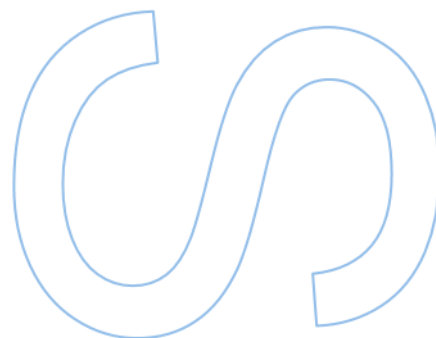
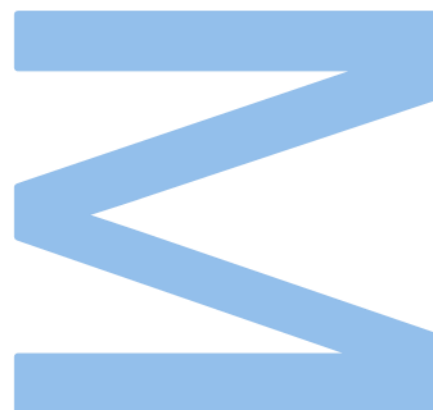


Integração de Métodos Geofísicos e Geotécnicos na Prospecção Subsuperficial: Uma Abordagem Multi- Método

Paulo Jorge Pereira Dias

Mestrado em Geomateriais e Recursos Geológicos
Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do território
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e Universidade de
Aveiro
Ano 2025



Integração de Métodos Geofísicos e Geotécnicos na Prospecção Subsuperficial: Uma Abordagem Multi- Método

Paulo Jorge Pereira Dias



Relatório de Estágio realizado no âmbito do Mestrado em
Geomateriais e Recursos Geológicos
Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território
Ano 2025

Orientador

Cláudia da Conceição Ferreira da Cruz, Investigadora doutorada de
nível inicial, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Coorientador

Helena Maria Sant'Ovaia Mendes da Silva, Professora Catedrática,
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Supervisor externo na Entidade de Acolhimento

Diogo Manuel Moreira Rodrigues, Gerente da empresa GEOSS

Aos meus queridos pais

Agradecimentos

Este trabalho não tinha sido possível de realizar sem a contribuição de muitas pessoas, que me ajudaram pacientemente ao longo deste trajeto. Gostava de agradecer:

À minha orientadora, investigadora Cláudia Cruz por toda ajuda que me deu na elaboração deste relatório e pela disponibilidade de esclarecer todas as minhas dúvidas sempre que precisei.

À minha coorientadora, professora Helena Sant'Ovaia por também ter aceitado este desafio de me coorientar durante este estágio e por estar sempre disponível para ajudar.

Ao meu orientador empresarial, o geólogo Diogo Rodrigues por me ter acolhido bem na empresa e por todo o conhecimento que me passou durante este estágio, do qual saio uma pessoa mais formada e mais consciente do que se vai passando na área.

Aos funcionários da Geoss por também me terem acolhido muito bem no seu seio o que me fez estar mais à vontade no trabalho e não ter receio de questionar quando surgisse alguma questão.

Aos professores que me lecionaram durante estes anos, que de uma maneira ou outra, contribuíram para a minha formação.

Aos meus amigos e colegas de curso, por todo o companheirismo e apoio que fomos dando uns aos outros durante este percurso, sem grandes egoísmos e todos a remar para o mesmo lado.

E por fim, mas não menos importante agradecer aos meus pais e aos meus familiares por todo o apoio que me prestaram ao longo destes anos todos.

Resumo

Os estágios curriculares em contexto empresarial proporcionam aos alunos a oportunidade de terem um primeiro contacto com uma outra realidade. Além do tema proposto inicialmente, há a hipótese de acompanhar trabalhos de diversas vertentes e que enriquecem o saber e dão motivação para um futuro que se avizinha cada vez mais próximo. Este relatório está estruturado segundo duas vertentes: uma que diz respeito aos trabalhos em curso na empresa Geoss e que tive oportunidade de acompanhar e outra, onde nos concentramos na investigação da eficácia do georadar na deteção de engenhos explosivos em diferentes solos: arenosos e argilosos.

Nesta investigação foram utilizados dois modelos de “Ground Penetrating Radar” (GPR) (Noggin e Proceq), além de dois detetores de metais (Eurotec Pro e Aeknetics).

Os resultados mostraram que: o modelo GPR Noggin teve taxa de deteção de 66% (areia) e 100% (argila), o modelo GPR Proceq teve 58% (areia) e 91% (argila) e os detetores de metais obtiveram taxas mais baixas e maior número de falsos positivos.

Conclui-se que o GPR, especialmente com antenas de 300 MHz, é mais eficaz na deteção de explosivos, sobretudo em solos menos condutivos. Este estudo reforça o valor da integração de métodos geofísicos/geotécnicos e valida o uso do GPR como técnica não-invasiva promissora para operações de desminagem.

Palavras-chave: Estágio em meio empresarial, solo arenoso, solo argiloso, engenhos explosivos, georadar, detetor de metais.

Abstract

Curriculum internships in a business context offer the students a unique opportunity to get in touch with a different reality. In addition to the main theme of this internship, we get a chance to expand our knowledge in different areas and sort of get a motivation to a near future. This report is then structured according to two aspects: one concerning the on-going work in the company Geoss and which I had the opportunity to follow up, and another where we focus on investigating the effectiveness of georadar in detecting explosive devices in different soils: sandy and clayey.

In this research, two Ground Penetrating Radar (GPR) models (Noggin and Proceq) were used, in addition to two metal detectors (Eurotec Pro and Aeknetics).

The results showed that: GPR Noggin had a detection rate of 66% (sand) and 100% (clay), GPR Proceq had 58% (sand) and 91% (clay) and the metal detectors had lower rates and higher number of false positives.

It is concluded that GPR, especially with 300 MHz antennas, is more effective in detecting explosives, especially in less conductive soils. This study reinforces the value of integrating geophysical/geotechnical methods and validates the use of GPR as a promising non-invasive technique for demining operations.

Keywords: Curriculum internships, sandy soil, clayed soil, explosive device, GPR, metal detectors.

Índice

Introdução.....	1
Pate I – Acompanhamento de trabalhos na GEOSS.....	3
Capítulo 1 – DPSH: Dynamic Penetration Super-Heavy	4
1.1 Metodologia DPSH.....	4
1.2 Cálculo dos parâmetros geotécnicos (DPSH).....	5
Capítulo 2 – PDL: Penetrómetro Dinâmico Ligeiro	7
Capítulo 3 – Poços Geotécnicos	8
Capítulo 4 – Resistividade Elétrica.....	9
Capítulo 5 – Sísmica de Refração.....	12
Capítulo 6 – Condutividade Térmica	13
Parte II Aplicação do Georadar na deteção de explosivos	15
Capítulo 1 – Estado da arte	16
1.1 Utilização do GPR no mundo: alguns exemplos	16
1.2 Utilização do GPR na Serra do Pilar, Vila Nova de Gaia	17
Capítulo 2 – Enquadramento Geral.....	20
2.1 Enquadramento Geográfico.....	20
2.2 Enquadramento Geológico	22
Capítulo 3 – Equipamentos.....	24
3.1 Detetores de metais	24
3.1.1 Detetor de metais <i>Eurotec Pro</i>	24
3.1.2 Detetor de metais <i>Aeknetics</i>	25
3.2. Georadares	26
3.2.1 GPR <i>Noggin</i>	27
3.2.2 GPR <i>Proceq</i>	28
Capítulo 4 – Metodologia utilizada e aquisição de dados.....	29
Capítulo 5 – Resultados e discussão	32
5.1 Resultados obtidos com os detetores de metais.....	32

5.2 Resultados obtidos com os GPR.....	36
Conclusão.....	43
Referências Bibliográficas	44
Anexo1 slices do GPR Noggin caixa de areia	A
Anexo 2 slices do GPR Noggin argila	D
Anexo 3 slices do GPR Proceq caixa de areia	G
Anexo 4 slices do GPR Proceq argila	J

Lista de Tabelas

Tabela 1 Resultados dos detetores de metais; O “x” representa que o engenho não foi enterrado no solo arenoso.	32
Tabela 2 Resultados dos detetores de metais; O “x” representa que o engenho não foi enterrado no solo arenoso (Continuação).	33
Tabela 3 Resultados obtidos através da interpretação dos dados de GPR; O “x” representa que o engenho não foi enterrado no solo arenoso.	41
Tabela 4 Resultados obtidos através da interpretação dos dados de GPR; O “x” representa que o engenho não foi enterrado no solo arenoso (Continuação).	42

Lista de Figuras

Figura 1 Exemplo de ensaio DPSH. Figura 1 a) e exemplo de dados DPSH processados Figura 1 b)	4
Figura 2 Exemplo de ensaio PDL Figura 2 a) e exemplo de dados PDL processados Figura 2 b)	7
Figura 3 Exemplo de Poço Geotécnico.....	8
Figura 4 Configuração de elétrodos tipo Wenner adaptado de (Fontoura et al., 2011)..	9
Figura 5 Configuração de elétrodos tipo Schlumberger adaptado de (Fontoura et al., 2011)	9
Figura 6 Configuração de elétrodos tipo dipolo -dipolo adaptado de (Fontoura et al., 2011)	10
Figura 7 Configuração de elétrodos tipo Wenner-Schlumberger adaptado de (Ekinci et al., 2013).....	10
Figura 8 Trabalho de resistividade elétrica.....	11
Figura 9 Exemplo de dados de resistividade elétrica processados	11
Figura 10 Exemplo de perfil de sísmica de refração	12
Figura 11 Exemplo de dados de sísmica de refração processados.....	13
Figura 12 Esquema do fluxo térmico através de um corpo adaptado de (NetZch,2025.).	13
Figura 13 distribuição e profundidade de enterro dos diferentes engenhos no solo arenoso situação a) e no solo argiloso situação b) adaptado de (Martins, 2018).	19
Figura 14 Imagem do local de estudo representado com um retângulo retirada do Google Earth.....	20
Figura 15 extrato da folha 122 da carta militar do Porto 1:25000 onde se localiza a área de estudo que está demarcada com o retângulo na imagem	21
Figura 16 Esquema das zonas geotectónicas de Portugal retirado da carta geológica de Portugal à escala 1:1000000	22
Figura 17 Excerto da carta geológica do Porto, folha 9-C à escala 1:50 000.	23
Figura 18 modo de funcionamento do GPR adaptado de (Daniels, 2000).....	26
Figura 19 Local do test site no solo arenoso (Gomes, 2019).	29
Figura 20 Local do test site no solo argiloso (Gomes, 2019).....	29
Figura 21 Material utilizado para os test sites na Serra do Pilar	30
Figura 22 Procedimento da recolha de dados no test site; a) detetor de metais; b) GPR Noggin	31

Figura 23 Mapa de falsos positivos da caixa de areia do detetor de metais Eurotec Pro.	34
Figura 24 Mapa de falsos positivos do terreno argiloso do detetor de metais Eurotec Pro.	34
Figura 25 Mapa falsos positivos da caixa de areia do detetor de metais Aeknetics	35
Figura 26 Mapa de falsos positivos do terreno argiloso do detetor de metais Aeknetics	35
Figura 27 Slice representativa caixa de areia GPR Noggin 0,15 m	37
Figura 28 Slice representativa do GPR Noggin da caixa de areia sobreposta na grelha	37
Figura 29 Slice representativa do terreno argiloso do GPR Noggin 0,50 m.....	38
Figura 30 Slice representativa do GPR Noggin do terreno argiloso sobreposta na grelha	38
Figura 31 Slice representativa da caixa de areia do GPR Proceq 0,01 m	39
Figura 32 Slice representativa do GPR Proceq da caixa de areia sobreposta na grelha	39
Figura 33 Slice representativa do GPR Proceq do terreno argiloso 0,15 m.....	40
Figura 34 Slice representativa do GPR Proceq da caixa de areia sobreposta na grelha	40

Lista de Equações

Equação 1 Fórmula dos Holandeses.	5
Equação 2 Equação de Pasqualini.	5
Equação 3 Equação de Pasqualini para obtenção de α	6
Equação 4 Fórmula empírica de Terzaghi-Peck.	6

Lista de Abreviaturas

FCUP	Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
UP	Universidade do Porto
GPR	<i>Ground Penetrating Radar</i>
IGUP	Instituto Geofísico da Universidade do Porto
Mh _z	Mega Hertz
Gh _z	Giga Hertz
cm	Centímetros
IED	Engenho Explosivo Improvisado
DPSH	<i>Dynamic Penetration Super-Heavy</i>
PDL	Penetrómetro Dinâmico Ligeiro
m	Metros
SAr	Solo Arenoso
SAg	Solo Argiloso

Introdução

O presente relatório de estágio foi realizado no âmbito da conclusão do último ano do mestrado em Geomateriais e Recursos Geológicos, sendo relativo ao ano letivo de 2024/2025 num contexto de estágio curricular em contexto empresarial. O estágio foi orientado pelo geólogo Diogo Rodrigues gerente da empresa Geoss, fundada em 2017. Esta empresa incorpora nos seus quadros, técnicos superiores na área da Geologia, Engenharia Geológica, Riscos Naturais e Ordenamento do Território.

O estágio teve a duração de 8 meses começando em outubro de 2024 e terminando em maio de 2025. A opção de fazer um estágio no último ano foi cativante, uma vez que era uma oportunidade única de ter uma experiência em contexto profissional. Este relatório está dividido em duas partes: uma primeira parte focada nos trabalhos decorridos na empresa e que tive oportunidade de acompanhar durante o período de duração do estágio e uma segunda parte dedicada a uma investigação da aplicação do georadar na deteção de engenhos explosivos enterrados em diferentes tipos de solo.

O conteúdo da primeira parte está dividido em 6 capítulos, estando cada um deles direcionado para as diferentes técnicas utilizadas, nomeadamente:

- Capítulo 1 – Dynamic Penetration Super-Heavy, DPSH;
- Capítulo 2 – Penetrómetro Dinâmico Ligeiro, PDL;
- Capítulo 3 – Poços geotécnicos;
- Capítulo 4 – Resistividade elétrica;
- Capítulo 5 – Sísmica de refração;
- Capítulo 6 – Condutividade térmica.

A investigação realizada na serra do Pilar é a continuação de um estudo realizado em 2017, de onde foram realizados os seguintes relatórios Machado (2019), Martins (2018) e Gomes (2019) e que foram retomados atualmente com mais ensaios de campo. A investigação consiste em testar a eficácia do georadar na deteção de engenhos explosivos em diferentes solos, neste caso em solo arenoso e em solo argiloso.

A segunda parte está dividida em 5 capítulos a seguir explanados:

- No capítulo 1 é realizado um estado da arte.
- No capítulo 2 é feita uma contextualização geográfica e geológica do local do estudo.
- No capítulo 3 é feita a descrição das características dos equipamentos utilizados.

- No capítulo 4 são referidos as metodologias utilizadas e o modo de aquisição dos dados.
- No capítulo 5 são indicados os resultados da investigação e realizada uma breve discussão dos resultados

Por fim são apresentadas algumas conclusões, assim como as referências bibliográficas utilizadas e anexos.

