



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Eduardo João Coelho Marques

DETEÇÃO DE ESTRUTURAS DE ORIGEM  
ANTRÓPICA  
GEORADAR PARA A DETEÇÃO DE ESTRUTURAS NOS  
COLÉGIOS DE JESUS E DAS ARTES (UC)

Dissertação no âmbito do Mestrado em Geociências, área de especialização em Georecursos, sob a orientação científica do Professor Doutor Fernando Pedro Ortega Figueiredo e apresentada ao Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.

Outubro de 2020



# Agradecimentos

---

Em primeiro lugar, quero agradecer carinhosamente à minha namorada, Mélanie, que não só me apoiou de forma incansável como foi também, para mim, um modelo de determinação, capacidade, resiliência e, acima de tudo, companheirismo.

Ao meu irmão, por ser um exemplo de perseverança, sucesso e abnegação, que conseguiu sempre estar sempre presente nos momentos mais importantes.

Da mesma forma, aos meus pais, que através dos seus esforços constantes conseguiram que esta etapa fosse, para mim, uma possibilidade.

Gostaria também de agradecer ao meu orientador de tese, o Professor Doutor Fernando Pedro Ortega de Oliveira Figueiredo, pelo apoio, orientação e suporte académico.

Por fim, aos Doutor João Duarte, Dr. José Carvalho e Doutora Sónia Filipe pela disponibilidade, colaboração e partilha de conhecimentos.



# Resumo

---

Esta investigação realizada nos claustros do Colégio de Jesus e Colégio das Artes, na zona histórica da cidade de Coimbra, Portugal, teve como objetivo usar o radar de penetração do solo para sondar o subsolo dessas instalações e verificar a possível existência de estruturas subterrâneas de origem antrópica. O radar de penetração do solo foi usado para efetuar sondagens em duas áreas. No Colégio das Artes, um padrão para aquisição tridimensional foi possível e, portanto, tornou-se uma opção viável para o estilo de aquisição eletromagnética que poderia render melhores resultados em termos de deteção e identificação de estruturas. No Colégio de Jesus a aquisição nestes termos era impraticável devido à geometria da área e ao número de obstáculos imóveis, como bancos de cimento e lajes. Portanto, a aquisição foi feita de forma linear, em linhas predefinidas, escolhidas com base em detalhes conhecidos sobre a estrutura de destino.

Os resultados revelaram, no Colégio das Artes, várias estruturas superficiais, utilitárias, e de dimensões reduzidas. Foi possível identificar e posicionar estas estruturas na área avaliada. No entanto, no Colégio de Jesus, os resultados renderam informações de qualidade sobre a profundidade e a dimensão das duas estruturas-alvo encontradas.

De modo a fundamentar a interpretação feita no Colégio de Jesus foi construído um modelo representativo das estruturas interpretadas, cuja resposta radar obtida através de uma simulação FDTD foi comparada à resposta radar do subsolo sondado.

Um estudo mais aprofundado, com aquisição multifrequência, poderia proporcionar uma melhor compreensão dessa estrutura no que toca ao seu posicionamento e dimensão.

**Palavras chaves:** radar de penetração do solo, arqueologia, cisterna, resposta do radar, processamento de dados, modelos



# Abstract

---

A study was promptly conducted on the grounds of the Colégio de Jesus and Colégio das Artes infrastructure complex, in the historic zone of the city of Coimbra, Portugal, had the objective of using ground penetrating radar to probe the grounds of this facilities and check for the possible existence of manmade structures. Ground penetrating radar was used to probe the grounds in two areas. On Colégio das Artes, a grid acquisition pattern was possible, and thus, it became a viable option for the electromagnetic acquisition style that could render better results in terms of structure detection and identification. On Colégio de Jesus, grid acquisition was impractical because of the geometry of the area and the number of unmovable obstacles like concrete benches and slabs. So, the acquisition was made in linear fashion along with predefined lines that were chosen to be perpendicular to the know orientation of the target structure.

In Colégio das Artes, the study yielded viable information about several utilities at shallow depth. With this data it was possible to identify and position these structures. However, in Colégio de Jesus, the results rendered quality information about the depth and dimension of the two target structures found.

Lastly, in order to justify the interpretation made in Colégio de Jesus, a model of the interpreted structure was built and then ran through an FDTD simulation and the resulting radar response compared to the actual radar response obtained in the field.

Further studies with multifrequency data acquisition could render a better understanding of these structure's shape and positions.

**KEYWORDS:** ground penetrating radar, archeology, cistern, hydraulic system, radar response, data processing, models



# Índice

---

Agradecimentos .....	II
Resumo .....	IV
Abstract.....	VI
Índice.....	VIII
Índice de figuras.....	XI
Índice de abreviaturas .....	XIII
Capítulo I – Introdução.....	1
1.1 Objetivos .....	1
1.2 Organização do trabalho.....	2
Capítulo II - Enquadramento .....	3
2.1 Enquadramento geográfico e geológico.....	3
Capítulo III – Métodos e Metodologias.....	7
3.1 O método (Georadar) .....	7
3.1.1 Introdução histórica ao georadar .....	8
3.1.2 Fundamentação teórica .....	11
3.1.3 Comportamento da energia eletromagnética .....	14
3.1.4 Propriedades dos materiais sondados .....	17
3.1.5 Modo de operação .....	19
3.1.6 Estado da arte .....	20
3.2 Introdução à metodologia.....	24
3.3 Caso 1: Colégio de Jesus.....	27
3.3.1 Aquisição linear .....	27
3.3.2 Processamento de dados .....	29
3.4 Caso 2: Colégio das Artes .....	33
3.4.1 Aquisição em grelha .....	34
3.4.2 Processamento e Visualização .....	38
Capítulo IV – Resultados.....	40
4.1 Colégio de Jesus.....	40
4.2 Colégio das Artes .....	47
Capítulo V – Discussão de resultados .....	57
5.1 Colégio de Jesus .....	57
5.2 Colégio da Artes .....	63
Capítulo VI – Considerações finais.....	66
6.1 Conclusões.....	66
6.2 Futuro da Arte.....	67
6.3 Considerações para trabalhos futuros.....	69

Capítulo VII – Bibliografía.....	71
7.1 Sites accedidos .....	74
7.2 Software .....	75



# Índice de figuras

Figura 1 - Localização dos Colégios (adaptado de © OpenStreetMap contributors) .....	3
Figura 2 - Contexto geológico da zona estudada (adaptado da Carta geológica de Portugal à escala 1:50000 - 19D).....	4
Figura 3 - Composição cartográfica da zona em estudo (adaptado de Rocha, et al. 1987) .....	5
Figura 4 - Gravura referente ao Complexo Colegial de Jesus (Lobo, 1999) .....	6
Figura 5 - Excerto do levantamento do piso térreo do Colégio de Jesus (Elsden, 1772) .....	6
Figura 6 - Esquema da pegada energética (adaptado de Conyers and Goodman (1997)).....	16
Figura 7 - Modo de funcionamento do GPR (Common-Offset), (adaptado de Jol and Smith (1991)) .....	20
Figura 8 - Fluxograma representativo da metodologia adotada .....	25
Figura 9 - Dados de precipitação dos últimos 15 dias de março de 2019 (Meteoblue.com) .....	26
Figura 10 - Esquema do Pátio das Cisternas, incluindo as linhas alvo de levantamento .....	28
Figura 11 - Modelo do fluxo de processamento de dados de aquisição linear .....	29
Figura 12 - Orientação dos levantamentos no DARQ (adaptado de Google Earth) .....	37
Figura 13 - LCJ1 (Sem processamento) .....	40
Figura 14 - LCJ2 (Sem processamento) .....	40
Figura 15 - LCJ3 (Sem processamento) .....	41
Figura 16 - LCJ4 (Sem processamento) .....	41
Figura 17 - LCJ5 (Sem processamento) .....	41
Figura 18 - LCJ6 (Sem processamento) .....	42
Figura 19 - LCJ7 (Sem processamento) .....	42
Figura 20 - LCJ1 (Fluxo de processamento 1) .....	43
Figura 21 - LCJ2 (Fluxo de processamento 1) .....	43
Figura 22 - LCJ3 (Fluxo de processamento 1) .....	43
Figura 23 - LCJ4 (Fluxo de processamento 1) .....	44
Figura 24 - LCJ5 (Fluxo de processamento 1) .....	44
Figura 25 - LCJ6 (Fluxo de processamento 1) .....	44
Figura 26 - LCJ7 (Fluxo de processamento 1) .....	45
Figura 27 - LCJ1 (pós-Migração) .....	45
Figura 28 - LCJ2 (pós-Migração) .....	45
Figura 29 - LCJ3 (pós-Migração) .....	46
Figura 30 - LCJ4 (pós-Migração) .....	46
Figura 31 - LCJ5 (pós-Migração) .....	46
Figura 32 - LCJ6 (pós-Migração) .....	47
Figura 33 - LCJ7 (pós-Migração) .....	47
Figura 34 - <i>Timeslice</i> CA / 52 cm @ $v = 0,12$ m/ns .....	48
Figura 35 - <i>Timeslice</i> CA / 72 cm @ $v = 0,12$ m/ns .....	48

Figura 36 - Modelo (valores de amplitude $\geq 3000$ <i>in threshold</i> ) .....	49
Figura 37 - Modelo de amplitudes normalizadas (0-100 valor de refletância relativa) .....	49
Figura 38 - Modelo de amplitudes normalizadas (2,4 a 6,8 m; @ $v=0,12$ m/ns) .....	50
Figura 39 - Projeção da <i>timeslice</i> no Colégio das Artes $\sim 0$ m @ $v=0,12$ m/ns .....	50
Figura 40 - Projeção da <i>timeslice</i> no Colégio das Artes $\sim 0,1$ m @ $v=0,12$ m/ns .....	51
Figura 41 - Projeção da <i>timeslice</i> no Colégio das Artes $\sim 0,2$ m @ $v=0,12$ m/ns .....	51
Figura 42 - Projeção da <i>timeslice</i> no Colégio das Artes $\sim 0,3$ m @ $v=0,12$ m/ns .....	52
Figura 43 - Projeção da <i>timeslice</i> no Colégio das Artes $\sim 0,4$ m @ $v=0,12$ m/ns .....	52
Figura 44 - Projeção da <i>timeslice</i> no Colégio das Artes $\sim 0,5$ m @ $v=0,12$ m/ns .....	53
Figura 45 - Projeção da <i>timeslice</i> no Colégio das Artes $\sim 0,6$ m @ $v=0,12$ m/ns .....	53
Figura 46 - Projeção da <i>timeslice</i> no Colégio das Artes $\sim 0,7$ m @ $v=0,12$ m/ns .....	54
Figura 47 - Projeção da <i>timeslice</i> no Colégio das Artes $\sim 0,8$ m @ $v=0,12$ m/ns .....	54
Figura 48 - Projeção da <i>timeslice</i> no Colégio das Artes $\sim 0,9$ m @ $v=0,12$ m/ns .....	55
Figura 49 - Modelo de isosuperfícies inteiro (59,33 valor refletância relativa) .....	56
Figura 50 - Modelo de isosuperfícies (59,33 valor refletância relativa, $P \leq -0,3$ m) .....	56
Figura 51 - Linha LCJ3, aproximação às medições efetuadas .....	58
Figura 52 - LCJ4, aproximação às medições efetuadas .....	59
Figura 53 - Modelo destinado à simulação FDTD .....	59
Figura 54 - Resultado da simulação FDTD .....	60
Figura 55 - Modelo esquemático da cisterna a norte .....	61
Figura 56 - Modelo esquemático da cisterna a sul .....	61
Figura 57 - Mapa de interceção de anomalias .....	62
Figura 58 - Esquemática genérica de anomalias lineares .....	64
Figura 59 - Marcação das estruturas lineares detetadas no Colégio das Artes .....	64
Tabela 1 - Tabela de constantes dielétricas, permitividades, velocidades e atenuações para alguns materiais (Annan, 2009) .....	26
Tabela 2 - Características do equipamento usado (pulseEKKO) .....	34
Tabela 3 - Tabela de relações entre dimensão maior da elipse e a profundidade .....	36

# Índice de abreviaturas

---

ALSE – Apollo Lunar Sounder Experiment

API – Application Programming Interface

CDP – Common Depth Point

CMP – Common Mid-Point

CNN – Convolutional Neural Network

CO – Common-Offset

CSG – Common-Source Gather

CSVM – Convolutional Support Vector Machine

DC Shift – Deriva temporal continua

DCSE – Double Cluster Seeking Algorithm

EMD – Empirical mode decomposition

FDTD – Finite difference time-domain

GPR – Ground Penetrating Radar

IMF – Intrinsic mode functions

MEMD – Multivariate empirical mode decomposition

MDEEMD – Multidimensional ensemble empirical mode decomposition

RDP – Relative Dielectric Permittivity

SVM – Support Vector Machine

THH – Transformada de Hilbert-Huang



# Capítulo I – Introdução

---

## 1.1 Objetivos

Esta investigação foi desenvolvida na área da geofísica aplicada, designadamente sobre a utilização e capacidade do método de prospeção eletromagnética, o georadar. Para o efeito da demonstração do método foi realizada a deteção de estruturas através da análise das respostas radar dos subsolos sondados nos Colégios de Jesus e das Artes.

Foi assim, desenvolvido num contexto de sondagem histórico-arqueológico, sendo que estruturas-alvo se encontram integradas na zona histórica da cidade de Coimbra e comportam interesse arqueológico.

No desenvolvimento deste estudo foram considerados os seguintes objetivos:

1. A averiguação da existência de estruturas de origem antrópica nos locais estudados.
2. A avaliação dos resultados, capacidades, vantagens e desvantagens do método de processamento de dados adotado na produção de modelos representativos favoráveis à execução do primeiro objetivo.

## 1.2 Organização do trabalho

Esta dissertação encontra-se estruturada em capítulos, os quais estão subdivididos em tópicos de modo a facilitar a acessibilidade à informação, estes capítulos são os seguintes:

### Capítulo 1 – Introdução:

Este capítulo consagra as considerações iniciais relacionadas com o trabalho levado a cabo durante o desenvolvimento desta dissertação. Nele encontram-se definidos os objetivos do trabalho, três tópicos alusivos à história e desenvolvimento da tecnologia de radar aplicada à prospeção do subsolo, e, por fim, um tópico organizacional da forma com será exposto o trabalho desenvolvido.

### Capítulo 2 – Caracterização:

O capítulo segundo expõe as idiosincrasias dos objetos de estudo, e, de certa forma, como estas influenciaram o desenvolvimento do trabalho.

### Capítulo 3 – Métodos e metodologias:

Visa definir com exatidão a forma como se desenvolveu o estudo, determinando os fatores críticos e relacionando-os com os objetivos do estudo através de processos definidos de acordo com as suas valias para o trabalho.

### Capítulo 4 – Resultados obtidos:

Capítulo no qual se apresentam os resultados obtidos em cada um dos trabalhos executados no decorrer deste estudo.

### Capítulo 5 – Discussão dos resultados:

Secção onde se procede à validação dos resultados obtidos face aos objetivos e às hipóteses em questão.

### Capítulo 6 – Considerações finais:

Módulo final onde foram tecidas as conclusões culminantes deste estudo e contém, ainda, um breve tópico sobre componentes que poderão ser desenvolvidas em estudos futuros.

# Capitulo II - Enquadramento

## 2.1 Enquadramento geográfico e geológico

O local onde foi efetuado o estudo corresponde ao antigo complexo do Colégio de Jesus, estabelecido em 1542 pela Companhia de Jesus, em Coimbra, Portugal. Situado num ponto alto da cidade, insere-se na zona histórica da mesma, consistindo numa infraestrutura parcialmente integrante da Universidade de Coimbra.

Este complexo divide-se em três estruturas, das quais, o Colégio de Jesus e o Colégio das Artes são os que englobam as áreas empregadas no desenvolvimento deste estudo.

A figura 1 identifica geograficamente os locais que foram estudados.

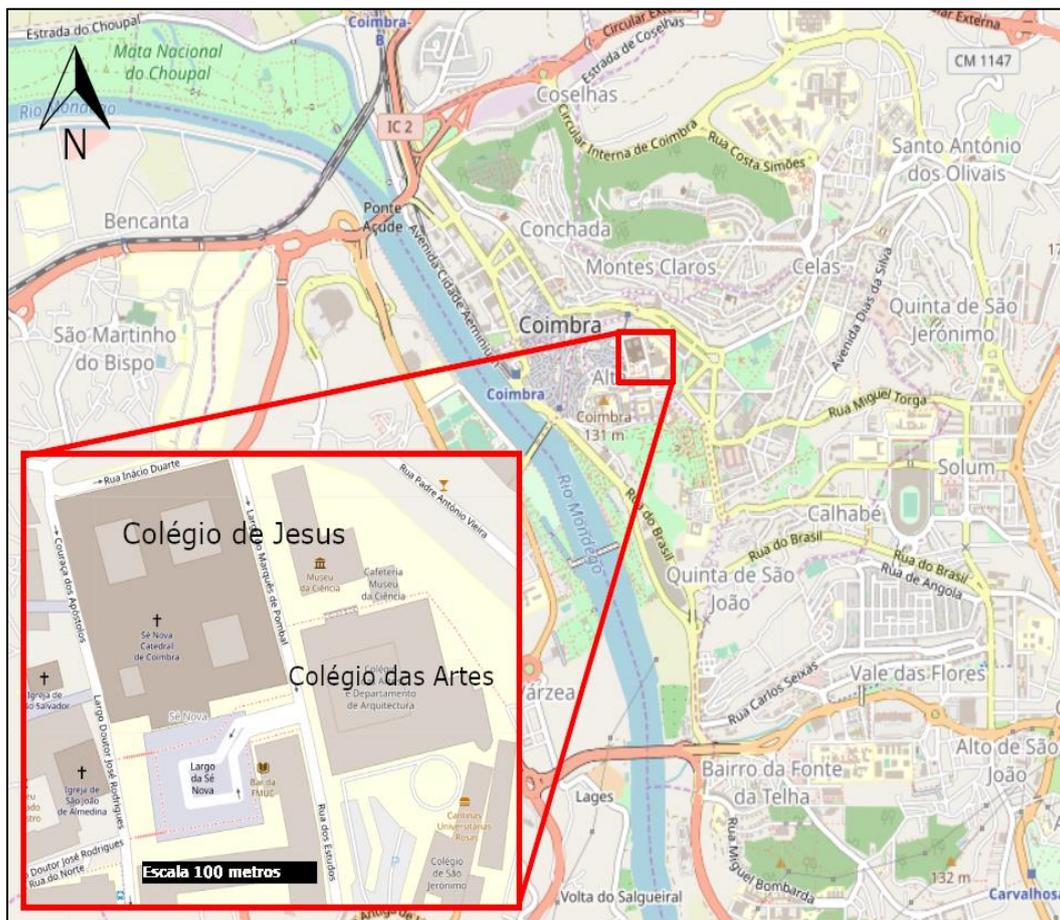


Figura 1 - Localização dos Colégios (adaptado de © OpenStreetMap contributors)

O contexto geológico dos locais em estudo é o mesmo para ambos. Encontram-se posicionados nas dolomias, arenitos e conglomerados das Camadas de Coimbra s.s., no entanto, a zona estudada encontra-se relativamente próxima do limite geológico entre as Camadas de Coimbra s.s. e os arenitos, pelitos e conglomerados da Formação de Castelo Viegas, do Grupo de Silves.

Apesar de não haver ainda carta geológica publicada, na escala 1:50 000 que inclua o local em estudo, o limite superior da carta 19D encontra-se próximo o suficiente que permita uma estimativa do contexto geológico com um grau de confiança melhor do que o que seria possível com cartas em escalas de menor resolução, assim, a figura 2, baseada na carta 19D, é exemplificativa do contexto geológico no qual se inserem as estruturas em estudo.

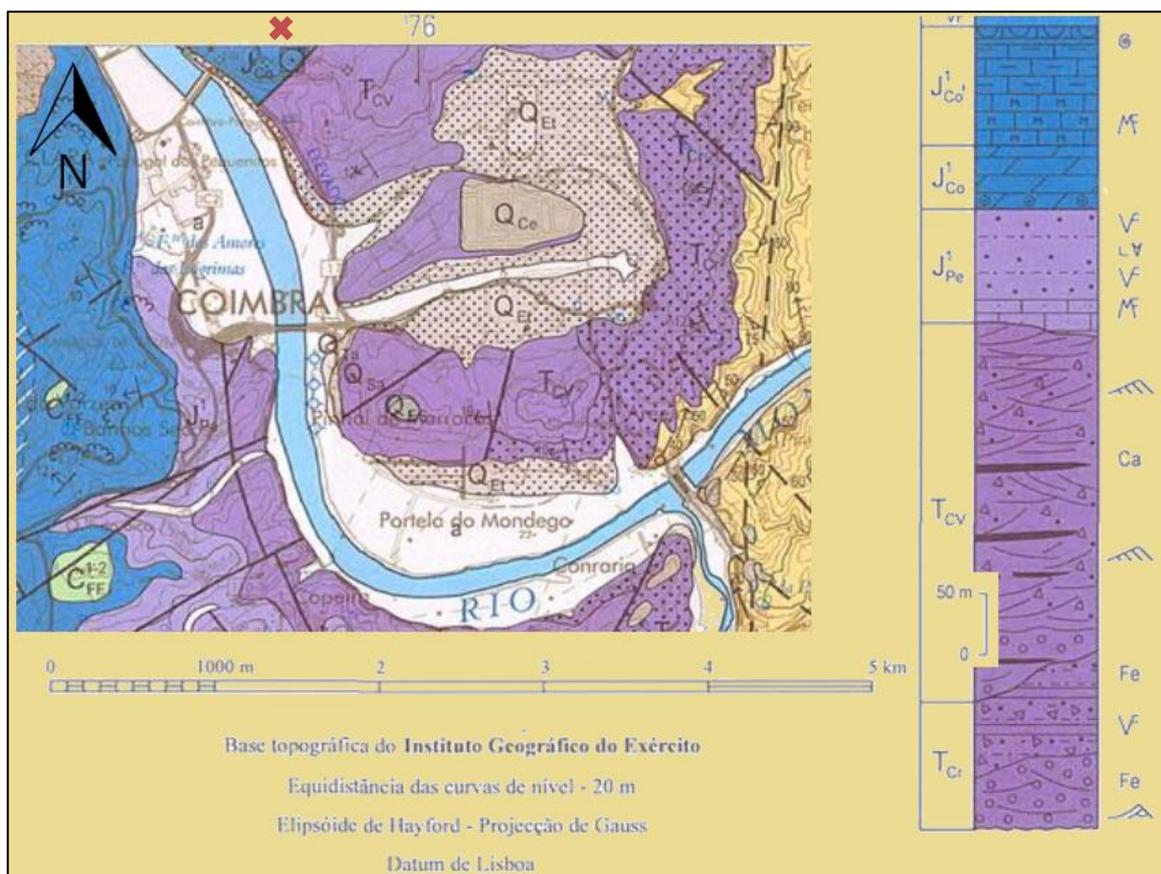


Figura 2 - Contexto geológico da zona estudada (adaptado da Carta geológica de Portugal à escala 1:50000 - 19D)

No entanto, devido aos limites de abrangência da carta 19D, e devido à inexistência da carta que assume a posição superior à carta 19D na matriz de cartas geológicas de Portugal, foi criada a composição representada na figura 3, de modo a expor de forma mais clara a posição geográfica e contexto geológico do local onde foram efetuados os levantamentos.

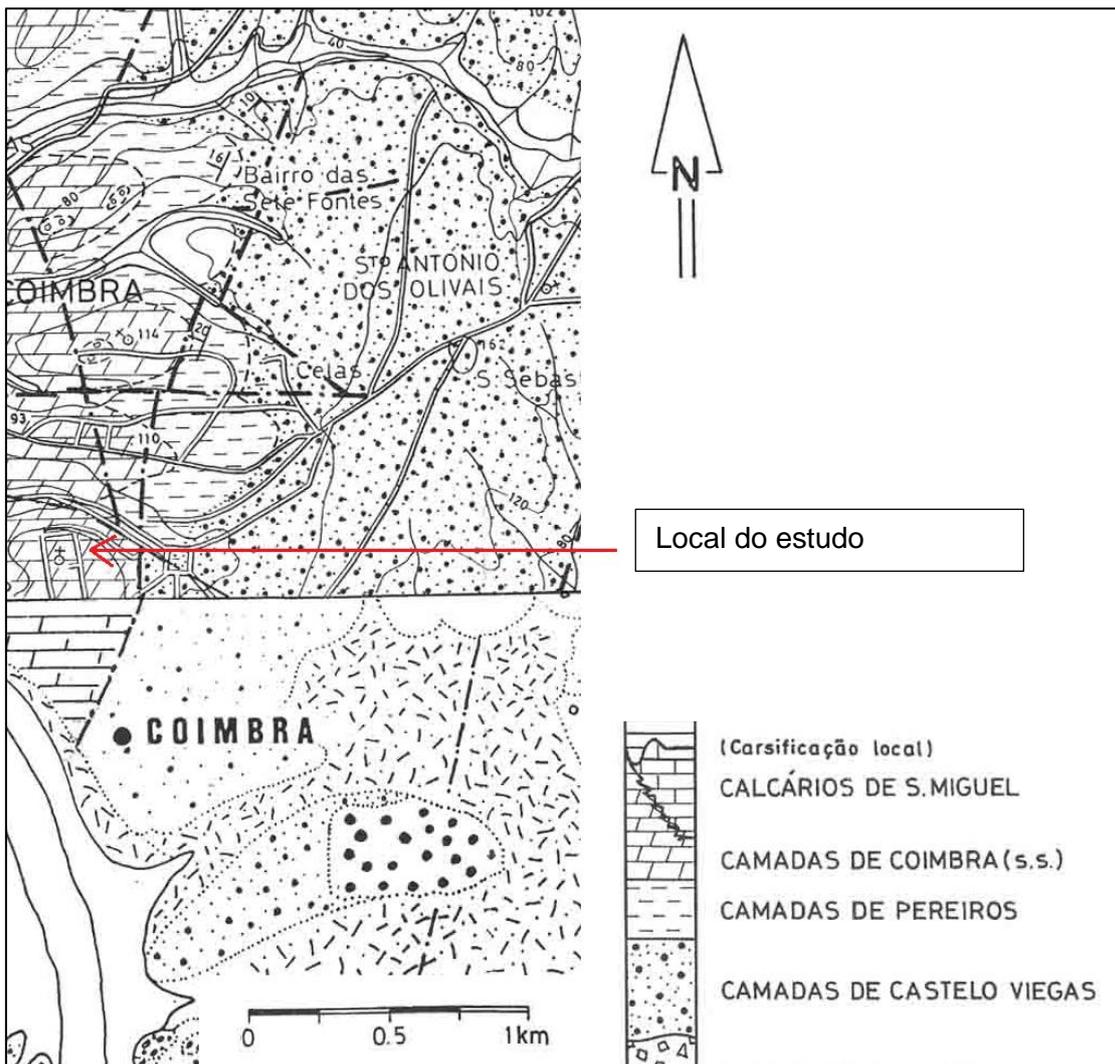


Figura 3 - Composição cartográfica da zona em estudo (adaptado de Rocha, et al. 1987)

A construção do Colégio de Jesus foi iniciada em 1547. Contudo a sua construção, na fase inicial, não avançou com celeridade, sendo que em 1560 ainda foram efetuadas modificações à planta do edifício. Ainda foram encontradas plantas para os dois pisos do edifício datadas de 1568 e 1569, o que coloca a sua construção mais contemporânea com a construção do Colégio das Artes.

