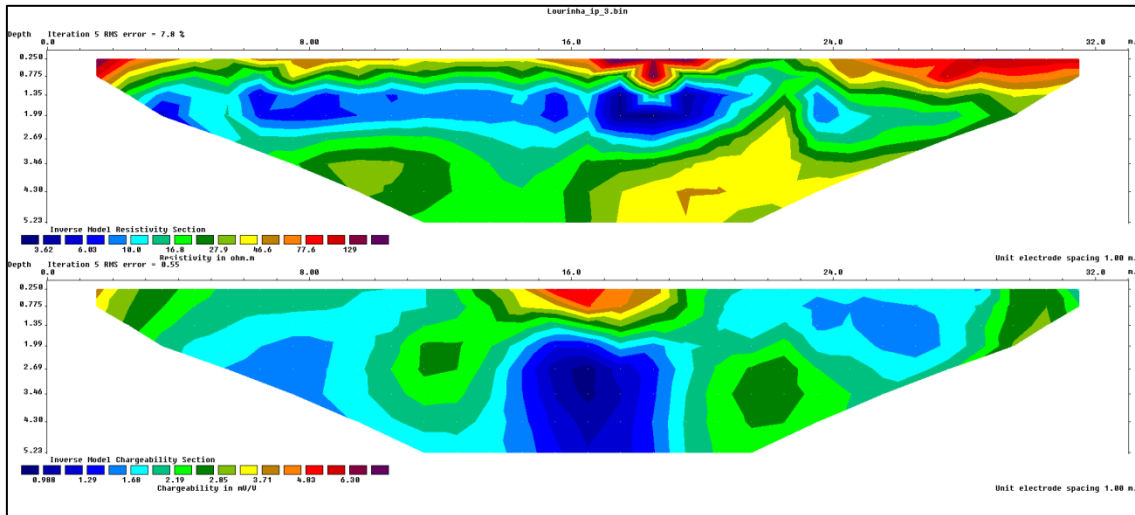


Figura 39:pseudosecção obtida para o perfil Lourinhã IP_3

4.3. Georadar

Para a prospeção geofísica com Georadar para este local foram realizados 479 perfis, com o auxílio de duas antenas da GSSI, uma de 200 (MHz) e outra de 400 (MHz)

Foram definidos um total de 30 polígonos de modo a cobrir uma grande parte da área de estudo (figura 40), com esses polígonos foram feitos diagramas tridimensionais, através dos cortes foi possível fazer um modelo em profundidade do que foi observado.

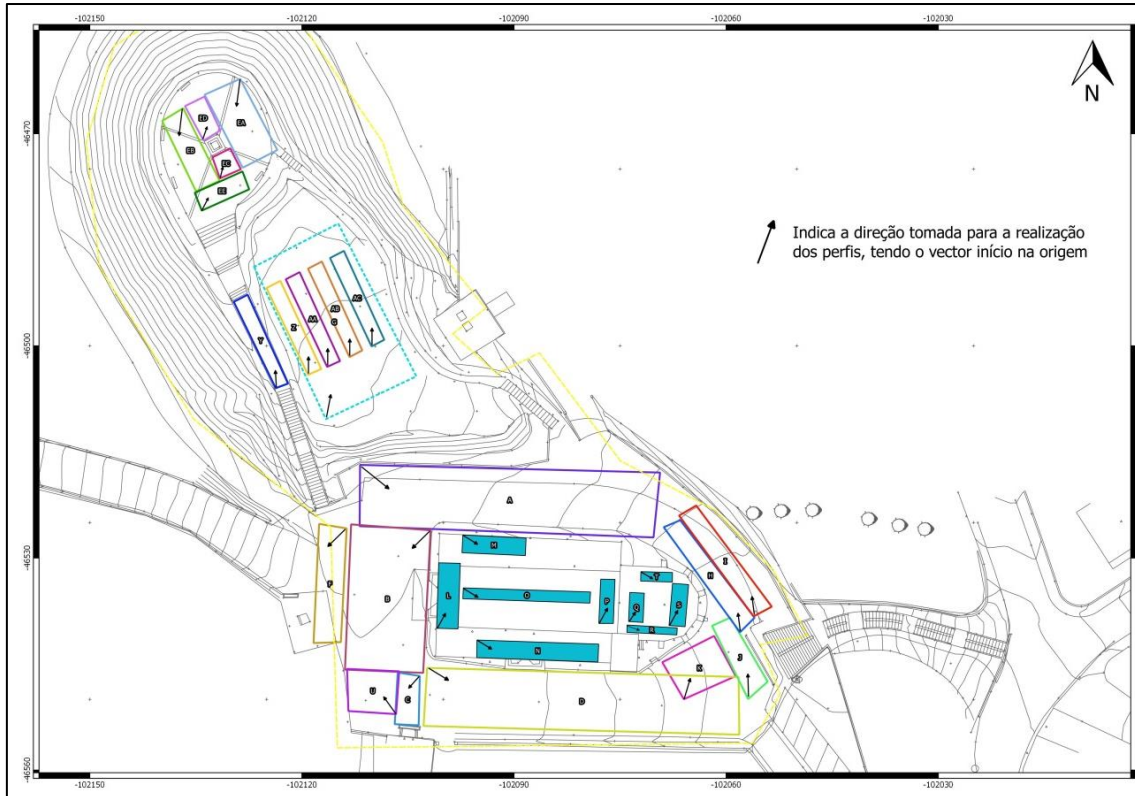


Figura 40: Mapa dos diferentes polígonos

Nas tabelas seguintes vamos apresentar os cortes dos respetivos polígonos com as antenas de 200 e de 400 (MHz), existem, no entanto, polígonos que devido aos dados obtidos não possuem informação relevante foram deixados de parte.

Tabela 1: Cortes do polígono A com a antena de 400 MHz

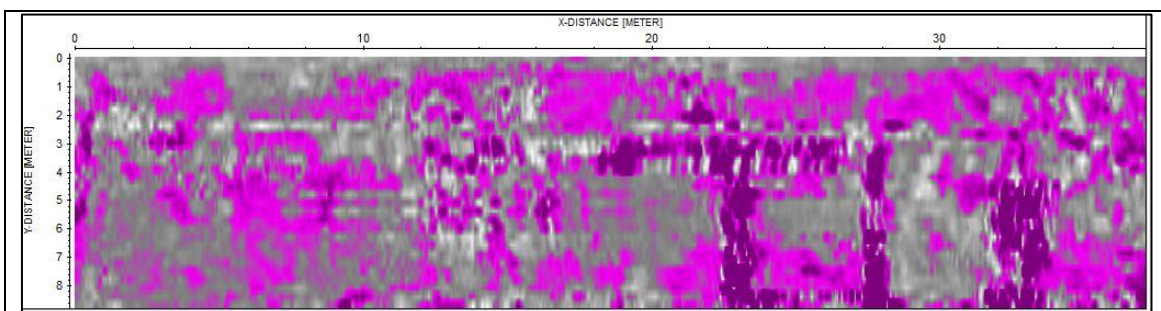


Figura 41

Profundidade de 61 centímetros

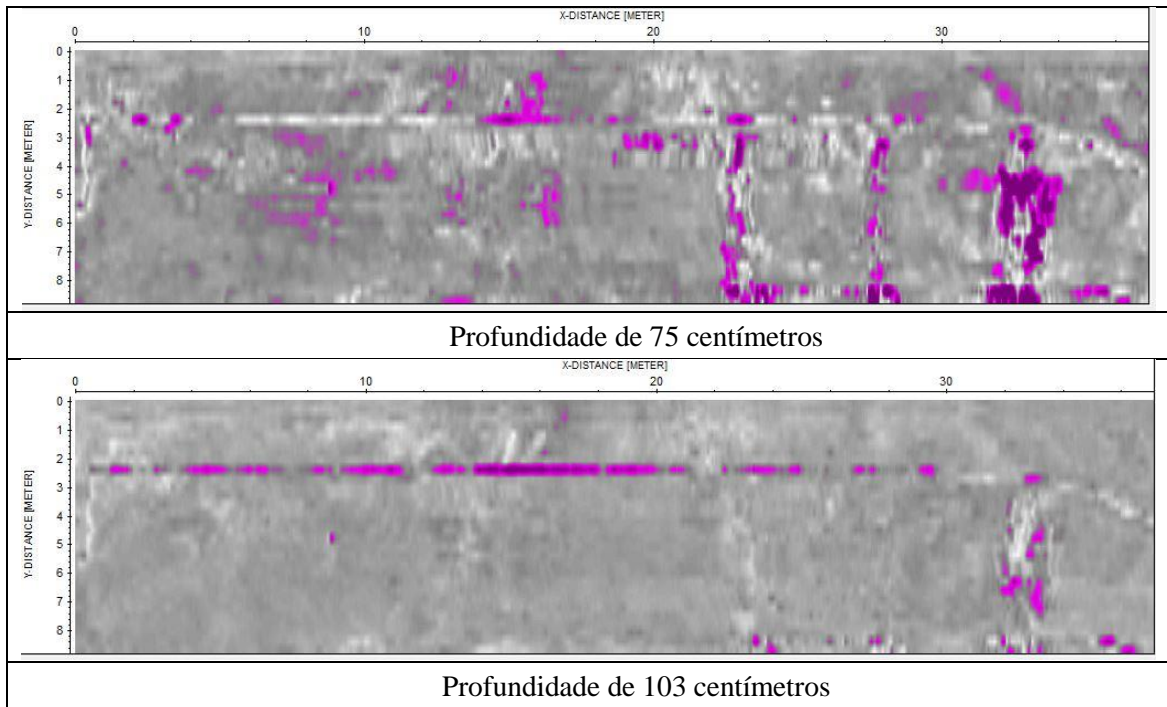
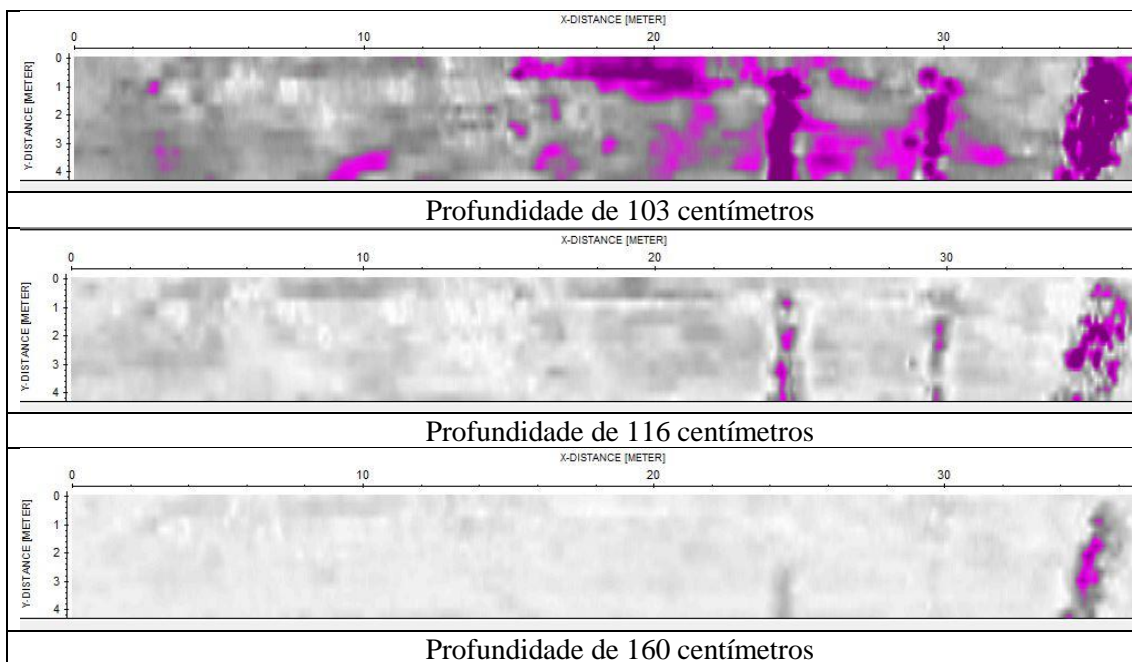


Tabela 2: Cortes do polígono A com a antena de 200 MHz



Ao comparar estas duas tabelas podemos observar que de facto existe uma correlação clara entre as anomalias apresentadas pelas duas antenas, sendo que é facilmente observável que a antena de 400 nos da uma imagem mais detalhada, no entanto o sinal ao 103 cm de profundidade torna-se

já quase vestigial. Por outro lado, com a antena de 200 MHz os cortes realizados com menos de 103cm não apresentam anomalias. . Nestes Slices dos modelos tridimensionais obtidos a partir dos radargramas da área A podemos observar facilmente o que parecem ser estruturas de origem antrópica tipo muro e até o que parece uma divisão de 6x3 m. estas estruturas na tabela um no corte feito a 61 cm parece alongar-se e ser evidente começarem aos 12 m, no entanto a medida que o sinal desce as estruturas parecem ter início apenas aos 22m.

Ao longo da tabela 1 é visível também uma figura de interferência ao longo de todos os cortes com início perto dos 2m no eixo dos y, essa figura trata-se de um lancil em calcário, de acordo com estes dados para a antena de 200 MHz ficou decidido encurtar o local de prospeção para evitar essa mesma figura, daí, no eixo dos Y da tabela 1 para a tabela 2 existir uma redução de 4m.

De acordo com este método podemos concluir que área A se trata de uma área com grande interesse arqueológico dado que as anomalias indicam não só a existência de anomalias, mas a existência de anomalias que muito provavelmente são de origem antrópica.

Na figura 41 podemos observar um radargrama referente ao polígono A e nele podemos ver o mesmo segundo outro plano. Aqui é perceptível algumas reflexões que de acordo com observações locais nos levou a concluir que se tratam de raízes.