Pate I – Acompanhamento de trabalhos na GEOSS

Capítulo 1 – DPSH: Dynamic Penetration Super-Heavy

1.1 Metodologia DPSH

Os ensaios DPSH (Dynamic Penetration Super-Heavy) ou em português Penetrómetro Dinâmico Super Pesado é um método geotécnico que consiste em cravar no solo uma ponteira pela ação da queda livre de uma massa com o objetivo de determinar a resistência (Karl Terzaghi et al., 1996).

A resistência é definida de acordo com o número de pancadas N_{20} (número de pancadas necessárias para que as varas penetrem 0,20 m no solo) necessárias para a cravação do penetrómetro e este ensaio dá-se por concluído quando N_{20} é igual a 100 pancadas ou quando o ensaio atinge os 20 m de profundidade (Karl Terzaghi et al., 1996),

Este ensaio é muito utilizado na prospeção, possibilitando a avaliação das características de resistência dos terrenos, sendo a sua utilidade melhorada quando relacionada com as litologias presentes. Permitem determinar a espessura de materiais de cobertura ou as irregularidades no subsolo, identificar camadas lenticulares ou irregulares, avaliar as características e espessura de zonas de alteração e localizar níveis de elevada rigidez ou o substrato rochoso (Karl Terzaghi et al., 1996)

Este método foi utilizado em vários trabalhos de estudo geotécnico e pareceres geotécnicos no distrito do Porto. A figura 1 a) mostra um exemplo de um ensaio DPSH e a figura 1 b) mostra um exemplo dos dados processados.

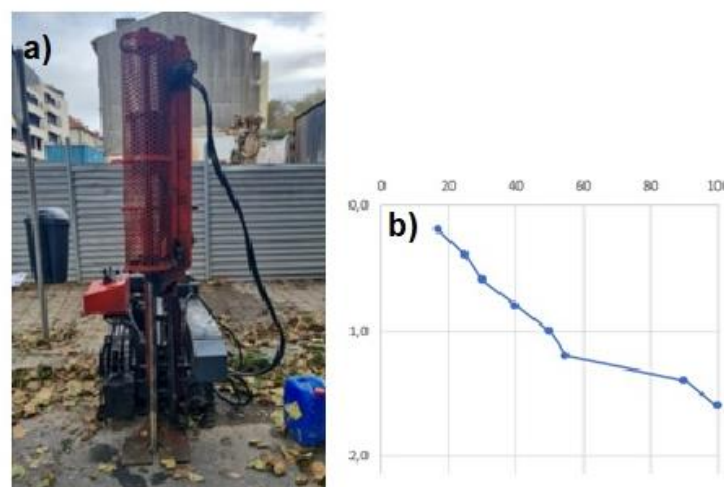


Figura 1 Exemplo de ensaio DPSH. Figura 1 a) e exemplo de dados DPSH processados Figura1 b)

1.2 Cálculo dos parâmetros geotécnicos (DPSH)

Tendo por base os resultados obtidos nos ensaios de DPSH (NDPSH20 - índice de resistência à penetração do ensaio de DPSH a qual mede o nº de pancadas necessárias para cravar as varas em cada trecho de 20 cm), apresentam-se de seguida as correlações e fórmulas empíricas usadas para a obtenção dos parâmetros do solo anteriormente referido (Karl Terzaghi et al., 1996);(Eurocódigo 7 , 2010)

De acordo com a fórmula que se segue (Fórmula dos Holandeses), equação 1 foi possível obter o valor da resistência dinâmica de ponta (R_{pd}) do terreno em estudo:

$$R_{pd} = \frac{P^2 \times h}{(P + P') \times A \times e} \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Equação 1 Fórmula dos Holandeses.

Onde: P é a massa do martelo (kg), h é a altura de queda do martelo (cm), P' é o peso das varas adicionadas (kg), A é a área da base do cone (cm^2), e é a penetração média obtida por cada pancada (20/N) (cm) (Karl Terzaghi et al., 1996).

Segundo a equação de Pasqualini (1983), equação 2, a relação entre os valores N obtidos neste ensaio e os valores de N_{SPT} são obtidos segundo a seguinte relação (Karl Terzaghi et al., 1996):

$$N_{SPT} = \frac{N}{\alpha}$$

Equação 2 Equação de Pasqualini.

Onde: N_{SPT} é o índice de resistência à penetração do ensaio de SPT, N é o índice de resistência à penetração do ensaio de DPSH e α é o coeficiente de relação (Karl Terzaghi et al., 1996).

Assim, segundo Pasqualini (1983), α é obtido usando a seguinte equação, equação 3 (Karl Terzaghi et al., 1996):

$$\alpha = \frac{Q1}{Q2} = \frac{m1 \times h1 \times e2 \times A2}{m2 \times h2 \times e1 \times A1}$$

Equação 3 Equação de Pasqualini para obtenção de α .

Onde: m é a massa do martelo (kg), h a Altura de queda do martelo (m), A é a área da secção reta da base do cone de penetração (m^2), e é o comprimento do intervalo de medição (m) (Karl Terzaghi et al., 1996).

$m1, h1, e1, A1$ – dados do Penetrómetro SPT (Q1)

$m2, h2, e2, A2$ – dados do Penetrómetro PDL (Q2)

Tendo os valores de N_{SPT} é possível estimar a carga admissível de um solo (σ_{adm}). Entre as várias correlações existentes na bibliografia, apresentamos a de Terzaghi-Peck, que apresenta a seguinte fórmula empírica, equação 4 (Karl Terzaghi et al., 1996):

$$\sigma_{adm} = \sqrt{N_{SPT} - 1} \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Equação 4 Fórmula empírica de Terzaghi-Peck.

Capítulo 2 – PDL: Penetrómetro Dinâmico Ligeiro

O Penetrómetro Dinâmico Ligeiro (PDL) pertence ao grupo dos penetrómetros dinâmicos onde também se inclui o DPSH (Karl Terzaghi et al., 1996).

Os ensaios terminam quando N10 igual a 100 pancadas mas diferem na outra possibilidade de dar também o ensaio por concluído, pois no DPSH o ensaio é dado por concluído quando a profundidade de 20 m é atingida, já no PDL este é dado por concluído quando é atingida a profundidade de 8 m (Karl Terzaghi et al., 1996), (Eurocódigo 7 , 2010)

Este método foi utilizado em vários estudos geotécnicos no distrito do Porto e em Viseu.

A figura 2 a) mostra um exemplo de um ensaio PDL e a figura 2 b) mostra um exemplo dos dados processados.

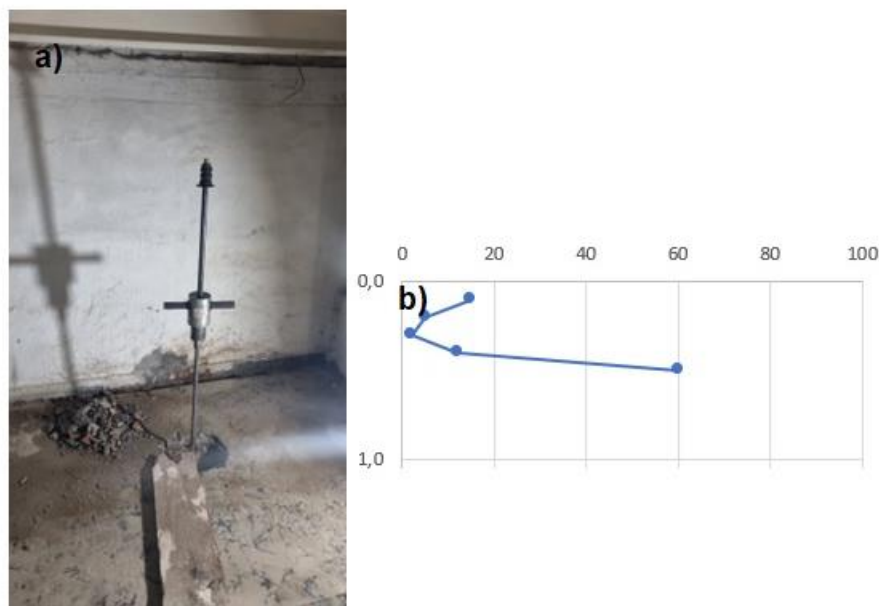


Figura 2 Exemplo de ensaio PDL Figura 2 a) e exemplo de dados PDL processados Figura 2 b)

Capítulo 3 – Poços Geotécnicos

Os poços geotécnicos são poços escavados de forma mecânica, principalmente em solos ou em rochas brandas e é um método de prospeção que permite observar de forma direta o terreno, possibilitando a análise das variações que ocorrem no solo em profundidade (M.Das, 2007).

Este é um método de utilidade quando se pretende colher grandes quantidades de amostras remexidas ou realizar ensaios in situ sobre os terrenos exposto (M.Das, 2007).

Este método foi utilizado nos trabalhos de Mirandela e Sines. A figura 3 mostra um exemplo de um poço Geotécnico.



Figura 3 Exemplo de Poço Geotécnico.

Capítulo 4 – Resistividade Elétrica

O método da resistividade elétrica é um método que consiste na utilização de uma corrente contínua, que é injetada no terreno através de dois elétrodos de corrente denominados A e B, com o objetivo de medir a diferença de potencial entre outros dois elétrodos, elétrodos de leitura ou potencial denominados M e N (Clark & Brandt, 2024).

Existem vários tipos de configurações possíveis para este tipo de trabalhos que são: Wenner, Schlumberger e Dipolo-Dipolo. Neste trabalho foi utilizada a configuração Wenner-Schlumberger.

No dispositivo de Wenner todos os elétrodos estão separados pela mesma distância a , como tal, devem sempre ser deslocados simultaneamente, de modo a manter a simetria do dispositivo. Variando a distância ' a ' obtém-se uma sondagem elétrica. Ao realizar um conjunto de sondagens elétricas, lateralmente separadas, e sobre o mesmo perfil, obtém-se uma imagem que traduz a variação da resistividade do terreno em termos laterais e em profundidade, obtendo-se uma pseudosecção de resistividade aparente, como mostra a figura 4 (Clark & Brandt, 2024).



Figura 4 Configuração de elétrodos tipo Wenner adaptado de (Fontoura et al., 2011)

No dispositivo de Schlumberger os elétrodos A, B, M e N são colineares e dispostos simetricamente em relação a um ponto central. Do mesmo modo, como foi descrito para a metodologia Wenner, é possível obter uma pseudosecção de resistividade aparente, através da realização de um conjunto de sondagens dispostas lateralmente ao longo do mesmo perfil como mostra a figura 5 (Clark & Brandt, 2024).

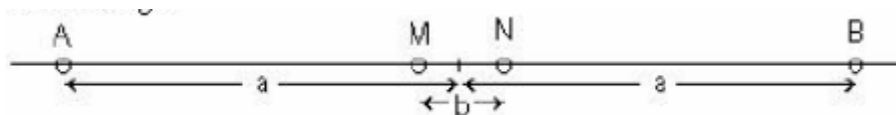


Figura 5 Configuração de elétrodos tipo Schlumberger adaptado de (Fontoura et al., 2011)

No método Dipolo-Dipolo, os elétrodos M e N estão distantes de A e B (Clark & Brandt, 2024) como se pode ver na figura 6.

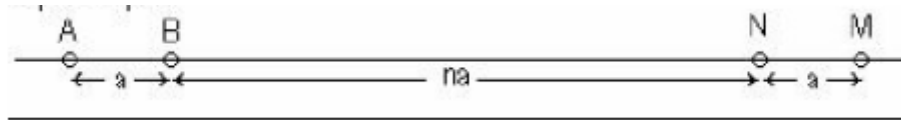


Figura 6 Configuração de eletrodos tipo dipolo -dipolo adaptado de (Fontoura et al., 2011)

A configuração Wenner-Schlumberger consiste na realização de perfis longitudinais com recurso a 24 eletrodos espaçados a distâncias regulares conhecidas, figura 7 (Loke, 1999).

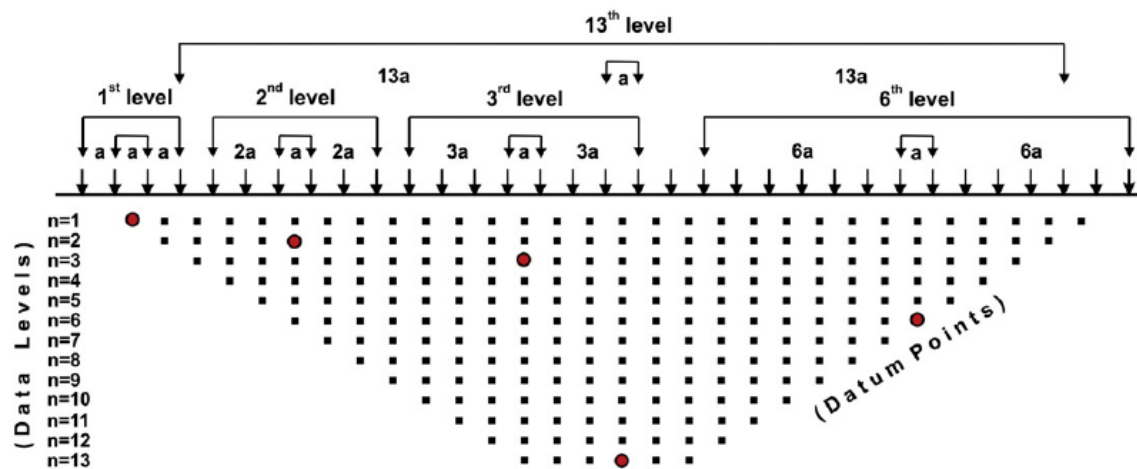


Figura 7 Configuração de eletrodos tipo Wenner-Schlumberger adaptado de (Ekinci et al., 2013).

Este procedimento permite compor as medidas em pseudosecções bidimensionais e para além de ser de execução rápida abrange áreas de investigação superiores e melhor qualidade de dados.

O equipamento utilizado foi um resistímetro de comutação automática *Syscal Junior SW* com 400 Watts de potência.

Este método foi utilizado no trabalho de Sines e no Porto (figura 8), e a figura 9 mostra um exemplo dos dados processados.



Figura 8 Trabalho de resistividade elétrica.

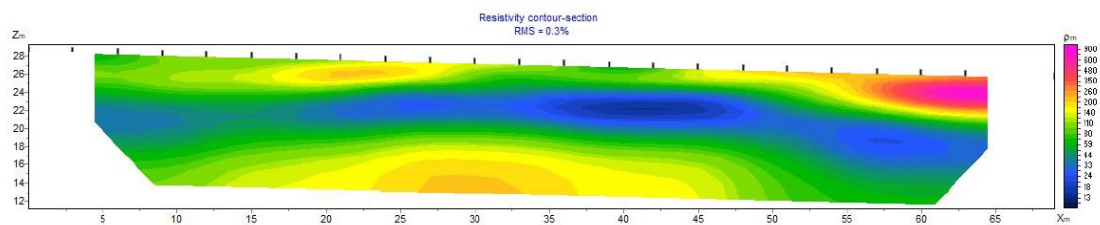


Figura 9 Exemplo de dados de resistividade elétrica processados

Capítulo 5 – Sísmica de Refração

O método sísmico utilizado consiste na realização de perfis longitudinais com recurso a geofones espaçados a distâncias regulares e conhecidas. A velocidade de propagação das ondas sísmicas, registada através do tempo que estas demoram a percorrer o trajeto deste a fonte até aos geofones pré-instalados, constitui o parâmetro mais representativo para determinar a ripabilidade e escavabilidade do terreno. A velocidade das ondas reflete o grau de compacidade, alteração e fracturação dos materiais (Clark & Brandt, 2024).