Na figura 4 encontra-se representada uma gravura de 1732 do Complexo Colegial de Jesus (Lobo, 1999).



## Capítulo III – Métodos e Metodologias

---

Neste capítulo encontra-se descrita a forma como foi conduzido o estudo, o método utilizado e as metodologias pelas quais se regeram as etapas de aquisição, análise e processamento dos dados bem como o estudo do contexto de trabalho e objetivos que estiveram na origem deste projeto.

Ainda, encontra-se neste capítulo, uma breve consideração sobre o estado atual do georadar enquanto tecnologia, esta permite estabelecer um paralelismo entre a forma como a tecnologia se tem desenvolvido nos anos mais recentes e a forma como foi explorada no decorrer deste estudo.

### 3.1 O método (Georadar)

O georadar é um método de prospeção geofísica que consiste na interpretação do comportamento de campos eletromagnéticos para determinar as propriedades físicas dos materiais, possibilitando a deteção remota de estruturas inclusas num meio.

Uma teoria simplificada que descreve o princípio operativo deste método de prospeção consiste na escuta e cronometria do eco de um sinal eletromagnético, criado por uma fonte e refletido numa interface geológica.

Assim, esta tecnologia é desejável sempre que a aplicação exija a não invasão física do meio prospetado ou um grau de precisão superior ao que é oferecido com prospeção sísmica ou acústica.

### 3.1.1 Introdução histórica ao georadar

Historicamente, a tecnologia de radar teve origem nas radiocomunicações e, geralmente, atribui-se o primeiro uso destes sinais, para detecção remota, a Hülsmeyer (Daniels, 2005), homem responsável pela patente “Das Telemobiloskop” em 1904. Este dispositivo era capaz da detecção de objetos metálicos à distância, e tinha um alcance aproximado de 3 quilômetros. No entanto, não era capaz de especificar a distância a qual se encontrava o alvo.

Desta época em diante, o desenvolvimento de tecnologias de radar foi fortemente impulsionado pela necessidade de haver uma forma de detectar remotamente objetos, fossem estes navios fora do alcance da visão devido a condições meteorológicas adversas ou aeronaves a longas distâncias. Necessidade essa que se tornou especial durante períodos de conflito armado entre nações.

Apesar de uma patente para um método de investigação da subsuperfície terrestre por via de radiação eletromagnética ter sido apresentada em 1910, por Leimbach & Lowy, os primeiros resultados observados na sondagem do subsolo com georadar apenas foram obtidos nos anos 50. El-Said (1956) concretizou um estudo onde documentou as suas tentativas de usar a interferência entre sinais refletidos na água para calcular a profundidade do nível freático no deserto do Egito e para tal usou dois métodos, interferência de frequência variável e outro de distância variável, e recolheu dados em dois locais de amostragem, num dos quais o nível das águas era conhecido através de um furo. No final, os resultados obtidos foram bastante coerentes com a posição real do nível freático. Já nos anos 60, e com base nos relatos de pilotos, datados de 1946, indicativos de que os altímetros radar produziam erros quando sobrevoavam neve e gelo de elevadas espessuras, um estudo realizado por Waite & Schmidt (1962), avaliou, pertinentemente, as características elétricas da neve e do gelo, e produziu medidas de constantes dielétricas, fatores de perda, atenuação e refletividade em relação à radiação usada que permitiram a penetração do sinal a profundidades elevadas.

Estabeleceu-se que a transparência deste meio à radiação eletromagnética podia induzir os pilotos em erros que, em condições de fraca visibilidade, se poderiam tornar fatais. A transparência da neve e do gelo às frequências eletromagnéticas já havia sido observada, em 1933, em Little America, onde antenas de transmissão, enterradas em vários metros de neve, eram capazes de operar corretamente Waite & Schmidt (1962).

De forma progressiva, esta técnica de prospeção geofísica começou a ser aplicada aos materiais mais favoráveis, como o sal. Provou-se possível posicionar os flancos de uma estrutura salina com base nos dados recolhidos por um equipamento de georadar desenvolvido para operar num furo de sondagem a uma frequência de

230MHz, os resultados obtidos foram confirmados por gravimetria de superfície e por uma sondagem que interceitou a estrutura salina (Hölser et al., 1972). Para propósitos semelhantes, os trabalhos de Ünterberger (1978) também incidiram sobre a prospeção de estruturas salinas a partir de áreas subterrâneas (Annan, 2002).

Na sequência dos estudos que se prolongaram desde os anos 70, as minas de evaporitos de Saskatchewan, no Canada, também foram usadas como solo de prova para a tecnologia de georadar, num estudo Annan & Davis (1988) investigaram as minas com radar, de frequências entre 100 Mhz e 1 Ghz, com os objetivos de avaliar a utilidade do método para mapear a estratigrafia das camadas salinas do local, por baixo dos tuneis e também lateralmente, e também, recolher dados sobre as características elétricas das camadas de sais de potássio. Um terceiro objetivo adjacente foi a sondagem do teto dos tuneis para averiguar a existências de fraturas horizontais, que podem colocar em causa a estabilidade e segurança da mina. Os investigadores lidaram com o problema das reverberações do sinal devido à prospeção em espaço confinado, esse problema foi parcialmente mitigado através do uso de materiais absorventes. Por fim, observou-se que o sinal de radar conseguir penetrar vários metros nos evaporitos e foram observadas reflexões até 20 metros, permitido a deteção de veios finos de argilas, zonas ricas em sais de potássio e camadas de anidrite. O radar também se provou capaz de detetar as falhas e roturas no ambiente da mina (Annan et al., 1988).

Ainda, durante os estudos anteriormente feitos em Saskatchewan, foram executadas experiências de transiluminância de radar. Num relatório de 1978, efetuado pelo mesmo autor, revela que os grandes pilares de evaporitos encontrados dentro das minas constituíam o local quase ideal para a experiência, e o objetivo do relatório foi delinear a metodologia desta técnica e como extrapolar a velocidade de propagação e a constante dielétrica aparente a partir dos resultados obtidos (Annan & Davis, 1988). Experiências laboratoriais, levadas a cabo por Cook (1975), em várias amostras de rochas recolhidas em minas, resultaram em medidas de permitividade para os diferentes tipos de material recolhido. Os resultados revelaram que se podiam esperar constantes de atenuação elevadas para xistos betuminoso, carvão betuminoso e areias ricas em hidrocarbonetos. Por exemplo, uma penetração inferior a 3 metros foi calculada para a maioria dos xistos, argilas e solos de granulometria fina (Cook, 1975).

A possibilidade de prospetar carvão com recurso ao georadar foi explorada, conseguindo demonstrar que o uso da técnica para prospetar carvão betuminoso, em argilas até 18 metros, e carvão, até 70 metros, era praticável. Observou-se também que o sinal era refletido em múltiplas estruturas enquadradas no ambiente mineiro, como galerias secas ou inundadas, falhas, furos abandonados e zonas com fortes mineralizações metálicas (Cook, 1975).

Em 1973, foi publicado, pela NASA, o relatório científico preliminar da missão Apollo 17, no qual é descrita uma experiência de sondagem da subsuperfície lunar com

recurso a energia eletromagnética, esta teve como objetivos o mapeamento da estrutura de condutividade elétrica da subsuperfície lunar para inferir a sua estrutura geológica, perfilar topograficamente a sua superfície e produzir imagens da mesma, e ainda, medir a radiação eletromagnética de origem galáctica no ambiente lunar. De acordo com este relatório, a qualidade dos dados obtidos dependeria de uma subsuperfície com baixa perda elétrica, e, consoante indicavam os testes de permitividade feitos em laboratório, estimou-se uma capacidade de penetração de, aproximadamente, 1km. O sistema ALSE (Apollo Lunar Sounder Experiment) operou em três frequências, 5 Mhz (HF-1), 15 Mhz (HF-2) e 150 Mhz (VHF), cada uma com o intuito de sondar a diferentes profundidades. De acordo com o autor, a análise preliminar dos dados da sondagem de subsuperfície foi suficiente para comprovar a capacidade do ALSE para atingir o seu propósito fundamental, os dados obtidos para o mapeamento e imagiologia da superfície foram adequados a uma interpretação geológica direta (Phillips, 1973).

Ainda nos anos 70, decorreram trabalhos que trouxeram um conhecimento mais completo e abrangente sobre as características dielétricas das rochas (Annan, 2002), permitindo uma melhor compreensão no âmbito da sondagem por radar e facilitando uma evolução para as aplicações com fins geológicos e geotécnicos.

Até aos anos 80, desenvolveu-se o interesse pelo estudo de zonas com permafrost, devido à necessidade da construção de oleodutos e gasodutos no Alasca (Annan, 2002). Alguns dos primeiros resultados foram publicados em 1976, quando se estudou com radar pulsado de alta frequência a subsuperfície do permafrost na região de Tuktoyaktuk, no delta do rio MacKenzie. Os resultados revelaram características estruturais entre uma profundidade de 3 e 30 metros, dado que as perdas elétricas do solo não permitiram maior penetração do sinal (Annan & Davis, 1976).

Ao mesmo tempo, houve tentativas de mapear utilidades no subsolo e também investigar a condição das estradas, este tipo de aplicações não obtiveram resultados sólidos, pois a tecnologia era recente e não estava otimizada (Annan, 2002).

Foi nos anos 90 que se deu o verdadeiro salto de conhecimento e inovação de tecnologia radar para prospeção do subsolo (Annan, 2002).

Uma experiência com aquisição de dados de cobertura múltipla e o seguinte processamento dos mesmos foi feito de forma similar aos métodos usados na sísmica (filtragem, correções estáticas, conjunto CMP, análise de velocidade, correções de moveout, stacking e migração). Os resultados obtidos foram, de acordo com autor, a melhoria do rácio sinal/ruído e a profundidade de penetração (Fisher, 1992).

Noutro estudo, de 1993, Gerlitz et al., demonstrou a resposta de radar de dois blocos de cimento, enterrados a menos de 2 metros de profundidade. Ao recolher os dados em amostragem multi-traço, experimentou vários métodos de processamento documentando o propósito e os resultados de cada um. Mais uma vez, fica comprovada a possibilidade de tratar dados de GPR com software desenhado para sísmica, e,

através de um fluxo de processamento semelhante ao usado em dados sísmicos, e apenas tendo em conta algumas características do sinal radar, pode-se melhorar significativamente a qualidade de um radargrama (Gerlitz et al., 1993).

O georadar também se provou útil no âmbito da arqueologia. Um estudo, já mais recente, sobre o processamento de dados 2D e 3D obtidos com diferentes técnicas de aquisição, CDP (Common Depth Point), CO (Common Offset) e CSG (Common-Source Gather), revelou que, no parque arqueológico de Aquileia, as estruturas alvo não se apresentavam a profundidades superiores a 2,5 m. As técnicas de registo usadas permitiram aquisição de cobertura múltipla (Multi-Fold), tendo como objetivo melhorar o rácio sinal/ruído. O primeiro uso de aquisição multi-traço é atribuído pelo autor a Gudmandsen, em 1971. No entanto, apenas o avanço da tecnologia, nomeadamente, portabilidade, registo digital, baixo custo e incremento na complexidade dos alvos, despertaram interesse nesta técnica, assim, constituiu um exemplo do avanço tecnológico que se verificou nestes anos (Pipan et al., 1999).

### 3.1.2 Fundamentação teórica

O georadar é apenas um dos vários meios de deteção remotas usados para fins de prospeção geofísica, este opera sob os princípios físicos que envolvem a propagação de ondas eletromagnéticas, estando estes descritos nas equações de Maxwell.

Na sua forma diferencial, contemplam-se quatro equações:

Sendo  $E$  [V] (Volt) a força do campo elétrico e  $B$  [Wb/ m<sup>2</sup>] (Weber por metro quadrado) a densidade do fluxo magnético, a equação 1 compõe a lei de Faraday, em que, campos magnéticos, quando variáveis no tempo produzem um campo elétrico.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

A equação 2 descreve a lei de Gauss, na qual se contempla que cargas elétricas ( $\rho$ )[C/m<sup>3</sup>] (Coulomb por metro cúbico) produzem um campo elétrico ( $e$ )[V/m] (Volt por metro) e o fluxo elétrico numa superfície fechada é proporcional à carga incluída nesta superfície.

$$\nabla \cdot e = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (2)$$

Esta equação é descrita por Jol (2008) conforme a equação 3:

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{D} = q \quad (3)$$

Sendo que, D é o campo deslocamento elétrico (D)[A/m<sup>2</sup>] (Ampere por metro quadrado) e q a densidade da carga elétrica(q)[C/m<sup>3</sup>] (Coulomb por metro cubico).

Por fim, a modificação e Maxwell da lei de Ampère, equação 4, denota que corrente elétrica estática e campos elétricos variáveis no tempo produzem campos eletromagnéticos.

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (4)$$

Jol (2008) escreve a lei de Ampère conforme expressa na equação 5:

$$\bar{\nabla} \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (5)$$

Onde  $\bar{H}$  [A/m] (Ampere por metro) é a intensidade do campo magnético e  $\bar{J}$  [A/m<sup>2</sup>] (Ampere por metro quadrado) o vetor da densidade da corrente elétrica.

Por fim, na equação 6, em que  $\bar{B}$  [T] (Tesla) representa o vetor da densidade de fluxo magnético, compõe-se a lei de Gauss para o magnetismo, na qual se estrutura que, ao não existirem mono polos magnéticos, o fluxo magnético numa superfície fechada é 0.

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{B} = 0 \quad (6)$$

É importante salientar também as equações constitutivas (equações 7, 8 e 9), no sentido em que estas, conforme expostas por Jol (2008) sumarizam um meio de descrever a forma como os materiais respondem aos campos eletromagnéticos. Definindo assim uma relação direta com as propriedades dos materiais mais importantes para o georadar.

$$\bar{J} = \tilde{\sigma} \bar{E} \quad (7)$$

$$\bar{D} = \tilde{\epsilon} \bar{E} \quad (8)$$

$$\bar{B} = \tilde{\mu} \bar{H} \quad (9)$$

Onde,  $\tilde{\sigma}$  é a condutividade elétrica,  $\tilde{\epsilon}$  a permitividade dielétrica e  $\tilde{\mu}$  a permeabilidade magnética. Estas três propriedades dos materiais e as suas respetivas importâncias serão discutidas mais adiante neste capítulo.

### 3.1.3 Comportamento da energia eletromagnética

Uma consideração a ter em conta é que a frequência da energia transmitida não se limita à frequência central da antena. O GPR transmite numa banda mais larga, geralmente com uma largura de duas oitavas (Dojack, 2012).

Assim sendo, o conteúdo de frequências inicial do sinal, concentra-se geralmente entre um meio e o dobro da frequência central da antena. Por exemplo, uma antena com uma frequência central de 250 Mhz produzirá um sinal cujo conteúdo de frequências se concentra entre os 125 Mhz e os 500 Mhz. Mais informações sobre este tema encontram-se também descritas por Annan (2009).

Outro efeito a ter em conta, o principal efeito responsável pela profundidade máxima viável de sondagem, é a atenuação do sinal que acontece inevitavelmente durante a propagação do mesmo. Devido a características do meio, nomeadamente a condutividade elétrica do mesmo, parte da energia do sinal dissipa-se em sinal elétrico, assim, sendo esta removida do sinal propagante, quanto maior a distância percorrida pelo sinal menor será o conteúdo energético do mesmo, tendo isco como última consequência a atenuação completa ou para além dos limites detetáveis do sinal.

Desta forma, nas situações em que a aplicação do georadar se foca predominantemente na sondagem da resposta radar do subsolo com base em reflexões e difrações do sinal recebido, o resultado observável deste efeito é a diminuição progressiva da energia detetada ao longo do tempo de colheita.

É de notar que, à semelhança do que acontece com a propagação de energia mecânica, como a que se verifica num contexto de aquisição sísmica. Tal como num sinal acústico, o sinal eletromagnético também se empobrece primeiro em frequências mais elevadas, porque estas se atenuam mais depressa, enriquecendo progressivamente o sinal em conteúdos de frequências mais graves, sendo que estas, apesar de, naturalmente, também serem atenuadas, conseguem propagar-se maiores distâncias preservando melhor a sua energia.

A reflexão designa o fenómeno que ocorre quando uma onda eletromagnética intercepta uma descontinuidade que representa uma transição para materiais com características físicas diferentes, provocando assim a reflexão de parte da energia contida na onda (Dojack, 2012).

Estas descontinuidades podem ser interfaces entre o meio e algum objeto enterrado, estruturas arqueológicas, vazios ou descontinuidade sedimentares, entre outras possibilidades (Conyers, 2009). A amplitude e direção da onda refletida depende da forma e características do refletor.

Aquando da incidência de uma onda num refletor plano, o fenómeno ocorre de acordo com a lei da reflexão (equação 10), na qual se contempla que o ângulo de

reflexão, ângulo compreendido entre a direção do vetor de incidência e a normal do plano refletor será igual ao ângulo de incidência.

$$\theta_i = \theta_r \quad (10)$$

Quando a reflexão acontece em objetos com a capacidade de refletir uma percentagem elevada da energia incidente, como algumas canalizações, cablagem elétrica ou outros refletores, normalmente metálicos, a energia refletida pode ser refletida outra vez na superfície, estabelecendo um ciclo que se repete resultando na captação sobreposta várias vezes de várias reflexões ao longo do tempo, todas elas relacionadas com o mesmo refletor.

A refração, por outro lado, é o fenômeno decorrente de circunstâncias similares às que originam reflexão, contudo este descreve o comportamento da porção de energia que não é refletida e que atravessa a interface, sendo transmitida para um material onde a sua velocidade possa ser superior ou inferior faz com que a sua direção mude.

Assim, este fenômeno pode ser descrito pela Lei da Refração de Snell, contemplada na equação 11:

$$\frac{\sin 2}{\sin 1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (11)$$

Sendo o ângulo de incidência (1) e refração (2),  $n$  o índice de refração e  $v$  a velocidade do sinal no meio.

A refração também é um dos fenômenos contribuintes para que o cone de transmissão seja progressivamente mais largo com o aumento da distância de propagação.

Após a emissão de um impulso eletromagnético, este propaga-se em geometria cônica à medida que se afasta da origem o impulso, aumentando a área da base com a profundidade ou distância à origem (Dojack, 2012). Esta forma geométrica ocupada pelo espaço percorrido pela energia emitida denomina-se de cone de transmissão, e a sua base, de forma elíptica, denomina-se de pegada energética ou zona iluminada.

Na figura 6,  $D$  representa a profundidade no solo, e  $A$  a dimensão máxima da elipse da área iluminada.

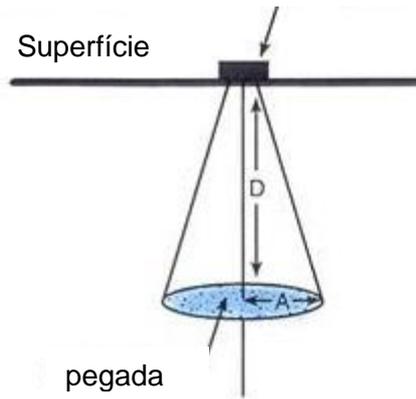


Figura 6 - Esquema da pegada energética (adaptado de Conyers and Goodman (1997))

As dimensões deste cone variam conforme as características do subsolo bem como com a frequência da energia transmitida. Geralmente, cones mais estreitos resulta de frequências mais elevadas e cones mais largos, de frequências mais baixas (Dojack, 2012).

Em GPR, a difração denomina o fenômeno que ocorre quando um objeto que constitui um refletor, produz uma assinatura no radargrama na forma de uma hipérbole. Isto acontece porque, devido à energia se propagar de forma cônica, pode-se registrar uma reflexão de um objeto que não se encontra diretamente posicionado verticalmente sob a fonte do sinal. Assim, devido à variação da distância entre o refletor e a fonte provocada pelo caminho oblíquo da onda à medida que vão sendo feitas aquisições em posições incrementadas após cada uma, os tempos chegada das ondas vão encurtando até que se cruze o plano vertical referente ao refletor, a partir deste ponto os tempos de chegada começam a aumentar outra vez. Produzindo assim, na varredura B, uma reflexão hiperbólica (Dojack, 2012).

As hipérbolas provocadas na ocorrência deste efeito são especialmente proveitosas para estimar a velocidade do sinal no meio através da adaptação de hipérbolas à varredura obtida. Este procedimento será detalhado mais adiante no capítulo 3.

Um efeito a ter em conta, predominantemente relacionado com a reflexão é a difusão da energia quando esta é refletida para direção que não permitem que mesma volte a ser capturada pelo recetor no equipamento. O efeito antitético disto ocorre quando, devido à geometria e posição do refletor este concentra a energia resultando na captura de sinal com elevada amplitude (Dojack, 2012).

A não deteção destes efeitos pode resultar numa interpretação imprecisa dos registos levando a uma inferência incorreta da posição de alvos da sua posição real, a nível de profundidade e geometria.

O modo como as antenas se posicionam em relação ao meio sondado também pode ter efeitos na forma como a energia penetra no mesmo. A variação da

perpendicularidade da antena face à interface com o meio sondado pode originar variações na amplitude das reflexões devido à quebra de energia penetrante no meio.

Toda a energia detetada que não é oriunda da resposta radar do subsolo face à emissão do sinal designa-se de ruído de fundo (Dojack, 2012). Esta energia pode ter várias fontes, inclusivamente o próprio sinal emitido ou campos criados pelo inerente funcionamento do equipamento de aquisição.

As principais medidas de mitigação deste efeito são uso de antenas blindadas que tende a minimizar este ruído, blindando direccionalmente radiação que não provenha da direcção do meio sondado. E, da mesma forma, o transmissor também pode focar direcionamento a energia neste meio.

Ainda, algumas precauções devem ser tidas em conta durante a campanha de aquisição de dados, nomeadamente minimizar o uso de equipamento não essenciais à atividade que emitam radiação eletromagnética.

### 3.1.4 Propriedades dos materiais sondados

É claro que o meio onde se propaga a energia eletromagnética afeta severamente a forma como esta radiação se propaga, e as principais características do mesmo que afetam a propagação da energia nesta forma são a condutividade elétrica do meio, a sua permitividade dielétrica e a sua permeabilidade magnética. Sendo as duas primeiras as mais importantes (Jol, 2008).

A condutividade elétrica representa a capacidade que um material tem de conduzir eletricidade, afetando assim diretamente a componente elétrica de um campo eletromagnético.

Deste modo, um impulso eletromagnético consegue reter melhor a sua energia em ambientes que sejam maus condutores, ou seja,  $\sigma = 0$ . Como por exemplo o gelo (Jol, 2008).

Ainda, é necessário ter em conta que os solos são uma mistura de componentes, sendo um desses componentes a água. A água, por si só, não é um bom condutor, no entanto com a presença de sais dissolvidos nela a sua condutividade elétrica aumenta muito significativamente, conferindo, de um modo geral, aos solos húmidos uma mais elevada condutividade elétrica.

Esta é a principal razão pela quando a água salgada e solos muito argiloso reduzem significativamente a eficácia do georadar enquanto meio de deteção remota (Jol, 2008).

A permitividade dielétrica, também denominada em inglês de *Relative Dielectric Permittivity* ou RDP, traduz-se na facilidade com que um material ou substância se pode polarizar através da indução por um campo elétrico, ou, por outras palavras e tal como descrito em Dojack (2012) a capacidade que um material tem de guardar e transmitir uma carga elétrica induzida por um campo eletromagnético.

O RDP de um dado material pode ser calculado pela fórmula 12:

$$k = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (12)$$

Onde K é o RDP,  $\epsilon$  é a permitividade dielétrica, e  $\epsilon_0$  é a permitividade dielétrica do vácuo, que é  $8,89 \times 10^{-12}$  F/m (Dojack, 2012).

O RDP de um meio também pode ser usado para estimar a velocidade de propagação do sinal eletromagnético no mesmo, através da equação 13:

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (13)$$

Onde  $\epsilon_r$  é o RDP, c velocidade da luz no vácuo em m/ns e v a velocidade da onda EM no meio, também em m/ns. Dojack (2012) nota ainda que é importante considerar que o RDP varia com a profundidade, e dessa forma, também a velocidade do sinal no meio varia com a profundidade.

A permeabilidade magnética contempla a resistência que um material tem à formação de um campo magnético, assim, é também o grau de magnetização que um material obtém em resposta a um campo magnético.

Esta propriedade também é definida por Dojack (2012) como a capacidade que um material tem de ser magnetizado face à presença de um campo eletromagnético.

A proporcionalidade com que esta característica se relaciona com a propagação da onda prende-se com a atenuação do sinal no meio, no sentido em que materiais com maior permeabilidade magnética são polarizáveis com maior facilidade e ainda atenuam o campo com maior facilidade.

Assim, valores mais elevados desta propriedade resultam em penetrações menos profundas do sinal no meio a sondar.

### 3.1.5 Modo de operação

O modo de operação do georadar, é na verdade, simples e analogamente semelhante aos princípios aplicados tanto na prospeção com recursos a sísmica como no uso de radar ou sonar para a detecção remota de alvos.

A propagação de energia na forma de radiação eletromagnética rege-se pelas quatro equações diferenciais que permitem descrever o eletromagnetismo clássico denominadas de equações de Maxwell e descritas na seção inicial deste capítulo. E da propagação da energia desta forma através de um meio verificam-se alguns efeitos que serão a seguir descritos na seção do comportamento das ondas ainda neste capítulo.

No entanto, um destes efeitos merece especial atenção pois não só está na base de vários outros como também constitui o principal responsável pela aplicação do radar à localização de alvos no espaço.

Tal como outras formas de energia, a radiação eletromagnética também é refletida em objetos com determinadas características que o diferenciam do meio onde a radiação se está a propagar.

Assim, sabendo o momento exato no qual um impulso eletromagnético é emitido e cronometrando o tempo até que se detete o retorno do mesmo refletido num alvo, por outras palavras, o seu eco, é possível calcular a distância entre o local onde foi emitido esse impulso, denominado de fonte, e o local onde foi recebido, pelo cálculo da fórmula 14:

$$d = v \cdot t \quad (14)$$

Onde  $d$  é a distância total percorrida pela onda,  $V$  a velocidade de propagação do sinal e  $t$ , o tempo decorrido entre a emissão e a chegada da onda ao receptor.

A figura 7 representa um esquema do princípio básico do modo de operação do georadar.