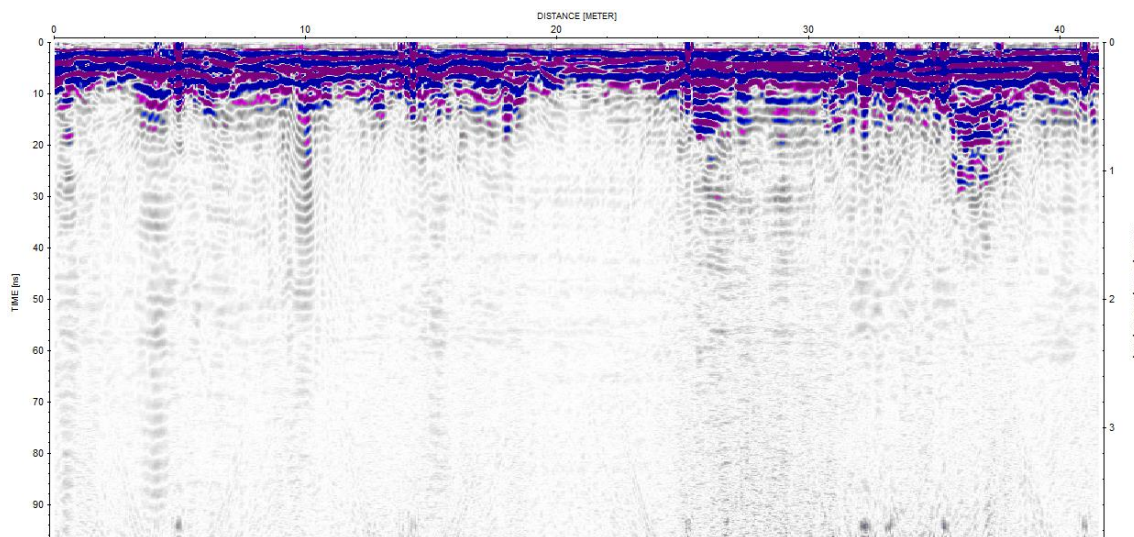
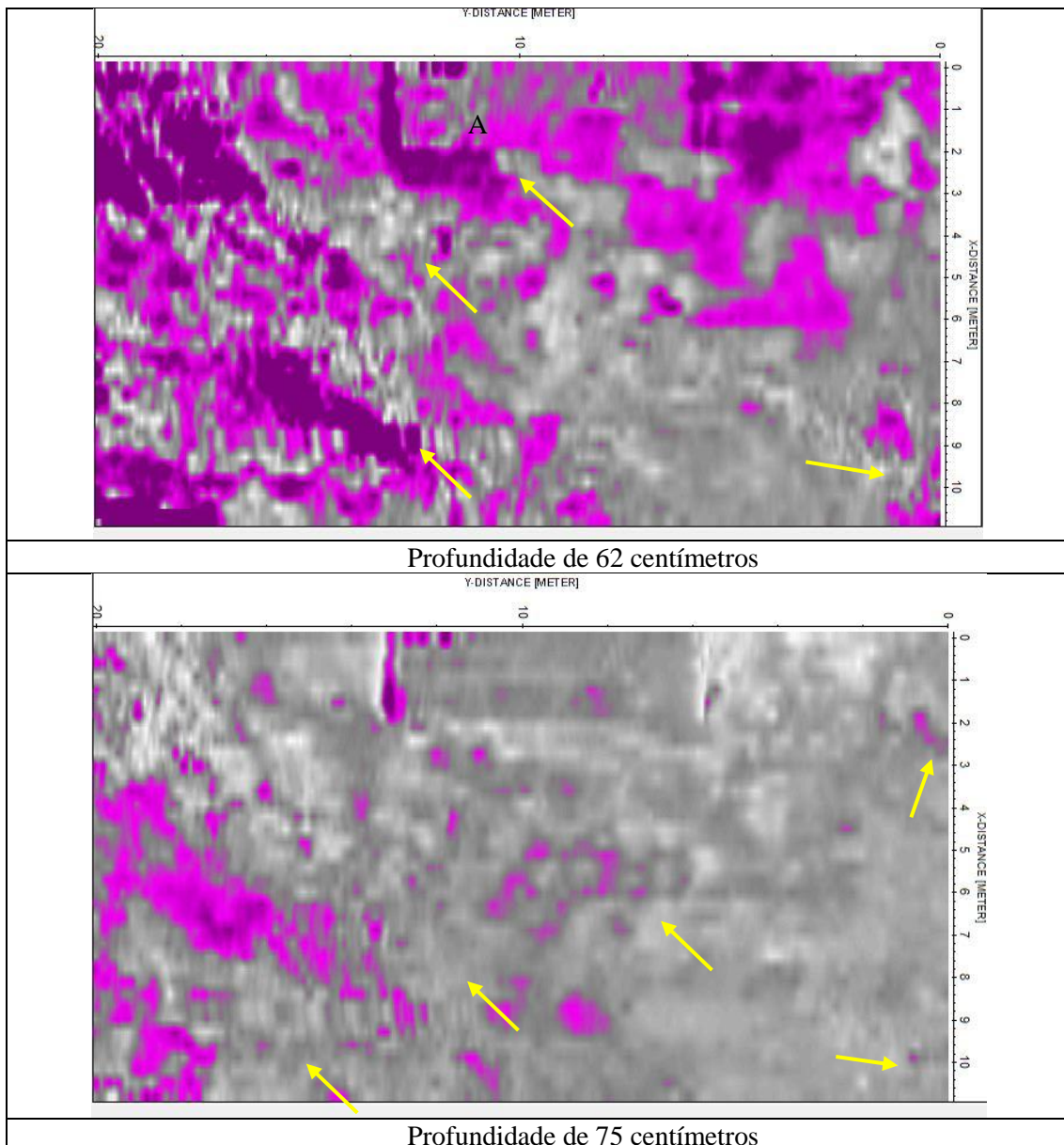


Figura 42: Radargrama referente ao Polígono A

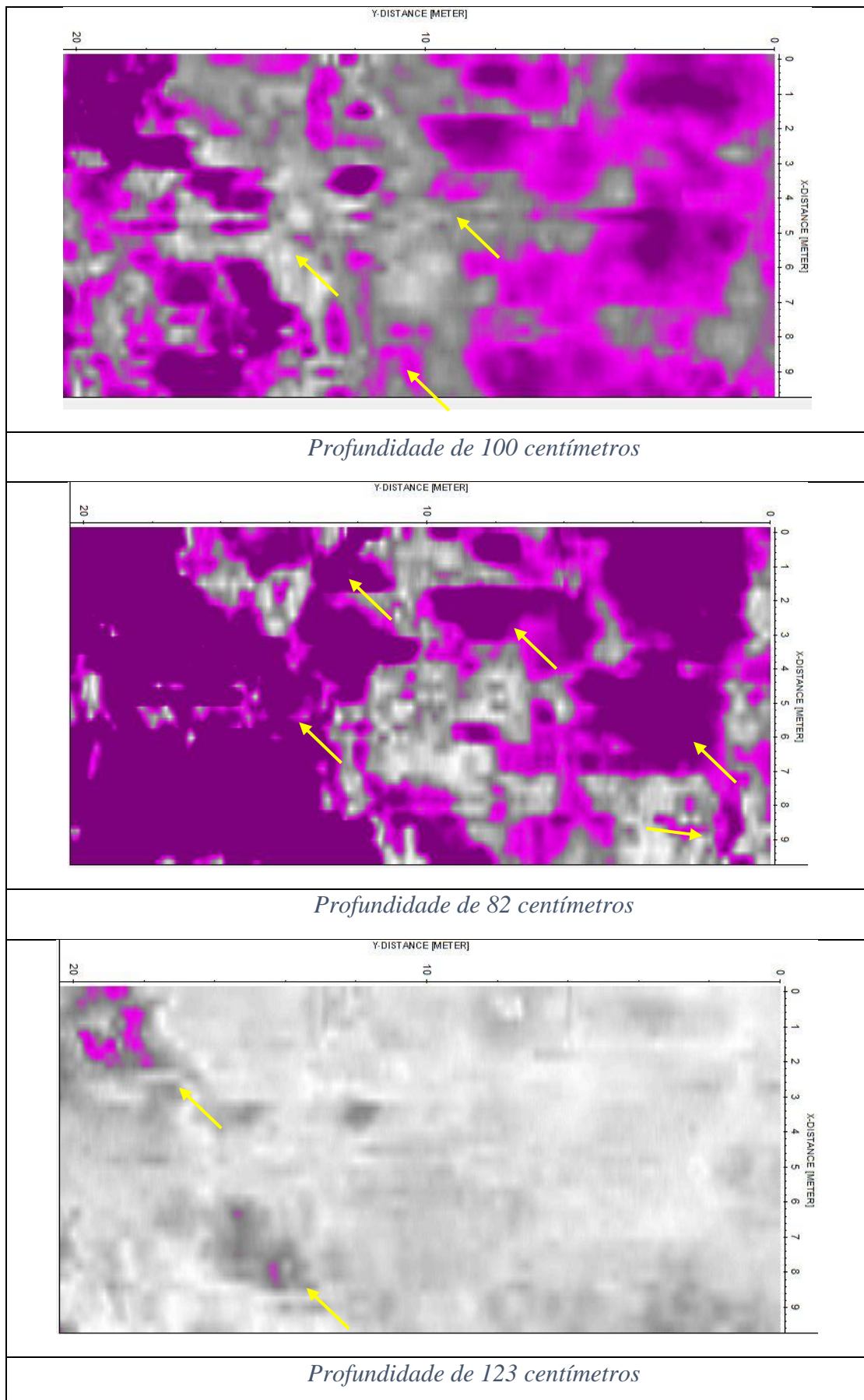
A Tabela 3 apresenta um corte do polígono B realizado com a antena de 400 MHz

Tabela 3: Cortes do polígono B com a antena de 400 MHz



Nesta tabela podemos observar algumas anomalias entre os 62 e os 75 cm de profundidade com formar retas e ângulos de 90° como podemos analisar no slice aos 62 cm assinalado com A.

Tabela 4: Cortes do polígono B com a antena de 200 MHz



No polígono B é possível observar uma figura que claramente é de origem antrópica, mas esta encontra-se a superfície (marcada com a letra A no recorte a 62 cm na Tabela 3) e trata-se de uma lage a entrada da igreja. Além desta figura aparecem outros

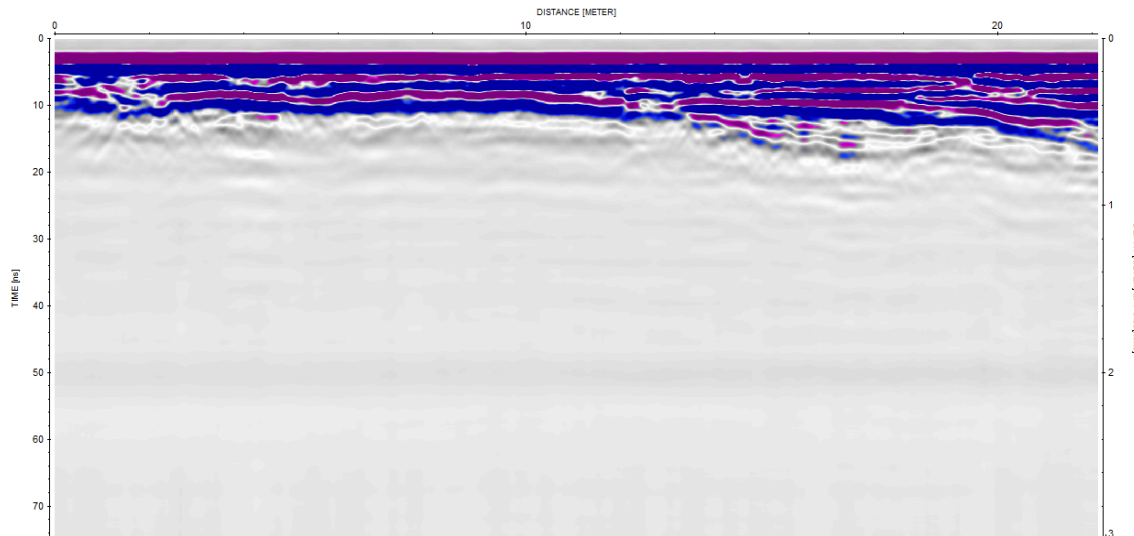
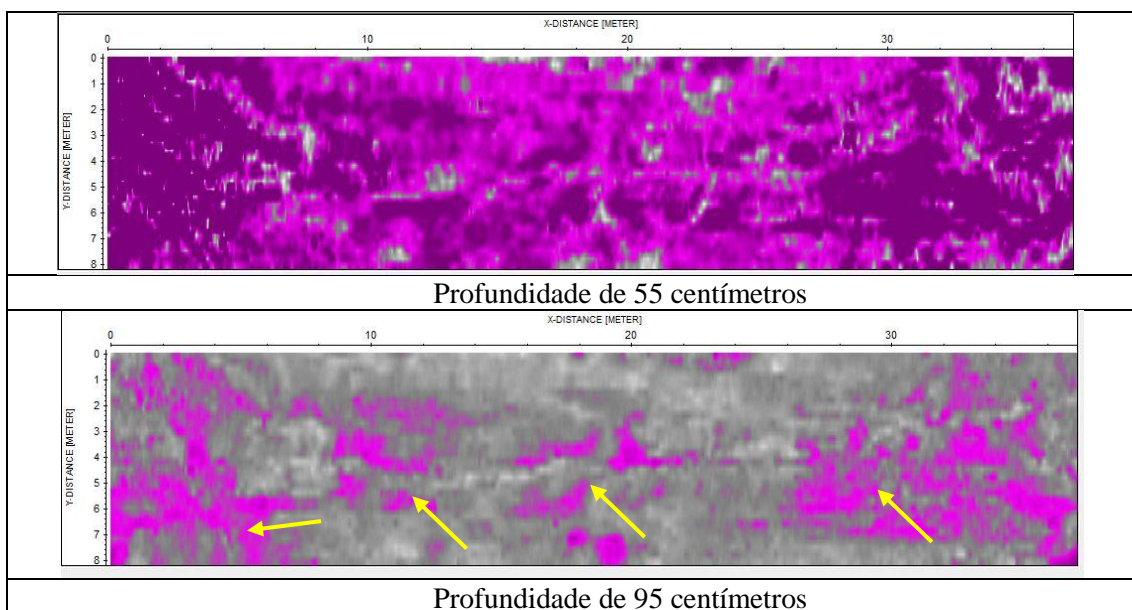
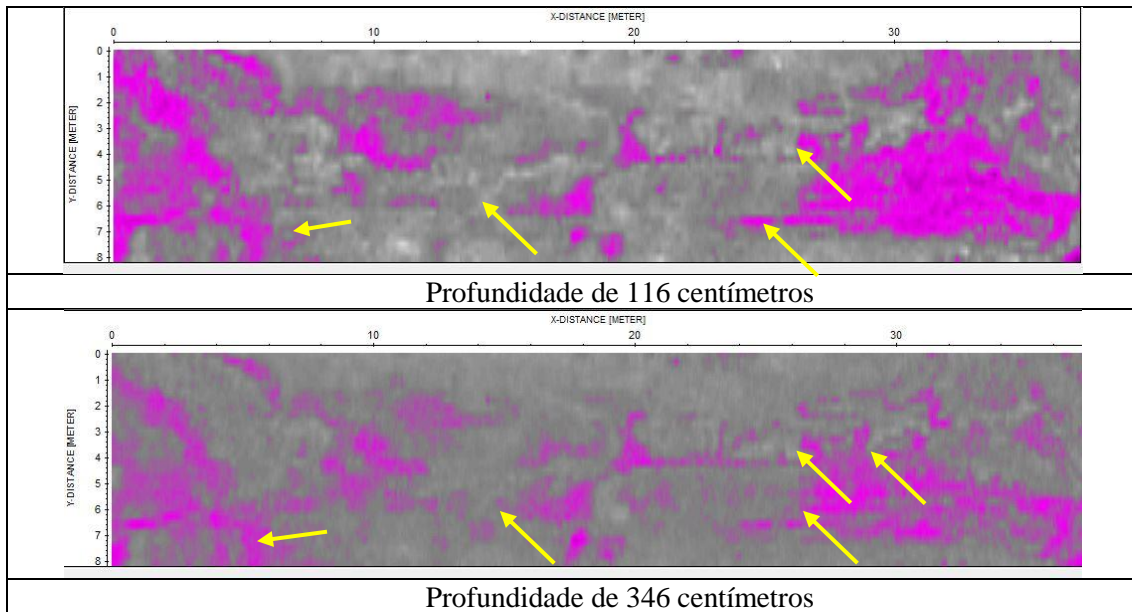


Figura 43: Radargrama referente ao polígono B

A Tabela 5 representa as seções axiais do polígono D (antena de 400MHz). Verifica-se bastante interferência até à profundidade de 55 centímetros. Aos 95 centímetros de profundidade, são observáveis anomalias de alta amplitude de sinal, com direções ortogonais entre si, com provável origem antrópica. Estas anomalias mantêm-se até aos 3,95 metros de profundidade.

