

1 2 9 0



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Alexandre Filipe Gomes

**ESTUDO DA COLORAÇÃO DE CALCÁRIOS ORNAMENTAIS  
PARA PLANEAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE EXPLORAÇÕES –  
CONTRIBUTOS COM A INTEGRAÇÃO DE DADOS  
GEOFÍSICOS E ENSAIOS DE LABORATÓRIO**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas  
orientada pela Professora Doutora Joana Paula Machado Ribeiro e pelo  
Doutor João António Marques Duarte apresentada ao Departamento de  
Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de  
Coimbra.**

Setembro de 2022



Faculdade de Ciências e Tecnologia  
da Universidade de Coimbra

Alexandre Filipe Gomes

**Estudo da coloração de calcários ornamentais para planeamento e  
otimização de explorações - contributos com a integração de dados  
geofísicos e ensaios de laboratório**

Dissertação no âmbito do Mestrado de Engenharia Geológica e de Minas orientada  
pela Professora Doutora Joana Paula Machado Ribeiro e pelo Doutor João António  
Marques Duarte apresentada ao Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de  
Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2022



## Resumo

O setor das rochas ornamentais detém um mercado de elevada relevância no nosso país, e sendo a arte de trabalhar a pedra uma tradição já tão antiga e tratando-se de um recurso natural finito, pretende-se contribuir para o estudo de estratégias de rentabilização da sua exploração.

Esta dissertação tem como principal objetivo a caracterização do calcário em exploração na “pedreira EM&R nº6478”, com base na aplicação de métodos geofísicos elétricos e eletromagnéticos não invasivos, de modo a planear e otimizar a exploração de calcário para fim ornamental, nomeadamente, através da identificação e localização das áreas do maciço com coloração azulada e, por isso, com menor interesse económico.

Verificou-se que os valores de resistividade elétrica sofrem variações em zonas de possível existência de descontinuidades estruturais, indicando a existência de uma associação entre o aparecimento de calcário de tonalidade mais clara em zonas de maior concentração de descontinuidades, relativamente ao calcário com tonalidade azulada. Foi possível constatar ainda, que o calcário mais escuro (azulado) apresenta uma fração argilosa na composição, que além de lhe conferir a tonalidade mais escura, faz com que os valores de resistividade elétrica sejam mais baixos, comparativamente ao calcário mais claro.

O radar de penetração no solo (GPR) mostrou-se eficaz na caracterização estrutural, sequencial e de tipologia através da conversão dos dados num modelo 3D, sendo possível identificar a direção estrutural preferencial do maciço em análise. Foi ainda possível testar um *software* que permitiu usar os valores de reflectância obtidos através do GPR e convertê-los em valores de resistividade do maciço.

Os métodos mostraram-se bastante importantes e eficazes no planeamento futuro da exploração, permitindo direccionar futuramente a frente de desmonte em virtude dos resultados obtidos e, deste modo rentabilizar ao máximo a exploração.

**Palavras-Chave:** Calcário, Coloração, Geofísica, Resistividade Elétrica, Radar de Penetração no Solo.



## Abstract

The ornamental stone sector has a highly relevant market in our country. Being the art of working the stone an ancient tradition and since it is a finite natural resource, it's intended to contribute to the study of strategies for the profitability increase of its exploitation.

The main aim of this dissertation is the characterization limestone explored in the "EM&R n°6478" quarry, based on the application of non-invasive electrical and electromagnetic geophysical methods, in order to plan and optimize the exploitation of limestone for ornamental purposes, namely, through the identification and location of areas of the massif with a bluish color and, therefore, with lesser economic interest.

It was found that the electrical resistivity values vary in areas of possible existence of structural discontinuities, indicating the existence of an association between the appearance of lighter colored limestone in areas with a higher concentration of discontinuities, in relation to the bluer limestone. It was also possible to verify that the darker limestone (blue) presents a clayey fraction in the composition, which, in addition to giving it a darker shade, makes the electrical resistivity values lower, compared to the lighter limestone.

The ground penetrating radar (GPR) proved to be effective in structural, sequential and typology characterization by converting the data into a 3D model, making it possible to identify the preferred structural direction of the massif under analysis. It was also possible to test a software that allowed using the reflectance values obtained through the GPR and converting them into mass resistivity values.

The methods proved to be very important and effective in the future planning of explorations, allowing to direct the blasting front in the future due to the results and, in this way, maximize the profitability of the exploration.

**Keywords:** Limestone, Coloration, Geophysics, Electrical Resistivity, Ground Penetrating Radar.





## Agradecimentos

Não há tamanho suficiente nesta secção que me permita descrever por palavras, o sentido e profundo sentimento de gratidão que tenho por todas as pessoas, que de uma forma ou de outra me ajudaram, tanto ao longo do percurso académico como no quotidiano em geral.

Quero começar com um agradecimento muito especial à minha família, ao meu pai, mãe e irmão por todo o carinho e acompanhamento durante todo o meu percurso.

À minha pequenina Ruth, por toda a motivação, carinho, ajuda e companheirismo demonstrados ao longo deste último ano.

Aos meus colegas e amigos, pela vossa paciência durante a minha ausência nessas tão importantes jantaradas e noitadas.

Ao meu orientador científico Doutor João Marques Duarte, pela orientação, paciência, disponibilidade e ensinamentos prestados que me serão bastante úteis para a vida, tanto profissional como pessoal.

À Professora Doutora Joana Ribeiro, minha orientadora científica, pela disponibilidade, conselhos e dicas, essenciais para a boa redação desta dissertação.

À empresa Eduardo Marques & Rosa, pela permissão da utilização dos seus terrenos para a execução e análise dos vários métodos e levantamentos efetuados.

Ao engenheiro Nuno Barraca, pela ajuda no processamento das TRE.

Ao Leonid Krinitsky, pela sua disponibilidade e contribuição no processamento dos diversos dados originados pelo método eletromagnético permitindo, dessa forma, testar uma nova técnica de processamento de dados.

Ao Professor Doutor Pedro Dinis, diretor do Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, pelo seu auxílio na descarbonatação das amostras.