O sistema de aquisição de sísmica de refração utilizado consiste num sismógrafo da marca *SARA Instruments* de elevada resolução. A gravação está a cargo de um conversor A/D de 24 bits, armazenando os dados em disco duro à taxa de amostragem de 0.2 milissegundos com 1000 milissegundos (1s) de janela total. O sistema possui “signal enhancement”, permitindo a soma de várias “pancadas” com o objetivo de fortalecer os sinais recebidos.

O dispositivo de colheita foi adaptado para o trabalho em questão sendo que cada perfil é constituído por 12 geofones verticais de 4.5 Hz com espaçamentos regulares de 5 metros entre os geofones, implicando um comprimento total do dispositivo de 60 metros. Utilizou-se a marreta de 5 kg em placa de aço como fonte, executando três pontos de tiro (direto, central e inverso) por perfil.

Este método foi utilizado no trabalho de Sines e de Braga.

A figura 10 mostra uma recolha de dados de refração sísmica e a figura 11 mostra um exemplo destes processados.



Figura 10 Exemplo de perfil de sísmica de refração

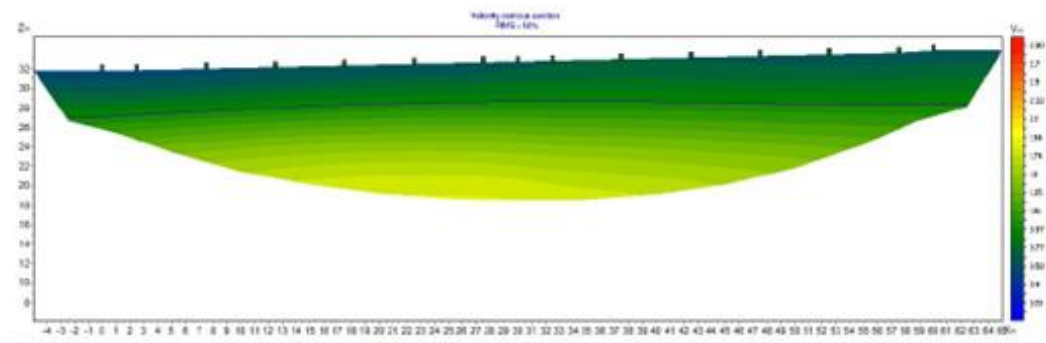


Figura 11 Exemplo de dados de sísmica de refração processados

Capítulo 6 – Condutividade Térmica

A Condutividade térmica, λ com a unidade $W/(m \cdot K)$) descreve o transporte de energia na forma de calor por um corpo de massa como resultado de um gradiente de temperatura. De acordo com a segunda lei da termodinâmica, o calor sempre flui na direção da temperatura mais baixa (NetZch, 2025), como mostra a figura 12.

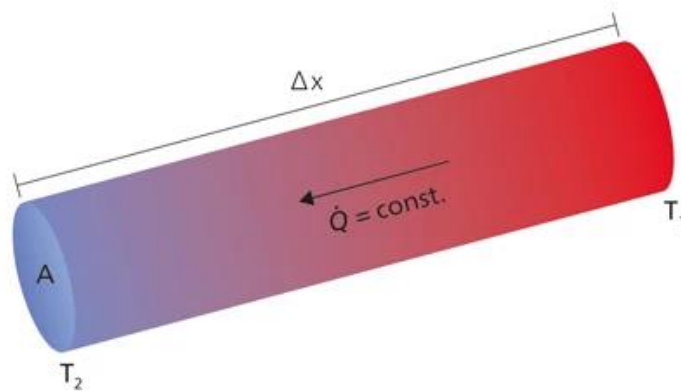


Figura 12 Esquema do fluxo térmico através de um corpo adaptado de (NetZch,2025.).

Para a realização dos ensaios de condutividade térmica, a norma aplicada foi a (ASTM D5334-14, 2022). O equipamento utilizado foi o TLS-100, fabricado pela Thermtest.

O procedimento de ensaio é simples e não ambíguo:

- Chegar ao local de ensaio.

- Colocar a sonda no local a ensaiar depois de garantir todas as condições de segurança.
- Iniciar o ensaio e aguardar 3 minutos pelos resultados que podem ser visualizados no momento, embora sejam guardados e a posterior possam ser exportados para computadores via USB.
- Retirar a sonda do local do ensaio, limpar e guardar a mesma na caixa de transporte.
- Mover para o próximo local de ensaio e repetir o procedimento.
- Após a última medida ser realizada, limpar e guardar o equipamento e voltar ao escritório.

Este método foi utilizado no trabalho de Sines.

Parte II Aplicação do Georadar na deteção de explosivos

Capítulo 1 – Estado da arte

O recurso ao Radar de Penetração do Solo, em inglês, *Ground Penetrating Radar* (GPR) é algo que já vem sendo utilizado desde o século passado mais precisamente desde 1994.

1.1 Utilização do GPR no mundo: alguns exemplos

Segundo Machado Brito-da-Costa et al., (2022), o primeiro teste em que se utilizou o GPR foi no campo de provas de Jefferson, localizado a cerca de 8 km do norte de Madison, nos Estados Unidos da América, serviu para avaliar a sua performance na deteção de minas e de explosivos e também perceber de que forma as propriedades do solo influenciariam o seu desempenho. Para isso utilizaram-se munições inertes e outros artigos não bélicos que foram colocadas previamente em cada local e depois de analisados os dados conclui-se que o fraco desempenho do GPR neste estudo, pode ser explicado, em parte, pelo elevado teor de humidade e elevada condutividade terrestre.

Na Austrália também foi realizado um teste para avaliar como é que características do clima, para além do tipo de solo, poderiam influenciar o desempenho do GPR. Neste caso antes de iniciar o teste foram medidas duas propriedades do solo, a suscetibilidade magnética e a permissividade dielétrica. A suscetibilidades magnética foi diferente para cada local e muito variável, dentro de cada local. Da mesma forma, a permissividade dielétrica mostrou claramente a variação local e diferenças entre os locais áridos e temperados. Neste teste foi utilizado um GPR 3D e o varrimento foi feito em frequências de 200 Mega Hertz (MHz) a 3 Giga Hertz (GHz). Depois do tratamento dos dados foi possível observar um sinal ligeiramente mais fraco na região árida em comparação com as três regiões, uma desértica e duas temperadas. Estes resultados confirmaram que diferentes regiões geográficas e condições climáticas afetam as assinaturas do GPR na deteção de dispositivos explosivos enterrados (Machado Brito-da-Costa et al., 2022).

No Egito, para avaliar o desempenho na deteção de minas metálicas e de plástico foi realizado outro ensaio onde se tentou detetar 10 objetos semelhantes a minas terrestres enterradas, a diferentes profundidades, num solo arenoso. O GPR, neste ensaio, operou com uma frequência de 400, 900 e 1500 MHz. Após processar os dados pôde-se concluir que a deteção de alvos metálicos utilizando a técnica GPR é bastante precisa,

quando existe um sinal refletido de elevada amplitude, devido ao elevado contraste de condutividade e constante dielétrica entre as minas metálicas e o meio envolvente. Pela mesma razão, a deteção de minas terrestres de baixa profundidade e plásticas só pode ter sucesso se existir um elevado contraste das referidas propriedades elétricas (Machado Brito-da-Costa et al., 2022).

Em Inglaterra, no âmbito de um estudo de ciências forenses, foi realizado um teste de deteção de objetos forenses em contexto semiurbano e de pátios domésticos. Para isso foram enterrados 8 objetos: facas de pão, pá, faca, granada da segunda guerra mundial, granada da primeira guerra mundial, revólver, morteiro e caixa de munições e 3 alvos não forenses (um tijolo, um parafuso metálico e uma chapa de aço) que foram enterrados a 15 centímetros (cm) de profundidade. O varrimento com o GPR foi feito com frequências de 450 MHz e 900 MHz e terminando o processamento dos dados conclui-se que: (1) a taxa de deteção no ambiente semiurbano foi de 50% utilizando frequências de antena de 450 MHz e de 75% utilizando frequências de antena de 900 MHz e (2) no ambiente urbano (no pátio), o resultado foi de 63% utilizando 450 MHz e também 75% utilizando frequências de antena de 900 MHz. As outras conclusões que se tiraram foram: que estas taxas mostraram que 900 MHz foi a melhor frequência de deteção GPR para estas condições e que apenas os dados GPR conseguiram determinar a profundidade do alvo abaixo do nível do solo (Machado Brito-da-Costa et al., 2022).

1.2 Utilização do GPR na Serra do Pilar, Vila Nova de Gaia

Em Portugal, mais concretamente no regimento da serra do Pilar também foram realizados vários trabalhos. Esta investigação, iniciada em 2017, foi atualmente retomada, tendo sido realizados mais ensaios de campo. Os novos ensaios, assim como os resultados e principais conclusões estão descritos ao longo da Parte II deste relatório de estágio.

Os trabalhos anteriormente realizados na Serra do Pilar, consistiram em testar o GPR na deteção de diferentes explosivos em diferentes tipos de solos, nomeadamente solos arenosos (Figura 13a) e argilosos (Figura 13b). Assim foram enterrados em dois tipos de solo os seguintes materiais: 1 granada *Mills*, 1 granada de instrução *Mod/ 962*, 1 granada foguete, 1 granada de morteiro 81 mm, 1 mina antipessoal, 1 projétil de obus de artilharia (80 mm -SAr (Solo arenoso); 60 mm-SAg (Solo argiloso)), 1 projétil de artilharia 155 mm, 1 invólucro de artilharia 101 mm (tiro real-SAr; tiro de salva-SAg), 1

engenho explosivo improvisado (IED) em caixa de madeira, 1 IED em caixa de plástico e 1 *firend* de plástico (somente no SAg). Em cada tipo de solo, foi também enterrado 1 frango de aviário (controlo orgânico) e foi escavado 1 buraco que posteriormente foi tapado com o seu respetivo solo, sem incluir qualquer tipo de material no seu interior (controlo negativo).

A importância destes trabalhos prende-se com o facto de comprovar e validar a eficácia da utilização do GPR, técnica não invasiva de baixo custo na identificação precisa de engenhos de guerra no subsolo. Provada a sua eficácia e mais-valia, esta pode ser uma técnica fundamental, por exemplo, no desmine de uma cidade depois de uma guerra.

Neste teste o GPR operou nas frequências de 100 MHz e 300 MHz. Após o processamento dos dados chegou-se à conclusão de que para os dois tipos de solo, a antena de 300 MHz é a mais eficaz na deteção dos diferentes materiais enterrados. Também se concluiu que nos dois tipos de solo, os materiais constituídos por metal e de maiores dimensões, foram os mais facilmente detetados. Concomitantemente, o SAg revelou ser aquele que mais facilmente camufla a existência de materiais enterrados, uma vez que origina um maior grau de atenuação do sinal, face às duas antenas do GPR (Machado & Da, 2019; Martins, 2018 e Gomes, 2019).

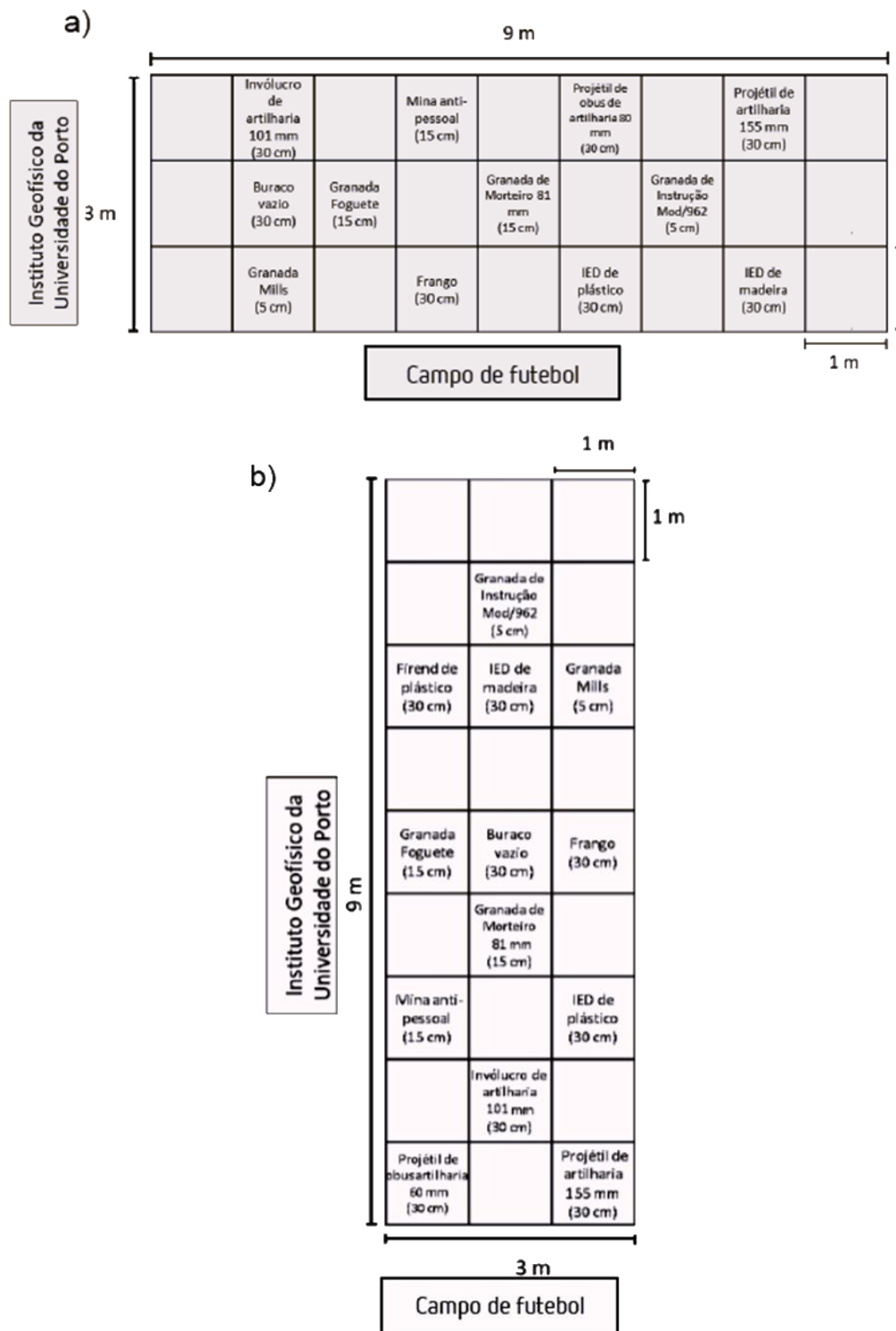


Figura 13 distribuição e profundidade de enterro dos diferentes engenhos no solo arenoso situação a) e no solo argiloso situação b) adaptado de (Martins, 2018).