Tabela 5: Cortes do polígono D com a antena de 400 MHz





É possível observar várias anomalias possivelmente antrópicas dado as suas formas terem direções ortogonais. Dadas as dimensões das anomalias (aproximadamente 2m) é possível que estas sejam sepulturas, dado que antigamente era comum enterrar pessoas nas imediações das igrejas.

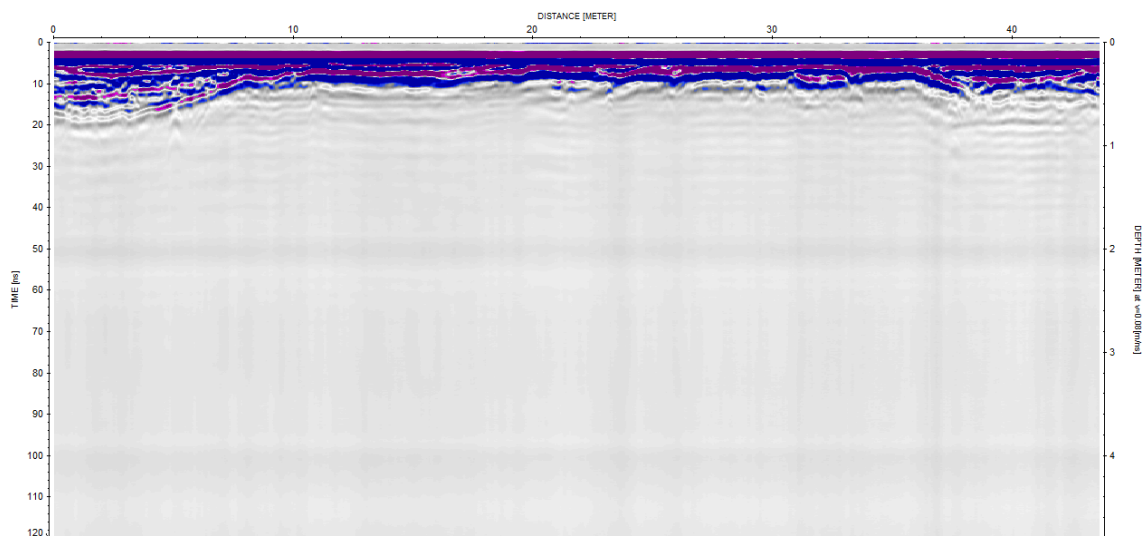
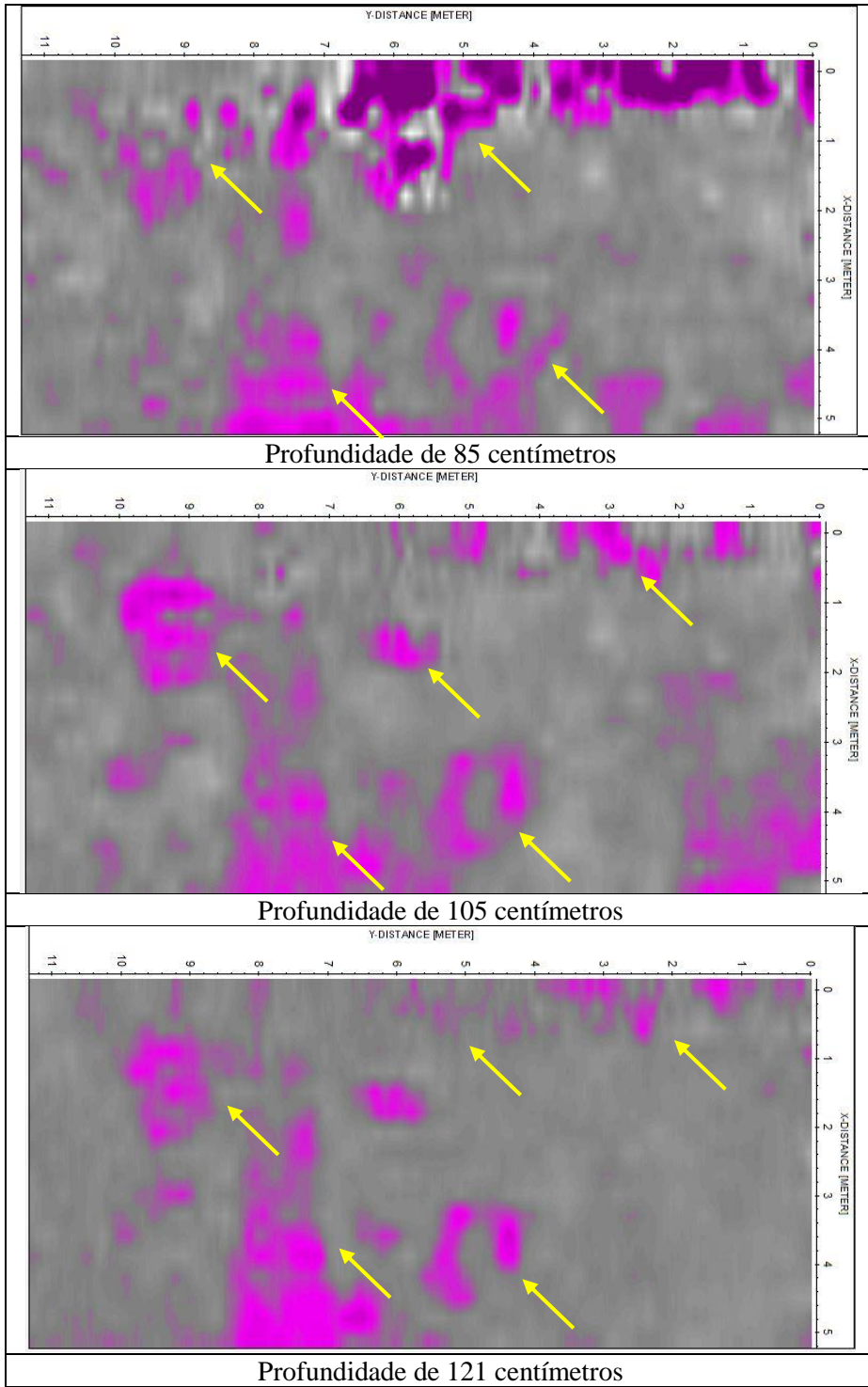
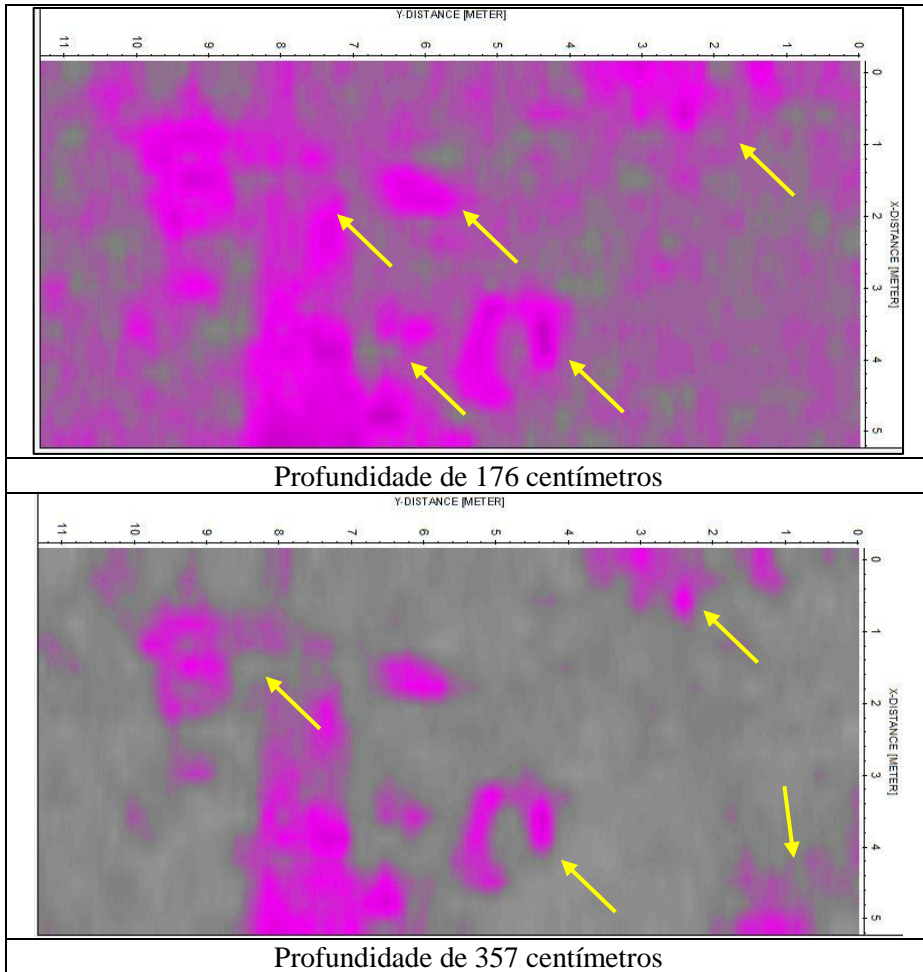


Figura 44: Radgrama referente ao Polígono D

A Tabela 6 representa as anomalias de maior amplitude de sinal, em planta, para o polígono E_A. Assinalam-se as anomalias de maior amplitude e de carácter persistente, atribuíveis à presença de estruturas com origem antrópica, em profundidade.

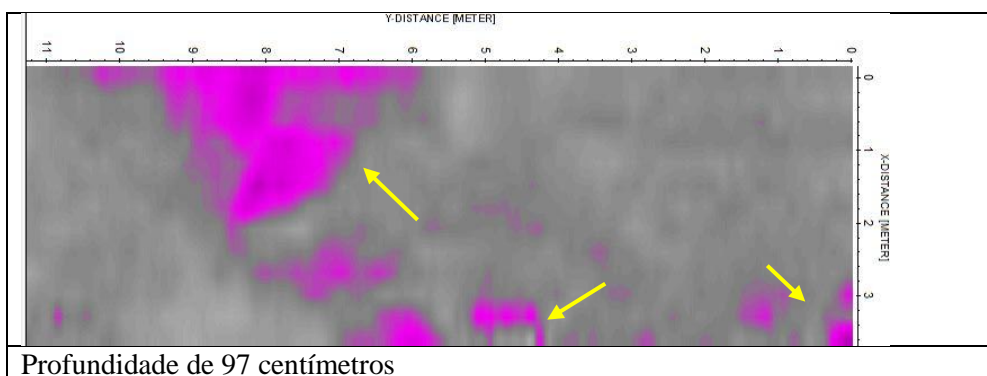
Tabela 6: Cortes do polígono E_A com a antena de 200 MHz

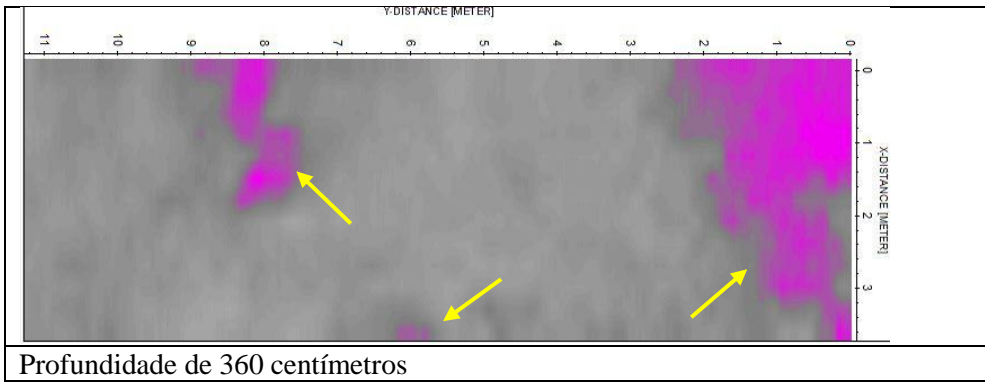




A Tabela 7 representa os cortes em planta a diferentes profundidades, obtidos para o polígono E_B. Assinalam-se as anomalias de maior amplitude e de carácter persistente, atribuíveis à presença de estruturas com origem antrópica, em profundidade.

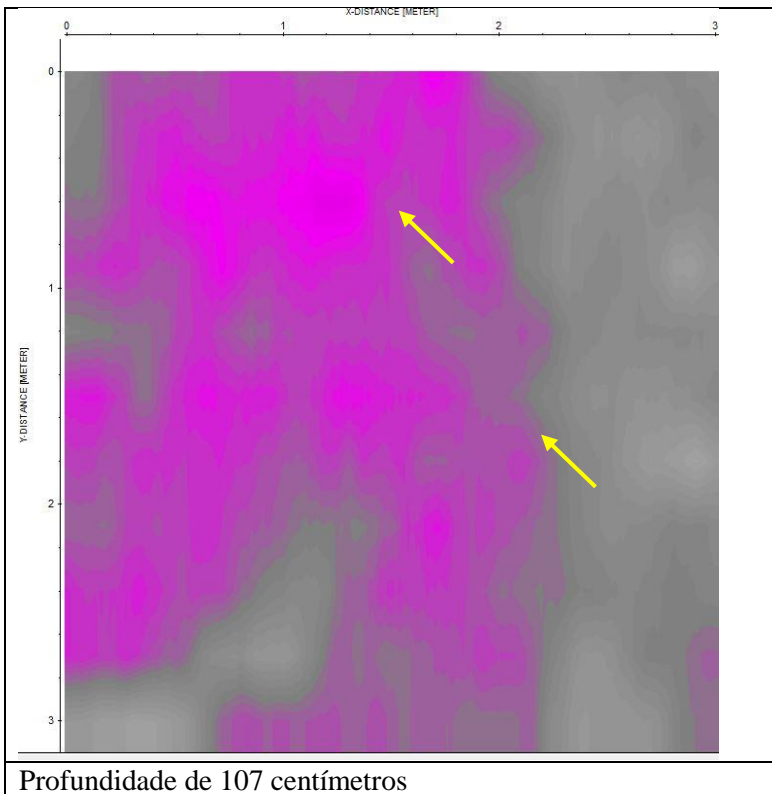
Tabela 7: Cortes do polígono E_B com a antena de 200 MHz