Ao corpo docente do Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, por todos os ensinamentos ao longo destes anos.

Ao senhor Carlos Maia, pela sua disponibilidade e ajuda com o equipamento de difração de raios-X.



# Índice

Resumo .....	iii
Abstract .....	v
Agradecimentos .....	vii
Capítulo 1 - Introdução .....	1
1.1 - Introdução .....	1
1.2 - Importância das rochas ornamentais.....	1
1.3 - Contextualização do tema em estudo .....	3
1.4 - Objetivo.....	3
1.5 - Estrutura da dissertação .....	4
Capítulo 2 - Enquadramento da área de estudo.....	5
2.1 - Localização Geográfica.....	5
2.2 - Enquadramento Geológico.....	6
2.3 - Caracterização Hidrológica .....	12
2.4 - Características físico-mecânicas do calcário em exploração.....	15
Capítulo 3 - Métodos.....	16
3.1 - Introdução .....	16
3.2 - Localização das tomografias de resistividade elétrica (TRE) e da grelha do <i>Ground Penetrating Radar</i> (GPR) .....	17
3.3 - Método da resistividade elétrica .....	19
3.4 – Método eletromagnético <i>Ground Penetrating Radar</i> (GPR).....	23
3.5 - Caracterização geral do calcário em exploração .....	25
3.5.1 - Análise Petrográfica.....	25
3.5.2 - Difração de raios-X (DRX) .....	27
3.6 - Tratamento de imagens .....	28
3.6.1 - Realce da diferença de tonalidade do calcário na frente da pedreira com recurso ao editor de imagens da <i>Microsoft</i> .....	28

3.6.2 - Realce da diferença de tonalidade do calcário na frente da pedreira através do <i>software Inkscape</i> .....	33
3.6.3 - Delimitação da interface mais creme-azul.....	36
Capítulo 4 - Resultados e Discussão .....	38
4.1 - Resistividade elétrica .....	41
4.1.1 - Tomografias de resistividade elétrica medidas no campo .....	41
4.1.2 - Valores de resistividade medidos no laboratório .....	52
4.1.3 - Análise petrográfica e mineralógica .....	58
4.1.4 - Modelo 3D da resistividade elétrica .....	62
4.2 - GPR .....	63
4.2.1 - Grelha do GPR .....	63
4.2.2 - Modelo 3D do GPR.....	64
4.2.3 - <i>Software GEORADAR-EXPERT 2.0</i> .....	65
4.2.4 - Comparação dos modelos 3D.....	66
Capítulo 5 - Conclusões.....	69
Referências Bibliográficas .....	71
Anexos .....	i

## Índice de Figuras

Figura 1 - Localização geográfica da área estudada.....	5
Figura 2 - Localização da área de estudo. A mancha a vermelho representa a área de estudo (fonte: Google Earth, acedido em 2022).....	6
Figura 3 - Subdivisões da BL de acordo com Kullberg et al., 2006; geologia adaptada da Carta Geológica de Portugal à escala 1/1000000 (ed. LNEG) (adaptado de Carvalho, 2014). .....	7
Figura 4 - Carta geológica simplificada do MCE com definição das principais unidades morfoestruturais; geologia adaptada da Carta Geológica de Portugal à escala 1/50000); o círculo vermelho representa o local da área-alvo do estudo (adaptado de Carvalho, 2013). .....	9
Figura 5 - Litostratigrafia do MCE; o retângulo vermelho assinala a litologia aflorante na área de estudo (adaptado de Carvalho, 2013). .....	10
Figura 6 – Mapa geológico com localização de núcleos de pedreiras no MCE; assinalado com o círculo vermelho encontra-se a região em estudo e com o retângulo a litologia aflorante na área de estudo (adaptado de Carvalho & Lisboa, 2018).....	11
Figura 7 - Localização do Sistema Aquífero Maciço Calcário Estremenho; o círculo vermelho indica a localização da área de estudo (adaptado de Carvalho et al., 2011). .....	12
Figura 8 - Enquadramento do sistema aquífero Maciço Calcário Estremenho (MCE); o círculo vermelho indica a localização da área-alvo estudada (adaptado de Almeida et al., 2000)). .....	14
Figura 9 - Fluxograma descritivo dos métodos aplicados.....	16
Figura 10 - Localização das tomografias de resistividade elétrica (TRE) e da área da grelha do GPR; marcação (a tracejado) da descontinuidade relevante presente. ....	17
Figura 11 - Localização dos locais (retângulos vermelhos) onde foram recolhidas as amostras.....	18
Figura 12 – Esquema do dispositivo Wenner (adaptado de Proceq SA, 2017). .....	19
Figura 13 – Eléctrodo e recipiente constituído por um tubo de plástico (PVC) com uma base porosa (pano + esponja), preenchido com material arenoso e regado com água salgada.....	20
Figura 14 - Movimento dos eléctrodos no levantamento de resistividade elétrica do dispositivo Wenner, realizada de forma automática pelo equipamento ao longo do alinhamento previamente determinado; C1 e C2 eléctrodos de corrente, P1 e P2 eléctrodos de potencial. O quadrado ■corresponde ao local da medição efetuada. ....	22
Figura 15 - Método de medição e ilustração gráfica de uma secção bidimensional (2D) de resistividade elétrica do dispositivo Wenner. Localização espacial dos eléctrodos de corrente (C1 e C2), e de potencial (P1 e P2). O quadrado ■corresponde ao local da medição efetuada. ....	22
Figura 16 - Sistema GPR utilizado, da empresa Sensors & Software Inc. a) unidade de controlo digital; b) antena transmissora; c) antena recetora; d) GPS. ....	23
Figura 17 - Esquema do principio básico de funcionamento do GPR (adaptado de Scantech Geoscience Ltd, 2021). .....	25
Figura 18 - (1) Limite (a tracejado) entre as diferentes colorações; a) mais azul; b) mais creme; (2) Amostra de calcário referente à área mais azul. ....	25