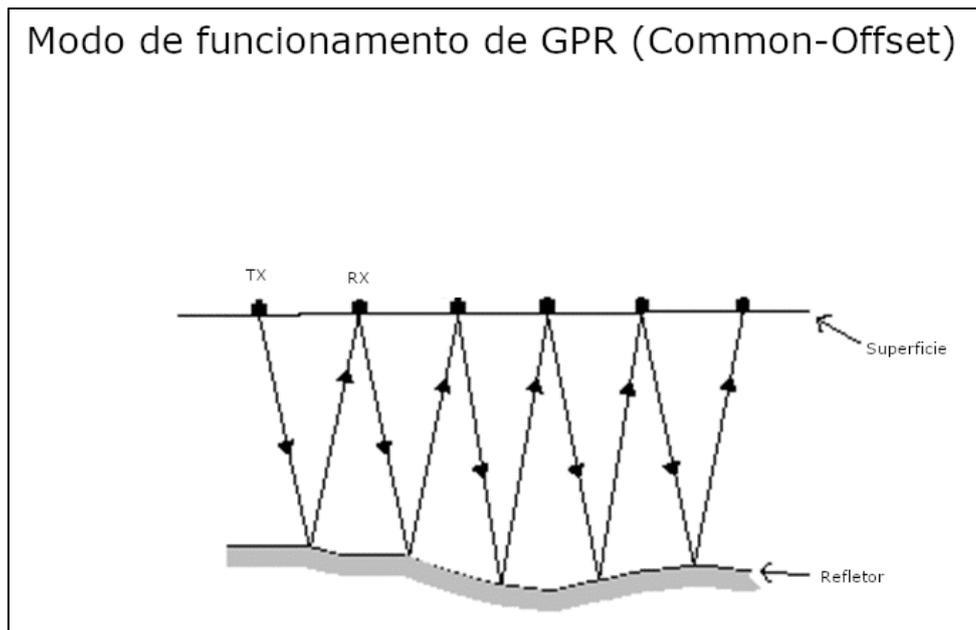


Figura 7 - Modo de funcionamento do GPR (Common-Offset), (adaptado de Jol and Smith (1991))

Isto porque, do ponto de vista técnico a aquisição moderna é comumente efetuada de acordo com a metodologia *zero-offset*, significando que a fonte e o recetor se encontram muito próximos, comportando-se de forma semelhante ao visualizável na figura anterior, mas onde o transmissor e recetor ocupam posições muito próximas.

### 3.1.6 Estado da arte

Atualmente, o GPR tem uma fundamentação sólida enquanto técnica de prospeção do subsolo, para vários fins, e também enquanto instrumento para a avaliação da condição de infraestruturas.

A tomografia de um meio ou estrutura através de radar, conseguidos através da computação de um modelo de velocidades de propagação, coerente com os dados recolhidos, confere uma interpretação quantitativa aos dados adquiridos com georadar (Sudakova & Vladov, 2018).

A conjugação do georadar com outros métodos de prospeção geofísica pode render resultados mais completos, contribuindo para a confiança nos dados adquiridos e satisfação do cliente. De todos os métodos de prospeção geofísica, o georadar é o

mais promissor no que toca à quantidade e precisão os dados recolhidos, no entanto, quando integrado com outras formas de prospeção, as que melhor se harmonizam com o GPR são a sísmica e a prospeção elétrica. É mais complexo encontrar anomalias coesas com gravimetria ou magnetometria, devido à escala das anomalias, e a escala de operação do georadar, que ronda, optimistamente, um máximo de 15 a 20 metros de profundidade (Sudakova & Vladov, 2018).

Um estudo de Orlando (2007) demonstra onde se associa a prospeção com GPR à prospeção magnética, no âmbito da investigação arqueológica. O estudo teve como objetivo registar anomalias passíveis de representar artefactos de interesse arqueológico. O levantamento magnético foi feito numa grelha de 0,5m por 0,5m de modo a contribuir para a identificação litológica dos espaços onde foram detetadas anomalias de radar. O levantamento de georadar, que abrangeu uma área de 50 metros de comprimento e 30 metros de largura, foi feito em linhas com espaçamento de 0,5 e 1 metro, respetivamente. Foram então catalogados três tipos de anomalias, superficiais, que podem ser alcançadas com escavações preliminares, e profundas, simples e complexas, sendo as últimas constituídas por um grupo de anomalias. Os resultados indicaram que, apesar do contexto geo-arqueológico do local ser complexo, e a geologia, composta por depósitos aluviais por vezes cimentados, não favorecer a penetração da radiação, foi possível identificar prontamente duas áreas distintas.

Uma zona ocidental, de fraca penetração, onde se observaram predominantemente anomalias superficiais, e outra zona central e oriental onde se observam anomalias mais profunda e complexas. De acordo com perfis de tempo de radar, foi possível detetar estrutura obliquas a poucos centímetros de profundidade, na zona central da área em estudo. A zona ocidental, as anomalias magnéticas registadas podem ser correlacionadas com anomalias de radar superficiais. Na zona oriental as anomalias detetadas com radar não tiveram expressão magnética na superfície (Orlando, 2007).

Neste momento, existe um esforço em evoluir técnicas de processamento que permitam uma melhora no rácio de sinal por ruído, esta evolução é importante pois constitui o método mais alcançável de ultrapassar algumas das limitações do georadar, nomeadamente a profundidade à qual é possível identificar, fiavelmente, anomalias.

Desta forma, observam-se cada vez mais, estudos onde é executada a aplicação de processos de tratamento de sinal, mais avançados e usados nos mais variados ramos da ciência, para resolver sinais de georadar. Chen et al. (2016) classifica as técnicas usadas como contemporâneas e recém desenvolvidas, nomeadamente, o multidimensional ensemble empirical mode decomposition (MDEEMD) e o multivariate empirical mode decomposition (MEMD), associados à análise de espectrogramas através da análise espectral de Hilbert-Huang. A aplicação do EMD, e conseguinte análise espectral de Hilbert-Huan, designa-se de transformada de Hilbert-Huang (THH),

(Wu et al., 2009) e os métodos aplicados por Chen (2016), constituem derivações da THH.

Neste estudo, o autor investiga a subsuperfície de um vale, aplicando técnicas de processamento de dados referidas, com o intuito de contribuir para a solidificação do conhecimento sobre a performance geotermal do local em estudo, a província de Chingshui, em Taiwan.

Considerando o fluxo de processamento usado pelo autor, é importante ter em conta que o ganho para correção da atenuação do sinal foi substituído pela transformada logarítmica natural. O processo de modelação descrito pelo autor, segundo este método, consistiu no seguinte conjunto de processos: os EMD's foram usados para decompor o sinal GPR em IMFs (intrinsic mode functions), as quais foram submetidas à análise espectral de Hilbert, de modo obter o espectro marginal de frequências de cada IMF, após este processo, selecionaram-se as IMFs pretendidas de forma a reconstruir o sinal. E para finalizar, foi usado um modelo geológico, obtido com base nas interpretações feitas nos perfis reconstruídos por EMD, para uma simulação numérica no domínio-tempo de diferença finita (FDTD), cujo radargrama, sintético, resultante serviu de comparativo para avaliar a fidelidade do modelo pai.

Os resultados foram verificados com base em 3 evidências. A primeira remete para a observação à superfície do dobramento detetado e registado no modelo. A segunda tem fundamento nos vários modelos testados, mas apenas o modelo apresentado tem coerência com os perfis obtidos. Na terceira, e final, refere-se a repetição da estrutura dobrada ao longo dos vários perfis de aquisição (Chen et al., 2016).

“Muitas investigações subterrâneas com o GPR em aplicações arqueológicas são dedicadas não a encontrar sítios arqueológicos, mas simplesmente a delinear estratigrafia, solos ou estruturas geológicas subterrâneas.” (Goodman & Piro, 2013).

Goodman & Piro (2013) realizaram vários estudos de casos onde tiraram algumas conclusões sobre as melhorias de integração de dados do GPR com os volumes de dados de outros equipamentos geofísicos. Fundir dados de pesquisa de resistividade, magnética e condutividade com o GPR pode ajudar a fornecer melhor confiança na verificação e interpretação do local (Kvamme, 2006).

A integração da digitalização a laser e de volumes no GPR, ajudam significativamente na interpretação dos locais, visualizando o contexto 3D das imagens das subsuperfícies. Trabalhos realizados no Trail of Tears, no Alabama confirmaram que a capacidade de ver dados GPR no seu contexto 3D torna a validade da interpretação mais clara (Goodman & Piro, 2013).

Mesmo com as melhorias e a implementação de imagens de alta resolução no terreno, o GPR ainda não é a tecnologia ideal, Goodman & Piro (2013) referem que Arqueólogos trabalhando em locais onde são necessários materiais líticos neolíticos

para deteção, precisariam de volumes GPR 3D com resolução abaixo de um centímetro para resolver problemas arqueológicos subterrâneos, sendo que, o GPR não consegue fornecer essa resolução não seria uma ferramenta viável. Existe a possibilidade futura de que as matrizes em fases podem fornecer uma resolução muito melhor permitindo que o predecessor do GPR seja usado em imagens médicas (Goodman & Piro, 2013).

Estes estudos demonstram o avanço do método e a extensão das suas capacidades, e, conseqüentemente, a melhoria da qualidade do produto final.

Dal Bo, et al. (2019) expõe a capacidade dos levantamentos multifrequência com georadar para avaliar o modo como material regolítico de origem granítica variam com o clima, cobertura vegetal, aspeto e topografia.

Os dados obtidos a partir deste estudo mostraram-se relevantes, pois permitiram a inferência de estratos coerentes com os observados em poços de 1m<sup>2</sup> escavados nas áreas de estudo destinados ao controlo. De acordo com os autores, as principais reflexões identificadas encontram-se relacionadas com a interface entre o rególito superficial, solo já móvel, e o saprólito ainda inamovível.

Num estudo de Rahman, et al. (2020) é descrita a aplicação de georadar para a avaliação da condição interna do betão usado na infraestrutura da barragem de Lahor, na Indonésia. A aplicação de georadar para este fim provou-se uma necessidade devido ao modo como esta condição é normalmente inferida, através da pressão de água nos poros que é normalmente medida por piezómetros no cerne da infraestrutura. Nesta barragem em específico, de 18 piezómetros instalados apenas 1 se encontrava, à data do estudo, operacional. Pelo que, georadar permitiu a avaliação remota e não invasiva da condição do núcleo da estrutura.

De um ponto de vista técnico esta avaliação resume-se apenas à deteção do nível freático através da obtenção de radargramas ao longo da barragem. Assim, obtendo valores de velocidades e determinando a posição do nível da água, é possível convertê-lo para pressão com base no conhecimento da localização dos piezómetros, antecipando assim as pressões que estes estariam a registar e contrastando estes valores com as margens de segurança admitidas.

Por fim o estudo permitiu concluir que os valores dos piezómetros, inferidos a partir da deteção do nível freático com georadar, apontavam para uma barragem em boas condições.

## 3.2 Introdução à metodologia

De acordo com o método científico adaptado a este enquadramento, cada uma das premissas deste trabalho consagra-se no seguinte:

- **Observação:** Existem estruturas hidráulicas de origem antrópica associadas a infraestruturas que no passado pertenceram ao complexo do Colégio de Jesus, ou seja, nas imediações do local em estudo. A Dra. Sónia Filipe, Arqueóloga na Reitoria da Universidade de Coimbra, revelou ser plausível questionar a continuidade de algumas dessas estruturas na zona do Colégio das Artes.

- **Questão:** Verifica-se a existência destas estruturas no local destinado ao estudo, neste caso, o pátio do Colégio das Artes?

- **Observação:** No atual Colégio de Jesus, o levantamento do piso térreo, datado de 1772 e efetuado por Elsdén, indica a existência de uma cisterna no pátio no qual foi levado a cabo este estudo.

- **Questão:** Qual é a localização, posição e condição em que se encontra essa cisterna?

- **Hipótese:** Se a existência de tais estruturas se verificar, a resposta radar do subsolo permitirá, não só as identificá-las, como também definir algumas das suas características através da interpretação das anomalias de resposta eletromagnética detetadas.

Assim, a metodologia adotada neste trabalho foi dividida em duas etapas:

Aquisição dos dados: etapa que se estende desde definição da estratégia de aquisição, com base no objetivo do trabalho, até ao final da aquisição dos dados.

Processamento dos dados: integra todos processos que envolvem a manipulação dos dados obtidos na etapa anterior.

No que remete para a execução do trabalho, que permitirá responder aos objetivos, foi elaborado um fluxograma de modo a simplificar a exposição do modelo operativo, o mesmo formula o percurso técnico executado após a identificação das áreas de estudo.

O referido fluxograma encontra-se representado na figura 8:

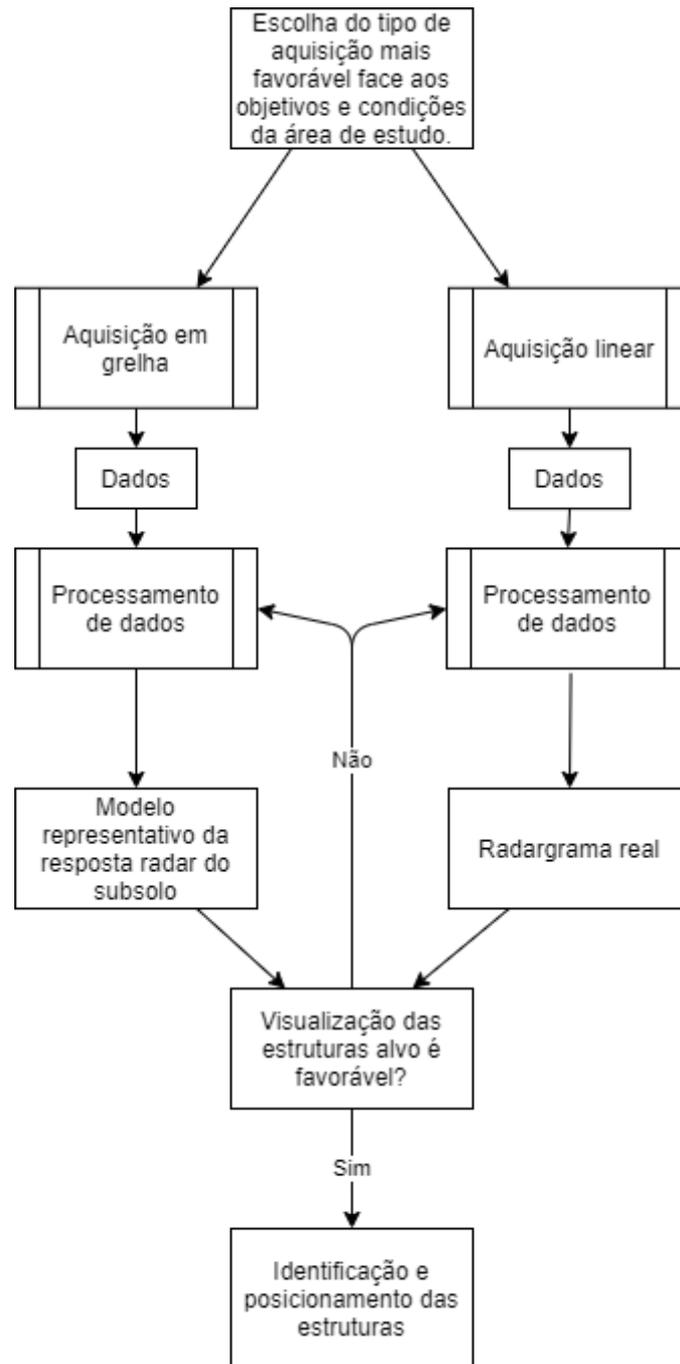


Figura 8 - Fluxograma representativo da metodologia adotada

Ainda, o equipamento utilizado no trabalho foi o pulseEKKO, na configuração Smart Cart, da Sensors & Software.Co. Foi configurado com antenas blindadas de 250 MHz. A blindagem destas mesmas antenas visa mitigar, na medida do possível, o ruído eletromagnético criado pelo próprio equipamento e por eventuais fontes externas.

No enalço de garantir a integridade do estudo e preservar ao máximo o potencial funcional do método de deteção remota empregue neste estudo foi avaliado o histórico meteorológico referente ao local sobre o qual incidiu o trabalho.

O levantamento foi efetuado no dia 30 de março de 2019, os registos indicam que terá ocorrido precipitação atmosférica na madrugada do dia 18 de março, como indicado na figura 9, ou seja, treze dias antes da data do levantamento.

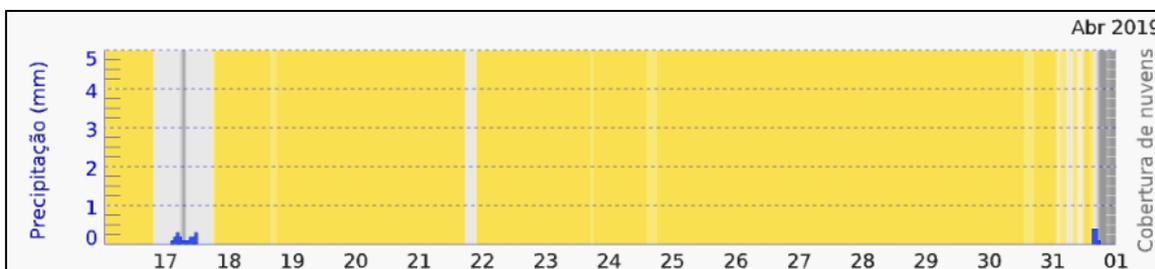


Figura 9 - Dados de precipitação dos últimos 15 dias de março de 2019 (Meteoblue.com)

Pode concluir-se que o teor de água no solo não terá sofrido alterações pontuais com significância que estejam associadas a fenómenos meteorológicos. A relevância destes dados prende-se com a possível alteração da resposta radar do solo, de acordo com o seu teor em água, devido à alteração das propriedades dos materiais de acordo com a presença de água, como é possível verificar nos valores apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Tabela de constantes dielétricas, permitividades, velocidades e atenuações para alguns materiais (Annan, 2009)

Material	$\kappa$	$\sigma$ (mS/m)	$v$ (m/ns)	$a$ (dB/m)
Ar	1	0	0,3	0
Água destilada	80	0,01	0,033	$2 \cdot 10^{-3}$
Água doce	80	0,5	0,033	0,1
Água salgada	80	$3 \cdot 10^3$	0,01	103
Areia seca	3 - 5	0,01	0,15	0,01
Areia saturada	20 - 30	0,1 - 1	0,06	0,03 - 0,3

De acordo com o autor dos valores apresentados na tabela anterior, a água é o material, de ocorrência natural nos solos, com permitividade mais elevada, e ocorre com elevada frequência nos poros do solo. Contudo, a existência de iões dissolvidos na água aumenta a sua condutividade elétrica. Assim, a água, enquanto componente do meio sondado, é um fator de importância maior na determinação das características dielétricas do solo (Annan, 2009). E conseqüentemente, a sua resposta radar.

## 3.3 Caso 1: Colégio de Jesus

No pátio das cisternas encontraram-se inúmeros obstáculos inamovíveis, concluindo-se ser inexequível a aquisição de dados georadar em grelha. Por esta razão, determinou-se que a melhor opção seria efetuar a aquisição de forma linear.

### 3.3.1 Aquisição linear

De modo a definir as linhas para efetuar a aquisição, foi, em primeiro lugar, feito o levantamento de uma linha experimental. Esta, tendo sido efetuado no modo de monitorização disponível no equipamento, não foi registada. Contudo, teve um posicionamento idêntico às linhas LCJ3 e LCJ4, situando-se exatamente entre as referidas.

Essa linha, rendeu de imediato a identificação de duas anomalias de elevada visibilidade. Apesar da orientação das cisternas não ser conhecida com um elevado grau de confiança, definiu-se que o curso de ação apropriado seria definir linhas paralelas na mesma orientação da linha de testes, de modo a avaliar a continuidade lateral das anomalias.

Os parâmetros de aquisição empregues nesta etapa foram uma frequência de 250 MHz, *stack* de 1000 por traço, 400 picosegundos de amostragem temporal e uma separação de antenas de 0,4 metros.

A figura 10, representa uma esquematização das aquisições feitas:

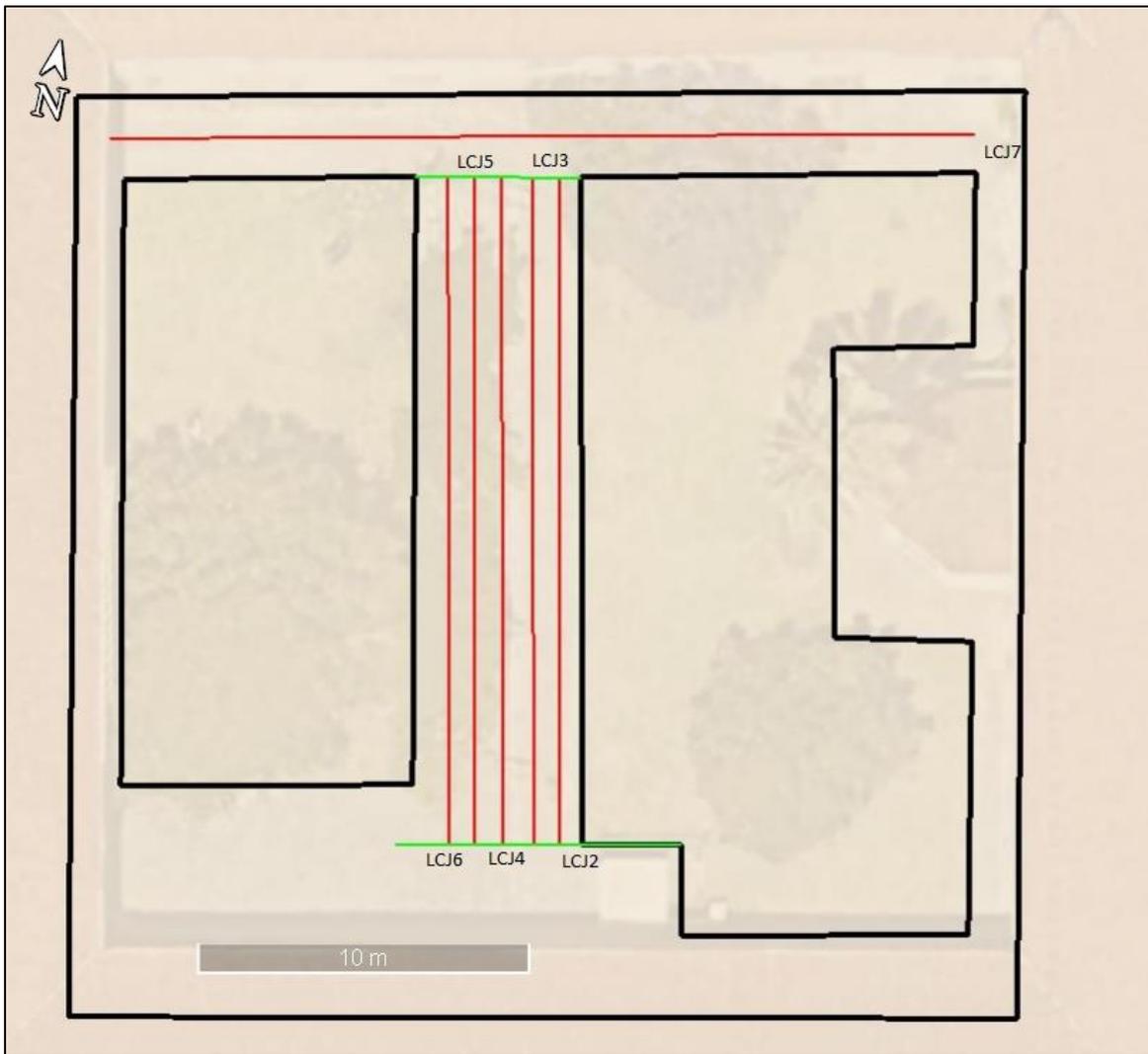


Figura 10 - Esquema do Pátio das Cisternas, incluindo as linhas alvo de levantamento

Na figura 10, os levantamentos lineares executados apresentam-se numerados, e serão designados neste trabalho com o prefixo LCJ, sendo os radargramas adquiridos neste contexto os seguintes: LCJ2, LCJ3, LCJ4, LCJ5, LCJ6 e LCJ7.

Ainda, no corredor W – E da cave do edifício executou-se a aquisição de uma linha, com o objetivo de obter uma resposta radar do subsolo e eventualmente, avaliar a presença de refletores mais profundos, esta linha tem a designação de LCJ1.

### 3.3.2 Processamento de dados

O modelo de processamento de dados adotado, como sendo o mais adequado ao tratamento dos dados adquiridos, encontra-se descrito na figura 11:

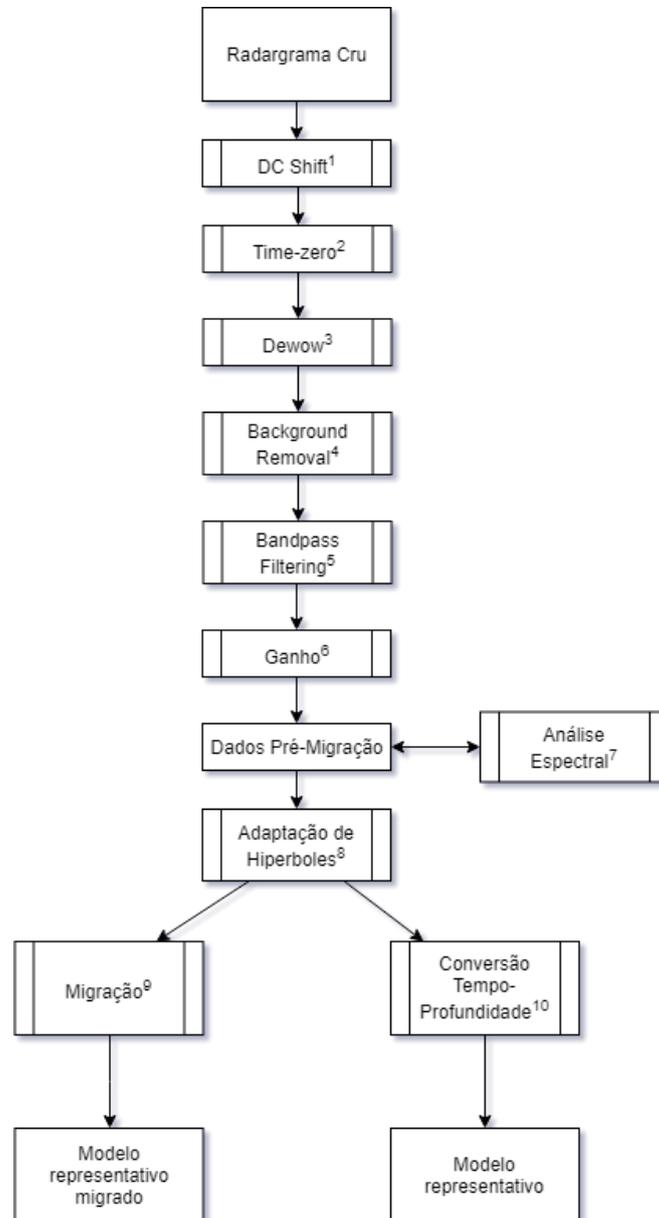


Figura 11 - Modelo do fluxo de processamento de dados de aquisição linear

### **Correção da deriva temporal contínua (DC Shift)**

O *DC Shift*, neste caso, uma deriva temporal contínua, é um ruído sistemático criado pelos campos eletromagnéticos inerentes operação regular do aparelho de aquisição. A sua sistematicidade permite a sua remoção através da subtração de uma média.

Assim, o filtro atua sobre cada traço de forma independente, estipulando-se um tempo 0 e um tempo 1, cria-se uma abertura temporal que será alvo do cálculo de uma média dos valores do sinal de radar, essa média é diferente para cada traço e é subsequentemente subtraída ao respetivo traço.

Deste modo, é possível garantir que o valor médio, dentro da abertura temporal, para cada traço é coerente com a deriva que se pretende remover, eliminando assim este tipo de ruído (Sandmeier, 2004).

As antenas blindadas usadas no pulseEKKO para este estudo têm em vista mitigar a introdução deste tipo de ruído no radargrama, contudo a sua blindagem, apesar de extremamente eficaz, não elimina por completo o mesmo.

### **Correção do tempo zero (Time-zero)**

A correção do tempo zero, tempo referente ao momento em que o sinal eletromagnético intercepta a interface ar / solo, corresponde ao processo de remover o intervalo entre a emissão do sinal e o designado tempo zero.