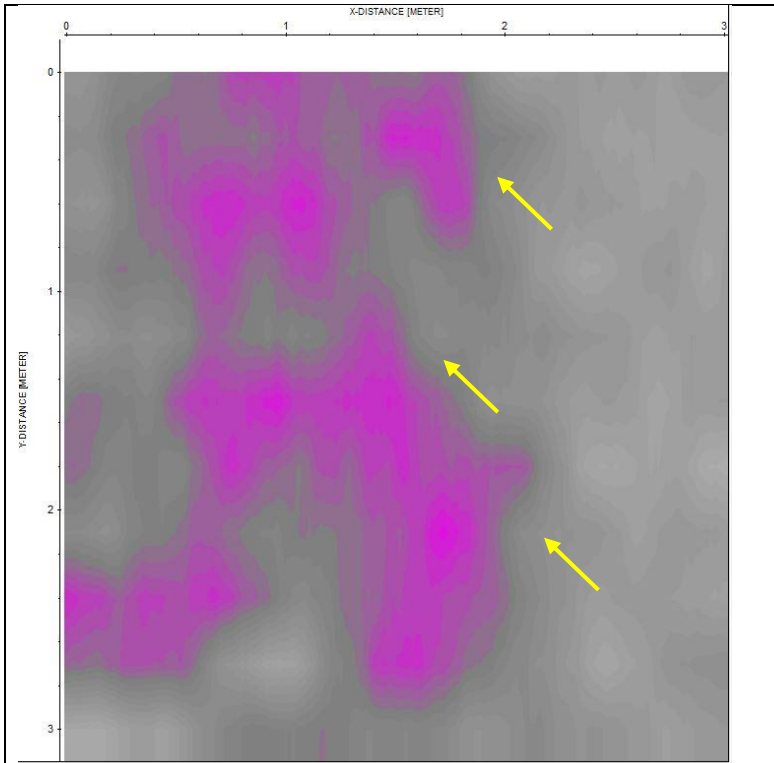




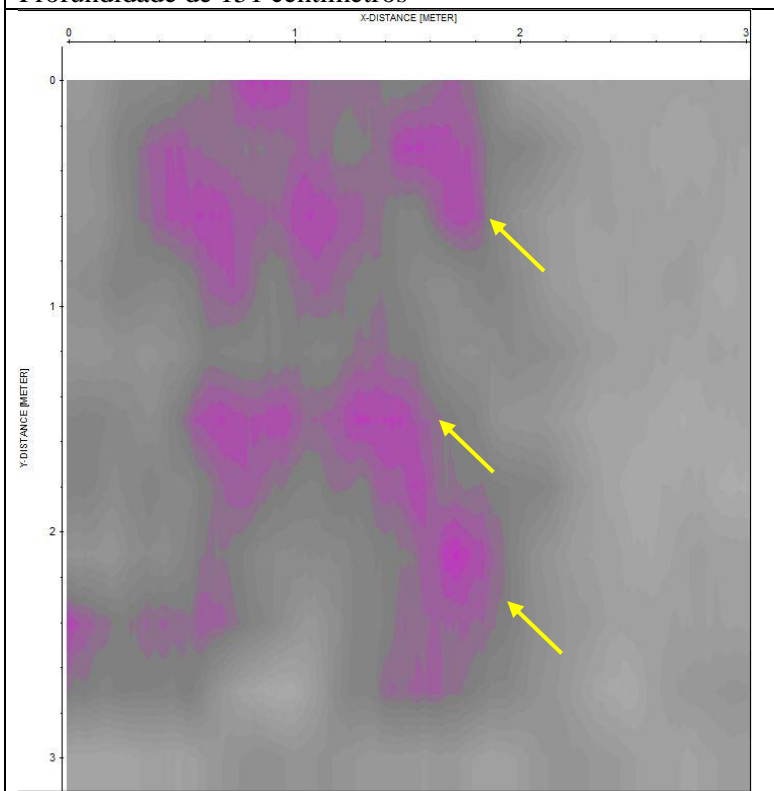
A Tabela 8 representa as anomalias de maior amplitude de sinal, em planta, para o polígono E_C. Assinalam-se as anomalias de maior amplitude e de carácter persistente, atribuíveis à presença de estruturas com origem antrópica, em profundidade

Tabela 8: Cortes do polígono E_C com a antena de 200 MHz

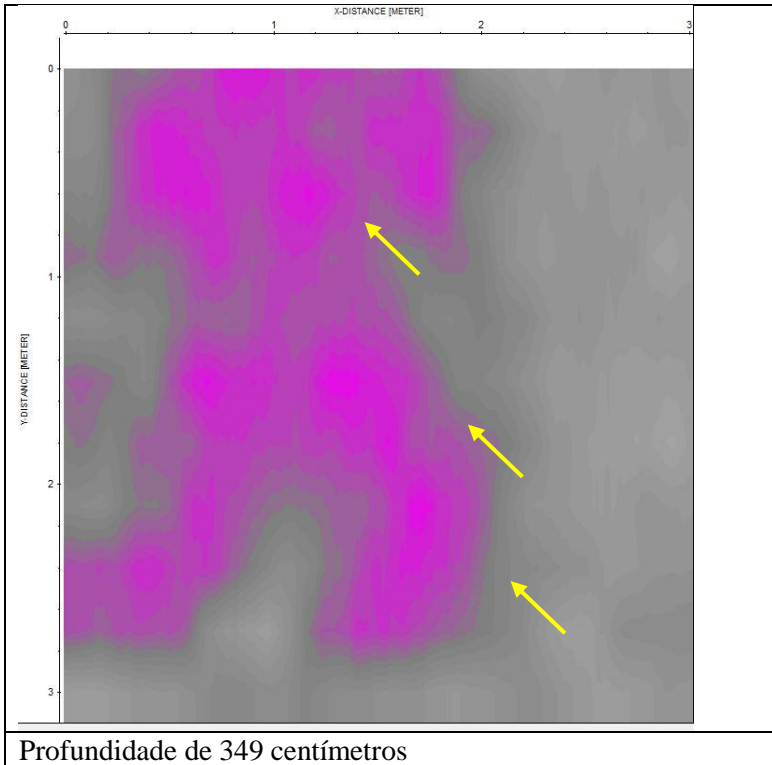




Profundidade de 151 centímetros

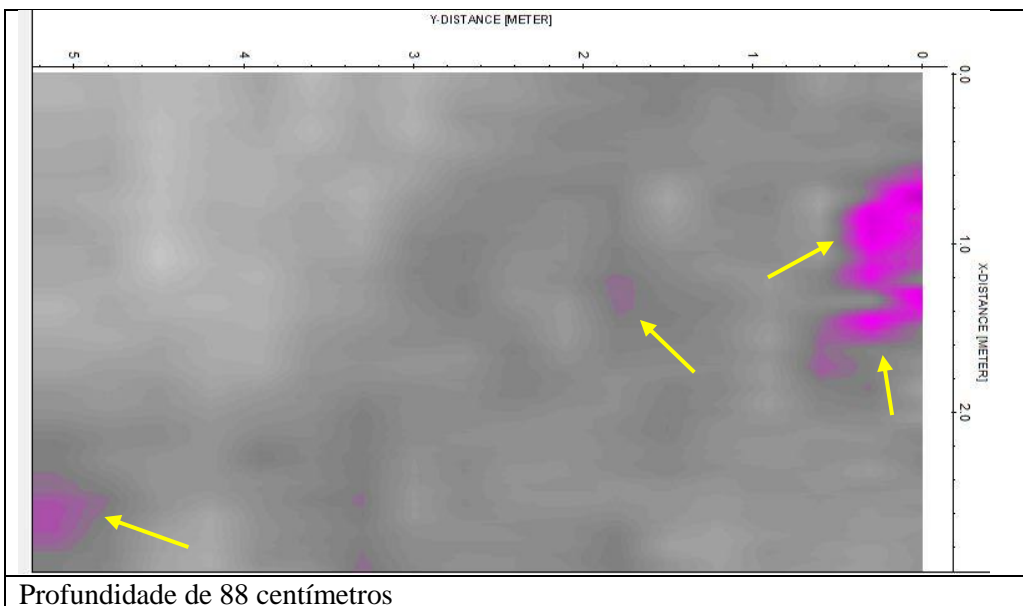


Profundidade de 300 centímetros



A Tabela 9 representa os cortes em planta obtidos para representa as anomalias de maior amplitude de sinal, em planta, para o polígono E_D.

Tabela 9: Cortes do polígono E_D com a antena de 200 MHz



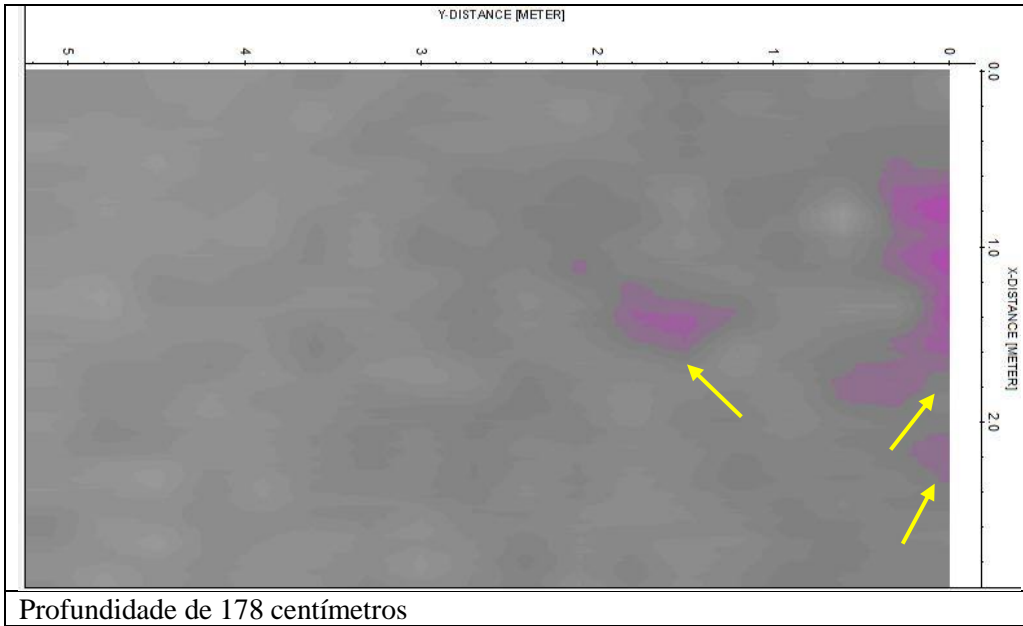
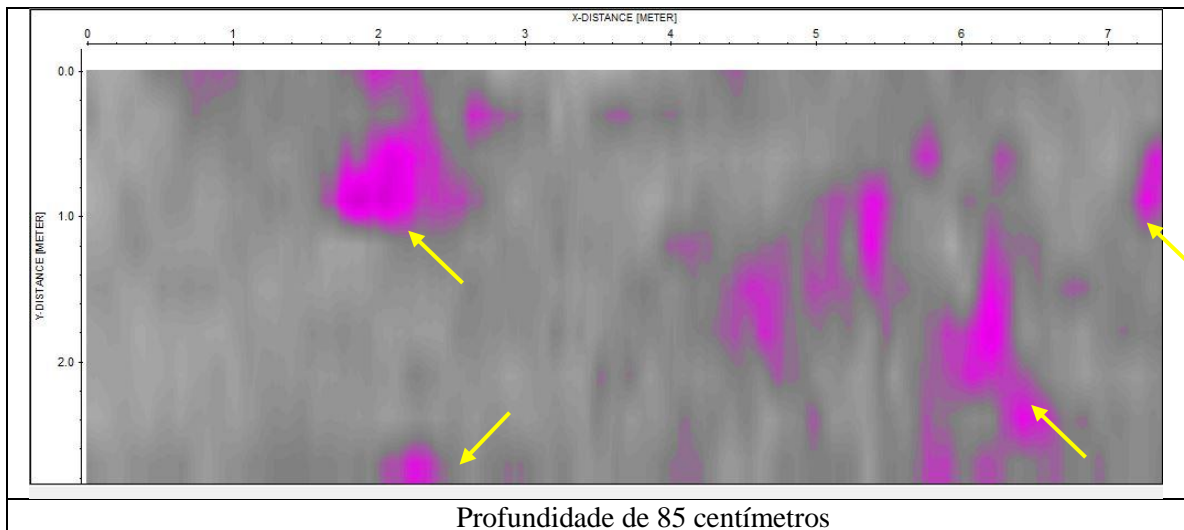
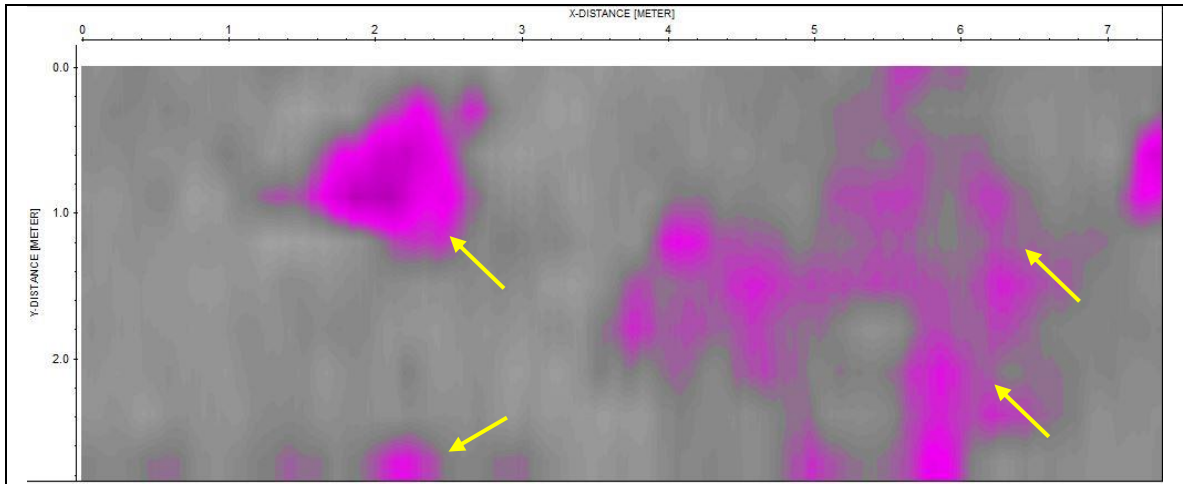


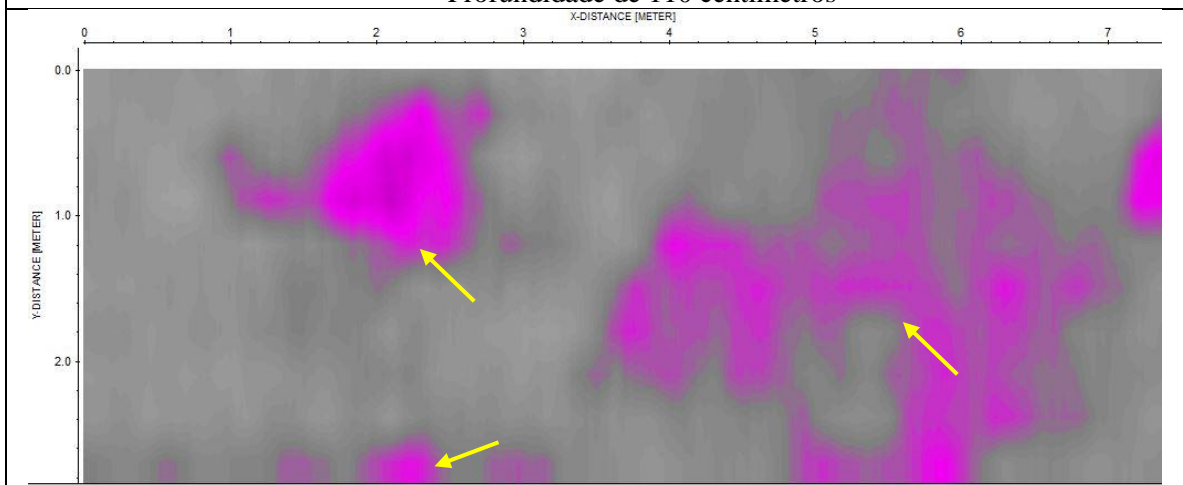
Tabela 10 representa os cortes em planta obtidos para a representa as anomalias de maior amplitude de sinal, em planta, para o polígono E_F.