Figura 19 - Microscópio ótico de reflexão LEICA DM750P utilizado nas observações petrográficas.....	26
Figura 20 – A) Equipamento de DRX utilizado; B) Esquema simplificado do funcionamento da técnica de difração de raios-X (retirado de Caracterizze (2022)). ..	27
Figura 21 - Frente de desmonte relativa à TRE 1 sem qualquer processamento de imagem.....	29
Figura 22 - Frente de desmonte relativa à TRE 1 com recurso ao editor de imagens da Microsoft para processamento de imagem. ....	29
Figura 23 - Frente de desmonte relativa à TRE 2 sem qualquer processamento de imagem.....	30
Figura 24 - Frente de desmonte relativa à TRE 2 com recurso ao editor de imagens da Microsoft para processamento de imagem. ....	30
Figura 25 - Frente de desmonte relativa à TRE 3 sem qualquer processamento de imagem.....	31
Figura 26 - Frente de desmonte relativa à TRE 3 com recurso ao editor de imagens da Microsoft para processamento de imagem. ....	31
Figura 27 - Frente de desmonte relativa à TRE 4 sem qualquer processamento de imagem.....	32
Figura 28 - Frente de desmonte relativa à TRE 4 com recurso ao editor de imagens da Microsoft para processamento de imagem. ....	32
Figura 29 - Resultado final do tratamento de imagem, referente à frente de desmonte da tomografia de resistividade elétrica 1, com recurso ao software Inkscape. ....	34
Figura 30 - Resultado final do tratamento de imagem, referente à frente de desmonte da tomografia de resistividade elétrica 2, com recurso ao software Inkscape. ....	34
Figura 31 - Resultado final do tratamento de imagem, referente à frente de desmonte da tomografia de resistividade elétrica 3, com recurso ao software Inkscape. ....	35
Figura 32 - Resultado final do tratamento de imagem, referente à frente de desmonte da tomografia de resistividade elétrica 4, com recurso ao software Inkscape. ....	35
Figura 33 - Área de desmonte respeitante à TRE 1, com a delimitação do calcário mais azul (a) e do mais creme (b))......	36
Figura 34 - Área de desmonte respeitante à TRE 2, com a delimitação do calcário mais azul (a) e do mais creme (b))......	36
Figura 35 - Área de desmonte respeitante à TRE 3, com a delimitação do calcário mais azul (a) e do mais creme (b))......	37
Figura 36 - Área de desmonte respeitante à TRE 4, com a delimitação do calcário mais azul (a) e do mais creme (b))......	37
Figura 37 - Localização das TRE, relativamente à frente de desmonte da TRE 1.....	38
Figura 38 - Localização das TRE, relativamente à frente de desmonte da TRE 2.....	39
Figura 39 - Localização das TRE, relativamente à frente de desmonte da TRE 3.....	39
Figura 40 - Localização das TRE, relativamente à frente de desmonte da TRE 4.....	40
Figura 41 - Localização da grelha GPR. ....	40
Figura 42 - Secção de resistividade elétrica processada, da TRE 1; delimitação da frente de desmonte (retângulo tracejado a vermelho). ....	42
Figura 43 - Secção de resistividade elétrica processada, da TRE 2; delimitação da frente de desmonte (retângulo tracejado a vermelho). ....	42
Figura 44 - Secção de resistividade elétrica processada, da TRE 3; delimitação da frente de desmonte (retângulo tracejado a vermelho). ....	43

Figura 45 - Secção de resistividade elétrica processada, da TRE 4; delimitação da frente de desmonte (retângulo tracejado a vermelho).....	43
Figura 46 - Secção de resistividade elétrica processada, da TRE 5.....	44
Figura 47 - Secção de resistividade elétrica processada, da TRE 6.....	44
Figura 48 - Secção de resistividade elétrica, projetada na frente de desmonte da TRE 1 e marcação (tracejado a vermelho), de possíveis descontinuidades estruturais. ....	45
Figura 49 - Secção de resistividade elétrica, projetada na frente de desmonte da TRE 2 e marcação (tracejado a vermelho), de possíveis descontinuidades estruturais. ....	45
Figura 50 - Secção de resistividade elétrica, projetada na frente de desmonte da TRE 3 e marcação (tracejado a vermelho), de possíveis descontinuidades estruturais. ....	46
Figura 51 - Secção de resistividade elétrica, projetada na frente de desmonte da TRE 4 e marcação (tracejado a vermelho), de possíveis descontinuidades estruturais. ....	46
Figura 52 – Evidências da “descoloração” e/ou “lixiviação” do calcário mais azul para calcário mais creme, junto de uma descontinuidade estrutural, num bloco da “pedreira EM&R”.....	48
Figura 53 - Destaque da coloração mais creme junto de descontinuidades estruturais (pedreira contigua).....	49
Figura 54 - Localização da caixa de falha (assinalada a vermelho); localização da TRE 1. ....	50
Figura 55 - Equipamento ABEM com a respetiva ligação dos cabos para medição através do método Wenner.....	52
Figura 56 - Talhada onde foram recolhidas as amostras (1 a 5); a) calcário com coloração mais azulada; b) calcário com coloração mais creme. ....	53
Figura 57 - Amostra característica da zona 1.....	54
Figura 58 - Amostra característica da zona 2.....	54
Figura 59 - Amostra característica da zona 3.....	55
Figura 60 - Amostra característica da zona 4.....	55
Figura 61 - Amostra característica da zona 5.....	56
Figura 62 – Imagem petrográfica da área mais clara (creme) do provete 1 com a objetiva de 50x a óleo. ....	59
Figura 63 - Imagens petrográficas da área mais escura (azulada) do provete 1 com a objetiva de 50x a óleo. ....	59
Figura 64 - Mineral de pirite observado na área mais escura (azulada) do provete 1 com a objetiva de 50x a óleo. ....	60
Figura 65 – Representação 2.5D do modelo tridimensional (3D) da campanha de resistividade elétrica. ....	62
Figura 66 – Representação 2.5D do modelo tridimensional (3D) dos valores de reflectância do GPR.....	64
Figura 67 – Representação 2.5D do modelo 3D do alinhamento das secções de resistividade elétrica, obtidos através dos radargramas do GPR. ....	66
Figura 68 – Representação 2.5D do modelo 3D de resistividade elétrica, limitado à área do GPR.....	67
Figura 69 - Representação 2.5D do modelo 3D de resistividade elétrica com base em dados GPR, limitado à área das secções de resistividade elétrica.....	67





## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Desempenho declarado do Calcário Creme Valinho (CVV) (EM&R Lda (2017)).....	15
Tabela 2 - Ajustes e os seus respetivos valores, efetuados para uma melhor perceção da coloração mais azul presente no maciço (tomografia de resistividade elétrica 1)...	29
Tabela 3 - Ajustes e os seus respetivos valores, efetuados para uma melhor perceção da coloração mais azul presente no maciço (tomografia de resistividade elétrica 2)...	30
Tabela 4 - Ajustes e os seus respetivos valores, efetuados para uma melhor perceção da coloração mais azul presente no maciço (tomografia de resistividade elétrica 3)...	31
Tabela 5 - Ajustes e os seus respetivos valores, efetuados para uma melhor perceção da coloração mais azul presente no maciço (tomografia de resistividade elétrica 4)...	32
Tabela 6 - Valores de resistividade elétrica medidos perpendicularmente à estratificação. ....	56
Tabela 7 - Média dos valores de resistividade elétrica das amostras 4 e 5. ....	57
Tabela 8 - Média final, obtida através da média dos valores médios registados na tabela 7. ....	57
Tabela 9 - Média final, obtida através da média dos valores médios de resistividade elétrica das amostras 1, 2 e 3. ....	58



# Capítulo 1 - Introdução

## 1.1 - Introdução

O presente trabalho foi elaborado no contexto da unidade curricular de Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas do Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Esta dissertação foi fruto do estágio curricular promovido pelo Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra e a empresa IQGeo – Serviços, Unipessoal, Lda. O mesmo teve uma duração de seis meses, durante os quais houve a oportunidade de colaborar, de forma ativa, em vários trabalhos no âmbito da geofísica, incluindo, aquisição, tratamento e processamento de dados, bem como a sua respetiva modelação em 3 dimensões (3D), nomeadamente, em métodos elétricos, como foi o caso da resistividade elétrica, e eletromagnéticos, destacando-se os métodos de Ground Penetrating Radar (GPR) e o Método Eletromagnético no Domínio do Tempo (TDEM). Adicionalmente a estes trabalhos, desenvolveu-se no âmbito desta dissertação, um trabalho de investigação que incluiu a aplicação de técnicas geofísicas, no estudo de um maciço rochoso, explorado para fim ornamental, tendo como objetivo a otimização da exploração.

Este estágio permitiu adquirir o conhecimento e as ferramentas indispensáveis para o desenvolvimento e concretização das temáticas abordadas ao longo deste trabalho.

## 1.2 - Importância das rochas ornamentais

A pedra é um dos recursos naturais mais utilizados pelo Homem, particularmente como sendo um material de construção e ornamentação, existindo evidências do uso da mesma já desde o neolítico, há mais de 10.000 anos, período em que a própria civilização humana já fazia uso deste recurso, sobretudo para construção de túmulos, tendo por base blocos dos mais variados litótipos de rocha, desde o granito ao arenito. Este tipo de construções e monumentos ainda hoje podem ser visitados, um pouco por todo mundo (Santos, 2017).

Posteriormente, múltiplas civilizações vieram dar ainda mais uso e importância à rocha, como foi o caso dos egípcios com a construção das suas pirâmides constituídas maioritariamente por blocos de calcário e sienito e os Gregos e Romanos que revolucionaram o modo de usar e manusear a rocha, desencadeando um avanço tecnológico de elevada importância, objetivando claro os seus conhecimentos de engenharia aplicados nas suas tão características construções, como são exemplo monumentos com surpreendentes arcos e cúpulas, esculturas, viadutos, estradas, entre tantas outras obras de engenharia (Sousa, 2019).

A utilização da pedra foi intensificada ainda durante a Idade Média, sobretudo na edificação de fortalezas (castelos), catedrais e palácios o que fez com que o seu uso se fosse tornando frequente, levando ao aperfeiçoamento das técnicas de corte e talhe e como resultado disso as características visuais da rocha (Casal Moura *et al.*, 2007).

A procura pela rocha ornamental voltou a aumentar no final do século XIX , culminando num aprimoramento das tecnologias até à data existentes, com a finalidade de facilitar a exploração e aumentar significativamente o rendimento, como tal desencadeou-se um aumento da mecanização dos processos de extração e beneficiação (Casal Moura *et al.*, 2007).

O mercado atual das rochas ornamentais vem apresentando, há já algumas décadas, uma contínua tendência de uso e procura, facto devido a este recurso mineral se apresentar como uma matéria-prima por excelência e um símbolo de intemporalidade e requinte, algo bastante procurado nos mais diversos projetos de arquitetura e engenharia. Segundo Carvalho *et al.* (2018), nos últimos 50 anos, o nosso país tornou-se um dos maiores produtores de rocha ornamental do mundo, sendo possível observar um crescimento médio nacional anual de 4%. A nível dos países da União Europeia (UE), Portugal apresenta-se destacado num expressivo segundo lugar, só perdendo para a Itália, o principal país exportador, e ficando à frente de países como a Espanha e a Grécia (Montani, 2020).

De acordo com a Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), a produção de rochas ornamentais subiu, na última década (2010 a 2020), cerca de 10% (DGEG, 2021b), sendo acompanhada pela exportação, face igual período homólogo (10 anos), com um crescimento superior a 25% (DGEG, 2021a).

### 1.3 - Contextualização do tema em estudo

Como descrito anteriormente, a rocha ornamental é um recurso com elevada procura no mercado atual. Consequentemente, compete aos profissionais ligados à prospeção, exploração e transformação de recursos geológicos suprir esta necessidade, sendo para isso fundamental investir não só em campanhas de prospeção e pesquisa como também em competentes estratégias de planeamento e otimização das explorações, visando a melhor sustentabilidade e recuperação do recurso, assim como a sua viabilidade económica.