Esta é uma intervenção relativamente simples que aprimora a fidelidade dos dados no que toca à sua visualização removendo ruído que mais tarde poderia sabotar os resultados obtidos na aplicação dos processos subsequentes.

### **Subtração da média corrida (Dewow)**

Este filtro, também unidimensional (atua em cada traço de forma independente), calcula uma média de valores de amplitude enquadrados numa janela temporal pré-definida pelo utilizador e conseqüentemente subtrai o resultado à mesma janela, avançando a mesma progressivamente no tempo (Sandmeier, 2004).

O resultado é indicado para remover ruído de baixas frequências, algum dele introduzido pelo filtro anterior. Ainda, a dimensão temporal da janela deve ser definida em aproximadamente 1 período completo da onda da frequência de aquisição (para o nosso caso, cerca de 4 ns). Usando um valor múltiplo do mesmo reduzirá a distorção produzida, contudo poderá não culminar em resultados favoráveis.

## **Remoção de ruído de fundo (Background Removal)**

O ruído de fundo pode ter várias origens, equipamento externos à operação que produzem radiação no espectro interferente ou reflexão do sinal emitido em estruturas e objetos constituinte do meio envolvente, mas que são externos aos alvos da campanha de aquisição.

Este processo de filtragem consiste no acumular de uma média dos valores verificados num determinado número de traços num certo intervalo de tempo, que pode ou não ser a totalidade do perfil, e com esses valores procede-se à construção de um traço médio, este contém as características mais consistentes do perfil, que regra geral estão associadas a ruídos de fundo (Sandmeier, 2004).

Efetuada a subtração deste traço médio a cada traço do perfil, remove-se alguma desta porção de ruído presente nos dados.

Nesta investigação verifica-se que este tipo de remoção de ruído é adequado, o método remove o sinal com maior expressividade longitudinal, preservando anomalias pontuais e com pouca continuidade ao longo do perfil. Na eventualidade de se pretender remover anomalias mais pontuais, o cálculo do referido traço médio seria mais adequado com o uso de uma média corrida (Kim, 2007).

## **Filtragem de banda de frequência**

Este filtro atua em cada traço de forma independentemente. Assim, após definido um conjunto de frequências que se pretendem suprimir no radargrama, o filtro modifica os dados de cada traço, alterando assim o domínio de frequências do radargrama em geral.

Desta forma, este filtro prova-se útil na remoção de ruído quando o domínio de frequências do sinal difere parcial ou totalmente do domínio de frequências do ruído, podendo ser esta diferença explorada para suprimir o ruído (Sandmeier, 2004).

## **Ganho**

À medida que o sinal se propaga no meio vai sendo atenuado, verificando-se um decréscimo acentuado nas propriedades do sinal, bem como um enriquecimento em frequências graves do mesmo. Diversas iterações do ganho podem ser aplicadas a um perfil.

A compensação da divergência geométrica amplifica o sinal com base na sua atenuação provocada pelo aumento exponencial da área da frente da onda do sinal. Devido ao aumento desta área versus o não aumento da energia necessária para a cobrir ocorre uma atenuação. É esta atenuação que este filtro visa corrigir.

O ganho para compensar a atenuação do sinal, por outro lado, é aplicado principalmente com base na avaliação dos seus resultados a nível visual no radargrama, de modo a permitir ao utilizador visualizar o sinal a maior profundidade. Este pode ser definido manualmente através de uma função de desenvolvimento de ganho no perfil através do tempo.

A importância desta etapa de processamento ser uma das últimas a ser aplicada prende-se com o facto de que nela, da mesma forma que se amplifica o sinal também se amplifica o ruído. Assim sendo, o ganho rende melhores resultados quando aplicado após o ruído ter sido removido.

## **Migração**

Esta etapa do processamento adquire especial importância em perfis com aquisição ZO (Zero-Offset), tal como aqueles que foram obtidos no decorrer deste estudo. Isto porque, quando a aquisição é feita com a fonte e recetor na mesma posição, a propagação esférica do sinal intercepta refletores que se encontrem deslocados horizontalmente da posição do aparelho. Assim, refletores com inclinações elevadas, ou, por exemplo, as secções laterais de estruturas cilíndricas ou cuboides, originam anomalias desfasadas da sua posição real.

Este processo tem como objetivo reconstruir o radargrama num modelo representativo da refletividade do meio sondado (Jol, 2008). Deste modo, obtém-se uma varredura na qual as anomalias visíveis assumem formas e posições mais semelhantes ao alvo que esteve na origem das mesmas. Através do cálculo da regressão temporal do sinal, é possível reposicionar a anomalia para a posição onde se calcula ter estado a sua origem, conferindo assim ao radargrama uma maior semelhança com o modelo do subsolo.

Contudo, esta técnica depende fortemente do conhecimento das velocidades do sinal no terreno, aumentando a sua fiabilidade proporcionalmente ao conhecimento de velocidades do sinal.

Neste estudo foi efetuada a *time FD Migration*, ou *FDTD, finite difference time-domain*, em português, migração de diferenças finitas no domínio do tempo. Este tipo de migração, constitui uma ferramenta apropriada ao uso em perfis ZO.

## 3.4 Caso 2: Colégio das Artes

No pátio do Colégio das Artes, atualmente parte integrante do Departamento de Arquitetura da Universidade de Coimbra, foi tida como hipótese a continuidade de algumas estruturas de origem antrópica, usadas com reservas estratégicas de água em tempos de escassez da mesma.

A profundidade hipotética das mesmas teve-se como desconhecida, contudo, na eventualidade destas estruturas existirem, e caso se encontrassem a uma profundidade viável à deteção remota com georadar, seria possível detetá-las efetuando uma aquisição neste pátio.

Devido ao complacente número de obstáculos inamovíveis neste pátio, optou-se por efetuar uma aquisição em grelha, permitindo assim, não só uma melhor visualização da resposta radar do subsolo, como também um tratamento de dados mais expedito e automatizado. Isto porque, apesar do tratamento de dados a três dimensões ser mais complexo, a maior parte dos processos aplicados em perfis B, também são diretamente aplicáveis nos radargramas bidimensionais que compõem a nossa grelha.

Ainda, grande parte da interpretação que é feita sobre radargramas bidimensionais, de certa forma, confina o interpretador aos dados ali presentes. Ora, numa grelha, e interpretando um volume tridimensional da resposta radar do subsolo, o interpretador deixa menos variáveis sujeitas à incerteza, e pode assim tecer conclusões mais sólidas.

### 3.4.1 Aquisição em grelha

A recolha de dados foi efetuada com recurso a um equipamento pulseEKKO SmartCart, da Sensors & Software com as características descritas na tabela 2.

Tabela 2 - Características do equipamento usado (pulseEKKO)

Time Window:	0.5 to 200,000 ns
Points per Trace:	10 to 31,000
Hardware Stacking:	1 to 32768
Software Stacking:	Unlimited
Signal Enhancement:	DynaQ
Hardware Temporal Sampling Increment:	5 ps
Sampling:	Digital Equivalent Time Sampling (DETS)
Power Consumption:	100 mA @ 12V
Temperature Range:	-50 to +50 C
Maximum System Performance:	186 dB + 10*log10 (#stacks)

Para efeito da deteção de estruturas anómalas no meio prospetado, estimou-se que os melhores resultados seriam obtidos com uma frequência de sondagem de 250 Mhz, devido ao tipo de estruturas esperadas, galerias e tubagens.

No Colégio das Artes foi criada uma grelha de modo a cobrir a superfície de aquisição: da área desejada.

Para iniciar o processo de aquisição foi feito um levantamento linear com o objetivo de estimar a velocidade no meio, após a análise de hipérboles verificadas nesta aquisição estimou-se que a velocidade do sinal eletromagnético no solo seria aproximadamente 0,12 m/ns, velocidade espectável em solos com a litologia verificada no local. De modo a estimar o RDP foram consideradas as equações 15 e 16:

$$\text{Sendo que } \epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \text{ (15), (Dojack, 2012) ou } v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ m ns}^{-1} \text{ (16),}$$

Em que  $\epsilon_r$  é a constante dielétrica relativa (RDP), (Leckebusch, 2003). A velocidade estimada rendeu um RDP de 6,24. Este valor é coerente com vários tipos de solos secos (Daniels, 2005).

O solo encontrado na área estuda é fruto da pedogénese dos dolomitos calcários dolomíticos das Camadas de Coimbra s.s., do Grupo de Coimbra.

De acordo com a equação para o comprimento de onda da frequência central no meio prospectado, equação 17, (Leckebusch, 2003):

$$\lambda = \frac{c}{f \cdot \sqrt{k}} \quad (17)$$

Resolvendo a equação 17 face a velocidade estimada e frequência empregue no estudo, foi possível estimar que o comprimento de onda seria aproximadamente 0,48 metros.

Normalmente, a definição correta para as dimensões de uma grelha depende principalmente do tipo de alvos que se pretende analisar. Se estes alvos forem de menores dimensões é recomendável que o espaçamento entre linhas de aquisição seja menor.

No caso deste estudo, como a expectativa de dimensão esperada de uma estrutura análoga à estrutura hidráulica contemplada para este contexto é de dimensões grandes, numa ordem nunca inferior aos 10 metros de extensão horizontal para qualquer direção, optou-se por definir um espaçamento entre linhas de 1 metro.

Este espaçamento é superior ao intervalo de amostragem de Nyquist, descrito por ser aproximadamente um quarto do comprimento de onda no meio de propagação (Jol, 2008).

Assim, este espaçamento garante a não interferência entre linhas e é compatível com a deteção de estruturas de dimensões grandes, médias e pequenas desde que a sua expressão horizontal seja significativa.

Com a grelha definida, foram recolhidas 42 linhas na direção X e 36 na direção Y. Na figura seguinte expressa-se a orientação da grelha face ao local de aquisição.

A distância entre traços também foi tida em conta como um fator a considerar para obter uma interpolação viável para um levantamento GPR tridimensional.

Regendo-se pelo intervalo espacial requerido, descrito pela fórmula 18:

$$\Delta_x = \frac{\lambda}{4} \quad (18)$$

Assim, considerando o comprimento de onda para a frequência central do meio prospectado, estimou-se um espaçamento mínimo entre traços de 0,1185 metros.

No entanto, de modo a obter uma noção mais precisa do espaçamento mínimo entre traços, para um melhor rendimento do estudo. Confirmou-se a dimensão máxima da área iluminada, para a velocidade do sinal no meio, para confirmar as dimensões das estruturas horizontalmente resolvíveis para neste estudo.

A equação 19 traduz o comprimento máximo da elipse da área de iluminação é a seguinte (Dojack, 2012):

$$A = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{d}{\sqrt{K-1}} \quad (19)$$

Onde  $A$  corresponde ao comprimento máximo aproximado da dimensão longa da elipse, e  $d$  a profundidade à qual esta dimensão se verifica.

A partir da equação 19, obtiveram-se os valores descritos na tabela 3:

Tabela 3 - Tabela de relações entre dimensão maior da elipse e a profundidade.

Profundidade (d)	Velocidade (v)	Dimensão min. (A)
1	0,12	5 cm
2	0,12	10 cm
3	0,12	16 cm
4	0,12	21 cm
5	0,12	26 cm
6	0,12	31 cm

Como o espaçamento adotado é sempre superior ao dobro valores obtidos na tabela anterior, conclui-se que este tipo de grelha é apropriado à deteção de estruturas de grandes dimensões e não à de estruturas pontuais de pequenas dimensões.

Se os alvos da sondagem forem pontuais e de pequenas dimensões este cálculo ganha outro tipo de importância, permitindo inferir a qual profundidade se poderá ter a cobertura total da área incluída na grelha.

No caso da grelha utilizada neste estudo, sabemos que, por exemplo, a 2 metros de profundidade, haverá 80 cm, no centro da distância entre cada linha, de espaço não iluminado, onde refletores não serão detetados. Para o objetivo deste levantamento esta particularidade não representa um risco.

Por fim, efetuou-se o levantamento em grelha com os parâmetros definidos na localização e com as dimensões enunciadas na figura 12:



Figura 12 - Orientação dos levantamentos no DARQ (adaptado de Google Earth)

## 3.4.2 Processamento e Visualização

Pela própria natureza da visualização e tratamento de dados, alguma parte do processamento acaba por se introduzir em etapas de visualização, denominando-se assim de pós-processamento, de modo a fortalecer uma relação de causalidade entre a identificação de fenômenos e a aplicação de processamento cuja complexidade aumenta significativamente devido à introdução de uma nova dimensão.

Contudo, ainda assim, foram aplicados os seguintes filtros à grelha. Os passos de filtragem e modificação do sinal foram levados a cabo no software de processamento e visualização de dados ReflexW da *Sandmeier*, no entanto, também foi efetuado processamento preliminar no software EKKOProject da *Sensors & Software*, que rendeu um modelo HDF que foi posteriormente submetido para visualização no software Voxler da *Golden Software*, devido à sua maior versatilidade no que toca a componente de representação gráfica.

### **Correção da deriva temporal continua (DC Shift)**

Esta correção é feita individualmente a cada traço, e por essa razão, a sua aplicação não difere, seja a sua aplicação numa grelha 3D ou em perfis bidimensionais, sendo igual à iteração da mesma correção aplicada nos perfis do Colégio de Jesus.

### **Correção estática do tempo-zero (Time-zero)**

Esta correção foi efetuada em cada perfil individualmente, sendo a primeira chegada identificada automaticamente pelo algoritmo do filtro e depois uma média aplicada a cada perfil, devolvendo uma grelha que permite a computação de um volume da resposta radar do subsolo sem a componente temporal que constitui o tempo que o sinal demora a atingir o solo e penetrar no mesmo.

### **Subtração da média-corrida (Dewow)**

Este filtro também é aplicado a cada trado de forma independente, consistindo no cálculo da média de valores numa determinada janela temporal, correspondente a pelo menos  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda do sinal, e consecutivamente subtraindo o resultado aos valores. Removendo assim algum do ruído, principalmente de baixas frequências.

## Remoção de ruído de fundo

A remoção do ruído de fundo teve como objetivo remover algum do ruído proveniente de fontes externas. Purificando assim algum do sinal resgatado e facilitando a visualização das anomalias.

Esta manipulação foi efetuada em cada linha constituinte da grelha de forma individual, tendo uma aplicação rigorosamente idêntica à que foi efetuada nas linhas recolhidas no Colégio de Jesus.

## Migração

A migração 3D foi efetuada devido à possível necessidade de extrair e interpretar varreduras C, ou *timeslices* ao longo do projeto.

A migração teve por base uma velocidade constante de 0,12 m/ns, não sendo tão precisa como a migração FDTD usada nos radargramas do Colégio de Jesus, contudo, este tipo de migração confere uma elevação no detalhe e posicionamento de algumas anomalias.

A migração FDTD individual de cada perfil com base num modelo de velocidades inferido a partir da adaptação de hipérboles determinou-se impraticável devido à escassez de hipérboles na maioria dos perfis, e também devido ao número elevado de perfis. Esta circunstância constitui um exemplo de uma das situações onde o reconhecimento automático de hipérboles através de algoritmos de *computer vision* ou de *machine learning* poderia conferir uma vantagem ao utilizador para detetar e catalogar automaticamente as hipérboles e contruir um modelo de velocidade aproximado de um volume tridimensional.

## Função exponencial de ganho

A aplicação de uma função exponencial de ganho teve como objetivo incrementar o sinal resgatado de profundidades mais elevadas. A função utilizada teve uma razão linear de 1 para 1 e exponencial de 1 para 1.3, tendo a sua origem nos 40 ns de profundidade.

Estas razões foram definidas de modo a amplificar fortemente o sinal a profundidades mais elevadas, mesmo com isso significando também amplificar muito o ruído. Contudo, tendo em consideração não só a natureza, mas também os objetivos deste levantamento, este tipo de aplicação faz sentido, pois às profundidades onde a introdução de ruído se verifica mais proeminente, a capacidade de deteção por georadar também já é significativamente limitada, servindo esta manipulação também para explorar esse limite.

## Capítulo IV – Resultados

---

O propósito deste capítulo será a apresentação dos resultados obtidos nesta campanha. Deixando os mesmos expostos ao escrutínio e discussão dos mesmos, que terá lugar no capítulo seguinte.

### 4.1 Colégio de Jesus

No que diz respeito ao Colégio de Jesus, os radargrama obtidos, antes, durante e após o processamento encontram-se descritos nas figuras 13 à 33:

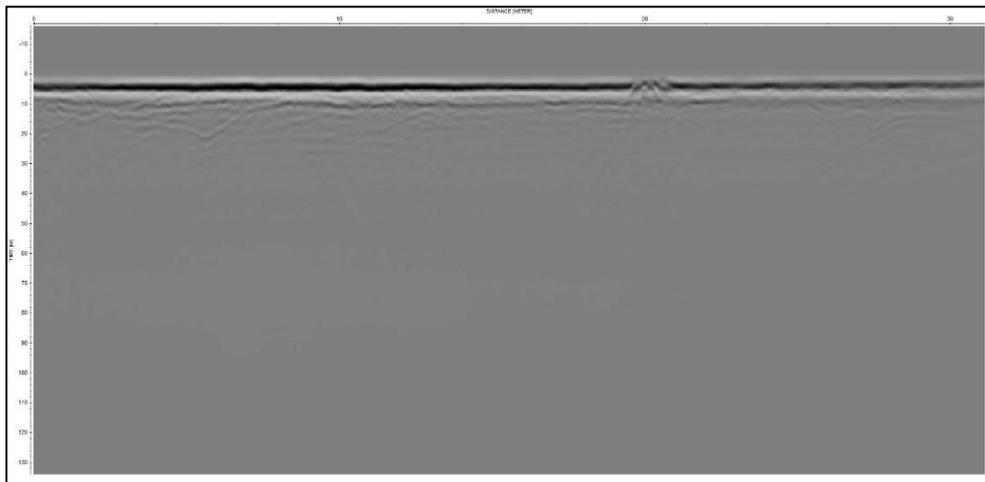


Figura 13 - LCJ1 (Sem processamento)

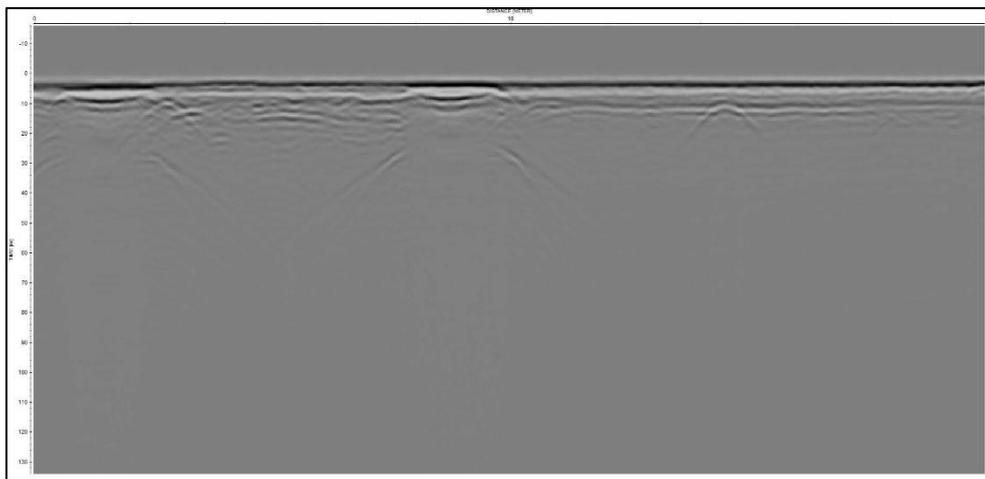


Figura 14 - LCJ2 (Sem processamento)

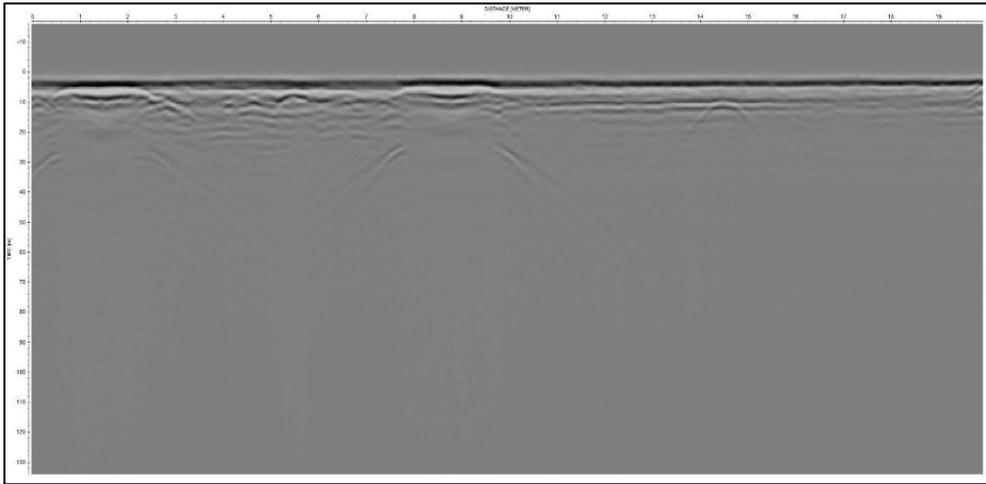


Figura 15 - LCJ3 (Sem processamento)

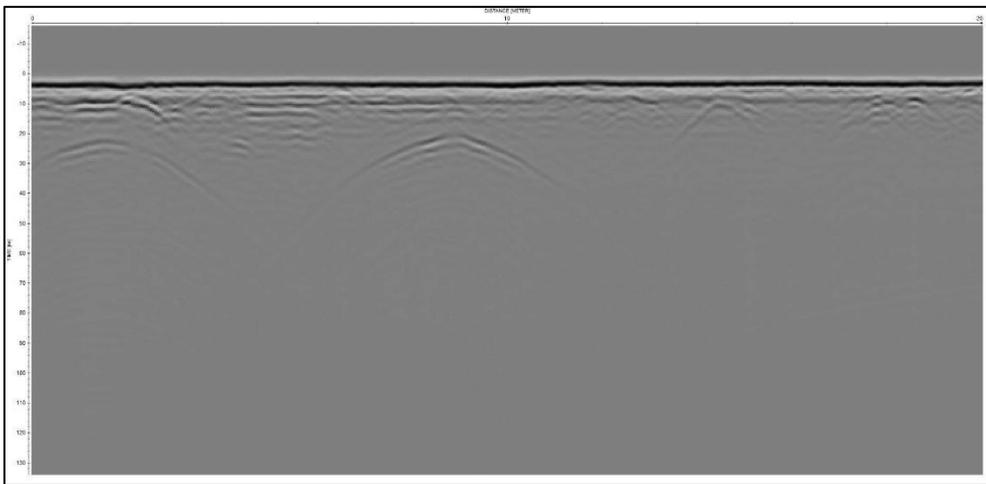


Figura 16 - LCJ4 (Sem processamento)



Figura 17 - LCJ5 (Sem processamento)

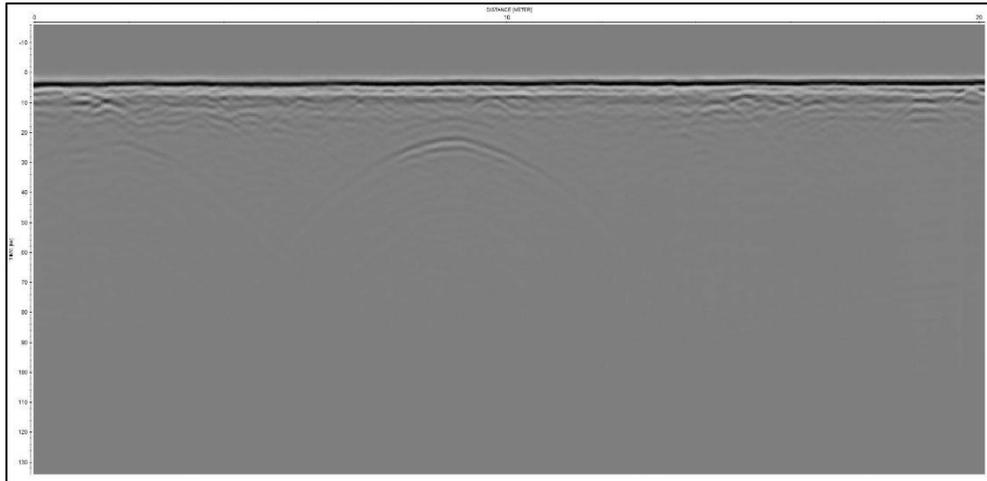


Figura 18 - LCJ6 (Sem processamento)

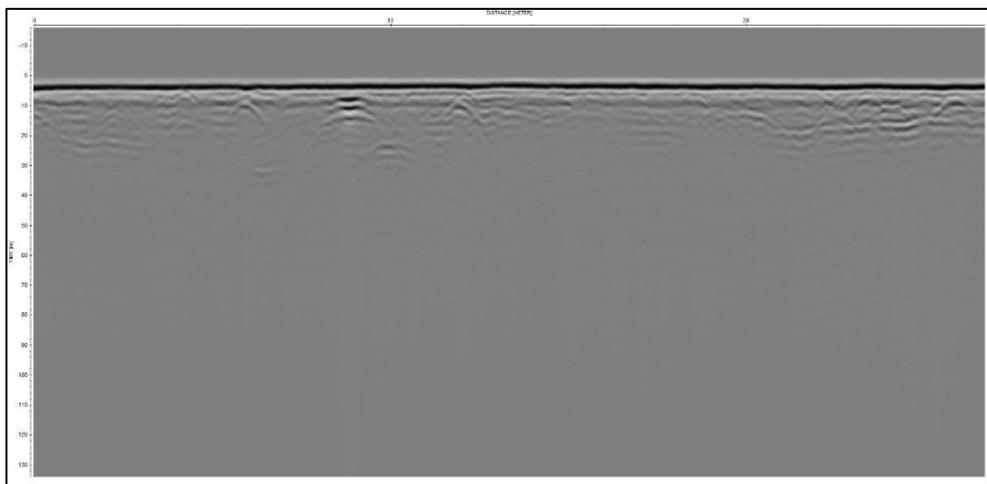


Figura 19 - LCJ7 (Sem processamento)

Radargramas do Colégio de Jesus, com processamento aplicado até à etapa de migração, sendo o fluxo de processamento no formato apropriado à integração no ReflexW, o seguinte:

```

subtract-DC-shift / 0 / 30 / 0 / 0 // 0 / 0 / 1 / 623
subtract-mean(dewow) / 4 / 0 / 0 / 0 // 0 / 0 / 1 / 623
move starttime / -15,4 / 0 / 0 / 0 // 0 / 0 / 1 / 623
background removal / 0 / 134 / 0 / 31,1 // 0 / 0 / 1 / 623
bandpassfrequency / 110 / 220 / 300 / 510 // 0 / 1 / 1 / 623
gain function / 20 / 1,85 / 1,25 / 300 // 1 / 623 / 1 / 623

```

O excerto de texto acima exposto, remete para o fluxo de processamento utilizado para obter os radargramas que se seguem, apresentados nas figuras 20, 21, 22, 23, 24, 25 e 26. O formato apresentado deste fluxo de processamento é compatível para ser carregado como fluxo de processamento para a ferramenta ReflexW.