Tabela 10: Cortes do polígono E_F com a antena de 200 MHz

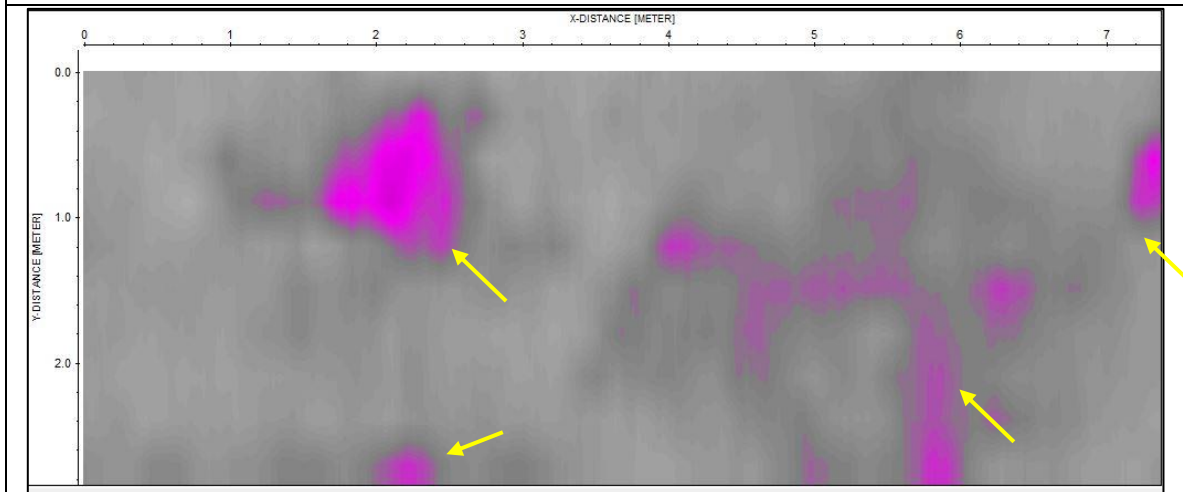




Profundidade de 110 centímetros



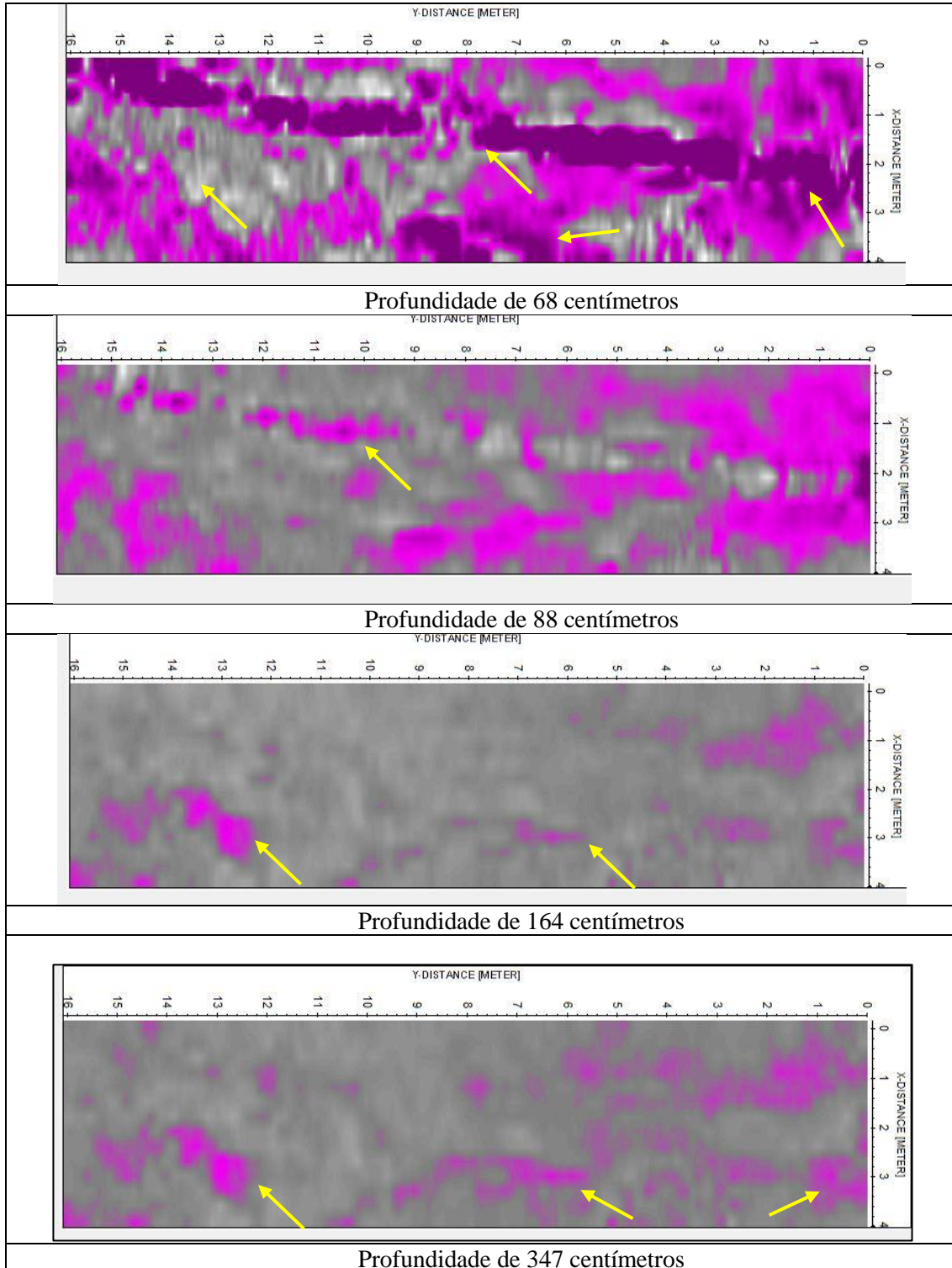
Profundidade de 169 centímetros



Profundidade de 286 centímetros

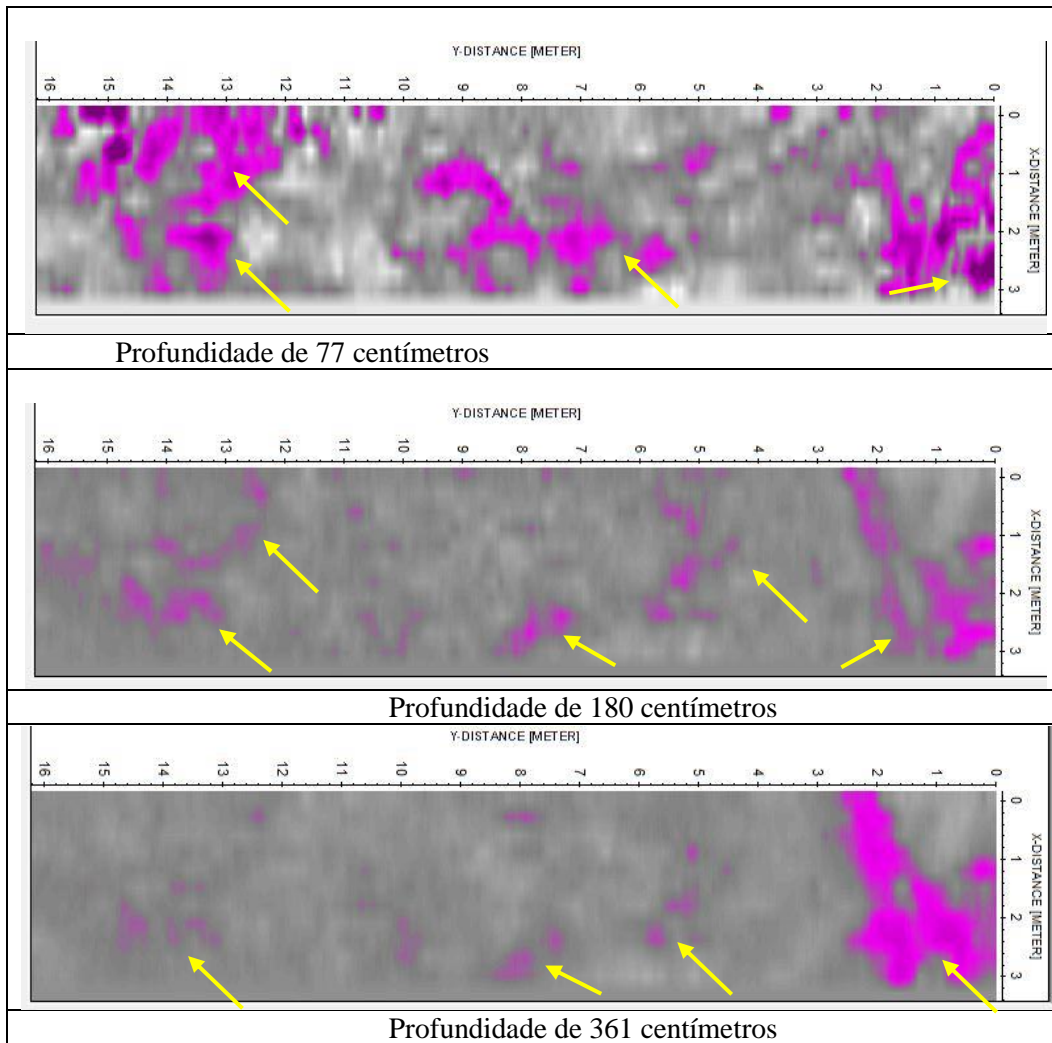
A Tabela 11 representa os cortes em planta obtidos para a o polígono F. neste corte podemos observar a presença de uma anomalia que atravessa o slice ao longo do eixo dos Y, esta figura é muito marcada a 68 cm de profundidade e perde intensidade a partir dai.

Tabela 11: Cortes do polígono F com a antena de 200 MHz



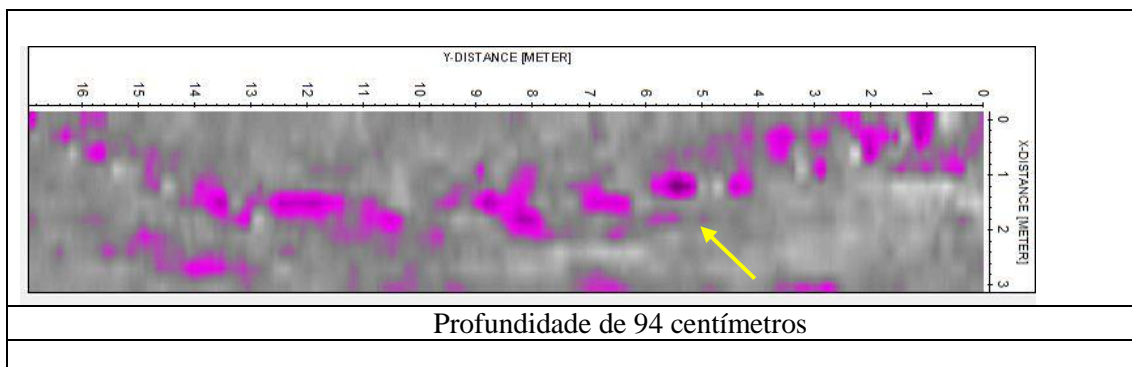
A Tabela 12 representa os cortes em planta obtidos para a o polígono H.

Tabela 12: Cortes do polígono H com a antena de 400 MHz



A Tabela 13 representa as anomalias de maior amplitude de sinal, em planta, para o polígono I.

Tabela 13: Cortes do polígono I com a antena de 400 MHz



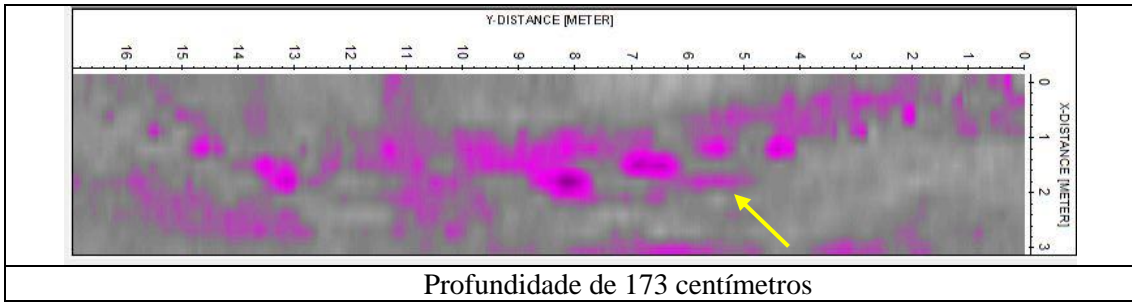


Tabela 15 representa as anomalias de maior amplitude de sinal, em planta, para o polígono J.

Tabela 14: Cortes do polígono J com a antena de 400 MHz

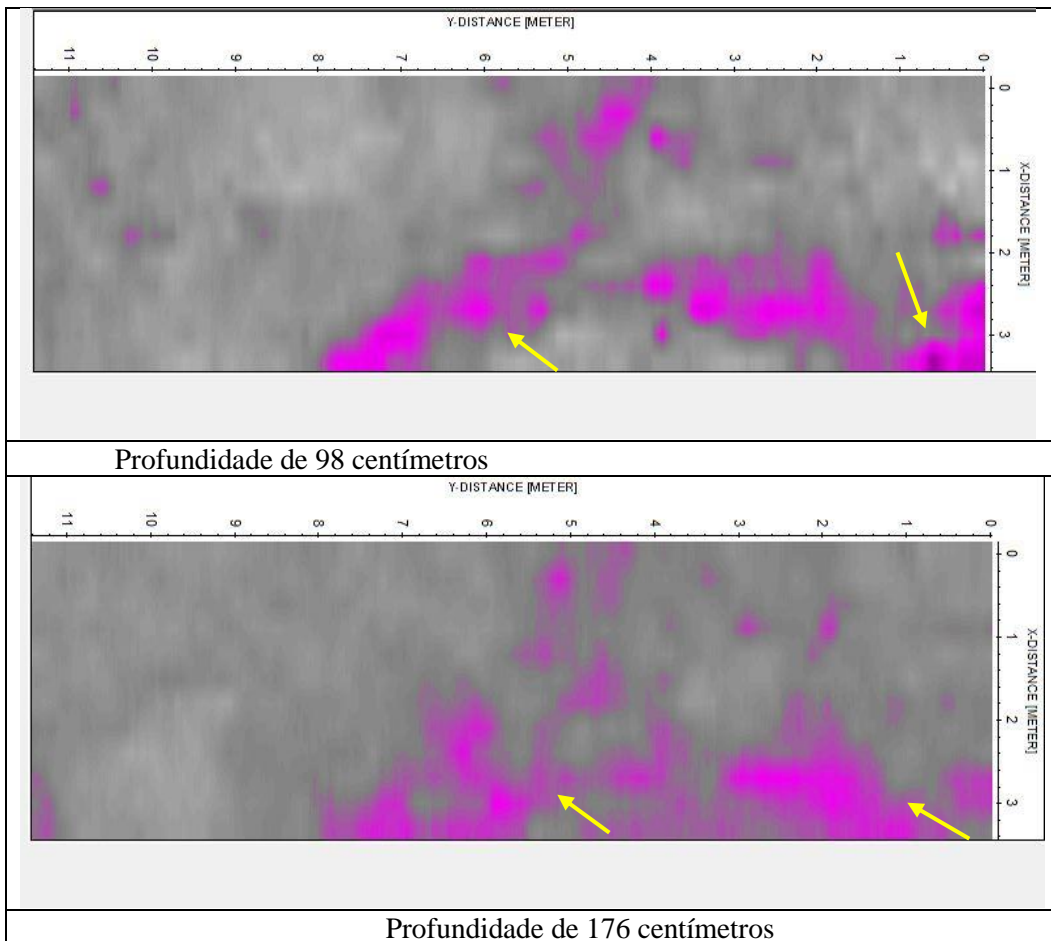


Tabela 15 representa as anomalias de maior amplitude de sinal, em planta, para o polígono K.