Foi tendo estes conceitos como base que se iniciou este trabalho. O material que serviu de estudo foi o calcário da pedreira “EM&R nº 6478” explorada pela empresa Eduardo Marques Rosa, Lda. O calcário explorado nesta pedreira, apresenta características únicas, diferenciando-se pela textura e tonalidade. Uma vez que se trata de um recurso de origem natural é normal apresentar estas variações na textura, mineralogia, cor, entre outras. O tipo de rocha em exploração na referida pedreira não é exceção e apresenta uma variedade notória na sua coloração, o que para obras de arquitetura pode representar um problema, pois a uniformidade fica comprometida no seu resultado. O material presente na pedreira apresenta uma variação na coloração, de tons mais creme para tons mais azuis, o que acaba por ser uma barreira no rendimento da exploração e comercialização, pois o tom procurado pelo mercado é o mais creme, tornando o calcário com a coloração mais azulada não comercializável e, portanto, não rentável para a exploração.

Apesar de consecutivas tentativas de comercialização da rocha com a coloração mais azulada, nunca existiu grande interesse por parte de potenciais compradores em utilizar este calcário com esta particularidade de forma recorrente, pois só aí estariam reunidas as condições mínimas de rentabilização que permitissem a exploração desse produto. Utilizações esporádicas do mesmo, não garantem condições económico-financeiras suficientes para que a exploração do calcário se torne rentável.

### 1.4 - Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é a caracterização do calcário em exploração na “pedreira EM&R” através da aplicação de métodos geofísicos (métodos elétricos e eletromagnéticos não invasivos), com vista a identificar e localizar *in situ* as áreas do

maciço com coloração azulada, para otimização do planeamento da exploração. Dessa forma será possível definir um plano de lavra adaptado às variações naturais do maciço, que permita otimizar a exploração, diminuindo os custos e aumentando o rendimento, explorando apenas o material com interesse económico.

## 1.5 - Estrutura da dissertação

Este tópico propõe descrever a organização da dissertação retratando, de forma sucinta, o que será abordado em cada um dos 5 capítulos, referências bibliográficas e anexos, constituintes deste trabalho. Esses capítulos são os seguintes:

### **Capítulo 1 – Introdução**

É realizada uma introdução à dissertação, bem como uma descrição dos objetivos principais e uma apresentação da estrutura adotada no presente documento.

### **Capítulo 2 – Enquadramento da área de estudo**

Localização geográfica, enquadramento geológico e hidrológico da área estudada.

### **Capítulo 3 – Métodos**

Este capítulo encontra-se subdividido em três partes, apresentando-se as metodologias utilizadas no estudo, nomeadamente:

- *In situ* (resistividade elétrica, GPR, recolha de amostras);
- Laboratoriais (resistividade elétrica, microscopia ótica, difração de raios-X);
- Gabinete (processamento e tratamento de dados).

### **Capítulo 4 – Resultados e Discussão**

Tal como o próprio nome indica, neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através dos vários métodos utilizados, bem como a discussão dos mesmos.

### **Capítulo 5 – Conclusão**

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais, em função dos resultados obtidos e apresentadas sugestões a serem implementadas em trabalhos futuros, dentro da mesma linha de pensamento e ação do tema abordado.

## Capítulo 2 - Enquadramento da área de estudo

### 2.1 - Localização Geográfica

A área de estudo fica situada na localidade de Valinho de Fátima, freguesia de Fátima, concelho de Ourém, distrito de Santarém, região centro de Portugal (figura 1).

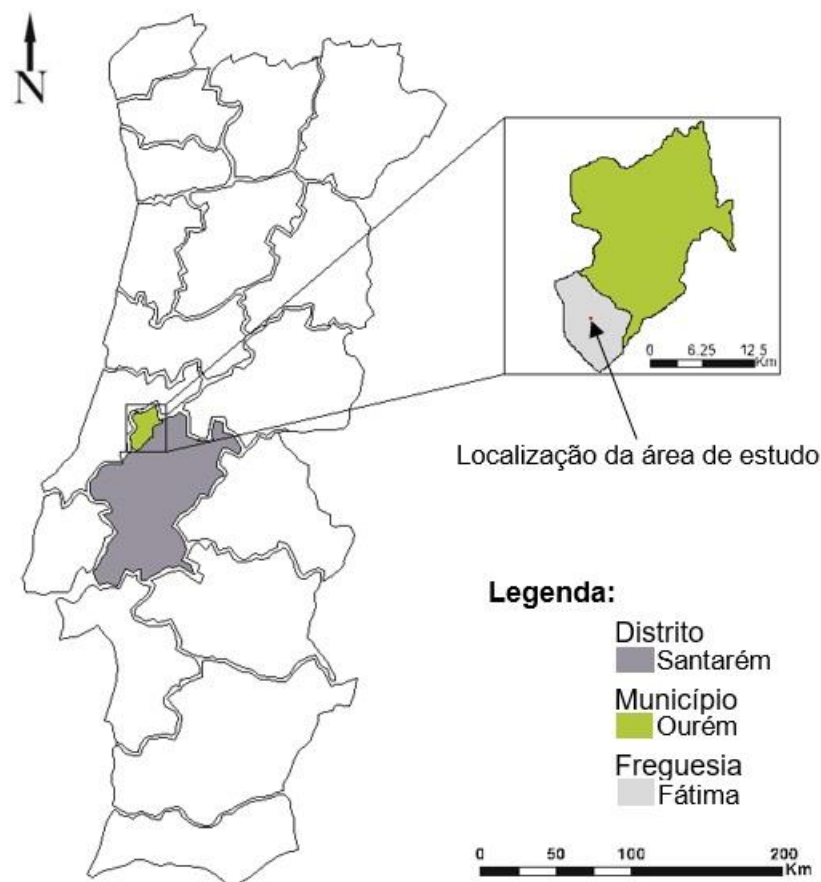


Figura 1 - Localização geográfica da área estudada

A área-alvo de estudo (pedreira EM&R) encontra-se localizada, num excerto do mapa do Google Earth, como mostra a figura 2, e está situada no sopé (NE) da Serra de Aire e Candeeiros.