Capítulo 2 – Enquadramento Geral

2.1 Enquadramento Geográfico

O regimento da serra do Pilar é propriedade do exército português e está localizado numa zona urbana pertencente à freguesia de Santa Marinha, ao concelho de Vila Nova de Gaia, distrito do Porto e tem de coordenadas geográficas $41^{\circ} 08' 12.17''$ N; $8^{\circ} 36' 11.10''$ W (datum WGS84) e uma altitude de 80 m relativamente ao nível médio das águas do mar (Figura 14 e Figura 15).

O regimento está delimitado a norte pela rua Gonçalves Zarco e a Este pela Avenida D. João II e encontra-se a cerca de 255 m do Instituto Geofísico da Universidade do Porto (IGUP) e a 500 m do rio Douro.



Figura 14 Imagem do local de estudo representado com um retângulo retirada do Google Earth.



Figura 15 extrato da folha 122 da carta militar do Porto 1:25000 onde se localiza a área de estudo que está demarcada com o retângulo na imagem

2.2 Enquadramento Geológico

Segundo Julivert et al (1974), Portugal está dividido em 4 zonas geotectónicas: a zona Galiza-Trás-os-Montes, a zona Centro-Ibérica, a zona Ossa-Morena e a zona Sul portuguesa (figura 16).

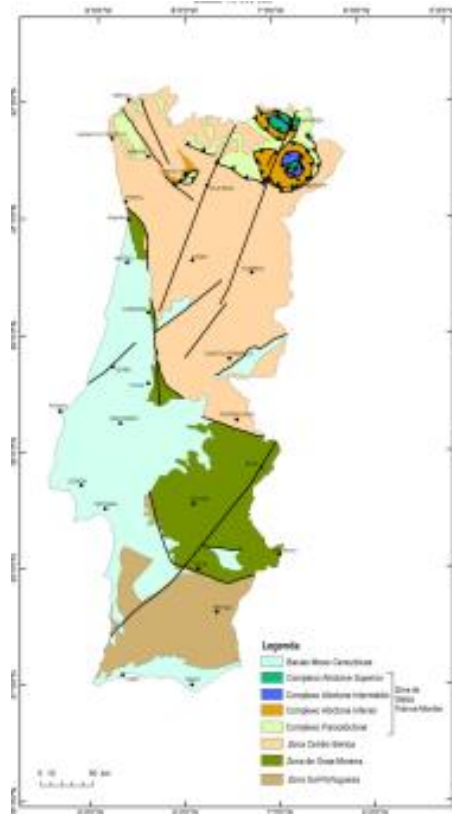


Figura 16 Esquema das zonas geotectónicas de Portugal retirado da carta geológica de Portugal à escala 1:1000000

A zona de estudo pertence à Zona Centro-Ibérica que integra o domínio orogénico interno da cintura Varisca Ibérica. A sua constituição é dominada por rochas granitoides que intruíram uma sucessão composta por diferentes sequências metassedimentares e metavulcânicas com idades compreendidas entre o Neoproterozóico e o Carbónico Inferior (PLaza Diez & Delgado Rodrigues, 2005).

A região em estudo está situada no Complexo Xisto-grauváquico de idade ante Ordovícica que está em contacto com o granito do Porto C.Teixeira ; J. Carrington Da Costa, (1957). O granito do Porto é um granito alcalino que possui quartzo, moscovite, turmalina e feldspatos, em que a albite é a que ocorre mais frequentemente, embora também se observe a ortoclase. O granito do Porto possui alguma biotite, mas o que predomina é a moscovite (C.Teixeira ; J. Carrington Da Costa, 1957).

A figura 17 mostra um excerto da carta geológica 9-C onde está localizada a área de estudo.

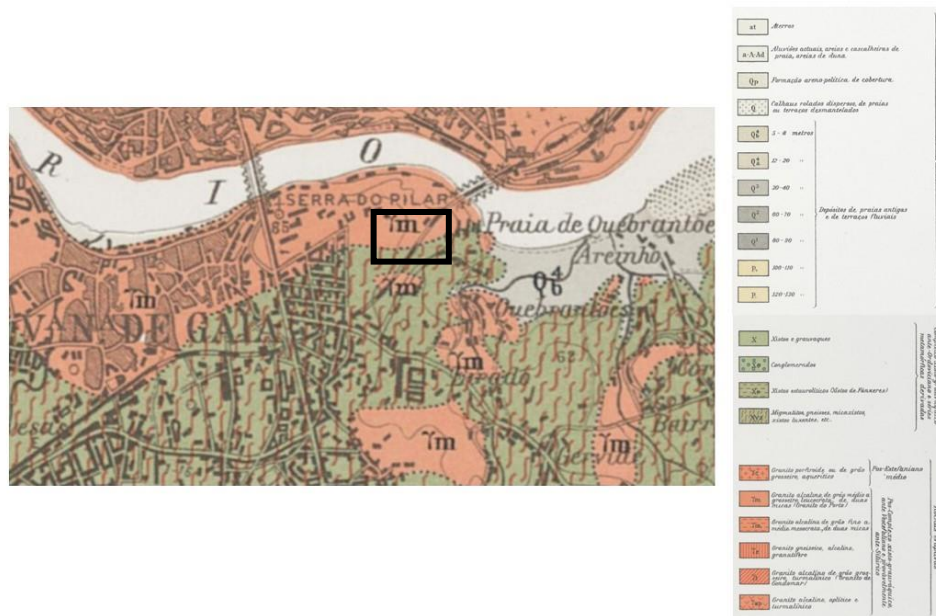


Figura 17 Excerto da carta geológica do Porto, folha 9-C à escala 1:50 000.

Capítulo 3 – Equipamentos

3.1 Detetores de metais

Os detetores de metais são muito utilizados na deteção de explosivos pois são equipamentos de fácil manuseamento, relativamente baratos e apresentam uma taxa de sucesso satisfatória (Dunn et al., 2011).

Os detetores de metais regem-se pelo princípio da indução eletromagnética onde bobinas presentes no equipamento criam um campo eletromagnético e esse campo induz uma corrente de *Foucault* nos objetos metálicos e em consequência uma corrente é gerada nas bobinas do detetor. O equipamento de metal deteta esta corrente no objeto enterrado e gera um sinal que indica a presença de um engenho (Dunn et al., (2011)).

A principal limitação dos detetores de metais é que apesar da sua utilização ser muito eficiente quando o engenho é composto por metal, não consegue detetar os engenhos feitos de outros materiais, por exemplo engenhos de plástico (Dunn et al., 2011).

3.1.1 Detetor de metais *Eurotec Pro*

O detetor de metais *Eurotec Pro* apresenta as seguintes principais características (GeoHunter, 2024):

- FeTone, áudio de ferro ajustável: permite o ajuste do volume do áudio de alvos de ferro.
- Muito eficiente em separar alvos ferrosos de alvos não ferrosos em proximidade um do outro.
- LED identificador de ferro: um LED na tela que acende quando o ferro é detetado, independentemente da configuração de discriminação.
- Bobina de busca à prova de água e concêntrica de 20 cm.
- Frequência de operação: 7,81 kHz.
- Comprimento: 95 cm – 128 cm.
- Bateria: 9 V.
- Peso: 1 Kg.

3.1.2 Detetor de metais *Aeknetics*

As principais características do detetor de metais *Aeknetics* são (*GeoHunter*, 2024):

- Áudio de ferro ajustável.
- Sistema de discriminação de Tom.
- Separação de alvos em ferro e lixo.
- Frequência de operação de 19 kHz.
- Peso 1,1 kg.
- *Pinpoint* estático todo em metal com indicador de profundidade.

3.2. Georadares

O GPR é um equipamento que mede a radiação de ondas eletromagnéticas no subsolo, e tem como princípio o seguinte: uma onda eletromagnética é radiada de uma antena transmissora, viaja pelo material a uma velocidade determinada principalmente pela permissividade do material, espalha-se e viaja pelo subsolo até encontrar um objeto com propriedades elétricas diferentes do meio circundante. A onda é dispersa pelo objeto e detetada por uma antena recetora (Daniels, 2000).

O sistema GPR também tem limitações e as principais são a profundidade de penetração e a resolução, que estão relacionadas com a frequência da antena. Antenas de alta frequência (500–2000 MHz) oferecem alta resolução, mas penetram apenas 8 a 10 metros, enquanto antenas de baixa frequência (12,5–50 MHz) alcançam maiores profundidades (até 65 metros), mas têm resolução inferior. A escolha do tipo de antena depende dos objetivos da investigação, além disso, águas salobras ou salinas apresentam alta condutividade, atenuando o sinal. O mesmo ocorre em sedimentos ricos em argila. Depósitos sedimentares com alta permeabilidade magnética podem limitar a penetração do sinal, mas são fortes refletores (Buynevich et al., 2017).

A figura 18 mostra a técnica de funcionamento do GPR.

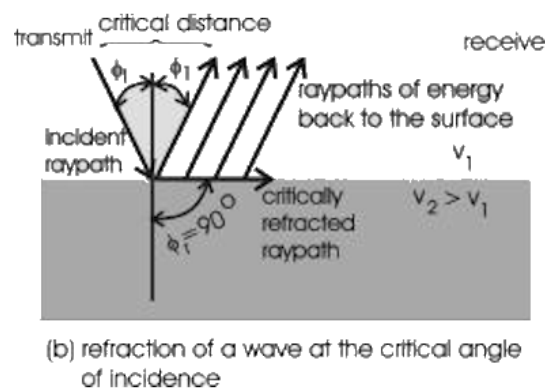


Figura 18 modo de funcionamento do GPR adaptado de (Daniels, 2000).

3.2.1 GPR *Noggin*

Os sistemas *Noggin*, com quatro frequências centrais e cinco configurações padrão, podem recolher dados em qualquer ambiente para qualquer aplicação. O GPR *Noggin* cobre as profundidades e resoluções necessárias para investigações do subsolo (*Sensores e Softwares*, 2024).

Este aparelho apresenta o seguinte conjunto de características (*Sensores e Softwares*, 2024):

- Design robusto: Os *Noggin* são usados em uma ampla variedade de ambientes, temperaturas e condições climáticas.
- Antenas GPR de banda ultralarga (UWB): Acoplado ao solo para máxima penetração de sinal e qualidade de dados.
- Gravador de vídeo digital: Tela sensível ao toque de alta resolução, visível à luz do sol, com transferência de dados Wi-Fi e USB.
- Recolha de dados flexível: Permite alterar os parâmetros do GPR para otimizar o levantamento, ajustar a profundidade, tamanho do passo, empilhamento, janela de tempo, tamanho da grelha e muito mais.
- Mini-relatórios por Wi-Fi: permite o envio de relatórios de linha, fatia de profundidade ou dados de visualização de mapas diretamente por Wi-Fi para os utilizadores.
- Perfis em profundidade: Recolhe grelhas de dados e permite visualizar perfis em profundidade diretamente no campo.
- Visualização do mapa: Utilizando um GPS externo, permite visualizar um mapa plano do percurso do levantamento, das grelhas, das interpretações de campo e dos sinalizadores.
- Interpretações de campo: Permite adicionar interpretações codificadas por cores e sinalizadores de campo.
- Multilinguagem: pode funcionar em várias línguas, nomeadamente em inglês, francês, alemão, espanhol, japonês, chinês simplificado, russo e árabe.

3.2.2 GPR *Proceq*

O GPR *Proceq* apresenta o seguinte conjunto de características (*Screening Eagle*, 2024):

- GPR de onda contínua de frequência reduzida.
- Faixa de frequência modulada entre 200 - 4000 MHz.
- Profundidade de penetração de 85 cm.
- Bateria amovível com dimensões de 22,1 x 18 x 14 cm.
- Peso de 1,5 kg (excluindo a bateria).
- Distância ao solo de 0,8 cm.
- Possui uma antena, cuja distância à borda é de 8,3 cm.
- Possui também um conjunto de características especiais que são tração integral com rodas de alta tração, orientação por luz laser, ligações Wi-Fi à unidade de visualização e uma Autonomia de 3 h.

Este GPR utiliza um sistema de aquisição diferente do GPR *NoggIn*, pois enquanto o *NoggIn* utiliza o software *EKKO_Project*, o GPR *Proceq* utiliza uma aplicação apenas disponível para iPad chamada App *Proceq GPR*.

Capítulo 4 – Metodologia utilizada e aquisição de dados

Para avaliar o desempenho do GPR e dos detetores de metais na deteção de engenhos explosivos realizou-se, no regimento da Serra do Pilar, *test sites* em dois locais:

- (1) numa caixa de areia para simular o solo arenoso (Figura 19);
- (2) no solo argiloso, que é o solo típico desta região (Figura 20).



Figura 19 Local do test site no solo arenoso (Gomes, 2019).



Figura 20 Local do test site no solo argiloso (Gomes, 2019).

Os ensaios foram realizados em locais já previamente estudados com o objetivo de comparar a eficiência da utilização dos métodos na deteção dos engenhos pouco tempo após terem sido enterrados, e após vários anos.

Os engenhos utilizados já se encontravam enterrados há 8 anos, tendo já servido para outros *test sites* realizados em 2018 e 2019 (Machado (2019), Martins (2018) e Gomes (2019)). Esses objetos, tal como anteriormente mencionados são: 1 granada *Mills*, 1 granada de instrução *Mod/ 962*, 1 granada foguete, 1 granada de morteiro 81 mm, 1 mina antipessoal, 1 projétil de obus de artilharia (80 mm -SAr; 60 mm-SAg), 1 projétil de artilharia 155 mm, 1 invólucro de artilharia 101 mm (tiro real-SAr; tiro de salva-SAg), 1 engenho explosivo improvisado (IED) em caixa de madeira, 1 IED em caixa de plástico e 1 *firend* de plástico (somente no SAg). Em cada tipo de solo, foi também enterrado 1 frango de aviário (controlo orgânico) e foi escavado 1 buraco que posteriormente foi tapado com o seu respetivo solo, sem incluir qualquer tipo de material no seu interior (controlo negativo).

Estes engenhos estavam distribuídos segundo uma malha 3 m x 9 m (Figura 11a e Figura 11b.)

Nestes *test site* foram utilizados os seguintes equipamentos (Figura 21):

- Dois detetores de metais: um da marca *Eurotec Pro* e outro da marca *Aeknetics* (Figura 21);
- Dois GPR: um da marca *Noggin* e um da marca *Proceq* (Figura 21);



Figura 21 Material utilizado para os test sites na Serra do Pilar



Figura 22 Procedimento da recolha de dados no test site; a) detetor de metais; b) GPR Noggin

O *test site* foi feito em primeiro lugar, na caixa de areia onde primeiro se varreu com os detetores de metais (Figura22 a) segundo uma grelha de 3 m x 9 m.

De seguida foi feito o varrimento utilizando os GPR (Figura22 b) também com a mesma grelha, mas com espaçamento de 10 cm entre cada varrimento. Quando terminado o teste na caixa de areia repetiu-se o mesmo procedimento no solo argiloso. Após a recolha de dados no campo, os dados de GPR foram processados no software *ReflexW*.