Tabela 15: Cortes do poligono K com a antena de 400 MHz

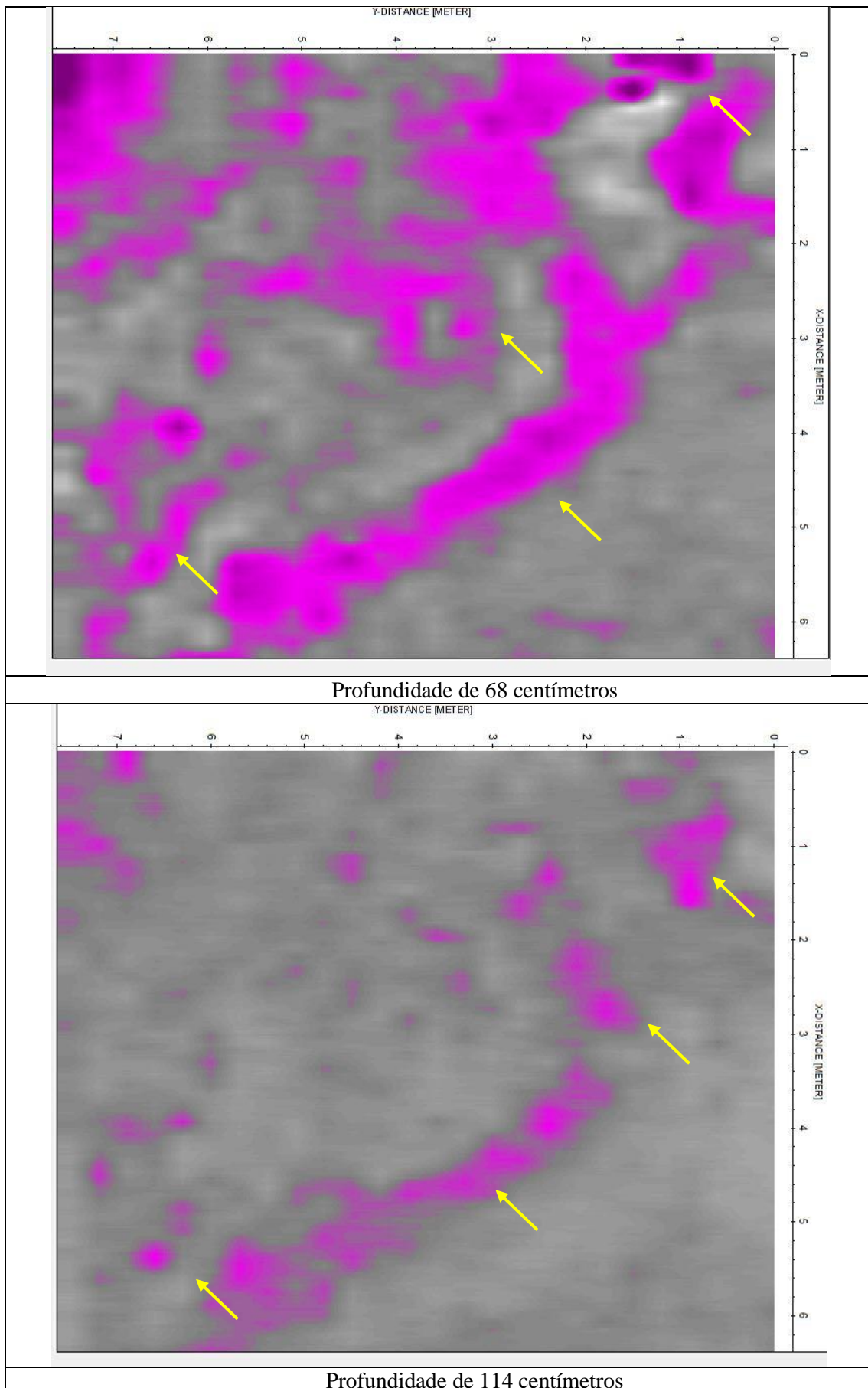


Tabela 16 representa as anomalias de maior amplitude de sinal, em planta, para o polígono L.

Tabela 16: Cortes do polígono L com a antena de 400 MHz

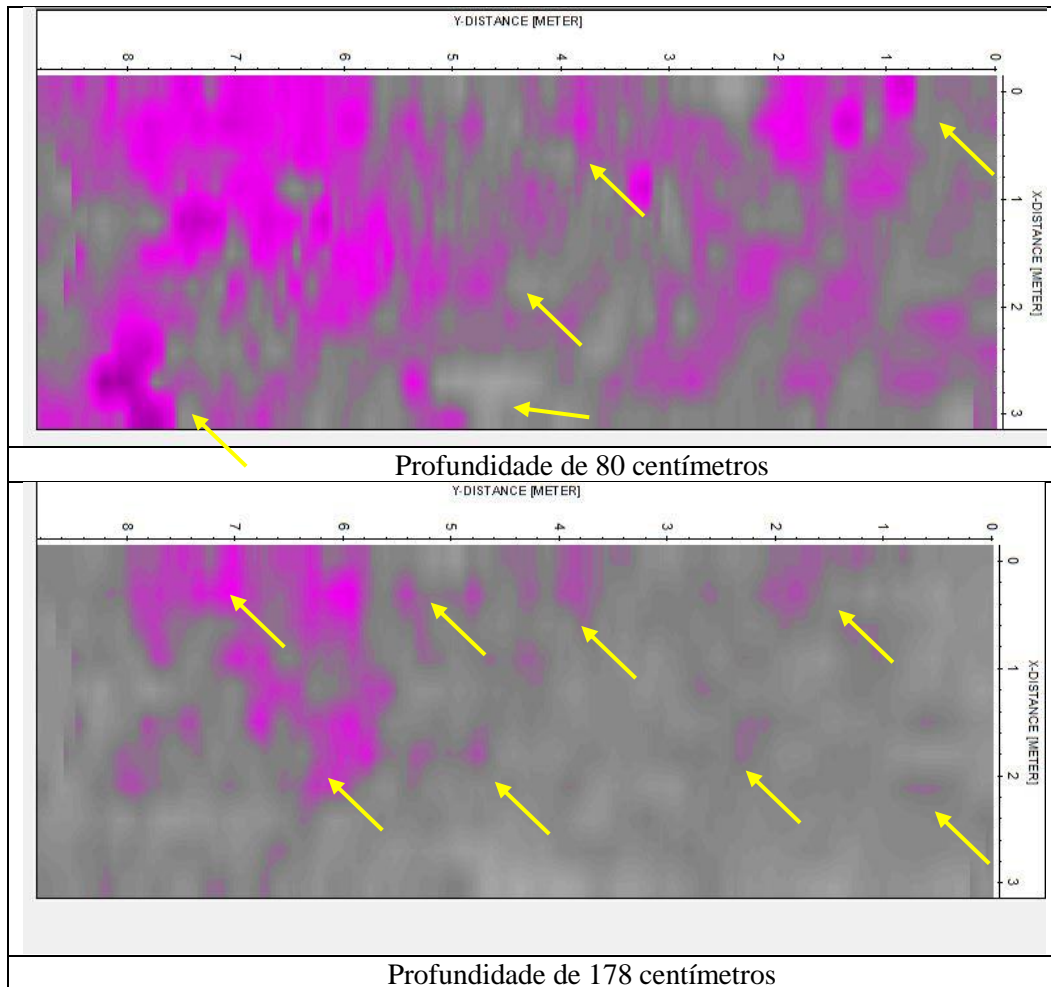
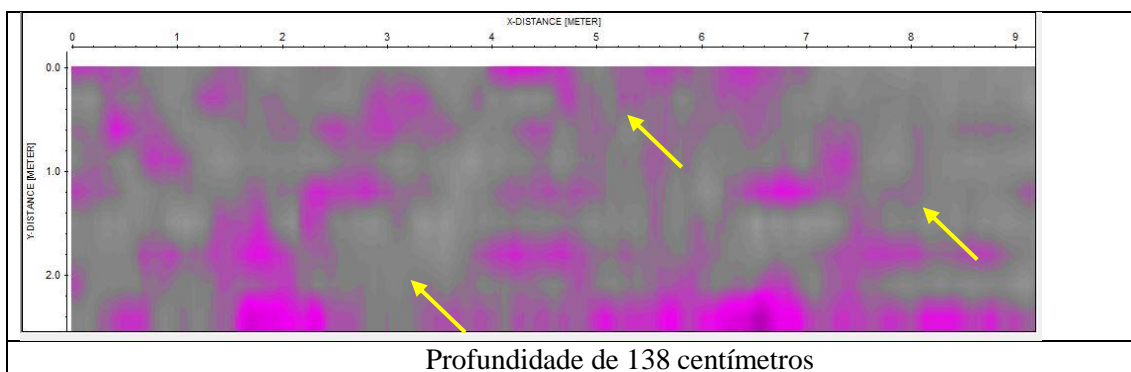


Tabela 17 representa as anomalias de maior amplitude de sinal, em planta, para o polígono M.

Tabela 17: Cortes do polígono M com a antena de 200 MHz



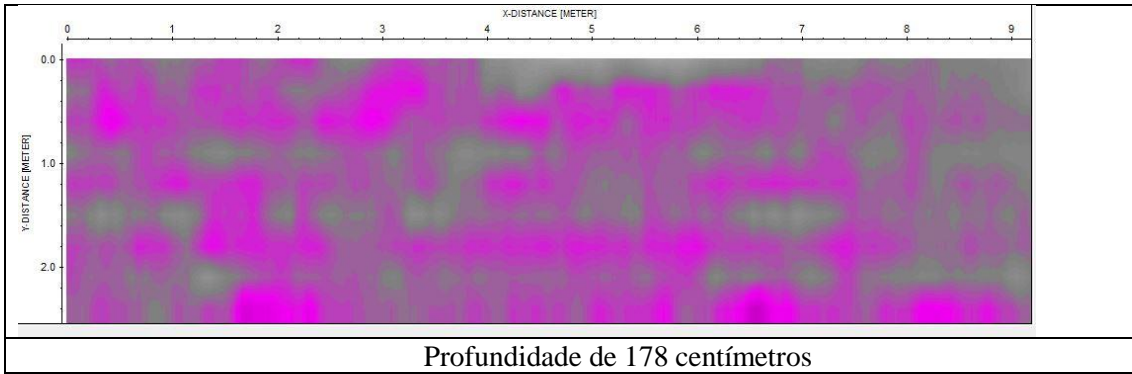


Tabela 18 representa as anomalias de maior amplitude de sinal, em planta, para o polígono N.

Tabela 18: Cortes do polígono N com a antena de 200 MHz

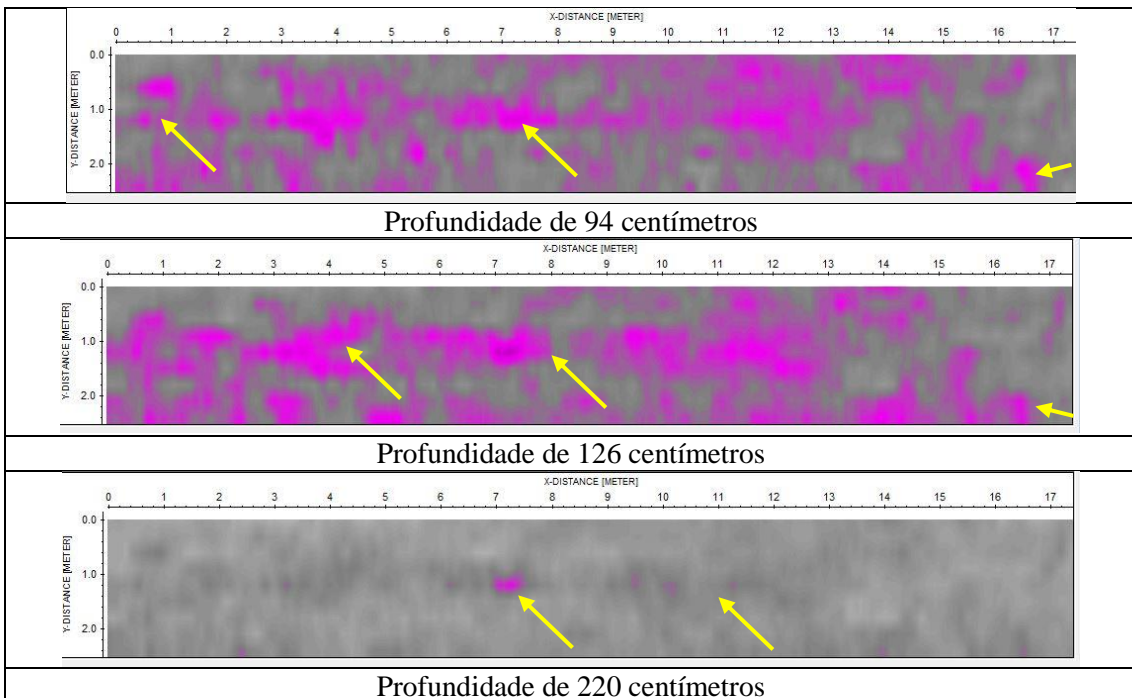
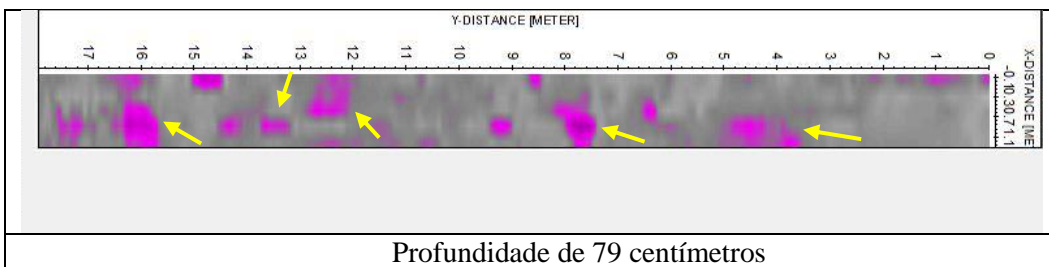


Tabela 20 representa as anomalias de maior amplitude de sinal, em planta, para o polígono O.