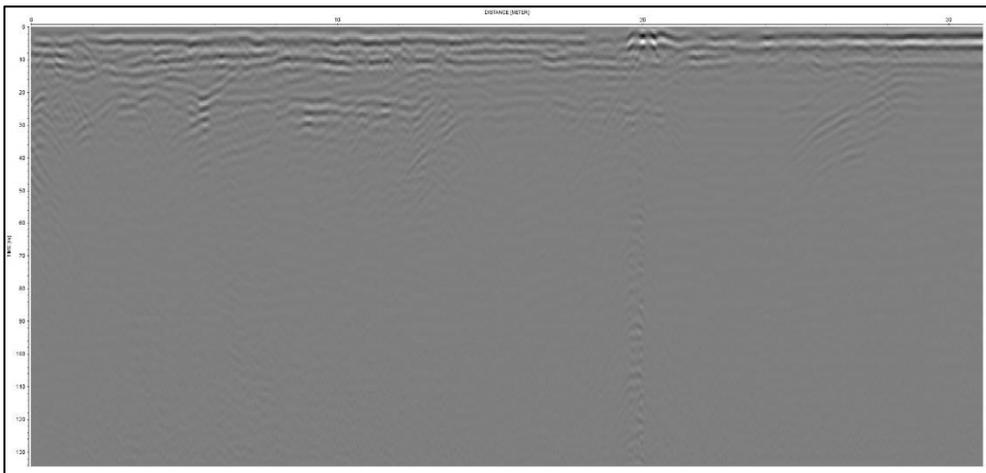


Figura 20 - LCJ1 (Fluxo de processamento 1)

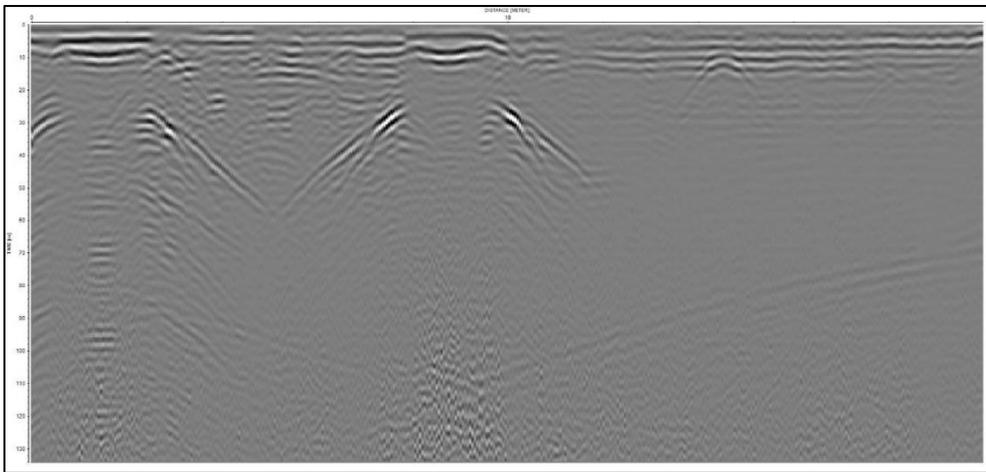


Figura 21 - LCJ2 (Fluxo de processamento 1)

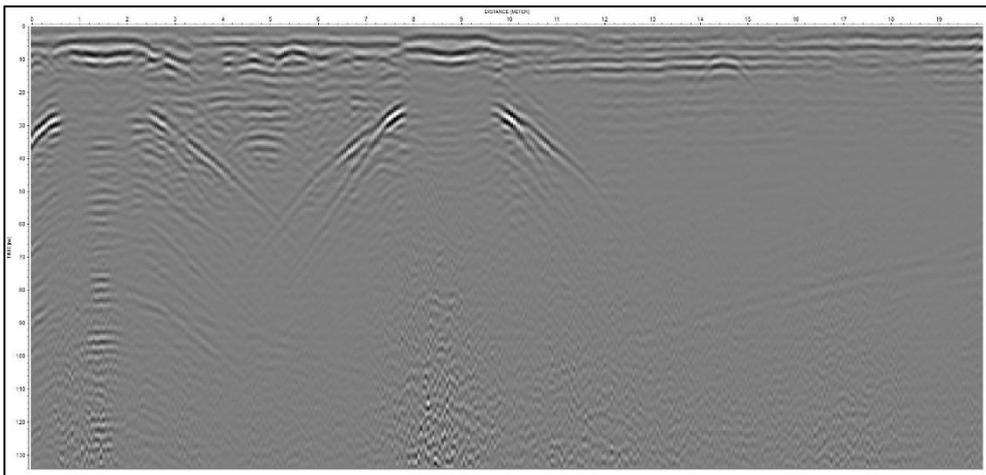


Figura 22 - LCJ3 (Fluxo de processamento 1)

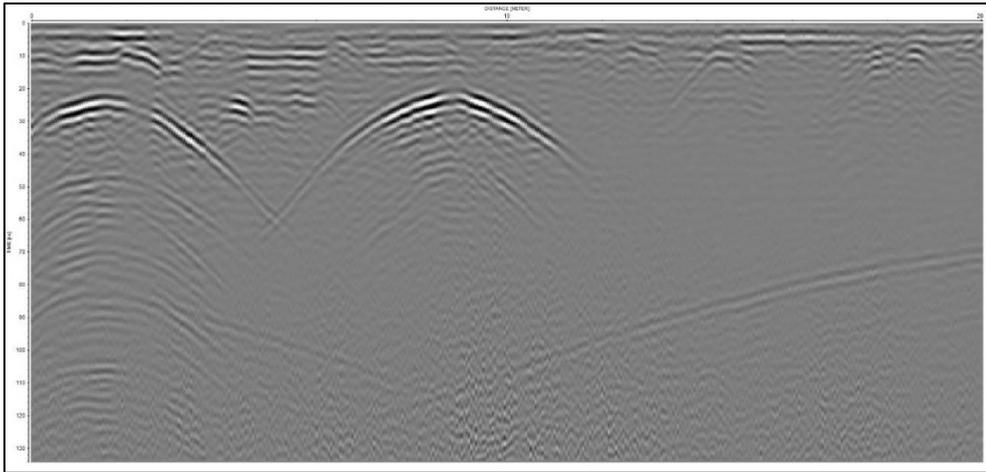


Figura 23 - LCJ4 (Fluxo de processamento 1)

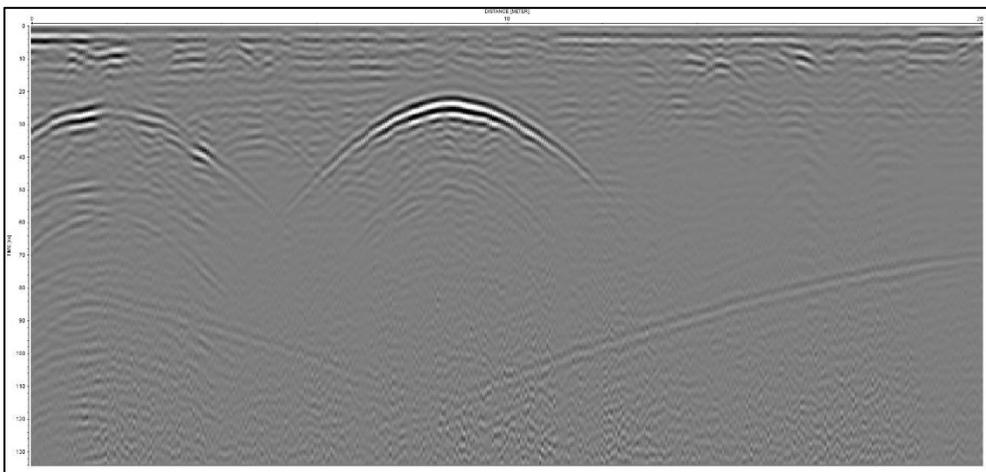


Figura 24 - LCJ5 (Fluxo de processamento 1)

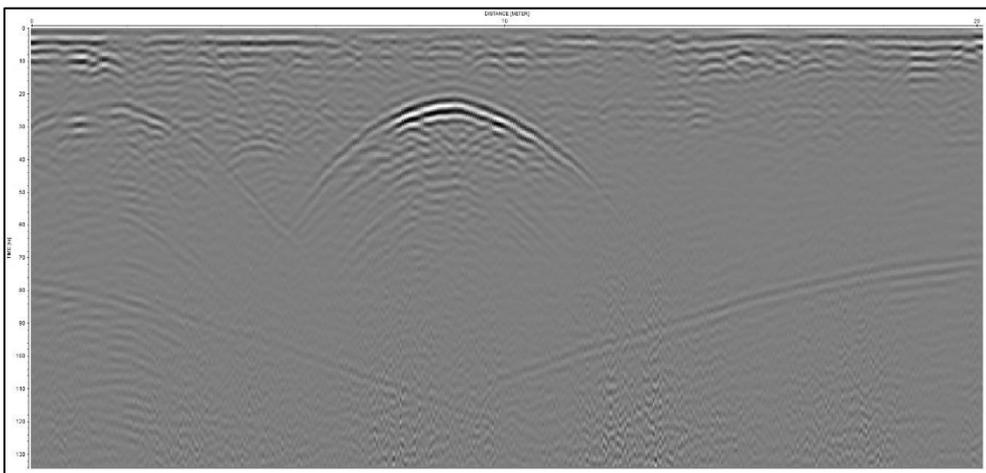


Figura 25 - LCJ6 (Fluxo de processamento 1)

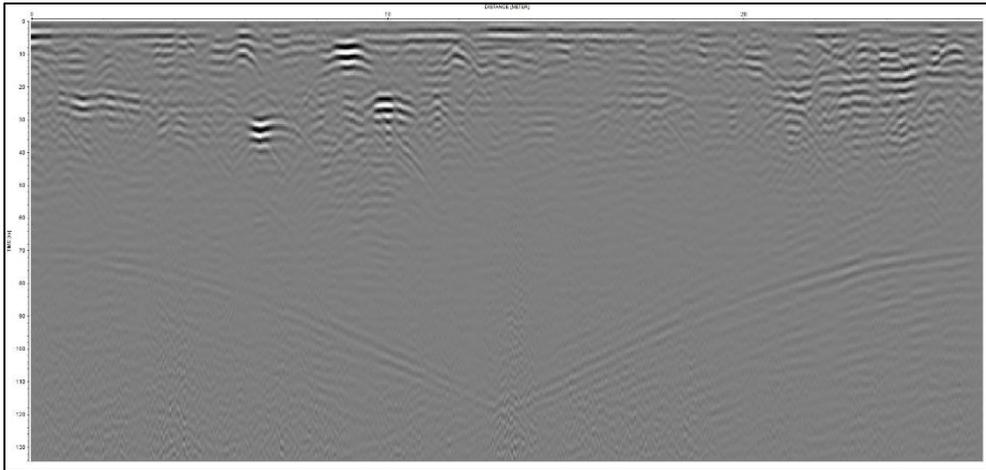


Figura 26 - LCJ7 (Fluxo de processamento 1)

Por fim, os resultados obtidos após a migração, descritos nas figuras 27 à 33.

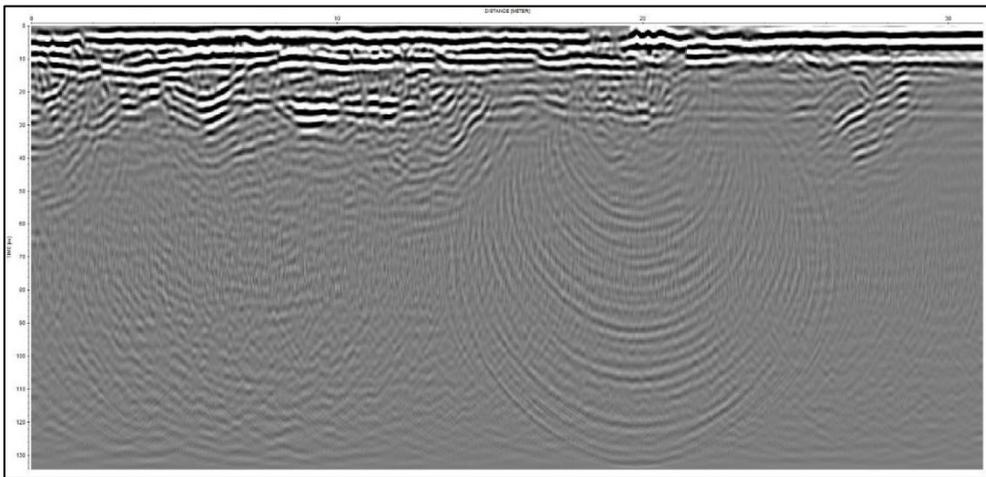


Figura 27 - LCJ1 (pós-Migração)

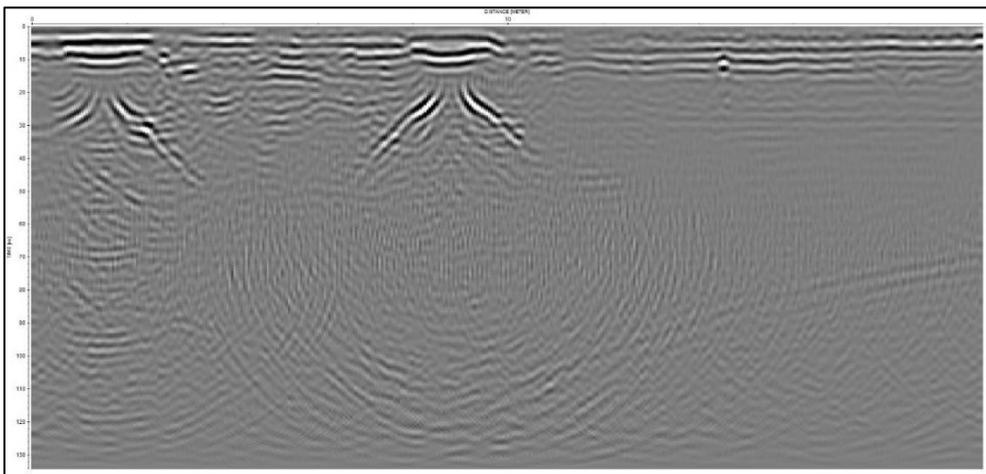


Figura 28 - LCJ2 (pós-Migração)

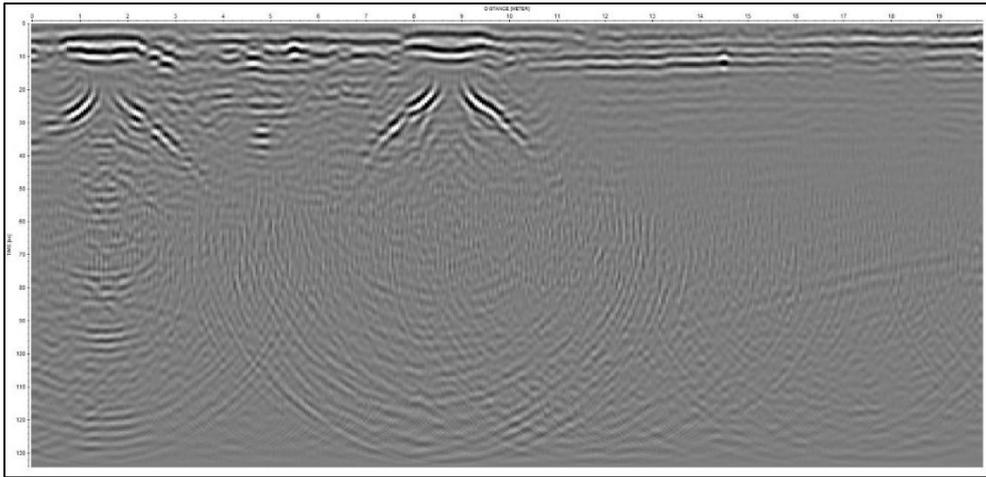


Figura 29 - LCJ3 (pós-Migração)

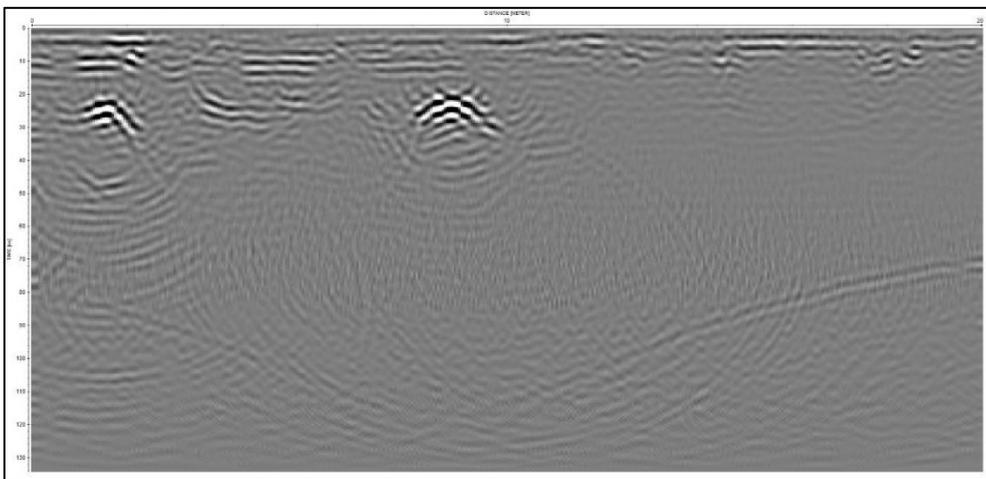


Figura 30 - LCJ4 (pós-Migração)

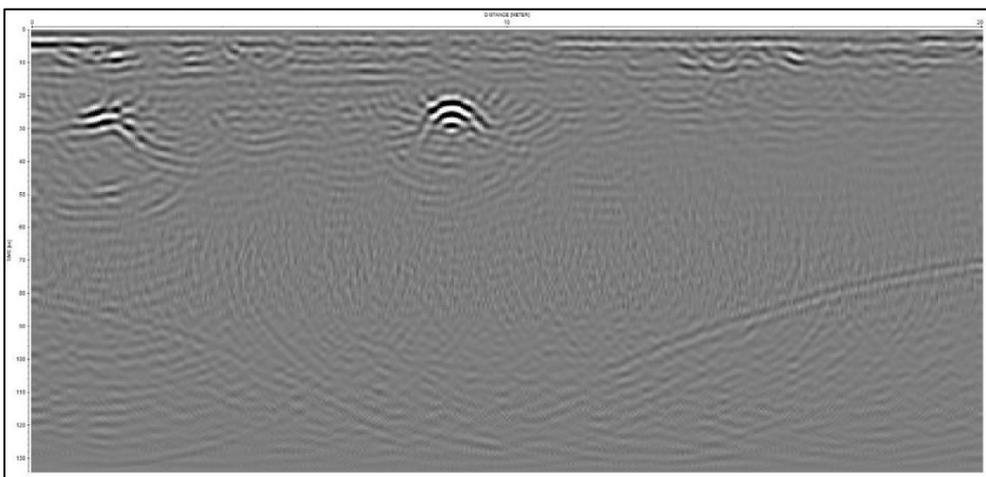


Figura 31 - LCJ5 (pós-Migração)

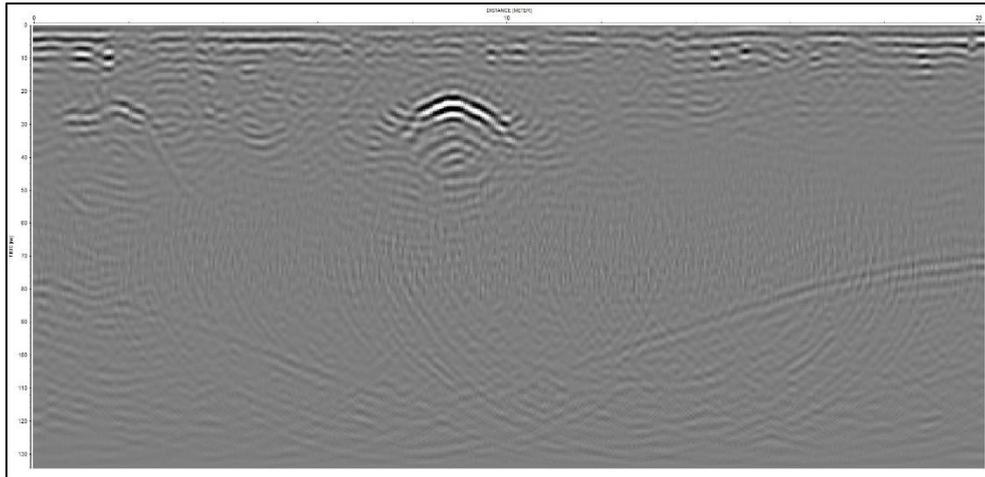


Figura 32 - LCJ6 (pós-Migração)

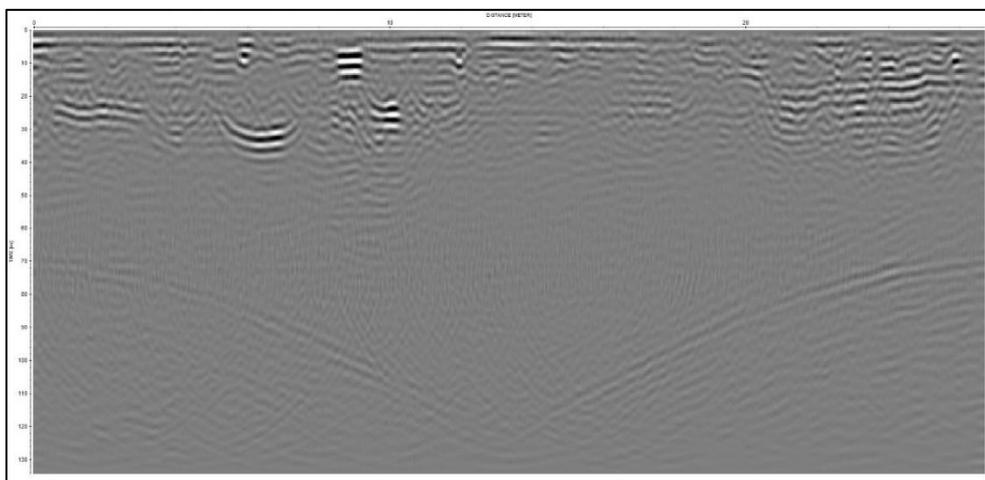


Figura 33 - LCJ7 (pós-Migração)

## 4.2 Colégio das Artes

Após os dados serem trabalhados no ReflexW, foi possível obter as seguintes *timeslices* representadas nas figuras 34 e 35.

Convém ter em consideração face aos dados apresentados que os valores de amplitude representam voltagem na antena numa escala de resolução de 0 a 10000, uma amplitude máxima representa um pico de 34 mV.

Em algumas representações os valores podem ter sido normalizados para uma escala de 0 a 100. Sendo que, em qualquer um dos casos, a representação visual não é alterada.

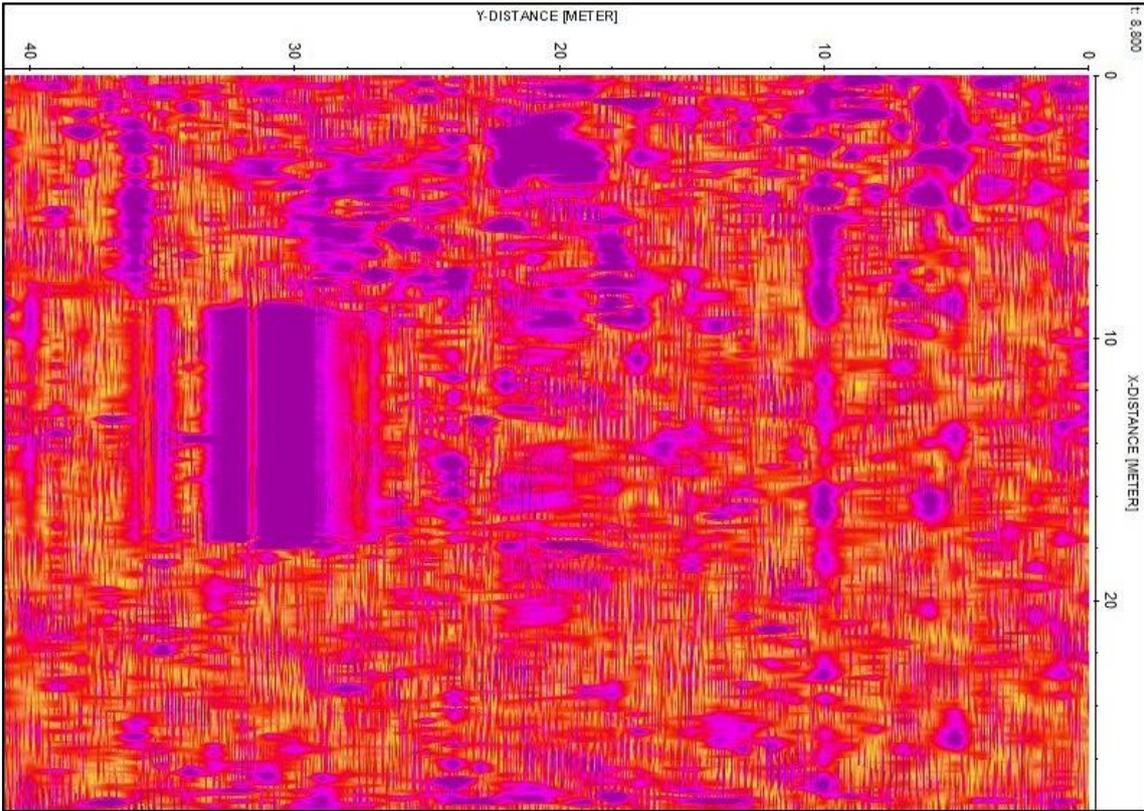


Figura 34 - *Timeslice CA / 52 cm @ v = 0,12 m/ns*

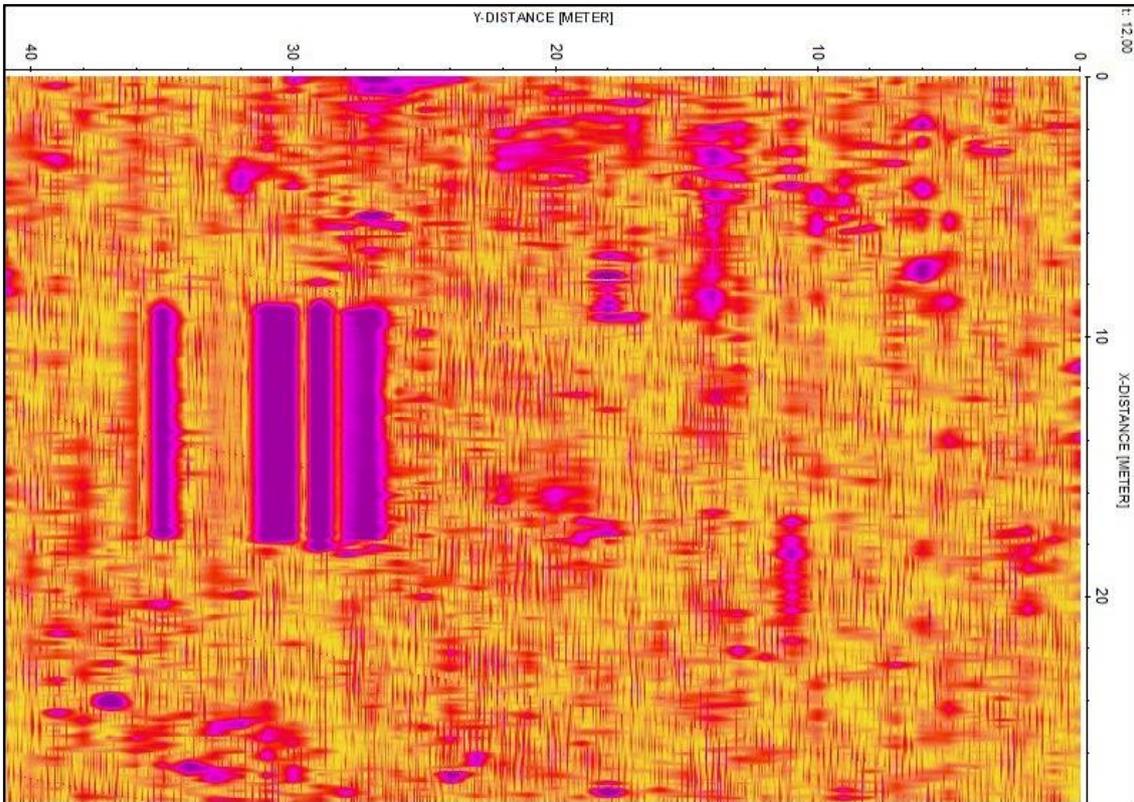


Figura 35 - *Timeslice CA / 72 cm @ v = 0,12 m/ns*

Ainda através do software ReflexW, foi possível, obter o seguinte volume, apresentado na figura 36, elucidativo da distribuição de amplitudes obtida:

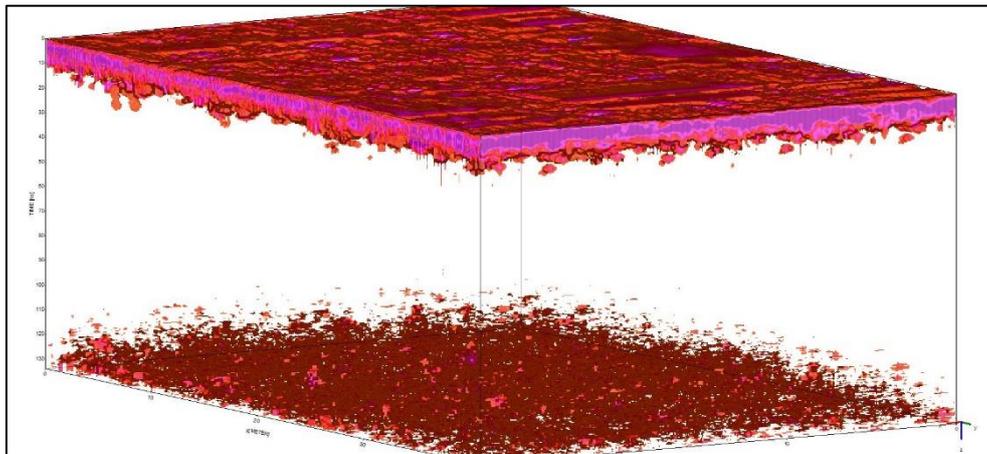


Figura 36 - Modelo (valores de amplitude  $\geq 3000$  *in threshold*)

Devido às limitações inerentes às capacidades de visualização de dados do ReflexW optou-se por utilizar o software de visualização de dados Voxler da Golden Software para uma manipulação mais flexível dos dados adquiridos com base do processamento inicial efetuado no software ProjectEKKO e exportando, em formato HDF.