Capítulo 5 – Resultados e discussão

5.1 Resultados obtidos com os detetores de metais

Para interpretar os dados dos detetores de metais no campo, durante o varrimento, quando algo era detetado, registávamos no caderno de campo as coordenadas desse ponto. Depois, ao consultar a grelha com a localização dos engenhos enterrados, correspondíamos os pontos a um determinado engenho.

Neste método conseguimos detetar alguns engenhos, mas também detetámos falsos positivos como mostra a tabela 1 e as figuras 23, 24, 25 e 26.

Tabela 1 Resultados dos detetores de metais; O "x" representa que o engenho não foi enterrado no solo arenoso.

MATERIAIS	DETETOR DE METAIS EUROTEC PRO AREIA	DETETOR DE METAIS EUROTEC PRO ARGILA	DETETOR DE METAIS AEKNETICS AREIA	DETETOR DE METAIS AEKNETICS ARGILA
GRANADA DE INSTRUÇÃO MOD/ 962	detetado	detetado	não detetado	detetado
GRANADA FOGUETE	detetado	não detetado	não detetado	detetado
GRANADA DE MORTEIRO	detetado	não detetado	não detetado	detetado
MINA ANTIPESSOAL	não detetado	detetado	não detetado	detetado
PROJÉTIL DE OBUS DE ARTILHARIA	detetado	detetado	não detetado	não detetado
PROJÉTIL DE ARTILHARIA	detetado	detetado	detetado	detetado
INVÓLUCRO DE ARTILHARIA	detetado	detetado	não detetado	não detetado

Tabela 2 Resultados dos detetores de metais; O “x” representa que o engenho não foi enterrado no solo arenoso (Continuação).

MATERIAIS	DETETOR DE METAIS EUROTEC PRO AREIA	DETETOR DE METAIS EUROTEC PRO ARGILA	DETETOR DE METAIS AEKNETICS AREIA	DETETOR DE METAIS AEKNETICS ARGILA
ENGENHO EXPLOSIVO IMPROVISADO (IED) EM CAIXA DE MADEIRA	não detetado	detetado	detetado	não detetado
FIREND DE PLÁSTICO SOMENTE NO SOLO ARGILOSO	x	não detetado	x	detetado
FRANGO DE AVIÁRIO	detetado	detetado	não detetado	não detetado
BURACO SEM NADA	não detetado	detetado	não detetado	detetado
IED PLÁSTICO	não detetado	não detetado	não detetado	detetado
GRANADA MILLS	não detetado	detetado	detetado	não detetado

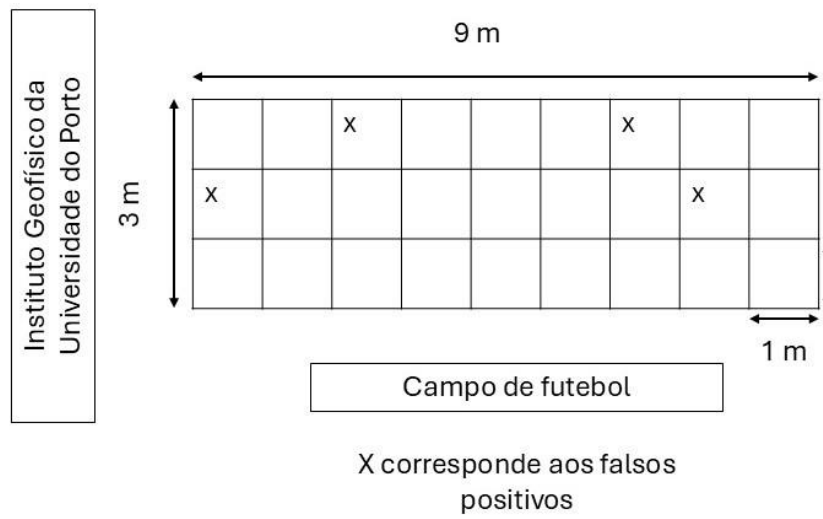


Figura 23 Mapa de falsos positivos da caixa de areia do detetor de metais Eurotec Pro.

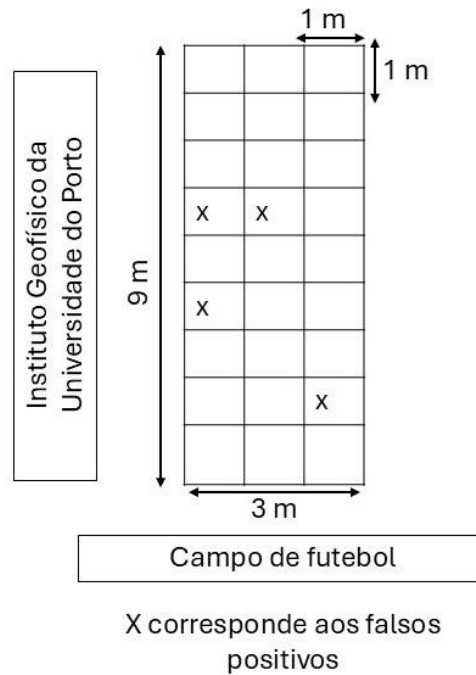


Figura 24 Mapa de falsos positivos do terreno argiloso do detetor de metais Eurotec Pro.

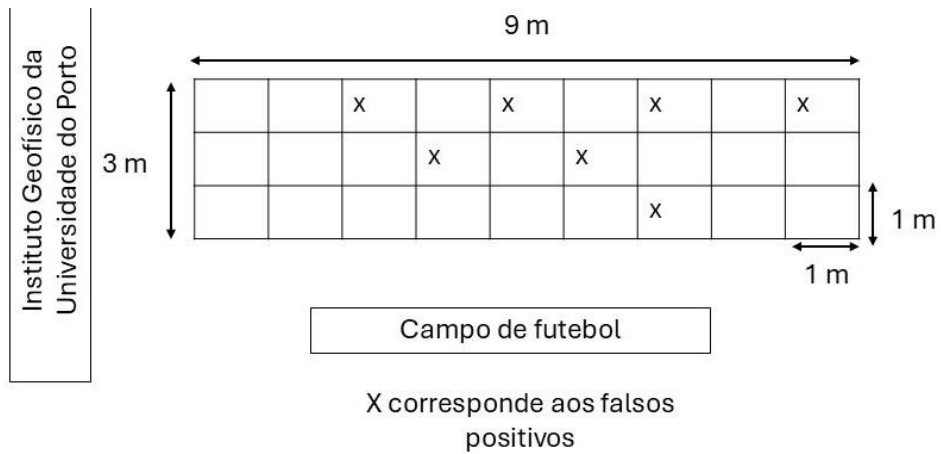


Figura 25 Mapa falsos positivos da caixa de areia do detetor de metais Aeknetics

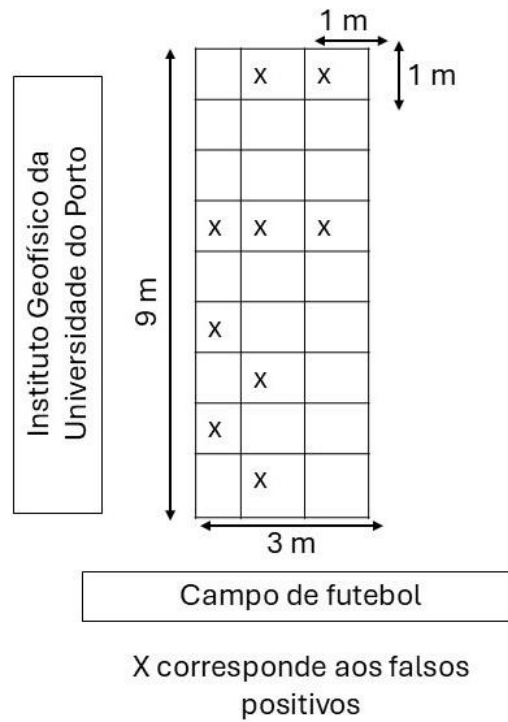


Figura 26 Mapa de falsos positivos do terreno argiloso do detetor de metais Aeknetics

5.2 Resultados obtidos com os GPR

Como já referido, para processar os dados recolhidos pelos GPR utilizamos o software *Reflex w*.

O processamento dos dados foi feito de maneira semelhante para os dados obtidos com os dois equipamentos, mas houve umas pequenas nuances no que toca à maneira de importar os ficheiros para o software, uma vez que os equipamentos trabalham com ficheiros em diferentes formatos. Posteriormente, procedeu-se à migração dos mesmos.

Para o GPR *Noggin* utilizamos os seguintes filtros:

- *Move start time;*
- *Subtract- mean (dewow);*
- *Energy decay;*
- *Background removal;*
- *Bandpassbutterworth;*
- *Kirchhof Migration.*

Para o GPR *Proceq* os filtros utilizados foram os seguintes:

- *Energy decay;*
- *Background removal;*
- *Bandpassbutterworth;*
- *Running average;*
- *Time cut;*
- *Kirchhof Migration.*

Com a migração feita abriu-se no *Reflex W* a janela que permite fazer os modelos 3D e as respetivas *slices* e assim importou-se os dados processados anteriormente e gerou-se o modelo e as *slices*. Posto isto passou-se à interpretação dos dados.

As figuras 25, 27, 29 e 31 mostram as *slices* que permitiram a melhor visualização e interpretação dos dados e as figuras 26, 28, 30 e 31 as *slices* sobrepostas às grelhas.

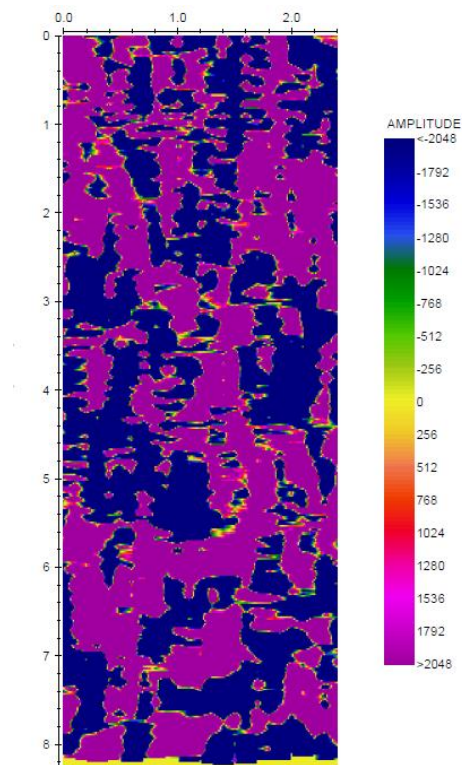


Figura 27 Slice representativa caixa de areia GPR Noggin 0,15 m

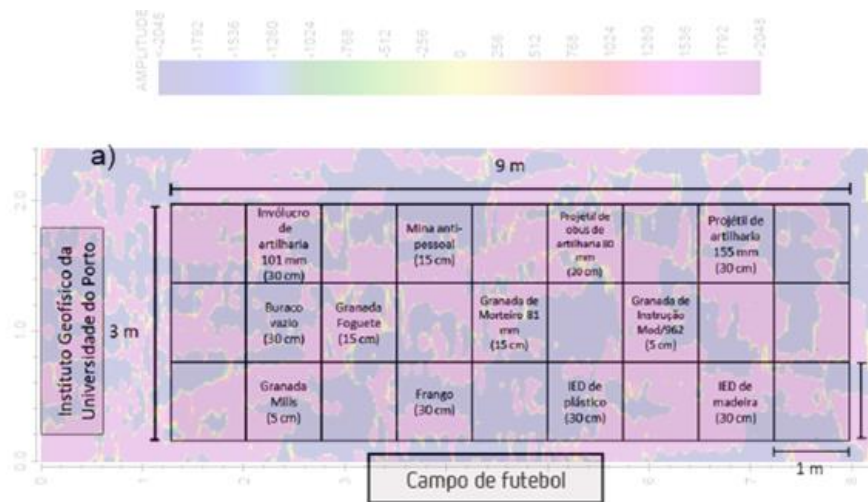


Figura 28 Slice representativa do GPR Noggin da caixa de areia sobreposta na grelha

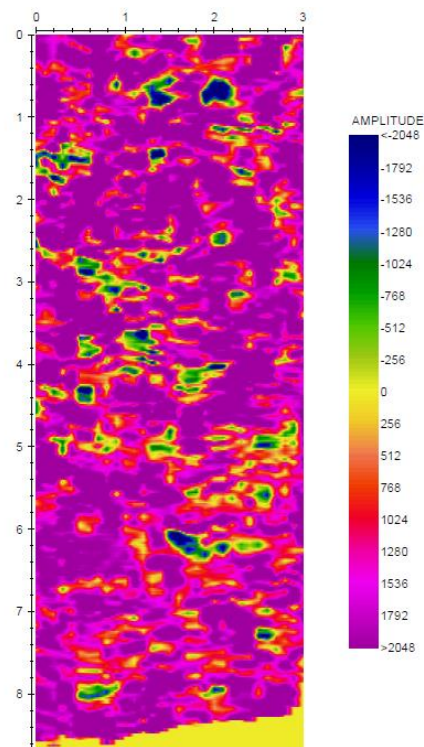


Figura 29 Slice representativa do terreno argiloso do GPR Noggin 0,50 m

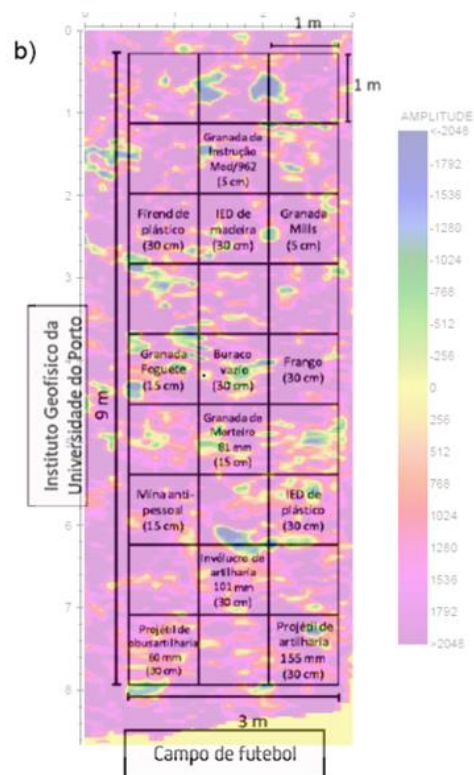


Figura 30 Slice representativa do GPR Noggin do terreno argiloso sobreposta na grelha