Tabela 19: Cortes do polígono O com a antena de 400 MHz



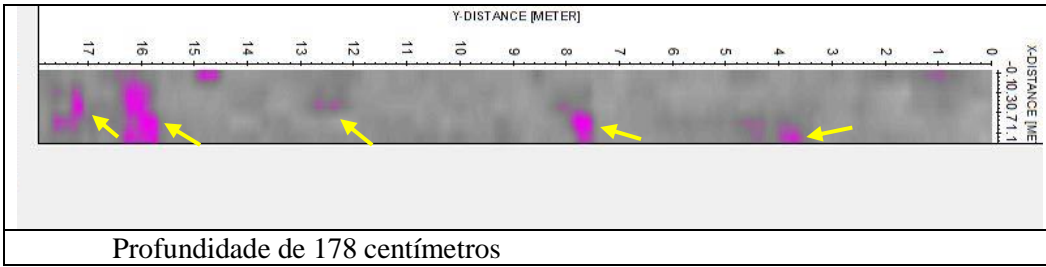


Tabela 21 representa as anomalias de maior amplitude de sinal, em planta, para o polígono P.

Tabela 20: Cortes do polígono P com a antena de 400 MHz

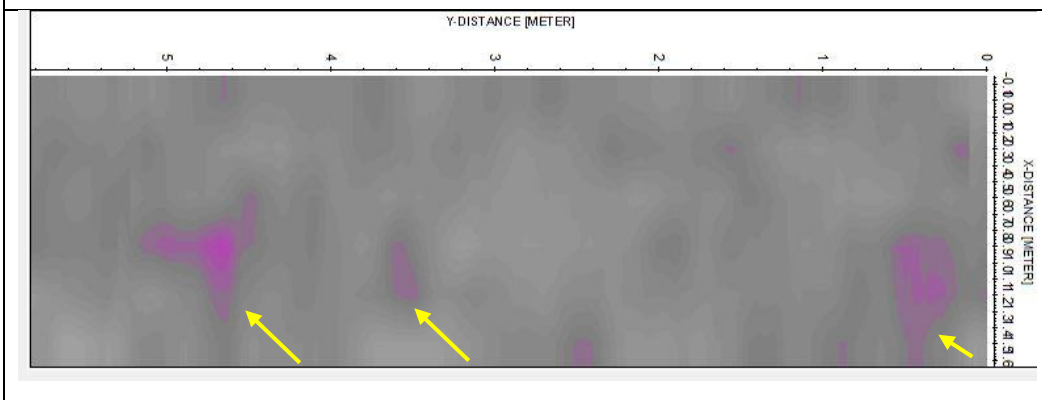
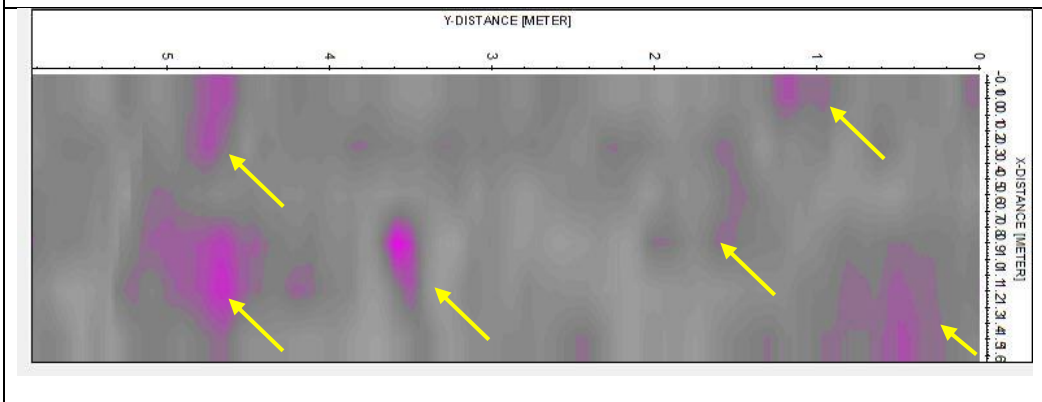
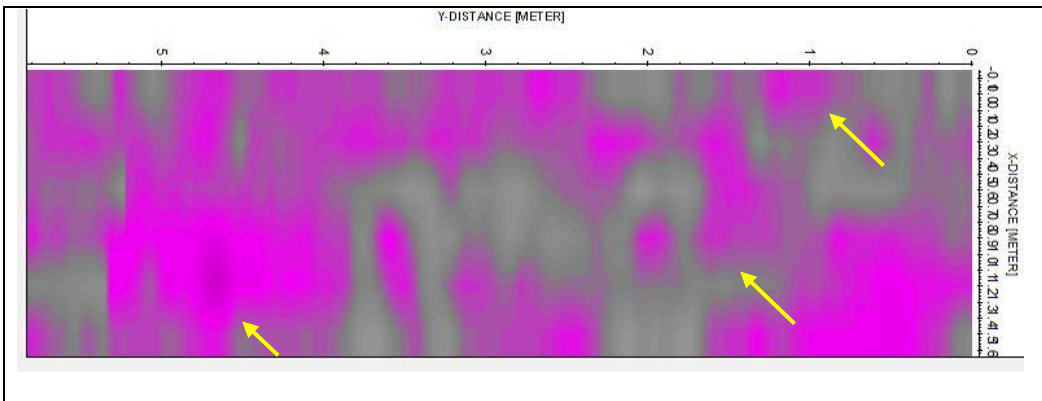


Tabela 21 representa as anomalias de maior amplitude de sinal, em planta, para o polígono S.

Tabela 21: Cortes do polígono S com a antena de 400 MHz

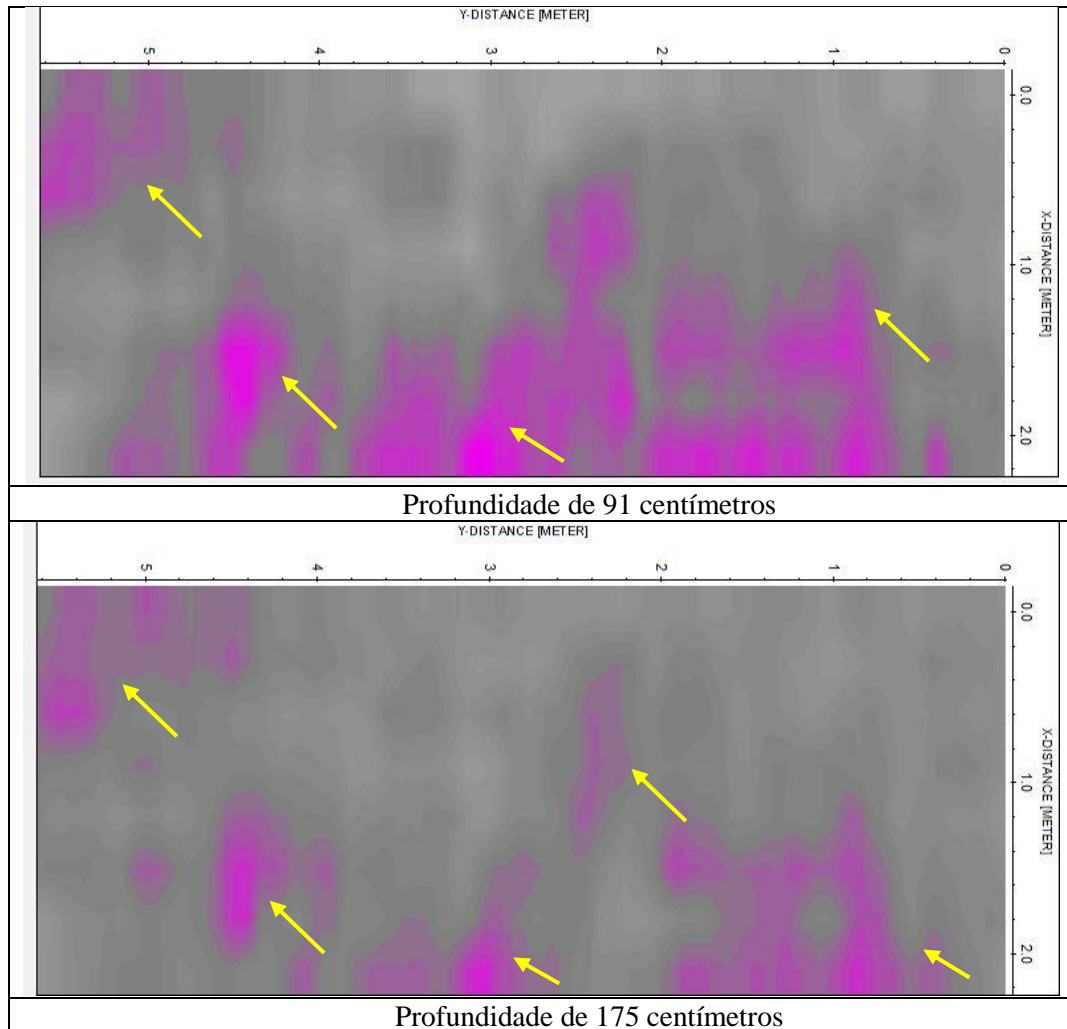
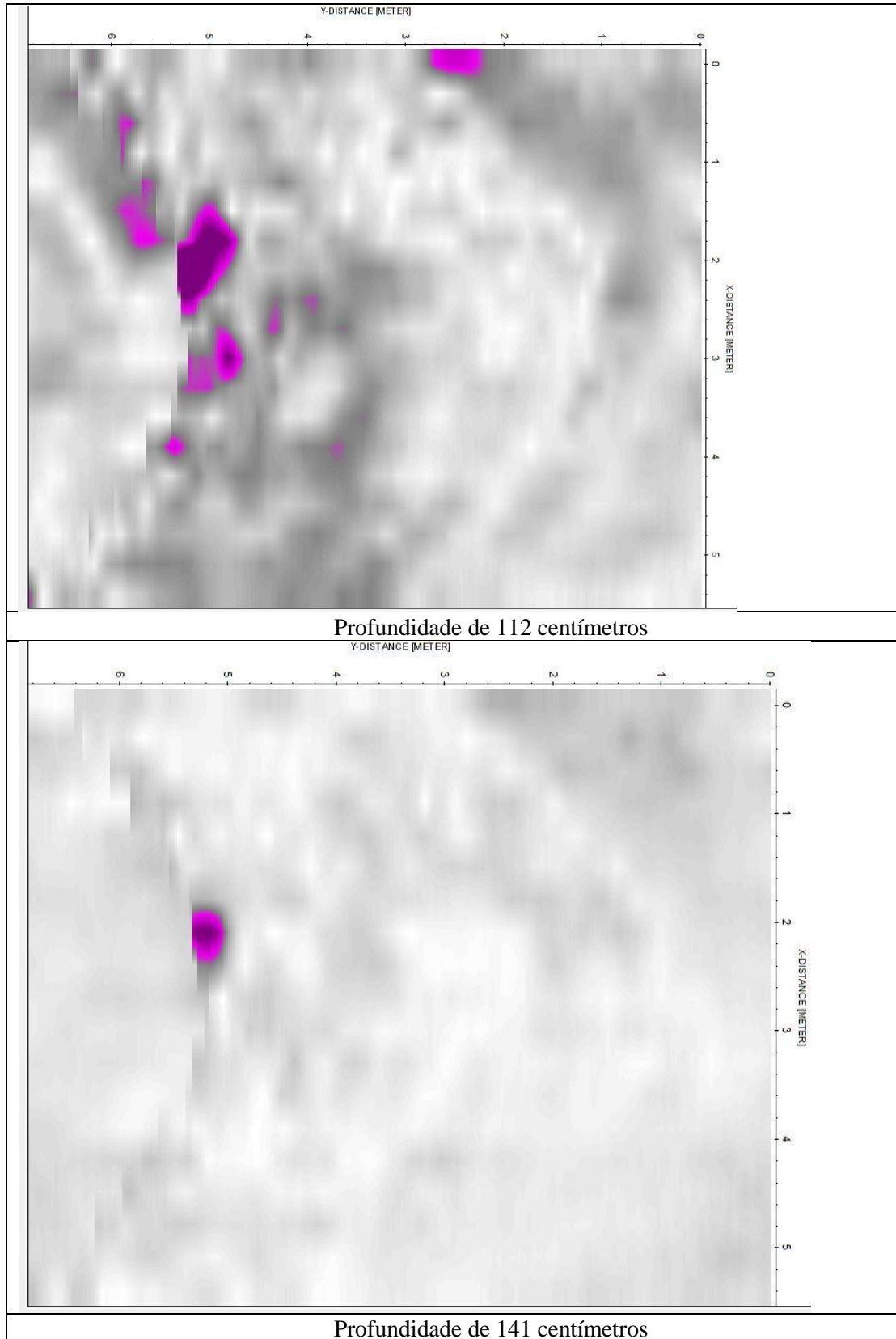
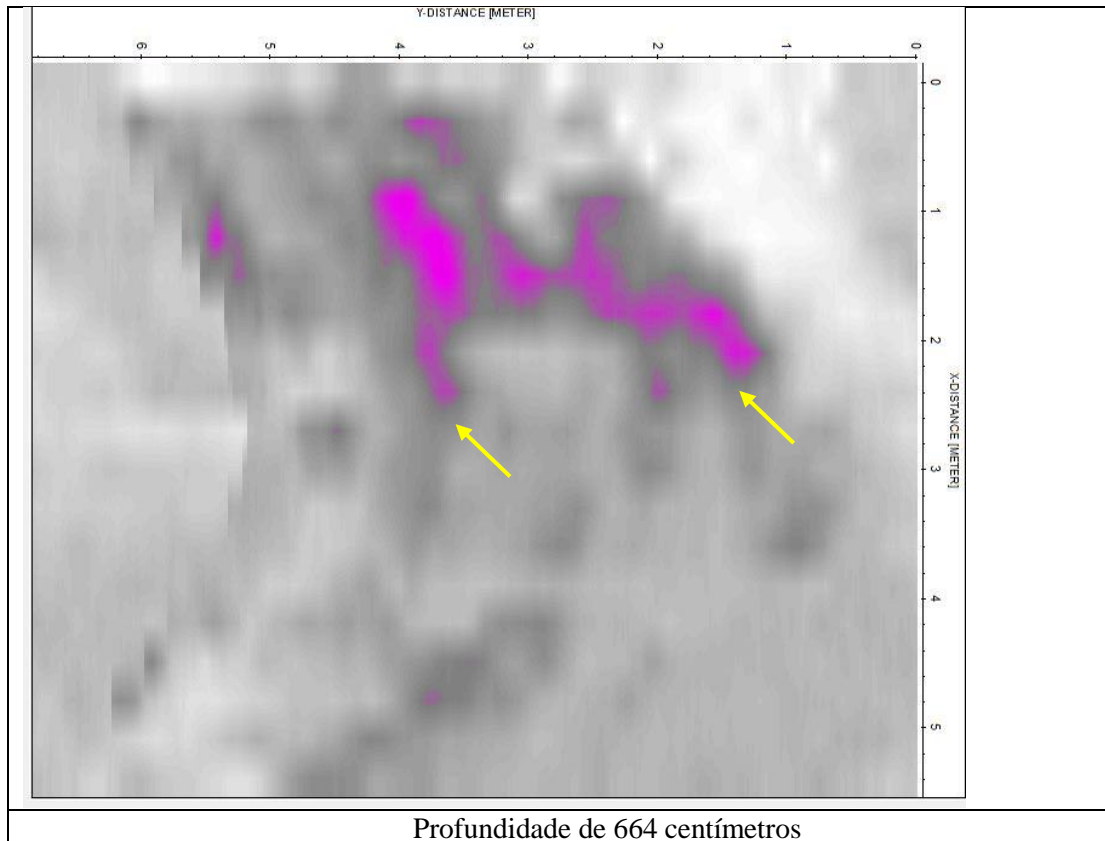


Tabela 22 representa as anomalias de maior amplitude de sinal, em planta, para o polígono U. Verificam-se geometrias com forma parabólica, eventualmente atribuíveis à presença de descontinuidades.