Estes modelos renderam, devido à sua qualidade, permitiram uma interpretação mais completa, sendo possível visualizar várias estruturas. Nas duas figuras que se seguem, figuras 37 e 38, observa-se uma perspectiva genérica, favorável à visualização da distribuição de amplitudes dos modelos obtidos:

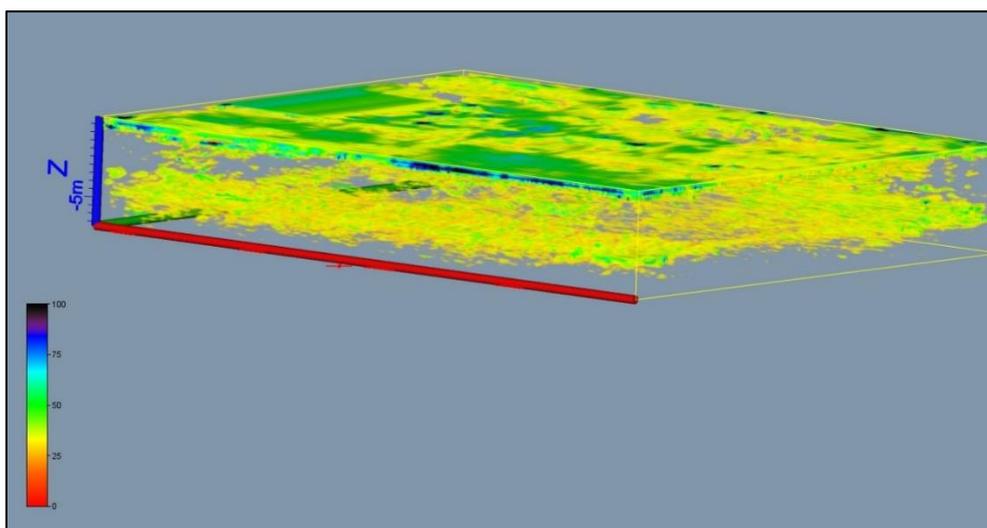


Figura 37 - Modelo de amplitudes normalizadas (0-100 valor de refletância relativa)

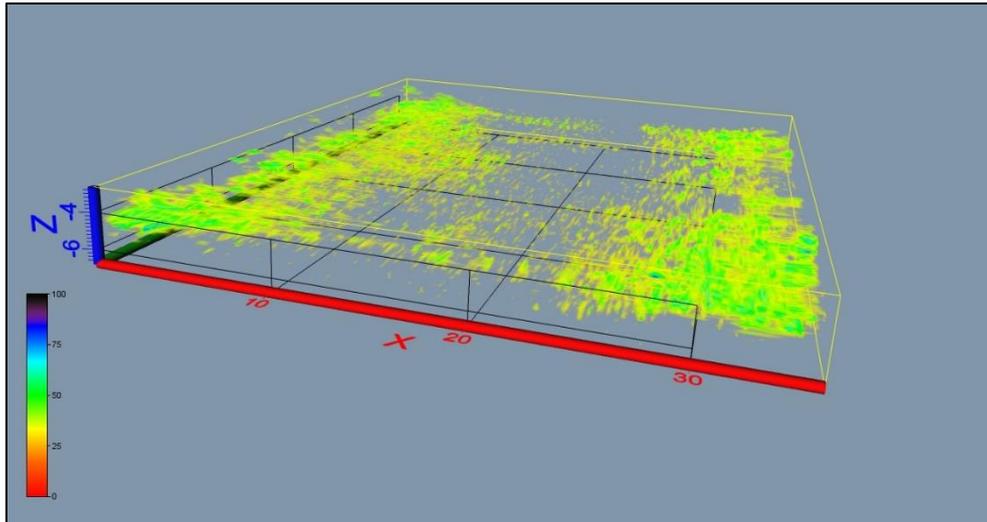


Figura 38 - Modelo de amplitudes normalizadas (2,4 a 6,8 m; @  $v=0,12$  m/ns)

Com estes modelos, usufruindo a maior versatilidade do software Voxler, foi possível obter a seguintes *timeslices* que estiveram na base da identificação de estruturas utilitárias mais superficiais (até cerca de 1 metro de profundidade), como tubagens usadas com condutas hidráulicas de baixo calibre ou passagem de cablagem para a instalação elétrica da infraestrutura na qual foi executado o levantamento. Apesar da estruturação geométrica da aquisição não ser favorável à sondagem ótima deste tipo de anomalias, foi possível a sua deteção e posicionamento.

As *timeslices* utilizadas para esta etapa, encontram-se representadas nas figuras 39 à 48:

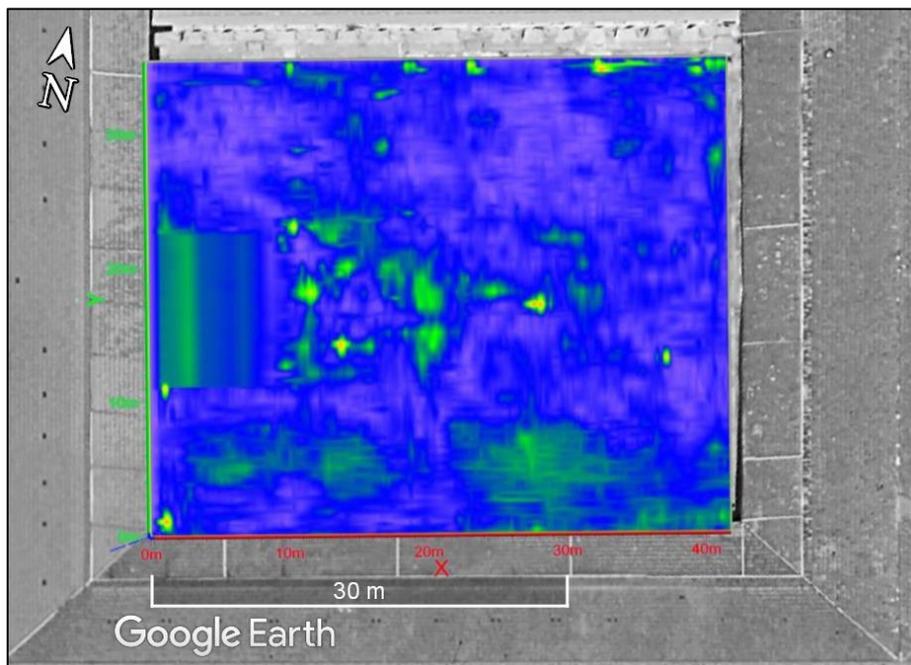


Figura 39 - Projeção da *timeslice* no Colégio das Artes ~0m @  $v=0,12$  m/ns

Na figura 39 é possível observar, entre outras, as anomalias de resposta radar originadas pelas caixas distribuídas pelo terreno sondado.

Estas caixas com tampas metálicas produzem fortes amplitudes e devido à condutividade destas tampas, geralmente ocorre também a inversão de fase do sinal.

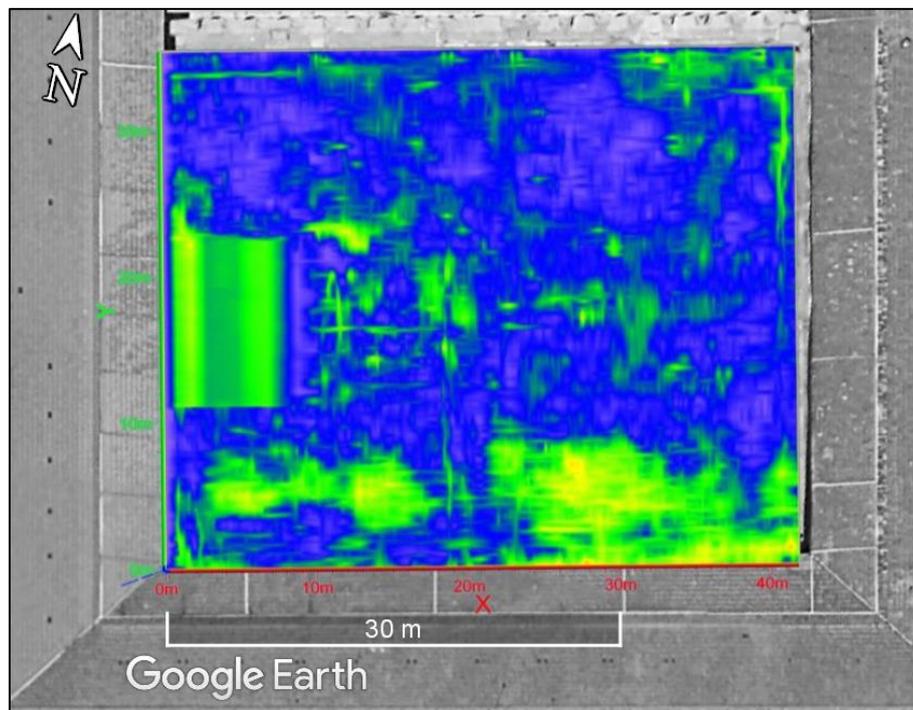


Figura 40 - Projeção da *timeslice* no Colégio das Artes  $\sim 0,1\text{m}$  @  $v=0,12\text{ m/ns}$

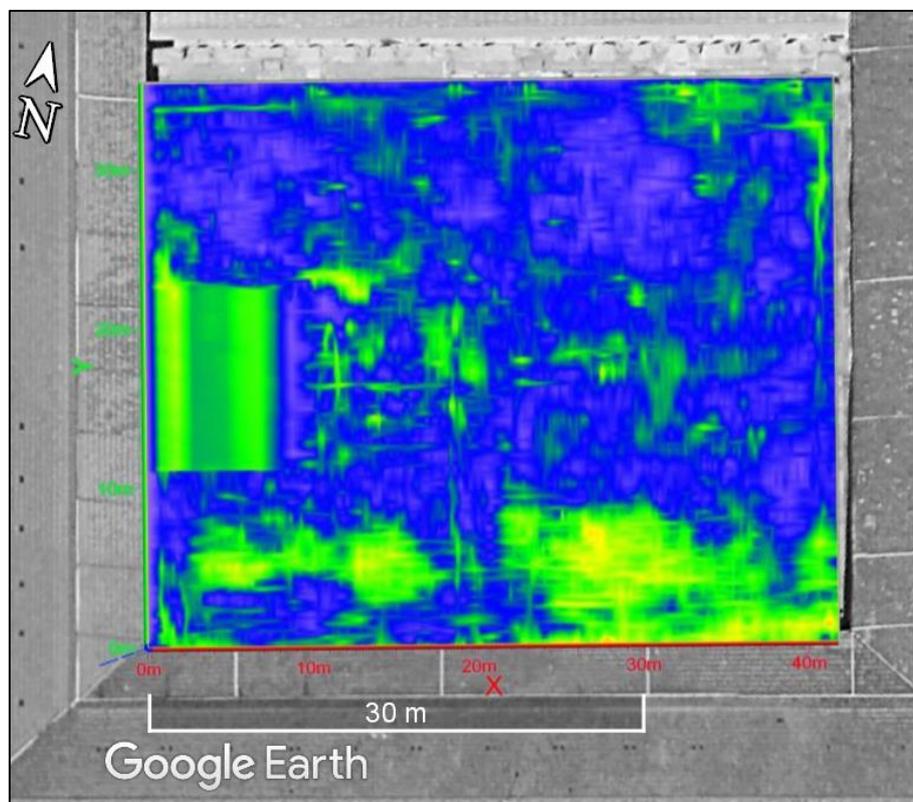


Figura 41 - Projeção da *timeslice* no Colégio das Artes  $\sim 0,2\text{m}$  @  $v=0,12\text{ m/ns}$

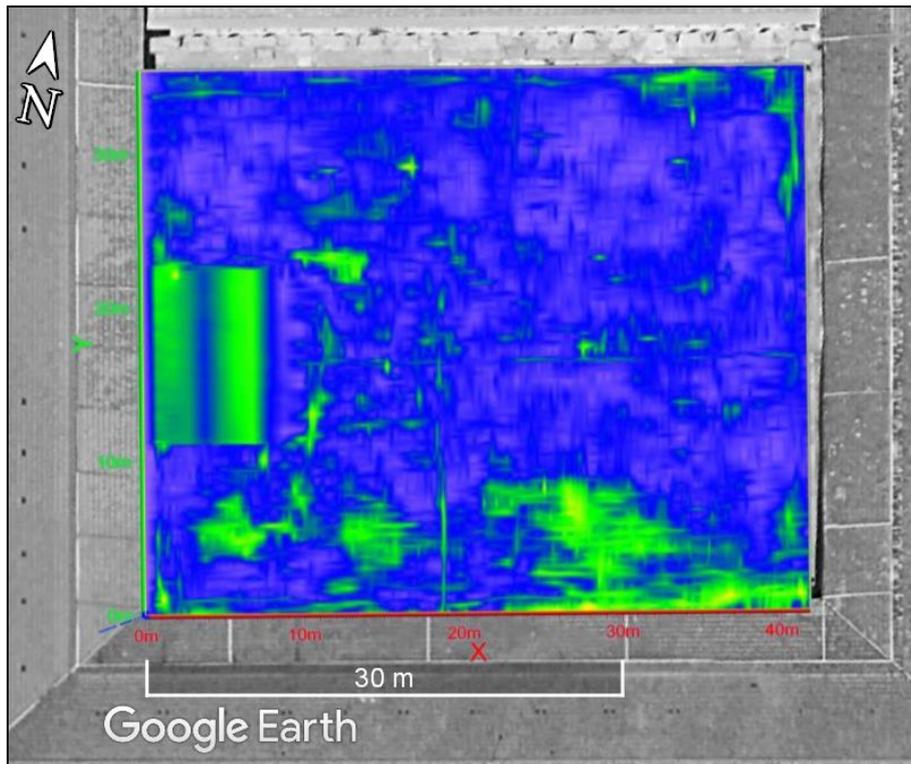


Figura 42 - Projeção da *timeslice* no Colégio das Artes  $\sim 0,3\text{m}$  @  $v=0,12$  m/ns

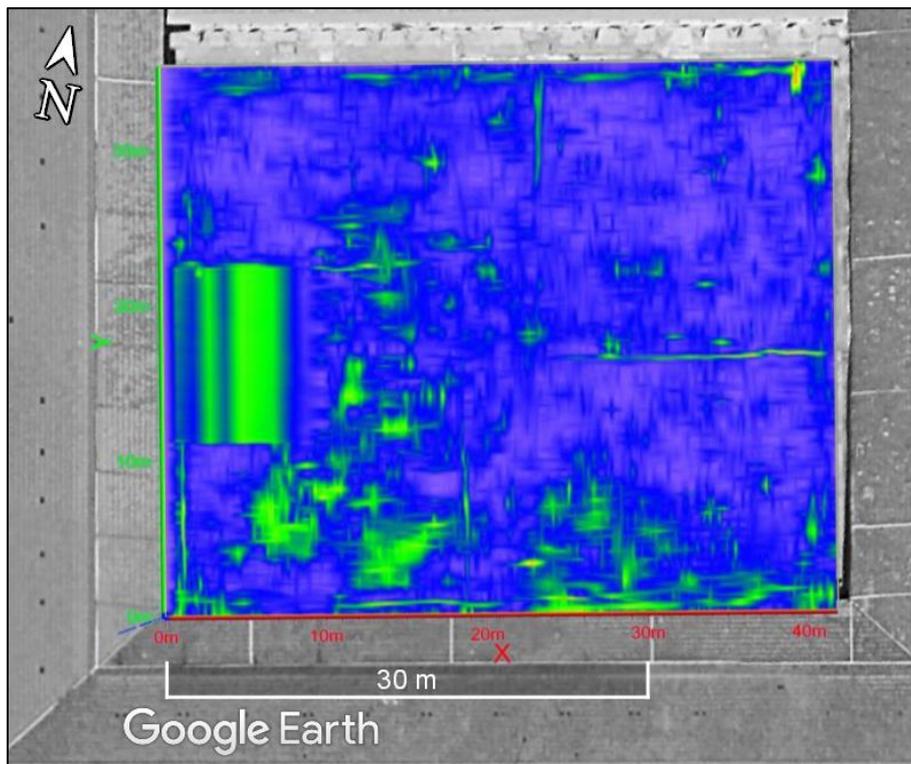


Figura 43 - Projeção da *timeslice* no Colégio das Artes  $\sim 0,4\text{m}$  @  $v=0,12$  m/ns

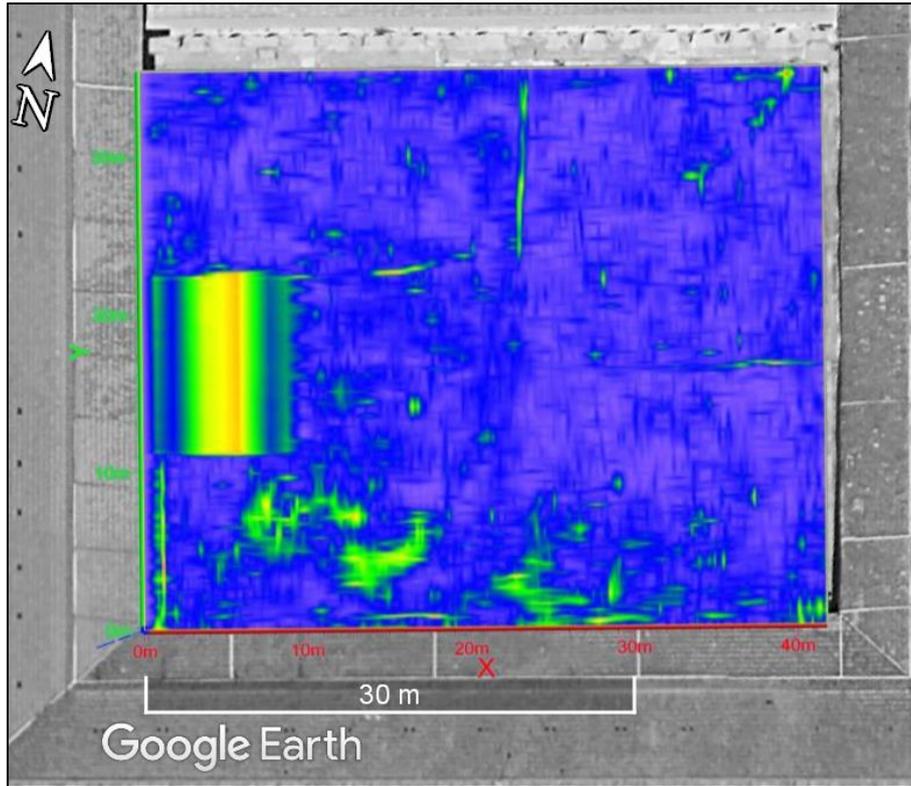


Figura 44 - Projeção da *timeslice* no Colégio das Artes ~0,5m @  $v=0,12$  m/ns

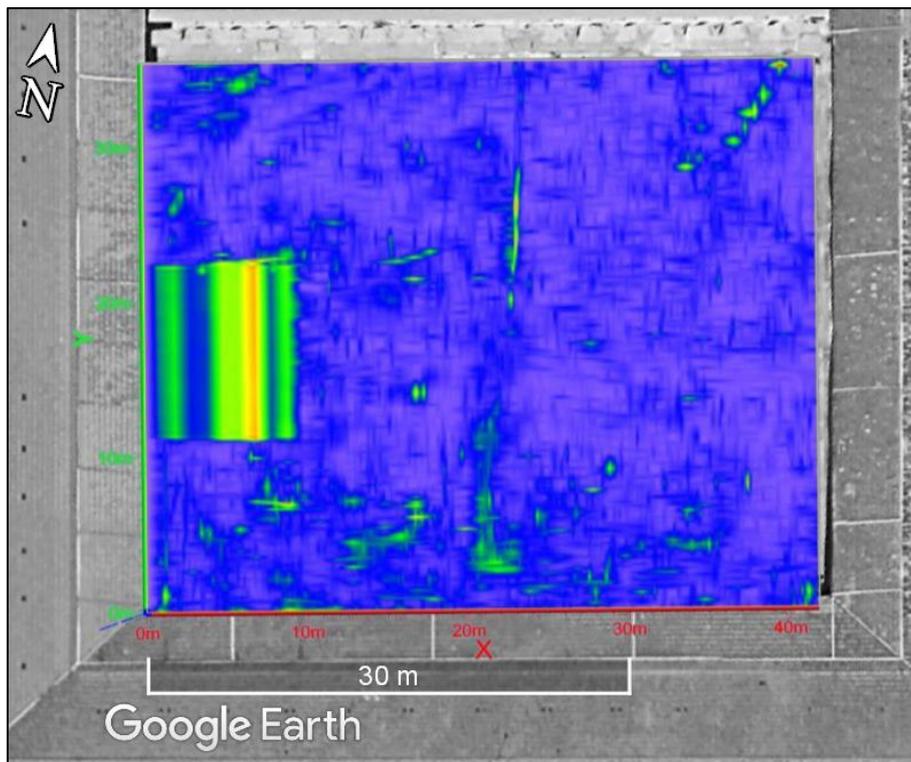


Figura 45 - Projeção da *timeslice* no Colégio das Artes ~0,6m @  $v=0,12$  m/ns

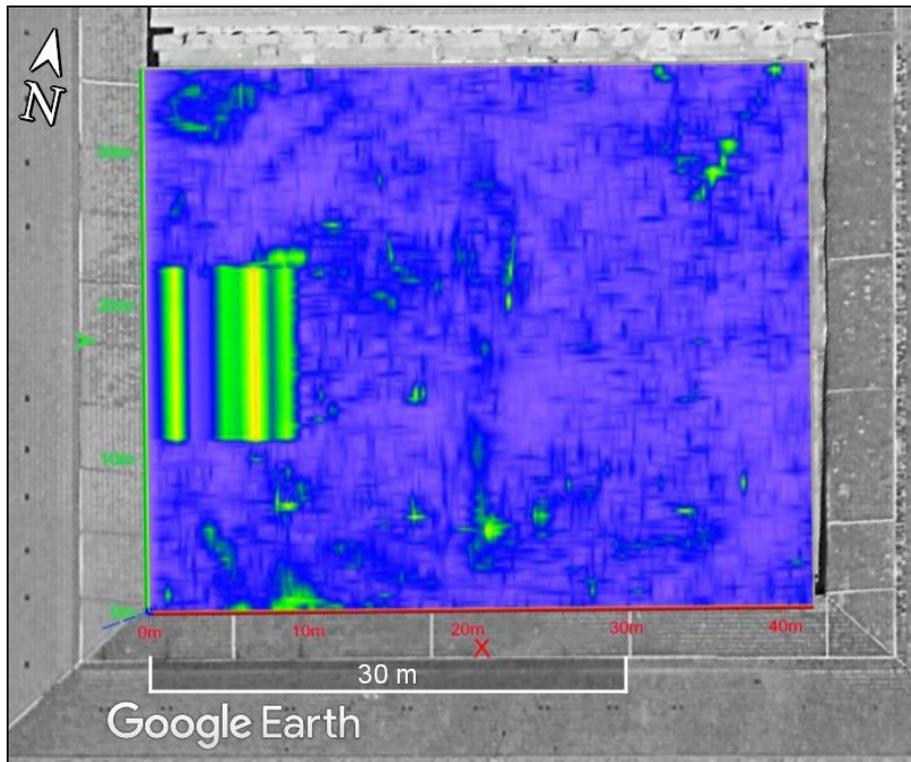


Figura 46 - Projeção da *timeslice* no Colégio das Artes ~0,7m @  $v=0,12$  m/ns

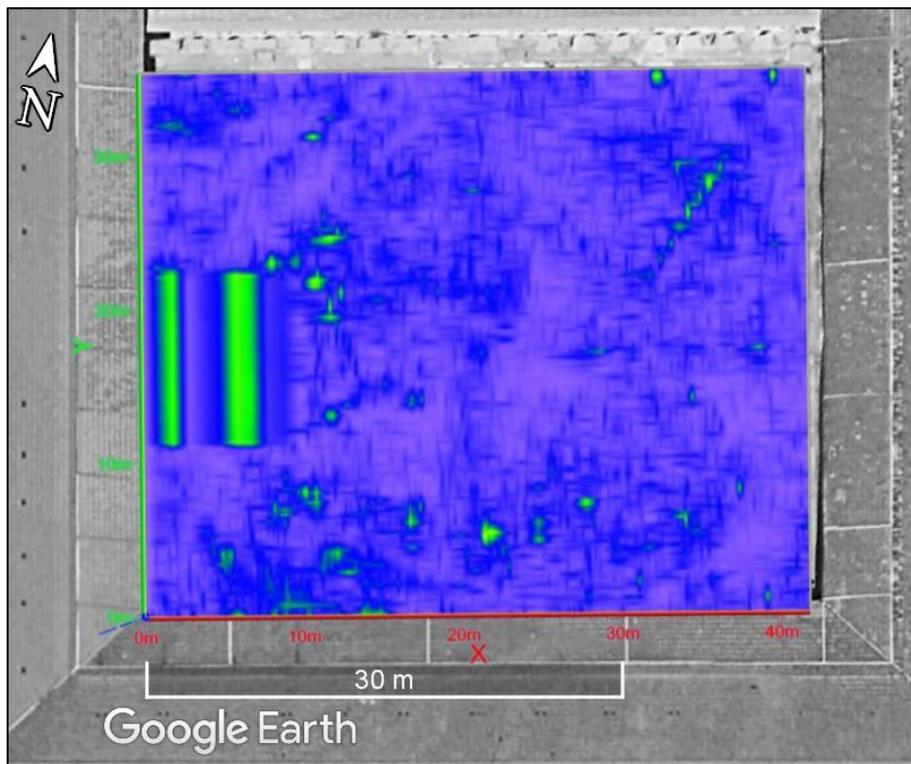


Figura 47 - Projeção da *timeslice* no Colégio das Artes ~0,8m @  $v=0,12$  m/ns

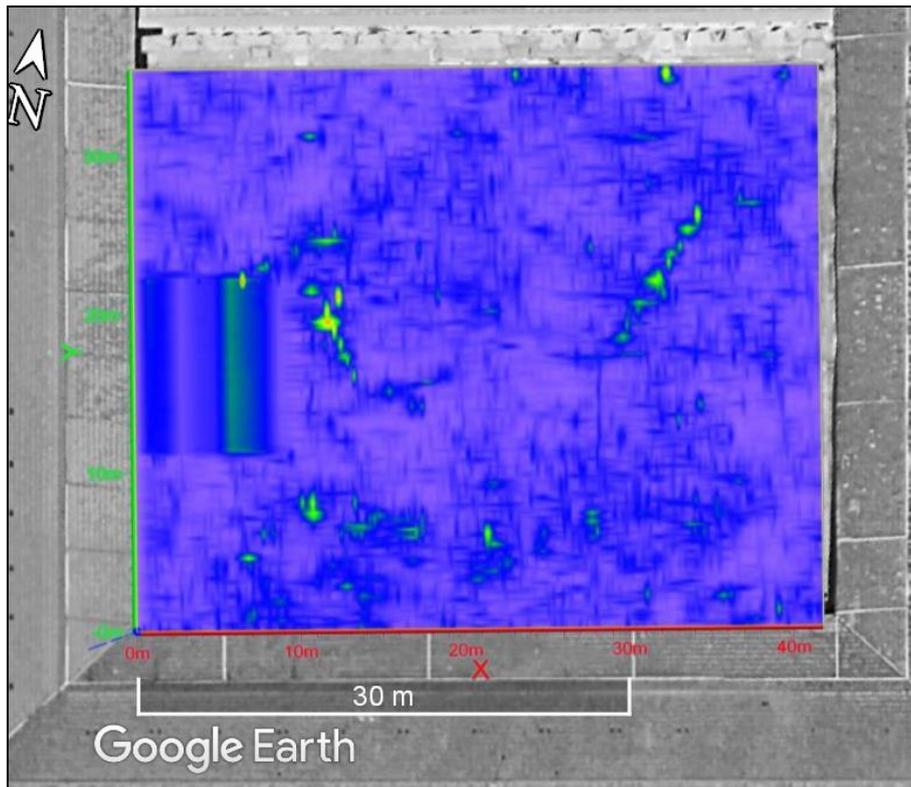


Figura 48 - Projeção da *timeslice* no Colégio das Artes  $\sim 0,9\text{m}$  @  $v=0,12\text{ m/ns}$

Ainda, de modo a facilitar a interpretação do modelo e a visualização de anomalias, foi estudado um modelo concebido através da renderização de um modelo de isosuperfícies de amplitude, sendo esse modelo representado nas figuras 49 e 50.