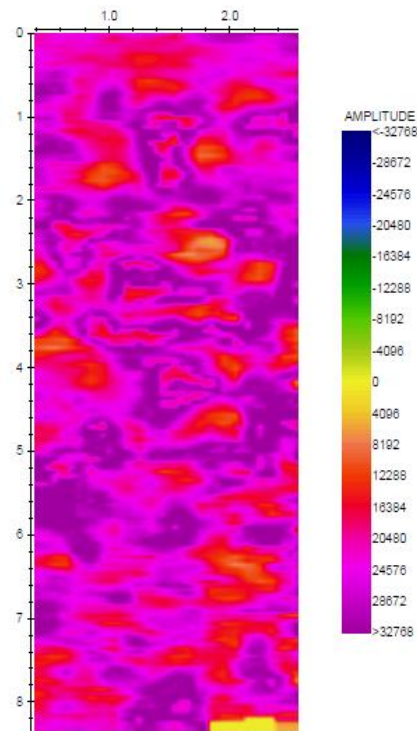


Figura 31 Slice representativa da caixa de areia do GPR Proceq 0,01 m

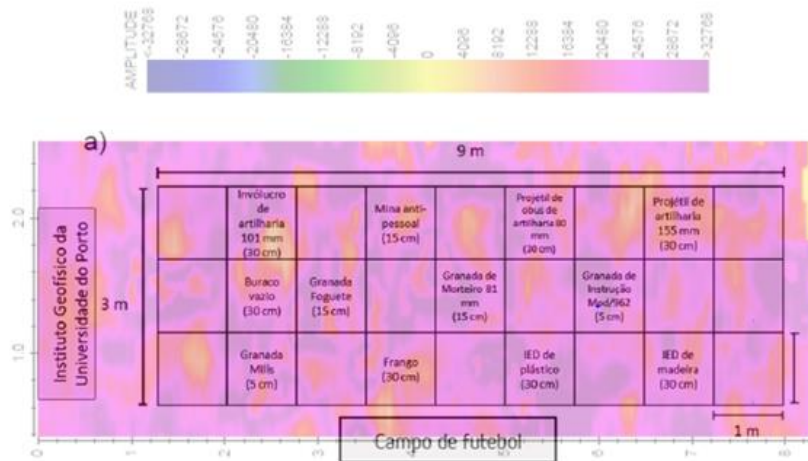


Figura 32 Slice representativa do GPR Proceq da caixa de areia sobreposta na grelha

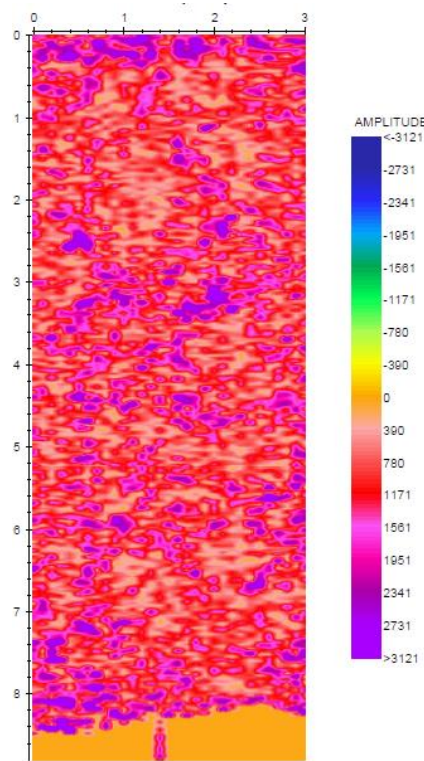


Figura 33 Slice representativa do GPR Proceq do terreno argiloso 0,15 m

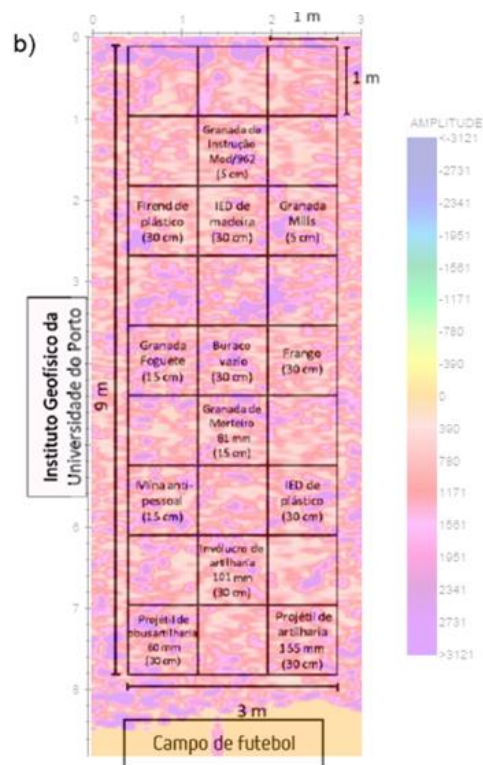


Figura 34 Slice representativa do GPR Proceq da caixa de areia sobreposta na grelha

Com base na interpretação destes modelos, conseguimos construir a seguinte matriz identificando-se os locais onde foram detetados os engenhos (Tabela 2).

Tabela 3 Resultados obtidos através da interpretação dos dados de GPR; O “x” representa que o engenho não foi enterrado no solo arenoso.

MATERIAIS	GPR NOGGIN AREIA	GPR NOGGIN ARGILA	GPR PROCEQ AREIA	GPR PROCEQ ARGILA
GRANADA DE INSTRUÇÃO MOD/ 962	detetado	detetado	detetado	detetado
GRANADA FOGUETE	não detetado	detetado	não detetado	detetado
GRANADA DE MORTEIRO	não detetado	detetado	não detetado	detetado
MINA ANTIPESSOAL	detetado	detetado	detetado	detetado
PROJÉTIL DE OBUS DE ARTILHARIA	detetado	detetado	detetado	detetado
PROJÉTIL DE ARTILHARIA	detetado	detetado	detetado	detetado
INVÓLUCRO DE ARTILHARIA	detetado	detetado	detetado	detetado
ENGENHO EXPLOSIVO IMPROVISADO (IED) EM CAIXA DE MADEIRA	detetado	detetado	não detetado	não detetado
FIREND DE PLÁSTICO SOMENTE NO SOLO ARGILOSO	x	detetado	x	detetado

Tabela 4 Resultados obtidos através da interpretação dos dados de GPR; O “x” representa que o engenho não foi enterrado no solo arenoso (Continuação).

MATERIAIS	GPR NOGGIN AREIA	GPR NOGGIN ARGILA	GPR PROCEQ AREIA	GPR PROCEQ ARGILA
FRANGO DE AVIÁRIO	não detetado	detetado	não detetado	detetado
BURACO SEM NADA	não detetado	detetado	não detetado	detetado
IED PLÁSTICO	detetado	detetado	detetado	detetado
GRANADA MILLS	detetado	detetado	detetado	não detetado

As *slices* relativas aos modelos GPR encontram-se nos anexos.

Conclusão

Tendo em consideração os resultados obtidos, relativamente aos detetores de metais, as percentagens de deteção dos objetos existentes foram baixas. Com o detetor de metais *Eurotec Pro*, a taxa de deteção foi de aproximadamente 58% na caixa de areia e 54% no terreno argiloso, enquanto com o detetor de metais *Aeknetics* foi de cerca de 25% na caixa de areia e 62% no terreno argiloso. No entanto, também foram detetados outros objetos nesses locais que não faziam parte dos pretendidos, sendo considerados falsos positivos. Estes podem ser explicados pela presença de objetos enterrados anteriormente por terceiros, antes da realização do *test-site*, ou objetos depositados ao longo dos anos, nomeadamente resíduos antrópicos.

Relativamente aos dados obtidos pelos GPR, podemos concluir que os resultados foram satisfatórios pois as percentagens de objetos detetados são relativamente altas. Com o GPR *Noggin* obtivemos 66% de objetos detetados na caixa de areia e 100% no terreno argiloso que quando comparado com os trabalhos anteriores (Machado, 2019; Martins, 2018; Gomes, 2019) percebemos que as percentagens se mantêm, o que mostra que este método é bastante fidedigno e fiável a longo prazo. Quanto aos dados obtidos com o GPR *Proceq* também concluímos que os resultados foram satisfatórios, mas na caixa de areia foram um pouco menos precisos pois a percentagem foi apenas de 58%, já no terreno argiloso obtivemos uma percentagem alta o que mostra que nos terrenos argilosos os GPR são mais fiáveis.

Com este *test-site* concluímos que o GPR e os detetores de metais ajudam na identificação de engenhos explosivos enterrados, tanto a curto como a médio-longo prazo, e que a sua utilização será fundamental no desmine de locais de treino e/ou de locais de confrontos armados.

Referências Bibliográficas

- Buynevich, I., & Duncan, M. (2017). *Ground-Penetrating Radar*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-48657-4>
- Clark, J., & Brandt, S. (2024). An introduction to geophysical exploration. In *From hunters to farmers*. <https://doi.org/10.1525/9780520407213-002>
- Daniels, J. (2000). *Ground Penetrating Radar Fundamentals* (USEPA Publication). <https://www.epa.gov>
- Das, B. M. (2007). *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. Bookman.
- Dunn, A. M., Hofmann, O. S., Waters, B., & Witchel, E. (2011). Cloaking malware with the trusted platform module. In *Proceedings of the 20th USENIX Security Symposium* (pp. 395–410).
- Ekinci, Y., Demirci, A., Türkeş, M., & Erginal, A. (2013). Shallow and deep-seated regolith slides on deforested slopes in Çanakkale, NW Turkey. *Geomorphology*.
- Eurocódigo 7 – Projecto geotécnico Parte 1: Regras Gerais. (2010). Instituto Português da Qualidade.
- Fontoura, M. J., Moura, R. M. M., & Dias, A. G. (2011). A geologia e a geofísica na avaliação da contaminação associada a vazadouros controlados – o caso do VC de Matosinhos no Norte de Portugal. *Comunicações Geológicas*, 98(1), 83–92.
- Gomes, C. (2019). *A utilização de georadar 2D e 3D na deteção e identificação de engenhos explosivos* [Dissertação de Mestrado].
- Julivert, M., Fontboté, J. M., Ribeiro, A., & Conde, L. (1974). *Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares*. IGME.
- Loke, M. H. (1999). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*. <https://www.geotomosoft.com/downloads.php>
- Machado, A. (2019). *Feasibility study of buried explosive detection using GPR (Ground Penetrating Radar)* [Dissertação de Mestrado em Ciências Forenses].
- Machado Brito-da-Costa, A., Martins, D., Rodrigues, D., Fernandes, L., Moura, R., & Madureira-Carvalho, Á. (2022). Ground Penetrating Radar for buried explosive devices detection: A case studies review. *Australian Journal of Forensic Sciences*, 54*(4), 559–578. <https://doi.org/10.1080/00450618.2020.1865453>

Martins, D. (2018). *Deteção geofísica de engenhos explosivos* [Relatório].

NetZch. (2025). *Definição de condutividade térmica*. <https://analyzing-testing.netzsch.com/pt-BR/landingpages/definicao-de-condutividade-termica>

PLaza Diez, O., & Delgado Rodrigues, J. (2005). Geologia aplicada. In *Imagem dos Centros Históricos – Bases Para a Sua Salvaguarda* (Vol. II, pp. 81–86).

Proceq GP8000. (2024). *Screening Eagle Technologies*. <https://www.screeningeagle.com/pt/products/proceq-gp8000>

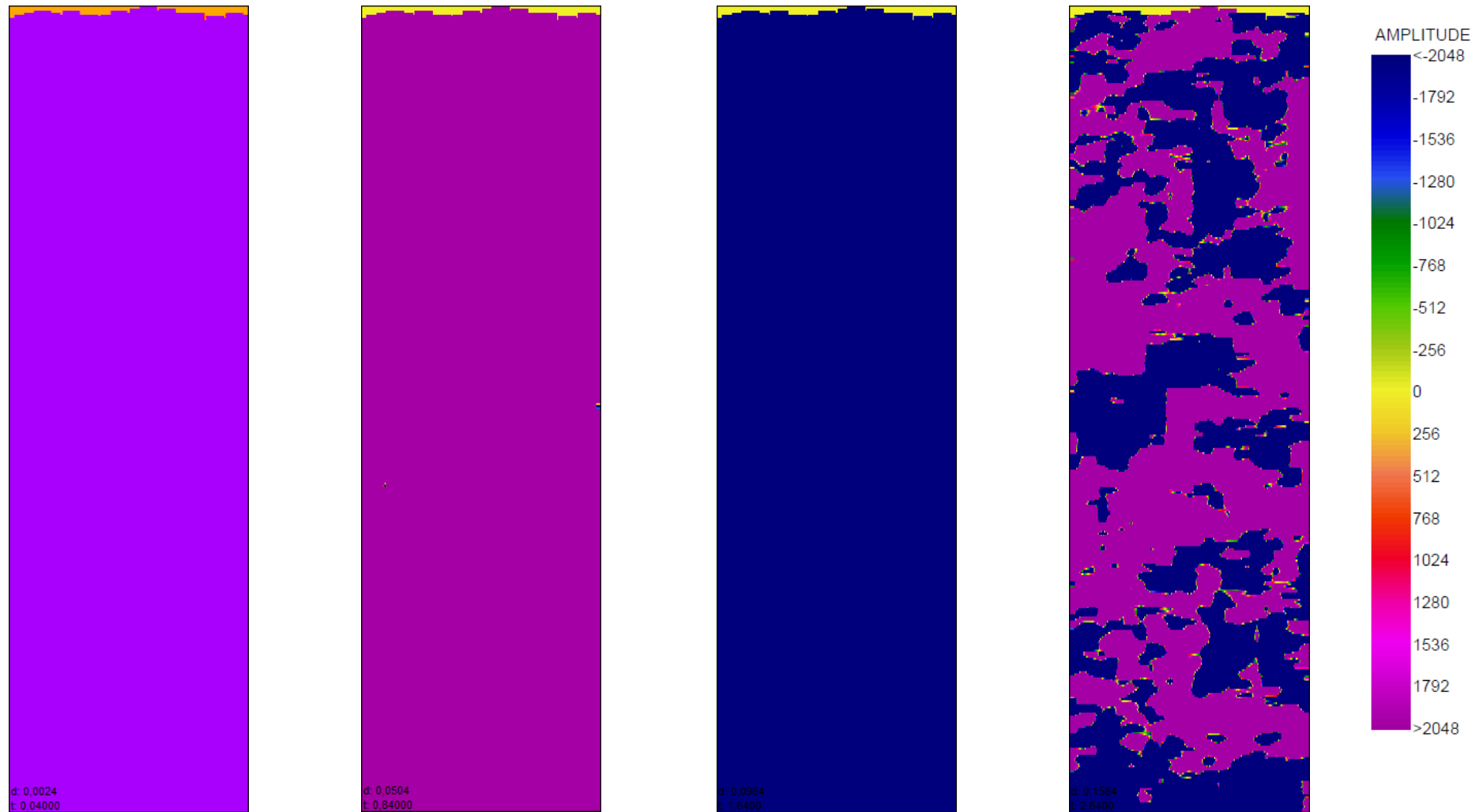
Sensores e Softwares. (2024). *Sistemas GPR adaptáveis NOGGIN*. <https://www.sensoft.ca/pt/products/noggin/overview/>