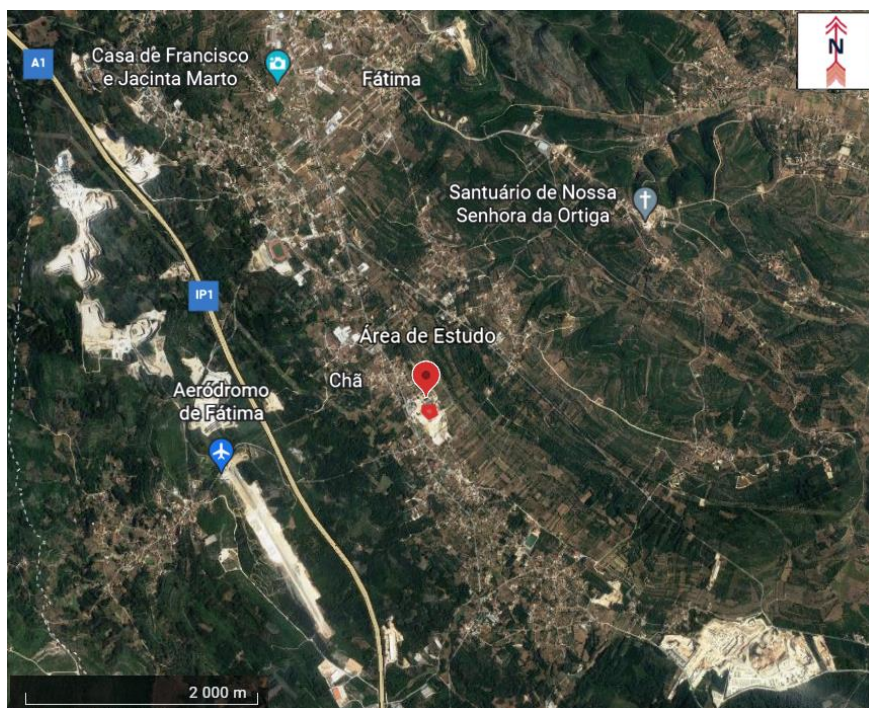


Figura 2 - Localização da área de estudo. A mancha a vermelho representa a área de estudo (fonte: Google Earth, acedido em 2022).

## 2.2 - Enquadramento Geológico

A pedra em estudo fica inserida no Maciço Calcário Estremenho (MCE), sendo este uma parte integrante da Bacia Lusitânica (BL), formada durante a Era Mesozóica (figura 3).

Segundo Kullberg *et al.* (2013), a Bacia Lusitânica é definida como sendo uma bacia intracratónica desenvolvida na parte oeste da margem Ibérica, Margem Ocidental Ibérica, constituindo uma das maiores bacias riftais do Mesozóico, originadas por reflexo de episódios distensivos enquadrados na dinâmica da fragmentação da Pangeia e posterior abertura do Oceano Atlântico Médio.

A figura 3 ilustra as diversas subdivisões da BL e delimita, de forma aproximada, o MCE.



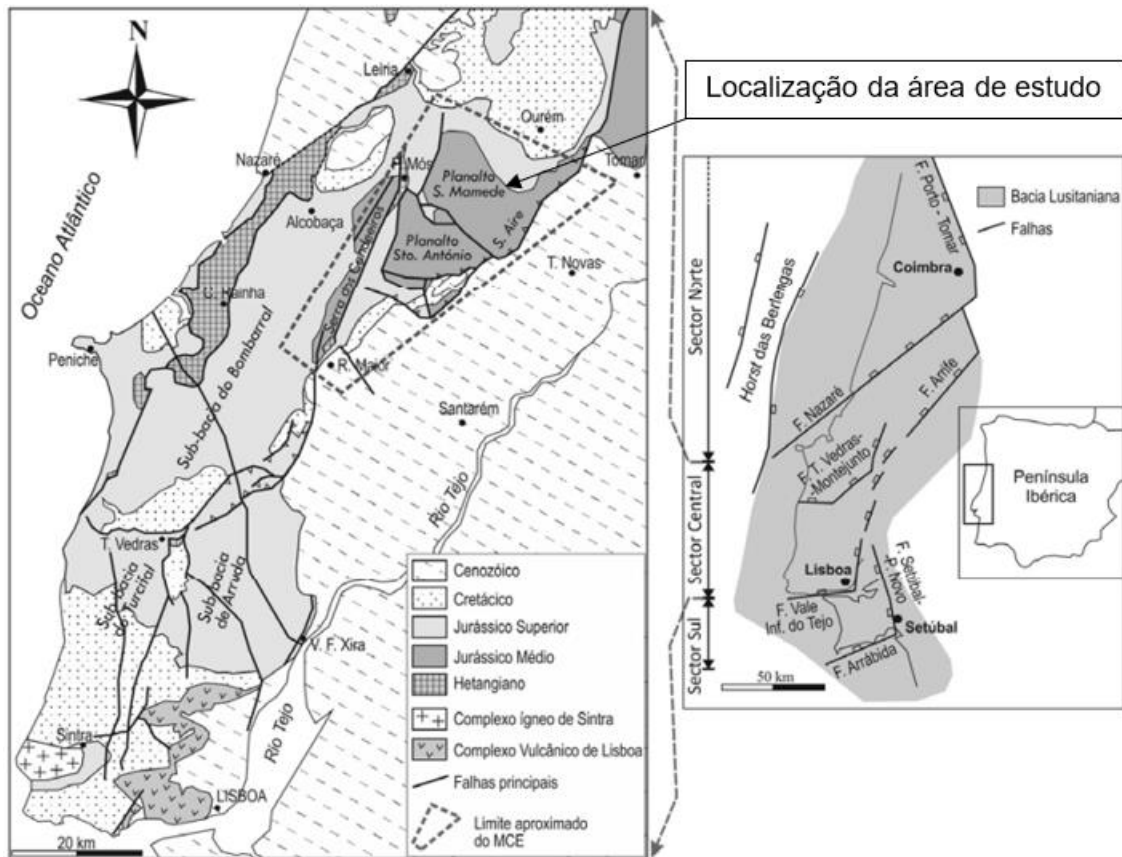


Figura 3 - Subdivisões da BL de acordo com Kullberg et al., 2006; geologia adaptada da Carta Geológica de Portugal à escala 1/1000000 (ed. LNEG) (adaptado de Carvalho, 2014).