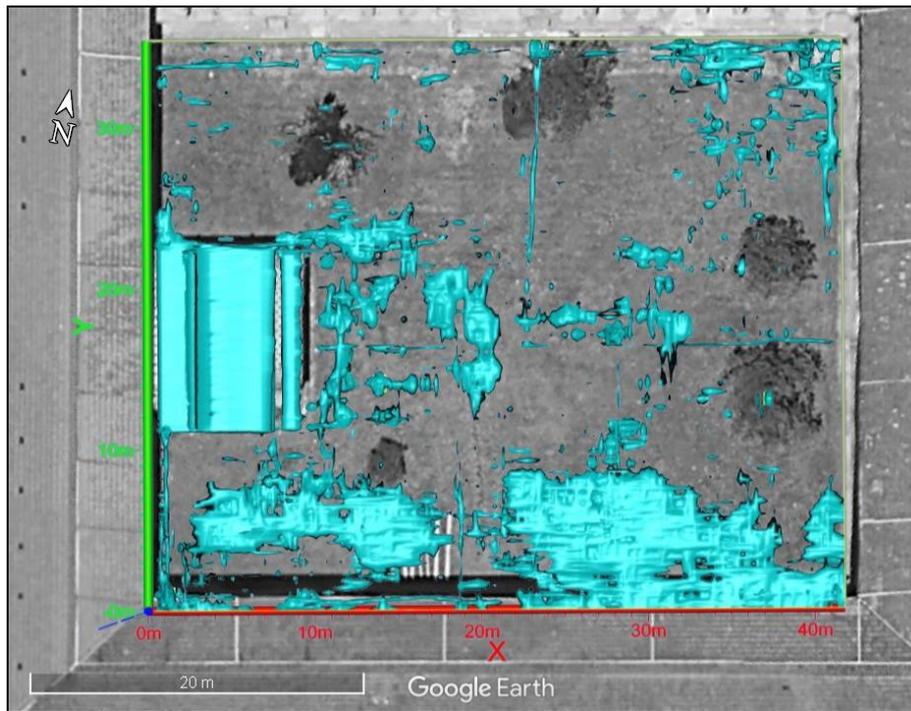


Figura 49 - Modelo de isosuperfícies inteiro (59,33 valor refletância relativa)

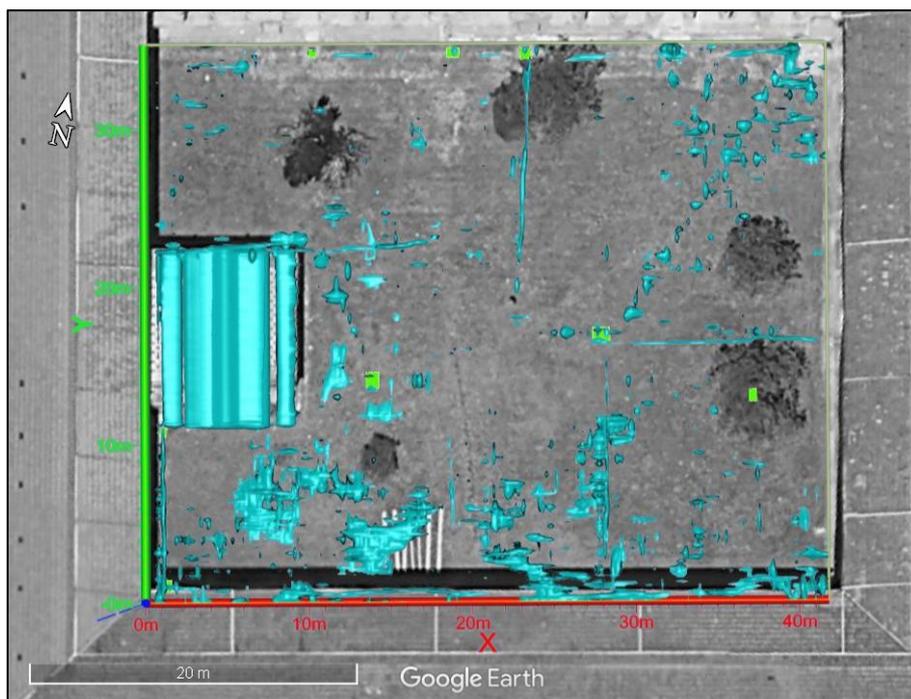


Figura 50 - Modelo de isosuperfícies (59,33 valor refletância relativa,  $P \leq -0,3m$ )

## Capítulo V – Discussão de resultados

---

Este capítulo visa expor o escrutínio e discussão efetuados com base nos resultados obtidos ao longo deste projeto e apresentados no capítulo anterior.

### 5.1 Colégio de Jesus

Antes da migração é possível visualizar com mais clareza as anomalias detetadas nos radargramas, os filtros de frequências mostraram-se particularmente eficientes ao limitarem ruídos com frequências coincidentes com ruído oriundo de dispositivos dependentes de radio tecnologias Bluetooth e GSM e semelhantes.

Da mesma forma, a fase de remoção do ruído de fundo também se provou importante na clarificação de anomalias mais pontuais e superficiais, visto que estas se encontravam, ocasionalmente, mas frequentemente camufladas por ruídos sistemáticos, sendo estes o alvo principal deste tipo de processamento.

A migração não rendeu resultados igualmente promissores nos perfis LCJ2 e LCJ3, devido à complexidade da estrutura, ausência de hipérboles e dificuldade na aproximação de velocidades.

No entanto, nos outros perfis, serviu inteiramente o seu propósito na tentativa da aproximação das anomalias à sua possível posição real no perfil.

No que diz respeito ao Colégio de Jesus, a questão colocada inquiria sobre a posição e condição das estruturas, caso esta fosse detetada.

Com base nos resultados obtidos, foi possível detetar não só uma, mas duas destas estruturas. Ambas apresentaram respostas radar semelhantes, pelo que se pode inferir que sejam similares, quanto à sua condição é difícil de inferir, contudo, podem-se tecer as seguintes considerações.

A deteção de respostas de refletores com amplitudes significativamente elevadas é um indício de que as estruturas detetadas sejam constituídas por um material com resposta eletromagnética forte, provavelmente alguma liga metálica ferrosa.

A adaptação de hipérboles nos perfis LCJ2, LCJ3 foi particularmente complexa, devido ao tipo de resposta radar provocada pela estrutura. A existência de reflexões oblíquas nas laterais da estrutura é indicativo de possíveis refletores verticais. A adaptação de hipérboles nestas condições torna-se complexa porque a geometria das reflexões não gera hipérboles fiáveis, rendendo velocidades estimadas demasiado elevadas sabotando parcialmente o processo de migração. Daí ser possível visualizar

hipérbolas investidas que constituem artefactos inevitavelmente introduzidos neste passo.

Ainda, a forte reflexão superficial que une os dois refletores laterais da estrutura hidráulica detetada indica também um refletor possivelmente constituído por alguma liga metálico-ferrosa, devido à elevada amplitude da anomalia. É de notar que a amplitude desta reflexão desencadeou o fenómeno de *ringing*, projetando reflexões sucessiva a maiores profundidades aparentes. Imediatamente após está janela no domínio temporal verifica-se alguma escassez de informação e também uma atenuação elevada do sinal.

Restando apenas algum ruído. Este contexto pode ser indicativo da perda e dispersão quase total da energia do sinal, ou a sua absorção e dissipação num material com propriedades dielétricas semelhantes às de solo saturado ou com elevados teores de água, ou água com sais dissolvidos. Um contexto compatível com a possível retenção de água no interior da cisterna.

Com base na análise efetuada às duas anomalias detetadas nas linhas LCJ2 e LCJ3 pode-se inferir que estas duas estruturas têm forma quadrada e estão possivelmente cheias com água ou algum material saturado de forma a que este registre velocidades do sinal bastante reduzidas.

Nas figuras 51 e 52 encontram-se descritas algumas medições efetuadas de modo a exemplificar como as mesmas foram feitas.

No entanto, de modo a garantir o máximo de precisão foram efetuadas leituras semelhantes em todas as linhas paralelas que registavam a continuidade destas anomalias, de seguida foi feita uma média dos valores posicionais, e consecutivamente uma análise da coerência de valores, permitindo interpretar que as hipotéticas estruturas estariam a ser intercetadas perpendicularmente. É relevante mencionar que este tipo de aproximação apenas é possível porque o levantamento de todos os perfis foi feito na mesmo sentido.

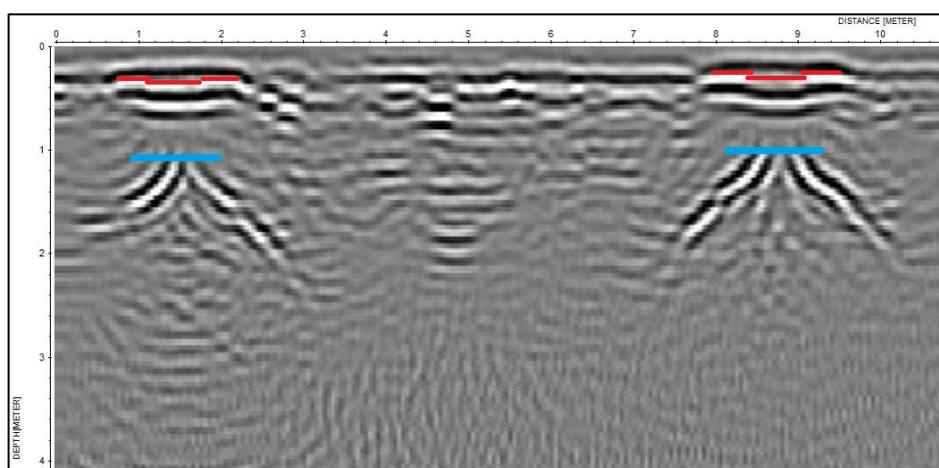


Figura 51 - Linha LCJ3, aproximação às medições efetuadas

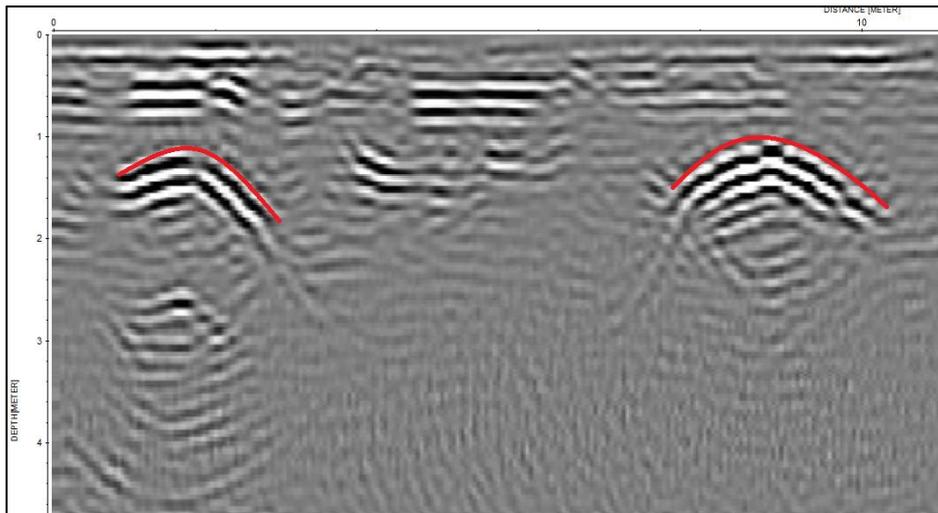


Figura 52 - LCJ4, aproximação às medições efetuadas

Estima-se que estas caixas tenham como dimensões aproximadamente 1,5m de comprimento horizontal, também é possível estimar que tenham aproximadamente a mesma dimensão vertical, contudo esta é algo especulativa pois devido à existência de uma parte superior metálica grande parte da energia é refletida aí, e o conteúdo da caixa atenua o resto do sinal, restando apenas algum ruído, nomeadamente *ringing* produzido pela reflexão contínua entre a tampa e a superfície.

Após várias tentativas de modelar a estrutura encontradas nas linhas LCJ2, LCJ3 e LCJ4, consegue-se construir o modelo que rendeu uma resposta radar mais semelhante à resposta obtida do solo durante o estudo, foi simulado num ambiente de escala 1:2, ou seja, 10 metros de comprimento, e 120 nanossegundos de simulação de profundidade, e no modelo contemplou-se apenas uma estrutura, sendo o objetivo a obtenção de uma anomalia da mesma.

O modelo obtido foi o que pode ser considerado na figura 53.

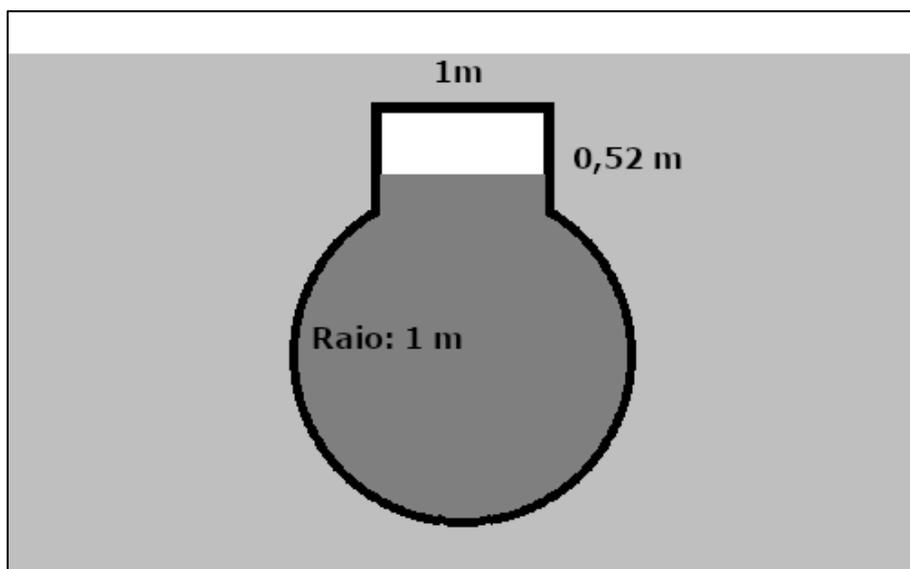


Figura 53 - Modelo destinado à simulação FDTD

Contudo, não se deve considerar este modelo como fonte de verdade, apenas uma aproximação de um hipotético refletor que possa estar na origem das anomalias registadas no terreno. Devido à reflexão de uma percentagem elevada da energia do sinal, é complexo inferir a possível extensão vertical da estrutura. O cálculo das propriedades dielétricas dos materiais, que revelam sempre desvios significativos relativamente às propriedades reais dos materiais no terreno, onde características como variabilidade da porosidade e saturação em água conferem variações significativas no solo que aumentam muito a complexidade da construção de um modelo mais fiel.

A técnica de modelação utilizada foi FDTD, que apesar de não estar prevista na definição inicial das metodologias às quais recorrer para o estudo, se mostrou útil nesta etapa para auxiliar na interpretação dos dados.

Para a aplicação desta tecnologia recorreu-se à API e ferramentas incluídas do software open-source de modelação FDTD gprMax.

Mesmo tendo se optado por um modelo de meia dimensão, representando apenas uma parcialidade do contexto real no qual foi feito o levantamento dos dados, o poder de computação necessário para a simulação FDTD de um modelo destas dimensões é relativamente elevado, pelo que, mesmo com os melhores processadores convencionais do mercado de 2020, os tempos de simulação seriam impraticáveis. De modo a ultrapassar esta circunstância, foi usada a tecnologia de computação CUDA da Nvidia, recorrendo ao poder de processamento em paralelo numa placa gráfica da GTX série 10, reduzido os tempos de computação de aproximadamente dois dias para apenas 7 minutos.

Por fim, o resultado da simulação do modelo anteriormente apresentado encontra-se representado na figura 54.

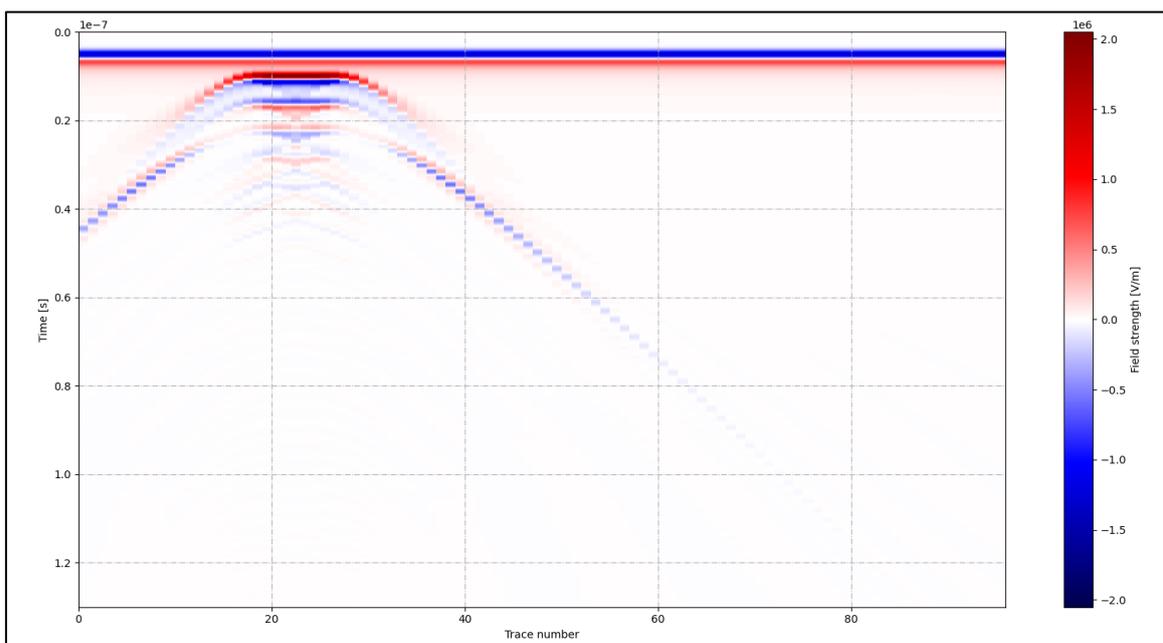


Figura 54 - Resultado da simulação FDTD

Esta simulação foi efetuada numa configuração em que foram simulados 96 traços, com um passo de 0,1 metros, perfazendo um total de quase 10 metros de distância simulada.

Na avaliação do modelo rendido é conveniente ter em conta que as principais diferenças se devem ao facto desta simulação ter sido levada a cabo num ambiente sem percas (*loss/less*) o que faz com que sejam detetáveis algumas feições que num contexto real, por mais próximo que fosse ao modelo usado, não seriam visualizadas da mesma forma.

Assim, assumindo a forma do modelo que esteve na origem da resposta radar obtida com a simulação representada na figura anterior e com base nos dados extraídos, predominantemente, dos modelos LCJ2, LCJ3, LCJ4, LCJ5 e LCJ6, pode-se concluir que as estruturas visualizadas na figura do modelo poderão ter aproximadamente as seguintes dimensões (esquemáticas nas figuras 55 e 56), com a sua cota superior a uma profundidade de cerca de 0,4 m – 0,5 m de profundidade (tendo em consideração que não houve correção topográfica devido à área de aquisição ser perfeitamente horizontal), estimadas com base nos valores médios visualizados ao longos dos vários perfis que intercetavam as estruturas.

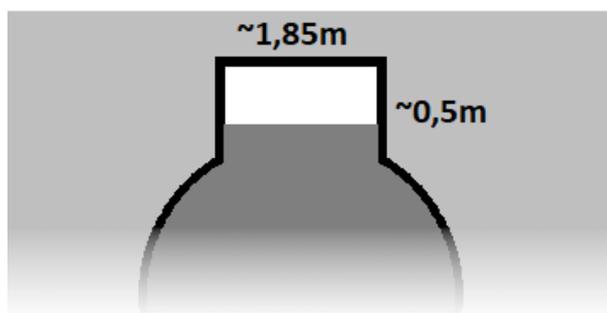


Figura 55 - Modelo esquemático da cisterna a norte

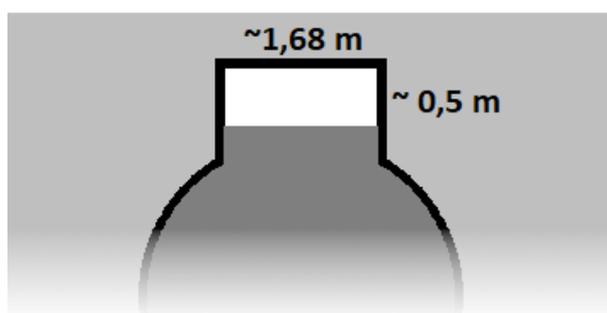


Figura 56 - Modelo esquemático da cisterna a sul

Quando projetados os resultados obtidos no mapa de aquisições obtém-se o esquema de seguida representado, onde se verifica a forma como estas estruturas se posicionam no subsolo. Contudo, a informação obtida não é suficiente para obter dimensões conclusivas acerca da extensão espacial das estruturas detetadas, onde as estruturas marcadas com a letra C na figura representam a reflexão cilíndrica mais profunda, cujas medidas foram obtidas a partir da migração FDTD da reflexão com base na adaptação de hipérbolas. E as estruturas marcadas com a letra S representam a reflexão horizontal de grande amplitude na parte superior destas estruturas.

Na figura 57, os números 1 e 2 identificam as estruturas visualizadas a Sul e a Norte, respetivamente.

Assim, a figura 57 é uma representação 2D de um mapa de interceções entre as anomalias relativas às estruturas interpretadas em cada linha de aquisição.

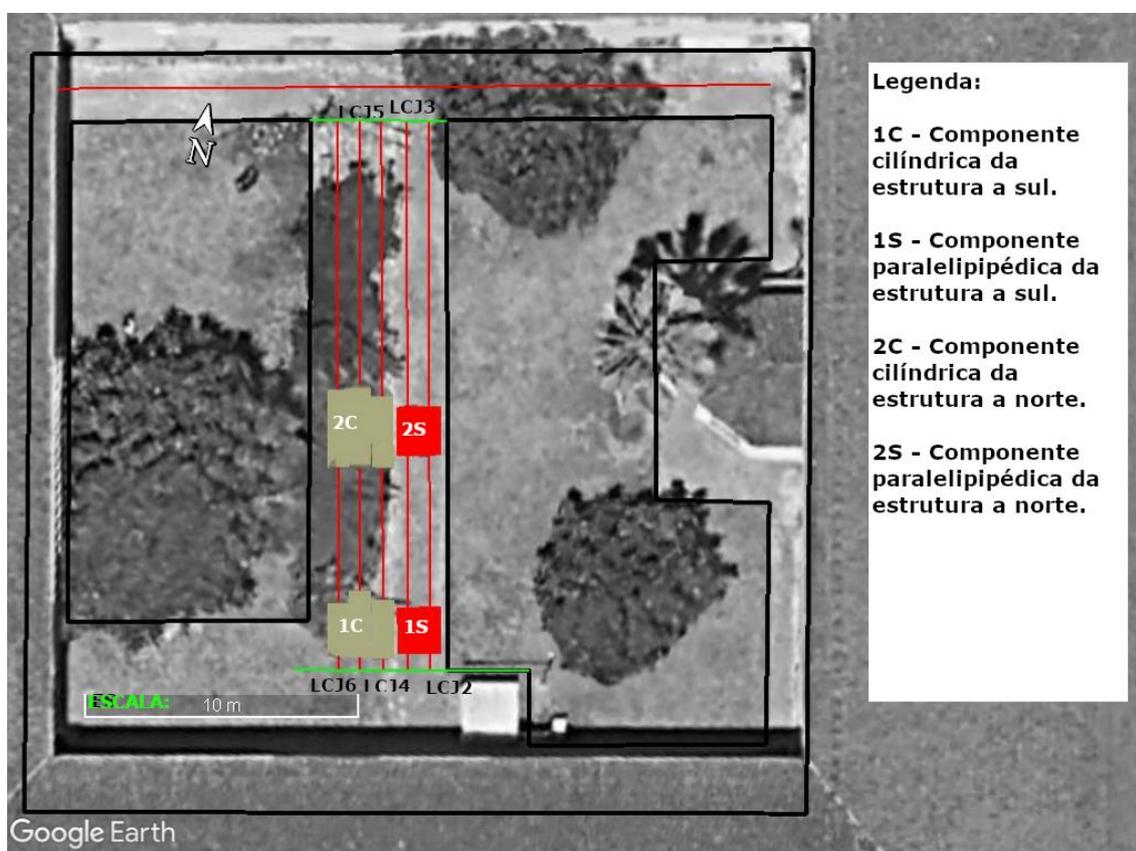


Figura 57 - Mapa de interceção de anomalias

O diâmetro da estrutura cilíndrica da parte inferior da cisterna é uma medição de aferição dúbia, pois a sua forma aparente pode variar conforme da velocidade do sinal no meio incluso, contudo estimou-se que esta, para uma velocidade entre os 0,11 m/ns e 0,12 m/ns deverá ter um raio de aproximadamente 1,08 – 1,42 metros.