Tabela 22: Cortes do polígono U com a antena de 200 MHz

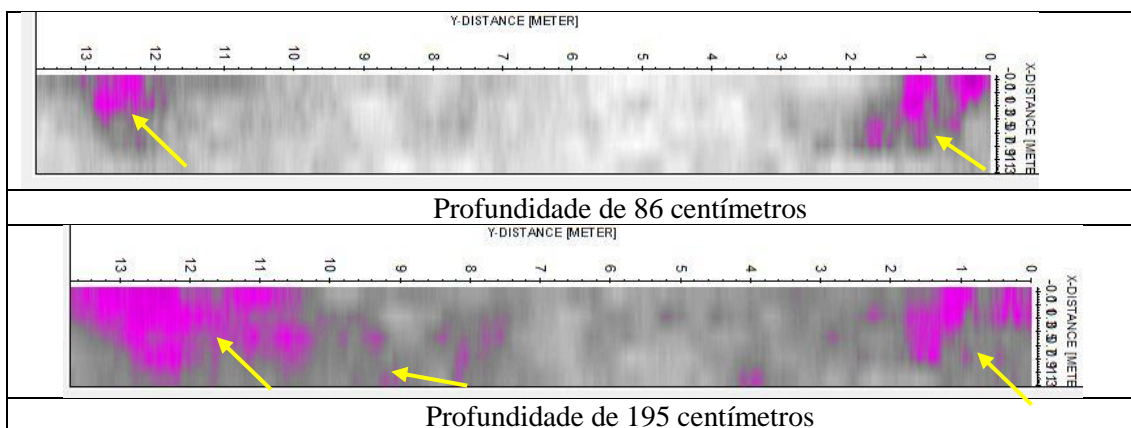


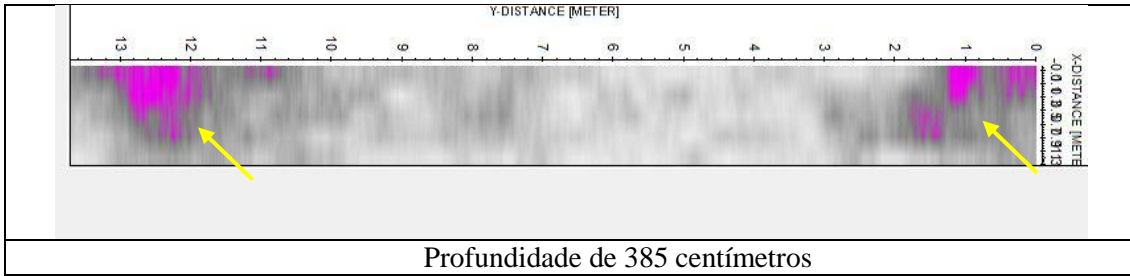


As possíveis discontinuidades apresentadas no polígono U apresentam um risco para o local em questão. Este já apresentava sinais de movimentos dado que existia uma zona no interior do cemitério que estava encerrada devido a queda de materiais.

Tabela 26 representa as anomalias de maior amplitude de sinal, em planta, para o polígono Y.

Tabela 23: Cortes do polígono Y com a antena de 400 MHz





O mapa apresentado na Figura x representa a implantação global das anomalias de Georadar que deverão ser utilizadas para auxiliar futuras escavações. As linhas tracejadas apresentadas, apesar de carecerem de interpretação arqueológica, representarão com um grau elevado de probabilidade, estruturas antrópicas subjacentes.

As zonas marcadas com pontos de interrogação, são zonas em que não foi possível discernir anomalias que quer pelo seu sinal contrastante, quer pela sua forma, sejam indicadoras da presença de estruturas antrópicas em profundidade. A reanálise dos dados, mas sobretudo as aberturas de sondagens arqueológicas servirão para reforçar ou dissipar a probabilidade de existência de estruturas com interesse arqueológico.

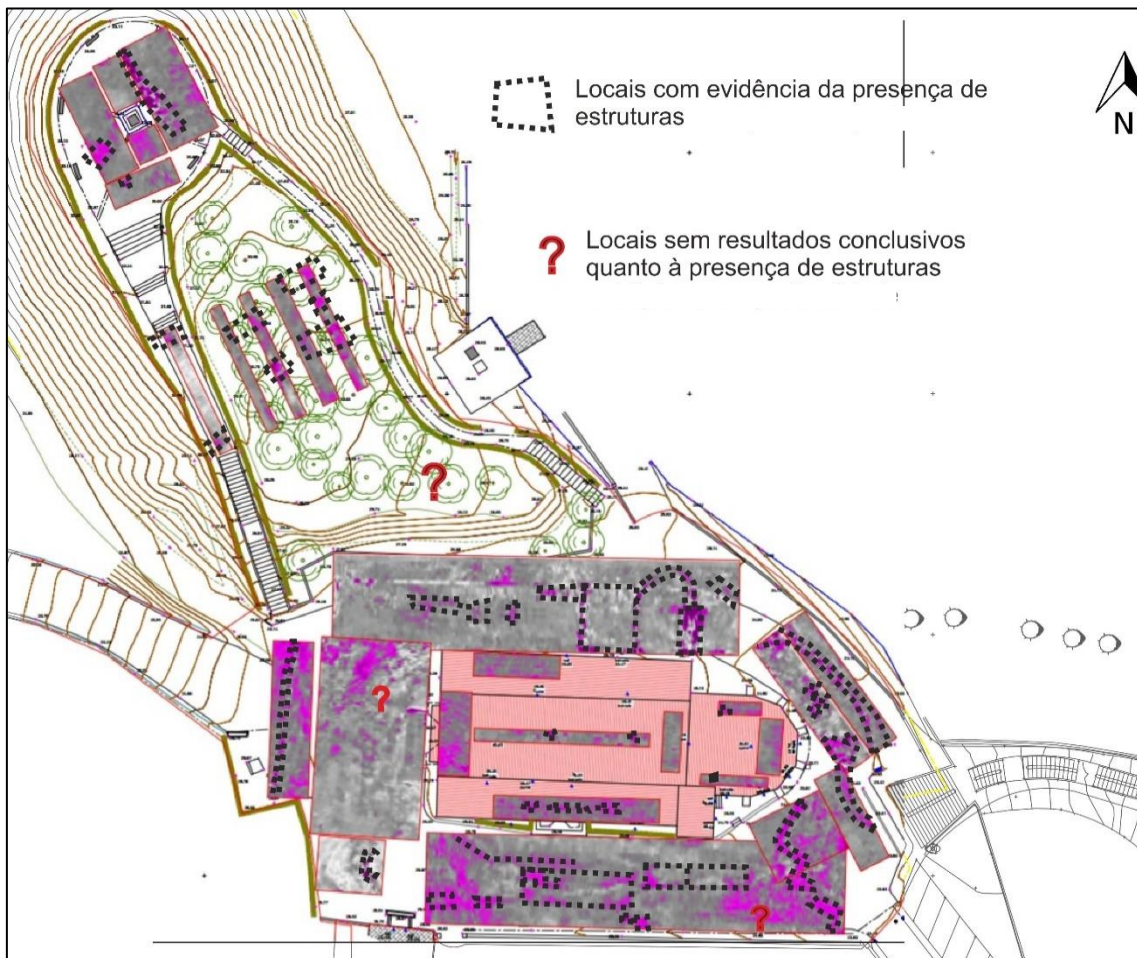


Figura 45: Mapa com implantação das anomalias de Georadar



5. Conclusões

A obtenção de informação em profundidade, por métodos não destrutivos, é cada vez mais essencial na nossa sociedade, em que os centros urbanos são cada vez maiores, e uma intervenção descuidada pode causar graves problemas. Este trabalho foi realizado com a intenção de procurar e identificar infraestruturas de carácter arqueológico na Igreja de Santa Maria do Castelo (Lourinhã), recorrendo para tal à prospecção geofísica com métodos eléctricos e com o GPR, uma vez que o local em questão possui uma história rica e os seus registos terem sido perdidos num incêndio. O trabalho tem também um carácter geotécnico uma vez que se pretendeu identificar possíveis causas geológicas/geotécnicas para a origem das fissuras observadas nas paredes da igreja atrás referida .

Após diversas campanhas de prospecção, tendo sido adquiridos dados geofísicos de resistividade eléctrica, polarização induzida e GPR, foi possível realizar modelos tridimensionais que, juntamente com os dados bidimensionais, nos permitiram retirar elações sobre o local.

Do ponto de vista da geotecnia foi possível detetar com o auxílio da resistividade, a presença de uma anomalia negativa (condutividades elevadas), esta pode ser indicadora da presença de discontinuidades preenchidas com argilas ou de um banco argiloso, sobre o qual assenta a estrutura. Infelizmente os perfis de polarização induzida não forneceram dados conclusivos, uma vez que a sua utilização foi mais mais concentrada no interior da igreja, não existindo muita informação de cargabilidade no exterior da igreja, no entanto com a informação obtida nos perfis de resistividade e do perfil de polarização feito no exterior, juntamente com as fissuras diagonais que são indicadoras de abatimentos, podemos afirmar que a causa das mesmas se deverá à presença de argilas expansivas, possibilidade que já havia levantada no relatório da DGPC (Pinto J. 2018) e não tanto a um abatimento natural da estrutura por esta se encontrar assente em aterro, ou por o terreno ter sido mal compactado. Foi ainda possível detetar, com o auxílio do georadar, no polígono U, uma anomalia de forma semi-circular, este polígono, estando localizado junto a uma parede de gavião e a um muro que estava em queda (para o interior do cemitério), pode ser indicadora de possíveis movimentos de massa do tipo movimentos de blocos, pelo que será importante uma intervenção para pervençam deste tipo de movimentos.

No que toca às interpretações arqueológicas este local mostrou possuir elevado potencial, uma vez que foi possível observar, a partir da interpretação dos dados de GPR, que na face Norte da igreja existem, soterradas, antigas estruturas de origem antrópica de tipo muro e os dados obtidos com a resistividade corroboram a presença destas mesmas estruturas fornecendo ainda informação sobre a possível existência de uma base onde assentam os referidos muros (esta informação pode ser observada nas anomalias de alta resistividade).



Na zona dos jardins foi muito difícil proceder a recolha de dados devido a presença de abundante vegetação arbórea, no entanto foi possível identificar algumas estruturas, não sendo, no entanto, possível discernir se estas são de origem antrópica ou não.

Nos polígonos em torno do cruzeiro. Assim como na face Oeste não existem anomalias que nos permitam identificar estruturas. No entanto no polígono F, que se localiza imediatamente depois do polígono da face oeste é discernível uma anomalia possivelmente antrópica.

Na face sul são identificadas várias anomalias mais pequenas, que se pensa poderem ser sepulturas, bem como outras anomalias que corresponderão a estruturas mais difíceis de interpretar.

Na face voltada a Este foram detectadas várias anomalias, no entanto estas são muito difíceis de interpretar.

No interior da igreja não foram identificadas grandes anomalias, quer, de resistividade quer de polarização induzida, nem mesmo nos dados do Georadar..



Bibliografia

- Assunção, T. (2016) “Aplicação do método geofísico de georadar em contexto de exploração mineira – Caso pratico eluvião da Bejanca”. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho. 144 p.
- Almeida C. 2000 “Sistemas aquíferos de Portugal continental”, 155 p
- Buderi, R.,1996 “The invention that changed the world”, 576 p
- Conyers L.B., 2004 – Ground Penetrating Radar for Archaeology. AltaMira Press: Walnut Creek, CA, 203 p.
- Daniels, D.J., 2007 – Ground Penetrating Radar, 2nd Ed., IET, London, 2007.
- Dentith M. & Mudge S. 2014 “Geophysics for the mineral exploration”, 425 p
- Fernandes, 2007 “Aplicações do georadar na reabilitação e detecção de anomalias”, 11p
- Gonçalves L. 2013 “Estudo geoarqueológico com Georadar. Aplicação aos contextos arqueológicos da Pré-História recente à Proto-História do NW de Portugal”. Tese de Doutorament. Universidade do Minho. 258 p.
- [Journal of Applied Geophysics Volume 67, Issue 1, 1 January 2009, p. 74-79](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985108001298)
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985108001298>)
- Loke M.H. 1999 “Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies”, 61 p
- Luís J., 2005 – Georadar. Universidade do Algarve, http://w3.ualg.pt/~jluis/files/folhas_cap5.pdf, 4 p.
- Kearey P., Brooks, M. and Hill, I., 2002 “An introduction to geophysical exploration”.Wiley-Blackwell. 272 P.
- Milsom, J. & Eriksen, A., 2011 – Field Geophysics. John Willey & Sons, Ltd. Fourth Edition. 287 p.
- Paiva, R., 2014, “Refração da luz” Revista de Ciência Elementar, 3 p
- Pereira B., et al, 2018 “Estudo Geofísico do Parque da Nossa Senhora do Castelo Lourinhã”, 101 p
- Pinto J., 2018, “Igreja Matriz de Santa Maria do Castelo, Igreja de Nossa Senhora da Anunciação da Lourinhã ou Igreja Matriz da Lourinhã. Anomalias”
- Reynolds, J.M., 2011 – An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons, 712 p.



Sharma V. 1997 “environmental and engineering geophysics”, 477p

Sudha, K. Israil, M., Mittal, S. Rai, J. 2009, “Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations”. J. Appl. Geophys., 67, pp. 74-79, 10.1016/j.jappgeo.2008.09.012.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff R.E. 1990 “Applied Geophysics” 2nd ed. Cambridge Univ. Press, 770 p.

Zeid, N.A., Corradini, E., Bignardi, S., Morandi, N., Nizzo, V., Santarato, G., 2016, “Unusual Geophysical Techniques in Archaeology - HVSR and Induced Polarization, A Case History”. 10.3997/2214-4609.201602027.