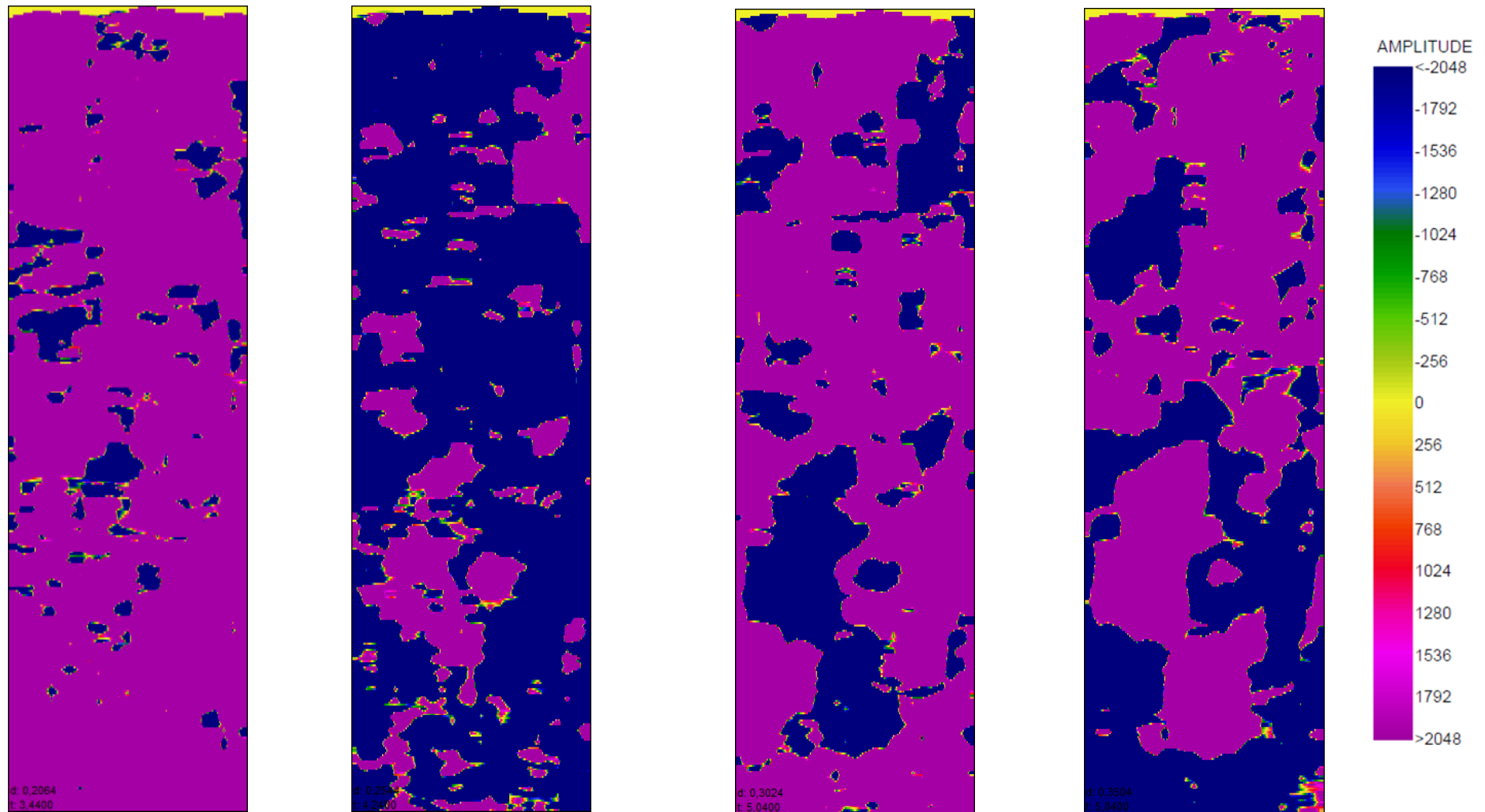
Teixeira, C., & Carrington da Costa, J. (1957). *Notícia explicativa da folha 09-C Porto da Carta Geológica de Portugal*.

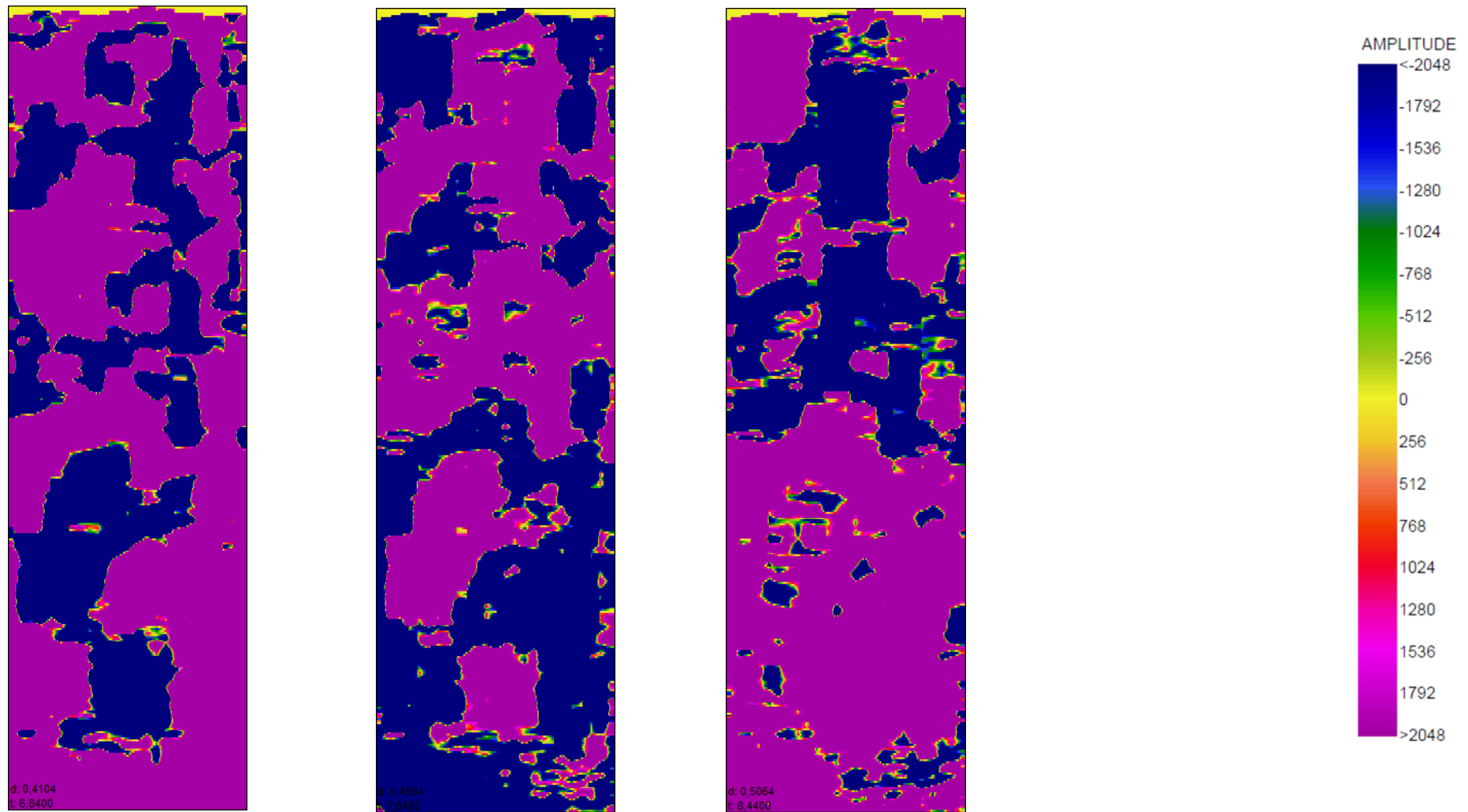
Teknetics Eurotek Pro 8. (2022). *GEOHUNTER*. <https://geohunter.pt/produto/teknetics-eurotek-pro-8/>

ASTM International. (2022). *Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure (ASTM D5334-14)*. <https://store.astm.org/d5334-14.html>

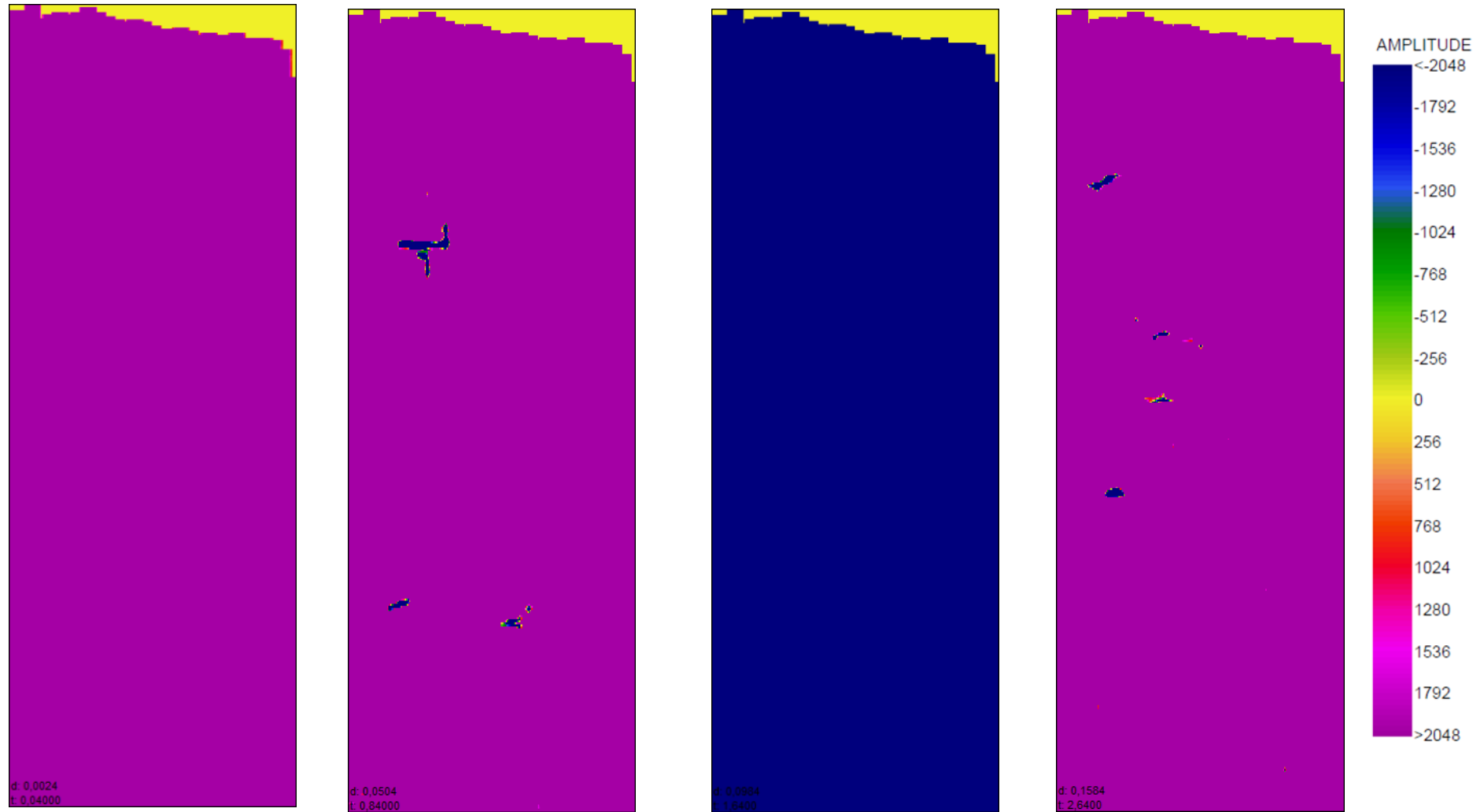
Anexo1 slices do GPR Noggin caixa de areia