No enquadramento tectónico, a BL corresponde a um graben alongado segundo a orientação NNE-SSW e encontra-se limitada por acidentes longitudinais herdados da orogenia varisca: a ocidente pela falha do bordo Este do *horst* das Berlengas; a oriente, por um complexo sistema de falhas escalonadas, tendo destaque a Falha de Porto – Tomar, a Falha do Arrife e a Falha de Setúbal – Pinhal Novo (Ribeiro et al., 1979; Montenat et al., 1988; Pinheiro et al., 1996; Kullberg et al., 2013 in Carvalho (2013)). Vários outros acidentes herdados também da orogenia varisca e orientados da mesma forma, mas também segundo a orientação NE-SW e mesmo segundo W-E, acabam por compartimentar, fortemente, a bacia através de reflexos na sua evolução a nível da distribuição das fácies sedimentares (Kullberg et al., 2013 in Carvalho (2013)).

Como descreve Sousa (2019), existem diversos autores (Ribeiro et al., 1979; Montenat et al., 1988; Wilson, 1988; Cunha & Pena dos Reis, 1992; Soares & Duarte 1995; Pinheiro et al., 1996; Rocha et al. 1996; Kullberg et al., 2006), que consideram a existência de grandes sequências sedimentares limitadas por discontinuidades, resultando em sucessivas etapas da bacia, e que se acabam por subdividir em dois

grandes grupos: o período distensivo (Triásico Superior – final do Cretácico) e o período compressivo (desde o final do Cretácico até aos dias de hoje).

A área-alvo de estudo fica localizada no limite de três regiões geomorfológicas: Bacia de Ourém, Bacia do Tejo e o MCE. Esta acaba por ficar inserida na sua totalidade dentro do MCE, sendo este destacado do resto da bacia devido às suas particulares características estruturais e litológicas, pelo que é importante caracterizar essa mesma unidade geomorfológica. No MCE, definido por Martins (1949) na sua tese de doutoramento, são consideradas três unidades morfoestruturais (figura 4): a Serra dos Candeeiros, a oeste, o Planalto de Santo António, ao centro, e o Planalto de São Mamede e Serra de Aire, a nordeste. Estas unidades encontram-se separadas entre si por meio das depressões da Mendiga e de Porto de Mós-Alvados-Minde, estando relacionadas com importantes acidentes tectónicos (Crispim (1995) *in* Duarte (2010)). É considerado que o Planalto de São Mamede englobe a chamada Plataforma de Fátima, definida por Martins (1949), e que a Serra de Aire constitui um prolongamento ainda mais elevado desse planalto para sudeste (Carvalho, 2013).

Em concordância com a carta geológica simplificada do MCE da figura 4, é possível verificar que as estruturas tectónicas do maciço se encontram preferencialmente alinhadas segundo três principais direções: NNE-SSW, NW-SE e NE-SW.

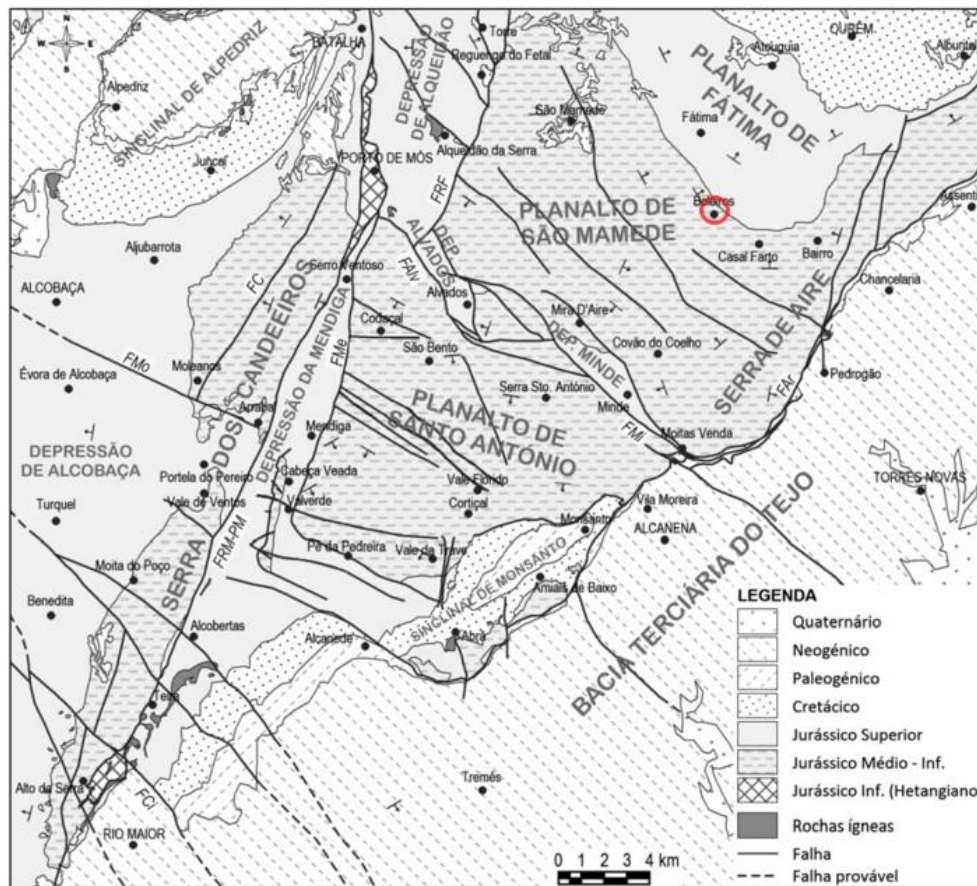


Figura 4 - Carta geológica simplificada do MCE com definição das principais unidades morfoestruturais; geologia adaptada da Carta Geológica de Portugal à escala 1/50000; o círculo vermelho representa o local da área-alvo do estudo (adaptado de Carvalho, 2013).