Por fim, no que toca ao estado destas estruturas, nomeadamente o seu interior, a forte refletividade das suas paredes não deixa escapar praticamente informação

alguma sobre a pouca energia que poderá ter penetrado as paredes e se propagado no seu interior.

O modelo construído para a simulação FDTD foi construído com uma estrutura cujo interior renderia velocidades mais lentas e com condutividade mais elevada, rendendo um comportamento semelhante ao de águas ricas em iões (após circulação no solo) ou areias saturadas.

A semelhança entre o resultado da simulação FDTD e a resposta radar do registada no terreno aliada à falta de informação sobre propagação de sinal no interior da estrutura apontam para um hipotético enchimento com material com características que rendam velocidades do sinal mais lentas e elevada dissipação da energia do mesmo.

Estas características são coerentes com vários tipos de materiais quando saturados em água, ou até mesmo água quando esta apresenta um conteúdo significativo de iões dissolvidos.

Contudo, apesar de todas as informações obtidas apontarem para que esta estrutura apresente um conteúdo de água acima do meio envolvente não possível tecer esta conclusão, principalmente devido ao efeito de blindagem que a própria estrutura confere ao seu interior contra o sinal eletromagnético empregue por este método.

## 5.2 Colégio da Artes

Relativamente ao levantamento efetuado no Colégio das Artes foi possível identificar várias estruturas como caixas, tubagens destinadas à condução de cablagem de instalação elétrica e, também, condutas hidráulicas de dimensão mais reduzida, no entanto, os dados recolhidos não permitiram inferir a existência de qualquer estrutura análoga à estrutura hidráulica de origem antrópica datada da ocupação Jesuíta deste complexo colegial, que se encontra expostas na lateral norte do edifício do Laboratório Chimico do complexo do Colégio de Jesus.

Procedendo à identificação das estruturas visualizadas no subsolo do claustro do Colégio das Artes, devido à densidade de anomalias lineares, resultantes predominantemente do espaçamento entre perfis, demasiado elevado para este propósito, foi necessário efetuar o levantamento destas estruturas começando por construir um catálogo genérico das anomalias lineares visualizadas, agrupando as mesmas pelas suas respetivas profundidades aparentes, resultando no seguinte esquema apresentado na figura 58:

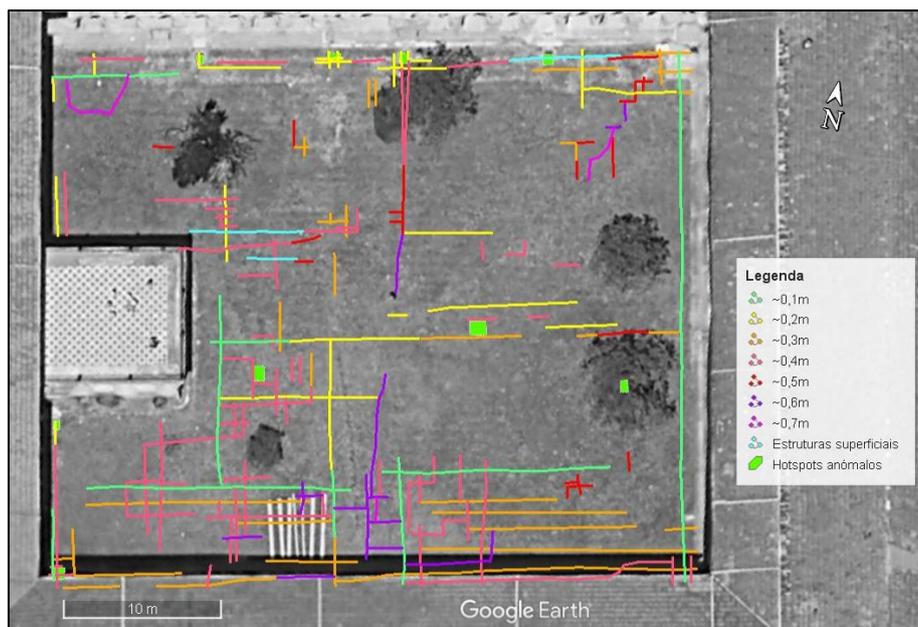


Figura 58 - Esquemática genérica de anomalias lineares

Após este passo, foi feita uma análise de modo a averiguar a continuidade, extensão e dimensão das anomalias detetadas. Filtrando as anomalias que se mostraram pouco fundamentadas pelas suas características e coerência, mantendo assim apenas as que revelaram uma expressão maior e mais concreta, estas estruturas encontram-se delineadas no esquema representado na figura 59.

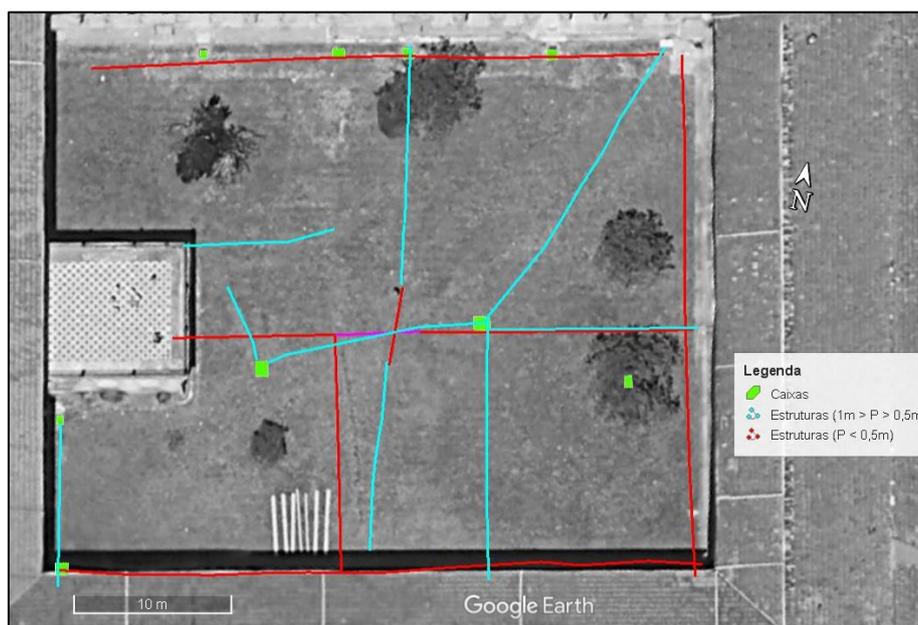


Figura 59 - Marcação das estruturas lineares detetadas no Colégio das Artes

Ao observar a figura 59, é possível interpretar a ligação entre a maior parte destas estruturas e as caixas e estruturas observáveis à superfície.

Foi também pertinente efetuar a divisão destas anomalias em dois grupos, diferenciados pela profundidade geral à qual estas estruturas foram detetadas. Sendo o primeiro grupo (a vermelho) de estruturas até 0,5 metros de profundidade, e o segundo (a azul) entre os 0,5 e 1 metro de profundidade.

A ausência de vestígios na resposta radar deste tipo de estrutura não exclui a possibilidade da sua existência, apenas a sua presença às profundidades que se provaram de acessibilidade efetiva através do emprego de georadar, que neste estudo rondaram os 4 metros de profundidade.

Avaliou-se que esta limitação se deve principalmente ao tipo de solo sondado, predominantemente composto por dolomias, calcários dolomíticos e algumas ocorrências margosas.

Este tipo de solos é explicitamente mais opaco a sinais eletromagnéticos, limitando significativamente o emprego de georadar para sondagem de profundidades mais elevadas.

## Capítulo VI – Considerações finais

---

### 6.1 Conclusões

Os trabalhos levados a cabo no decorrer deste projeto foram conclusivos, contudo algumas missões poderiam ter sido contempladas de modo a melhorar a solidez dos dados recolhidos bem como a qualidade das conclusões que se poderiam fundamentar com base nestes dados.

Em resumo, no Colégio das Artes foi possível definir que até uma profundidade de aproximadamente 5 metros não há traços passíveis de serem associados com alguma estrutura hidráulica de origem antrópica de grandes dimensões.

No entanto, foi possível identificar, catalogar e posicionar um número considerável de estruturas de dimensões mais reduzidas. Apesar do espaçamento entre perfis não ser o ideal para este tipo de aplicação, a interpolação de dados não foi despropositada e permitiu em algumas circunstâncias seguir a continuidade de certas anomalias culminando na delineação total ou quase total das mesmas.

Já no Colégio de Jesus foi possível identificar duas cisternas mesmo no centro do pátio noroeste do edifício. Foi também, possível inferir as dimensões aproximadas destas estruturas. Contudo, a condição das mesmas, bem como a sua continuidade vertical para profundidades mais elevadas não foram determinadas com precisão, com base nos dados recolhidos, tecer conclusões sobre estas características seria especulativo, devido à elevada refletividade das anomalias geradas neste contexto pouca energia ficou disponível para sondar o interior das estruturas, e mesmo grande parte da energia que penetra a estrutura dificilmente seria suficiente para se propagar de volta à superfície, deixando assim um vácuo de informação neste contexto.

## 6.2 Futuro da Arte

Em parte, o futuro da arte passa pela automação parcial, e ultimamente, total da aquisição e tratamento de dados de georadar.

A aplicação de *machine learning* a alguns procedimentos do método, nomeadamente parte do processamento com ênfase na detecção de anomalias, poderá ser um caminho promissor para a automação e melhoria da precisão da detecção de anomalias de georadar. Um trabalho realizado por Szymczyk (2015) protagonizou este tipo de aplicação com resultados auspiciosos, onde o objetivo foi construir um algoritmo capaz de analisar dados de georadar e detetar a presença de vazios.

Devido à complexidade dos dados de GPR analisados nesta experiência, foi entendido que analisá-los todos diretamente não seria tecnicamente concretizável, devido à complexidade recomendada da rede neural não facilitar o tempo de treino da mesma.

Então, de modo a simplificar os dados e consequentemente otimizar o processo, cada traço de georadar foi aproximado a uma função polinomial, onde se verificou que o grau polinomial ideal seria  $N = 20$ , se  $N < 20$ , então a função não se aproximaria o suficiente ao traço recolhido, e características importantes do mesmo seriam ignoradas. Por outro lado, se  $N > 20$ , haveria coeficientes da equação a igualar zero, não tendo utilidade prática e complicando o processo desnecessariamente.

De forma resumida, e apesar do algoritmo não ter a capacidade de detetar a profundidade hipotética da anomalia correspondente a um vazio, os resultados foram muito favoráveis ao objetivo, sendo que, para traços onde se sabia não haver um vazio ( $n^{\circ}27$ ), o algoritmo determinou uma probabilidade de 4,655%, e para um traço onde se sabia existir um vazio ( $n^{\circ}330$ ), o algoritmo produziu uma probabilidade de 94,32% (Szymczyk, 2015).

Este trabalho demonstra que existe lugar para a evolução da tecnologia no sentido descrito. Efetivamente, este é, neste momento, o caminho mais rápido para a redução de custos e aumento da eficiência e das capacidades técnicas da prospeção do subsolo com radar.

Em Sakaguchi, et al. (2013) encontra-se descrito um procedimento de estudo onde é implementada categorização de imagens com *machine learning* para identificar objetos enterrados com características semelhantes às de minas explosivas. O trabalho de Sakaguchi, et al. (2013) revelou resultados que, apesar de demonstrarem a potencialidade do método, também expõem as deficiências do mesmo. De acordo com o autor, este método assenta na identificação de qualidades de uma imagem que contenha um alvo positivo, assim sendo, tem um bom desempenho na identificação de reproduções de uma instância, contudo não é tão promissor no que toca a identificar um tipo em ambientes diferentes. A evolução das tecnologias de *computer vision* e de

métodos de preparação de conjuntos de dados usados para treinar redes neurais aliados ao uso de algoritmos beneficiadores dos dados de distribuição espacial da anomalia demonstram um elevado potencial para melhorar a performance de métodos que, tal como este, se baseiem em *computer vision* para a finalidade descrita neste estudo.

Num contexto mais generalista e na consideração que a maioria dos alvos do GPR se manifestam através de diferentes iterações de hipérboles, Lee & Mokji (2014) desenvolveram um estudo que visou a deteção de hipérboles através do treino de uma SVM para a deteção destes alvos usando os seus histogramas de gradientes orientados como descritores.

O propósito do desenvolvimento da tecnologia neste sentido prende-se em larga escala com a necessidade de automação na deteção de alvos devido ao elevado volume de dados recolhidos em campanhas de aquisição GPR. O método experimentado pelo autor revelou uma taxa de sucesso na deteção de hipérboles de 93,75% (Lee & Mokji, 2014).

Em 2018, Giannakis, I., Giannopoulos, A. and Warren, C., sendo Giannopoulos o criador do software de modelação FDTD gprMax, publicaram um estudo sobre o uso de *machine learning* para criar sistemas de simulação mais expeditos. O resultado foi a possibilidade de ultrapassar o método convencional de modelação FDTD, extremamente intensivo em termos de requisitos de poder de computação.

Num estudo de Lei, W. et al. (2019) provou ser possível automatizar um passo importante e demorado da interpretação de varreduras B de georadar, a adaptação de hipérboles. Segundo o autor, utilizado uma *Faster R-CNN* para propor áreas de análise, uma tecnologia de vanguarda no campo da deteção de objetos, submetendo a área, após tratamento, a um algoritmo DCSE (*double cluster seeking estimate*), foi possível obter uma deteção precisa e eficiente de anomalias no subsolo e a conseguinte adaptação da hipérbole.

Numa tentativa constante de melhorar os rácios de deteções erróneas de anomalias, por parte de algoritmos de inteligência artificial a atuar com base em dados de georadar, Kim, N., Kim, S., Na, & Lee (2019) publicaram um artigo no qual, à semelhança dos esforços até então implementados nas metodologias de interpretação convencionalmente adotadas na geofísica, se usufrui de dados tridimensionais para obter melhores resultados.

O método proposto alimenta algoritmos de classificação baseados em *deep learning* com dados triplanares, ou seja, varreduras radar B, C e D. Mais uma vez, o algoritmo de classificação é contruído tendo uma base um CNN.

Por fim, os autores deste estudo concluem que, tal como o que acontece na interpretação convencional levada a cabo por técnicos treinados, esta metodologia

revelou uma melhoria muito significativa relativamente à aplicação de CNN restrita a varreduras B, reduzido o número de deteções erróneas.

Um estudo de Ozkaya, et al. (2020) apresenta uma experiência inovadora no método de aplicar *deep learning* à interpretação de varreduras B de georadar.

Este estudo em específico propõe, em associação às redes neurais convolucionais, a utilização de uma máquina de vetores de suporte lineares para auxiliar o processo de classificação, de acordo com o conceito de CSVM (*convolutional support vector machine*).

De acordo com o autor, após o treino da rede neural com radargramas reais e outros resultante de simulações, o algoritmo conseguiu identificar alvos, a sua forma e localização, com uma superioridade observável no que toca à performance, requerendo um poder computacional significativamente menor.

Noutro estudo sobre a aplicação de redes neurais e uma SVM para a deteção de estruturas em radargramas, Smitha & Singh (2020) expõem esta ventura no seu artigo onde comparam os resultados obtidos através de ambos os métodos.

De acordo com estes autores, as redes neurais rendem melhor precisão nos resultados em cerca de 85% a 90% quando testadas em dados de treino, nos testes em dados nunca antes submetidos a análise por ambos os algoritmos, 20 casos, a rede neural também se mostrou 15% a 20% mais precisa do que a SVM.

## 6.3 Considerações para trabalhos futuros

De modo a melhorar a qualidade das informações que foi possível recolher sobre as características e estado destas estruturas seria benéfico para o estudo, em trabalhos futuros, recorrer à aquisição longitudinal, de este para oeste e vice-versa, de forma a poder obter uma estimativa da extensão espacial destas estruturas, visto que foram apenas intercetadas uma área reduzida.

Ainda, com o objetivo de completar este estudo, à semelhança do que foi feito por Giannakis (2018) aliando a capacidade de reconhecimento e classificação de padrões das várias tecnologias do domínio de *machine learning* à construção de modelos e consecutiva execução de simulações FDTD de modo a ser possível obter um modelo o mais completo e semelhante possível, rendendo no passo da simulação uma resposta radar semelhante à encontrada no terreno.

Já no Colégio da Artes, seria benéfico para o estudo a replicação das metodologias pelas quais se guiaram os trabalhos levados a cabo neste estudo, mas

com uma antena de 50 MHz. Com o objetivo de sondar o subsolo a profundidades mais elevadas.

No que diz respeito aos dados recolhidos no Colégio da Artes, seria uma melhoria na etapa de processamento a aplicação de *computer vision* à deteção automática de hipérboles. A capacidade deste procedimento, especialmente quando se tratam elevadas quantidade de dados, já foi documentada nos trabalhos de Lei, W. et al. (2019), este procedimento permitiria a obtenção de um catálogo de hipérboles de forma mais eficiente e expedita e assim, um modelo de velocidades mais robusto e completo.

Por fim, sendo que o estudo no Colégio da Artes rende um modelo tridimensional da resposta radar do subsolo, se usada uma antena de frequências mais reduzidas para alcançar profundidades mais elevadas, a resolução das feições detetadas também será justificadamente pior. Pelo que, nesta situação, tal como descrito no por Kim, N., Kim, S., Na, & Lee (2019), seria possível usufruir do incremento significativo da coerência e qualidade de dados obtidos em aquisições tridimensionais para a aplicação de algoritmos de *deep-learning* para o auxílio á interpretação do modelo obtido.

## Capítulo VII – Bibliografía

---

- Annan, A. P., Davis, J. L., & Gendzwill, D. (1988). *Radar sounding in potash mines, Saskatchewan, Canada. Geophysics*, 53(12), 1556-1564.
- Annan, A. P. (2002). GPR—History, trends, and future developments. *Subsurface sensing technologies and applications*, 3(4), 253-270.
- Annan, A. P. (2009). *Electromagnetic principles of ground penetrating radar (Vol. 1, pp. 1-37). chapter.*
- Chen, C. S., & Jeng, Y. (2016). GPR investigation of the near-surface geology in a geothermal river valley using contemporary data decomposition techniques with forward simulation modeling. *Geothermics*, 64, 439-454.
- Conyers, L. B. (2009). Ground-penetrating radar for landscape archaeology: method and applications. *Seeing the Unseen. Geophysics and Landscape Archaeology*, 245-255.
- Conyers, L. B., & Goodman, D. (1997). Ground-penetrating radar (pp. 149-194). *An Introduction for Archaeologist: AltaMira Press.*
- Cook, J. C. (1975). Radar transparencies of mine and tunnel rocks. *Geophysics*, 40(5), 865-885.
- Dal Bo, I., Klotzsche, A., Schaller, M., Ehlers, T. A., Kaufmann, M. S., Espoz, J. P. F., & van der Kruk, J. (2019). Geophysical imaging of regolith in landscapes along a climate and vegetation gradient in the Chilean coastal cordillera. *Catena*, 180, 146-159.
- Daniels, D. J. (2005). Ground penetrating radar. *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering.*
- Dojack, L. (2012). *Ground penetrating radar theory, data collection, processing, and interpretation: a guide for archaeologists. Doctoral dissertation, University of British Columbia.*
- Elsden, W. (1772). *Plantado Real Collegio das Artes da Universidade de Coimbra.*
- El-Said, M. A. H. (1956). Geophysical prospection of underground water in the desert by means of electromagnetic interference fringes. *Proceedings of the IRE*, 44(1), 24-30.

- Fisher, E., McMechan, G. A., & Annan, A. P. (1992). Acquisition and processing of wide-aperture ground-penetrating radar data. *Geophysics*, 57(3), 495-504.
- Gerlitz, K., Knoll, M. D., Cross, G. M., Luzitano, R. D., & Knight, R. (1993). Processing ground penetrating radar data to improve resolution of near-surface targets. In 6th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems.
- Giannakis, I., Giannopoulos, A., & Warren, C. (2018). A machine learning approach for simulating ground penetrating radar. In *2018 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)* (pp. 1-4). IEEE.
- Goodman, D., & Piro, S. (2013). *GPR remote sensing in archaeology* (Vol. 9, p. 233). New York: Springer.
- Gudmandsen, P. (1971). Electromagnetic probing of ice. *Electromagnetic probing in geophysics*.
- Hölser, W. T., Brown, R. J. S., Roberts, F. A., Fredriksson, O. A., & Unterberger, R. R. (1972). *Radar logging of a salt dome*. *Geophysics*, 37(5), 889-906.
- Jol, H. M., & Smith, D. G. (1991). Ground penetrating radar of northern lacustrine deltas. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 28(12), 1939-1947.
- Jol, H. M. (Ed.). (2008). *Ground penetrating radar theory and applications*.
- Kim, J. H., Cho, S. J., & Yi, M. J. (2007). Removal of ringing noise in GPR data by signal processing. *Geosciences Journal*, 11(1), 75-81.
- Kim, N., Kim, S., An, Y. K., & Lee, J. J. (2019). Triplanar Imaging of 3-D GPR Data for Deep-Learning-Based Underground Object Detection. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(11), 4446-4456.
- Kvamme, K. L. (2006) Integrating multidimensional geophysical data. *Archaeol Prospect* 13(1): 57–72.
- Leckebusch, J. (2003). Ground-penetrating radar: a modern three-dimensional prospection method. *Archaeological prospection*, 10(4), 213-240.

- Lee, K. L., & Mokji, M. M. (2014). *Automatic target detection in GPR images using Histogram of Oriented Gradients (HOG)*. In 2014 2nd International Conference on Electronic Design (ICED) (pp. 181-186). IEEE.
- Lei, W., et al. (2019). Automatic hyperbola detection and fitting in GPR B-scan image. *Automation in Construction*, 106, 102839.
- Lobo, R. (1999). Os Colégios de Jesus, das Artes e de S. Jerónimo: evolução e transformação no espaço urbano.
- Orlando, L. (2007). Georadar data collection, anomaly shape and archaeological interpretation—a case study from central Italy. *Archaeological Prospection*, 14(3), 213-225.
- Ozkaya, U., Melgani, F., Bejiga, M. B., Seyfi, L., & Donelli, M. (2020). GPR B Scan Image Analysis with Deep Learning Methods. *Measurement*, 107770.
- Phillips, R. J., et al., (1973) Apollo lunar sounder experiments, Apollo 17. Preliminary Science Report, NASA Spec. Publ. SP-330, Chapter 22.
- Pipan, M., Baradello, L., Forte, E., Prizzon, A., & Finetti, I. (1999). 2-D and 3-D processing and interpretation of multi-fold ground penetrating radar data a case history from an archaeological site. *Journal of Applied geophysics*, 41(2-3), 271-292.
- Rahman, M. B. S., Laksono, Y. A., Zulaikah, S., Suaidi, D. A., & Fuad, A. (2020, August). Identify the condition of the Lahor dam using georadar. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2251, No. 1, p. 040046). AIP Publishing LLC.
- Rocha, R., et al. (1987). *2nd International Symposium on Jurassic Stratigraphy*. ISJS, Centro Estratigrafia, Lisboa. p. 29
- Sandmeier, K. J. (2004). ReflexW Version 3.5. Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data.
- Sakaguchi, R. T., Morton Jr, K. D., Collins, L. M., & Torrione, P. A. (2013). Application of image categorization methods for buried threat detection in GPR data. In *Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XVIII* (Vol. 8709, p. 87091P). International Society for Optics and Photonics.

- Smitha, N., & Singh, V. (2020). Target detection using supervised machine learning algorithms for GPR data. *Sensing and Imaging*, 21(1), 1-15.
- Soares, A. F., Marques, J. F., & Sequeira, A. J. D. (2007). Carta geológica de Portugal e Notícia Explicativa da Folha 19D (Coimbra-Lousã), na escala 1: 50000. *INETI, Lisboa*.
- Sudakova, M. S., & Vladov, M. L. (2018). Modern Directions of Application of Ground-Penetrating Radar. *Moscow University Geology Bulletin*, 73(3), 219-228.
- Szymczyk, M., & Szymczyk, P. (2013). Preprocessing of GPR data. *Image Processing & Communications*, 18(2-3), 83-90.
- Telemobiloskop-Gesellschaft Hülsmeier und Mannheim, (1904a). *Das Telemobiloskop* (DRP Nr. 165546). Deutsches Reichspatent.
- Ünterberger, R. R. (1978). Radar propagation in rock salt. *Geophysical prospecting*, 26(2), 312-328.
- Waite, A. H., & Schmidt, S. J. (1962). Gross errors in height indication from pulsed radar altimeters operating over thick ice or snow. *Proceedings of the IRE*, 50(6), 1515-1520.
- Wu, Z., & Huang, N. E. (2009). Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. *Advances in adaptive data analysis*, 1(01), 1-41.

## 7.1 Sites acedidos

Google Earth / Landsat Copernicus. (n.d.). *Colégio das Artes, Coimbra, Portugal* - 40°12'34.30"N 8°25'23.65"W, 28/06/2016 [Satellite Imagery]. [https://earth.google.com/web/@40.20945193,-8.42316358,104.68235616a,198.22171347d,35y,0.00019991h,0t,0r?utm\\_source=earth7&utm\\_campaign=vine&hl=pt-PT](https://earth.google.com/web/@40.20945193,-8.42316358,104.68235616a,198.22171347d,35y,0.00019991h,0t,0r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=pt-PT)

Meteoblue. (n.d.). Weather archive Coimbra (Almedina). Retrieved July 30, 2019, from <https://www.meteoblue.com/>

Sensors & Software Inc. (n.d.). *Sensors & Software | Ground Penetrating Radar | GPR | Georadar Systems*. Retrieved July 30, 2019, from <https://www.sensoft.ca/>

## 7.2 Software

*gprMax* (v3.0.0b20). (2018). [Electromagnetic Simulation Software]. A. Giannopoulos and C. Warren. <https://www.gprmax.com/>

OpenStreetMap contributors. (2019). Map data retrieved from <https://www.openstreetmap.org>. <https://www.openstreetmap.org>

*ReflexW* (7.5.9). (1998). [Data processing and visualization tool]. Sandmeier geophysical research.

*Voxler* (Version 4 Demo). (2015). [Data visualization tool]. Golden Software.