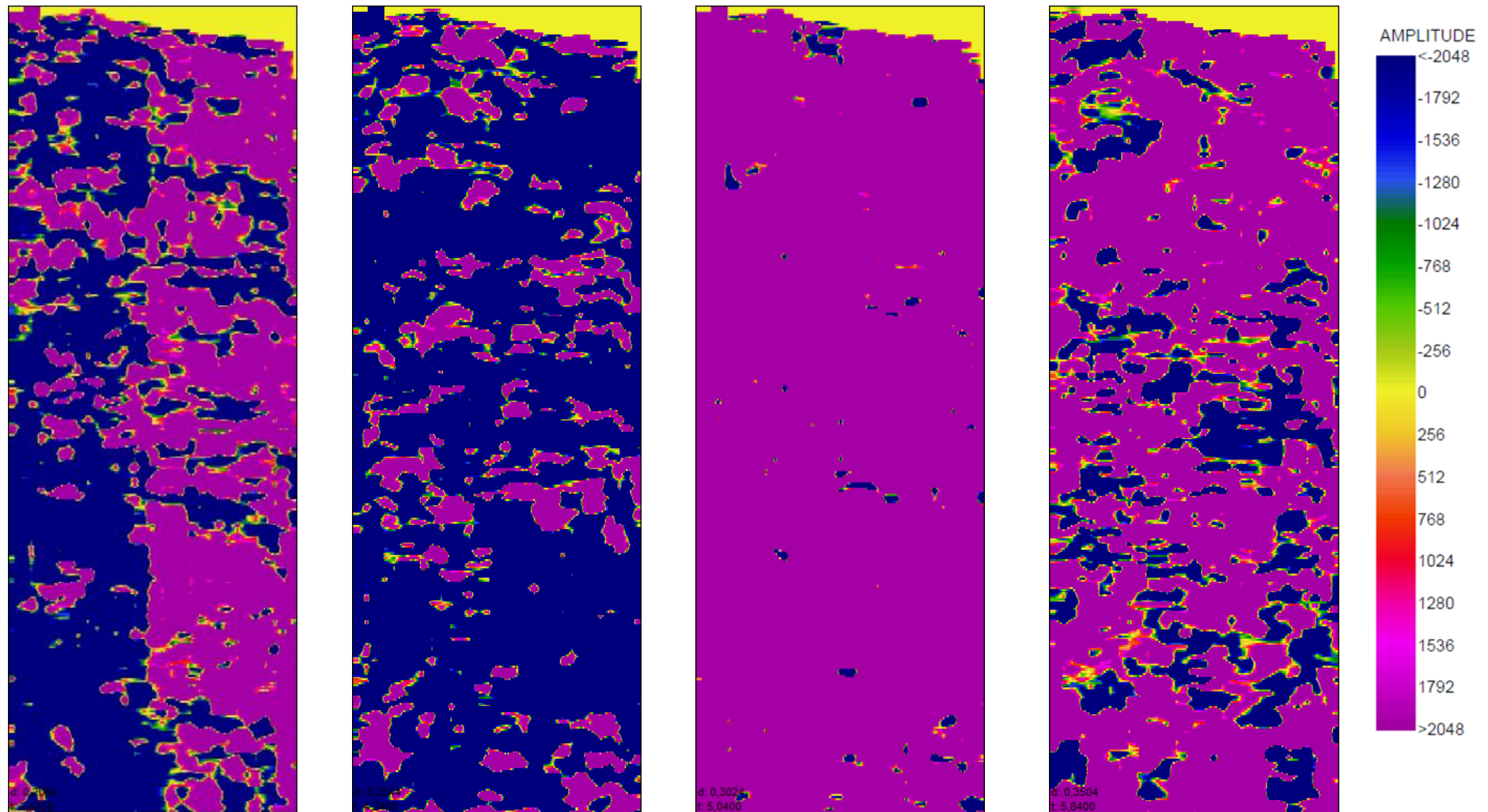


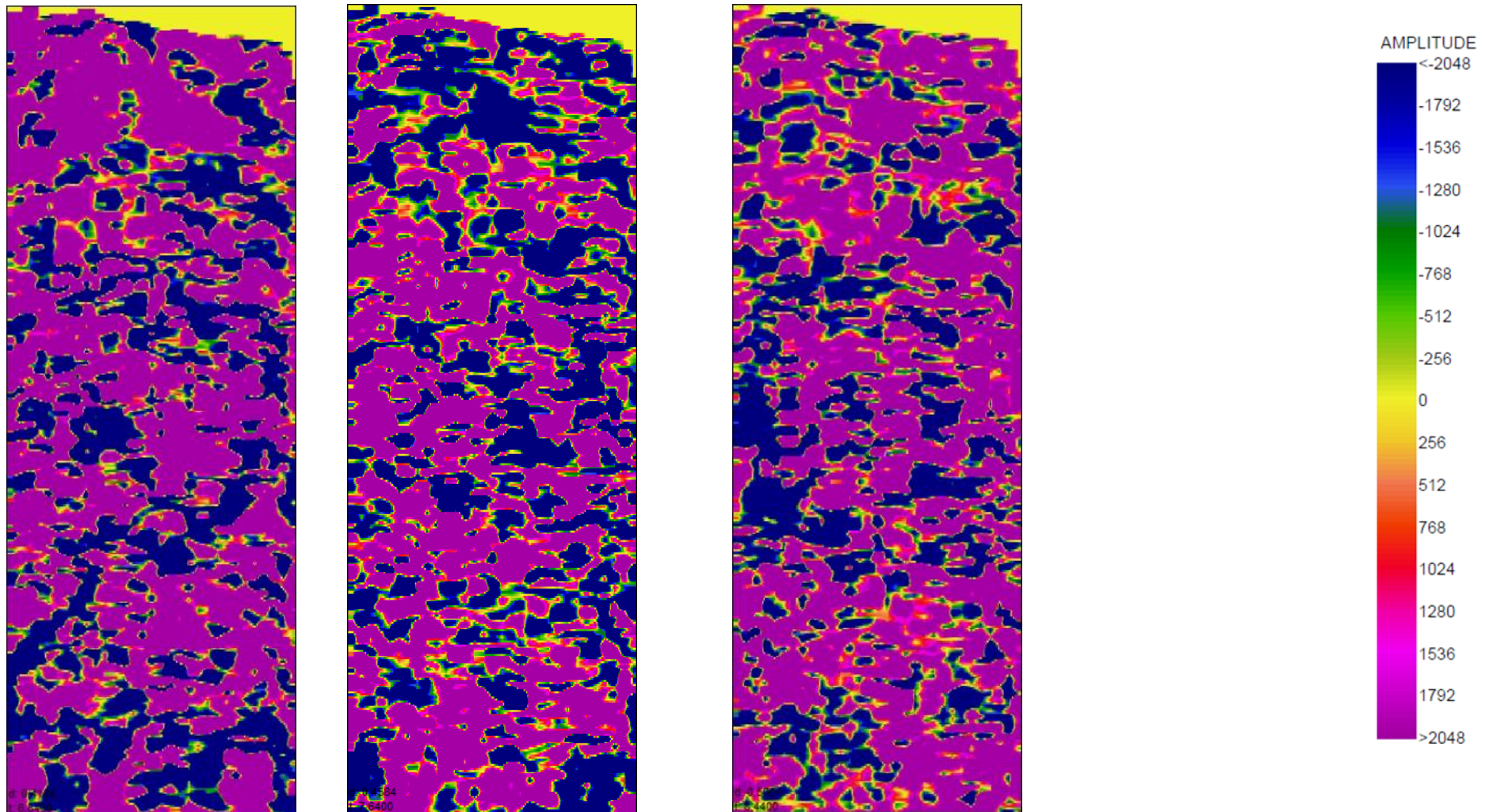




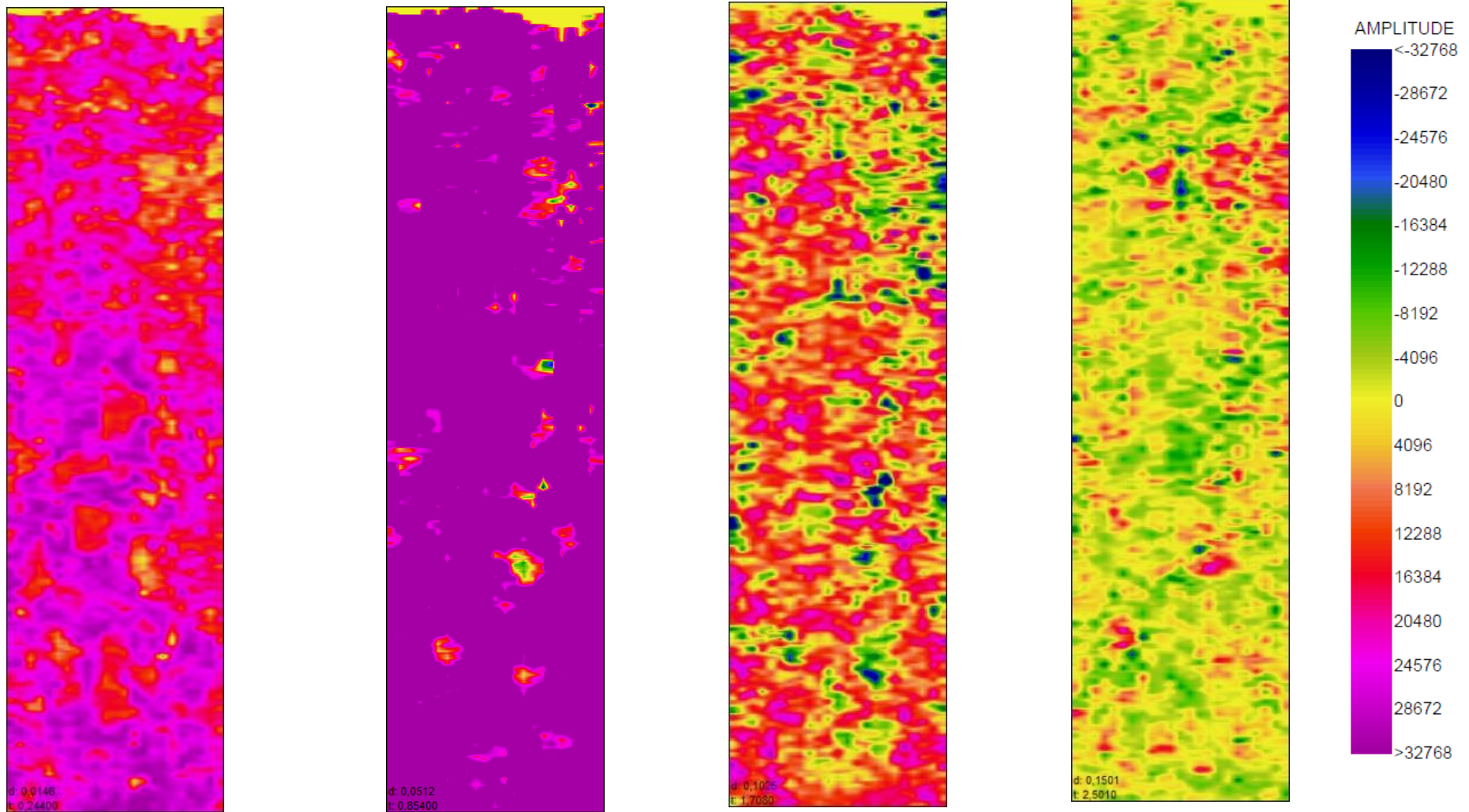
Anexo 2 slices do GPR Noggin argila

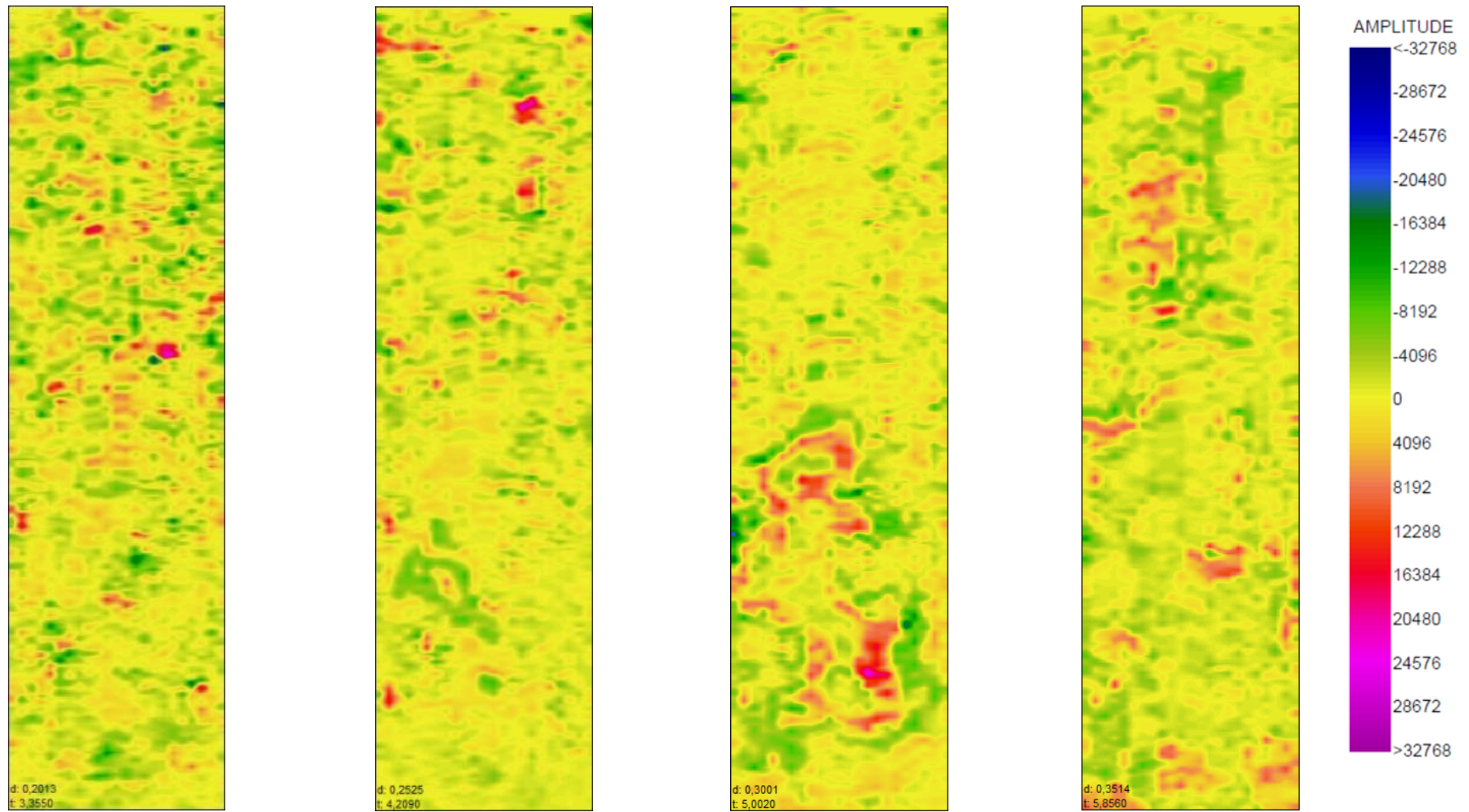


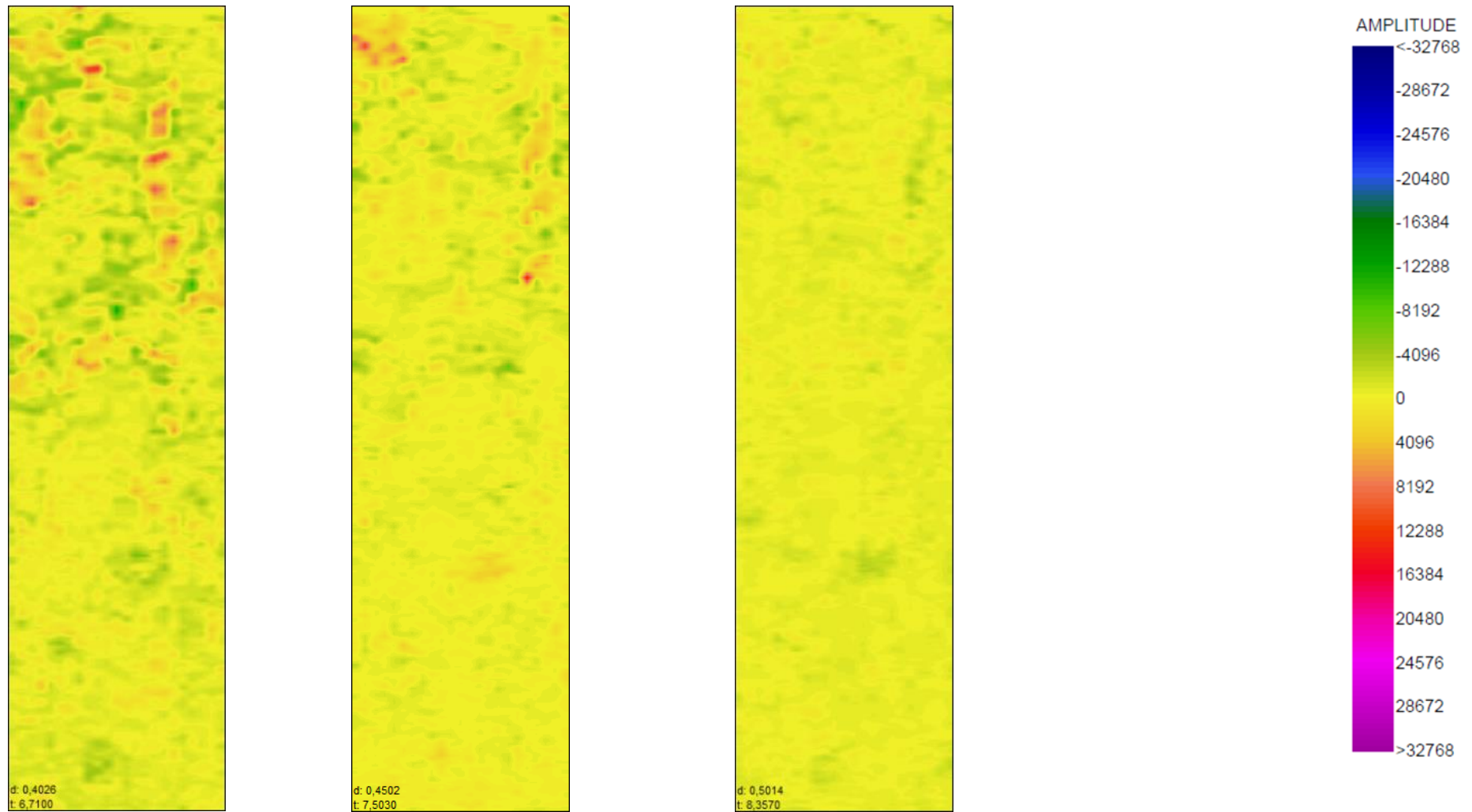




Anexo 3 slices do GPR Proceq caixa de areia







Anexo 4 slices do GPR Proceq argila