No que diz respeito ao tipo de litologia ocorrente na área de estudo, é possível verificar que a mesma é datada do Jurássico médio (Caloviano), pertencendo à Formação de Santo António – Candeeiros – Membro de Moleanos e que, segundo Manuppella *et al.* (2000) é descrita da seguinte forma:

### Calcários de Moleanos – $J^2_{Mo}$

Esta formação ocorre nas duas extremidades da área de Dogger, área essa de natureza carbonatada, na sua grande maioria calcária, com ocorrência subordinada de margas e de dolomitos (Manuppella *et al.*, 2000). Sendo esta cartografada na zona norte da Serra dos Candeeiros (faixa mais ou menos triangular cortada por falhas, na zona de cabeço grande) e para oeste desta (Tourões-Pedreiras-Casal Boleiro); e nas adjacências de Fátima, integrando uma mancha em forma de crescente com

convexidade para sul, grosso modo paralela à dos Calcários oolíticos de Fátima, todavia de maior extensão (desde as proximidades da Cova de Iria até Outeiro das Matas).

As fácies Calovianas (Formação de Santo António – Candeeiros – Membro de Moleanos) (Azerêdo, 2007), encontram-se bem marcadas por toda a Bacia devido a uma acentuada descida no nível eustático, o qual veio provocar o enchimento detrítico da Bacia. A figura 5, diz respeito à litostratigrafia do MCE.

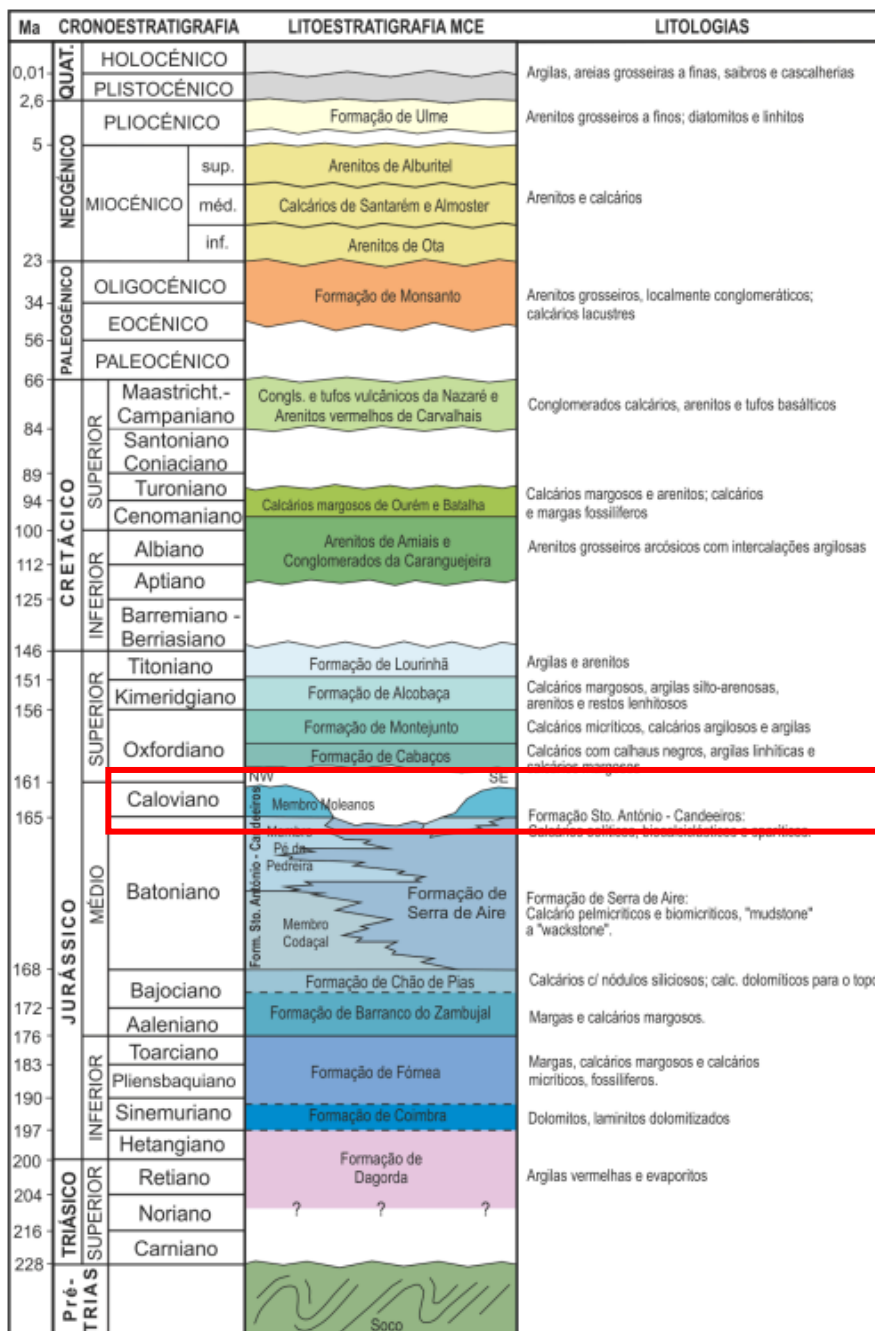


Figura 5 - Litostratigrafia do MCE; o retângulo vermelho assinala a litologia aflorante na área de estudo (adaptado de Carvalho, 2013).

Na zona mais ocidental, os Calcário de Moleanos contactam, quase sempre, por falha com os Calcários micríticos de Serra de Aire; na região oriental, o contacto, maioritariamente normal, acontece com esta última unidade e, localmente (Casal Farto), com os Calcários oolíticos de Fátima. Com base em dados paleontológicos foi possível datar os Calcários de Moleanos do Caloviano.

Esta formação possui cerca de 150 metros de espessura, e é composta por calcários clásticos (rudstones, grainstones e packstones oolíticos/ bioclásticos/ litoclásticos), frequentemente de cor branca ou creme, com intercalações de calcários muito fósseiros e de calcários pelmicríticos com bioturbação, filamentos e amonóides.

A figura 6, ilustra o mapa geológico e da indústria extrativa no Maciço Calcário Estremenho (MCE).

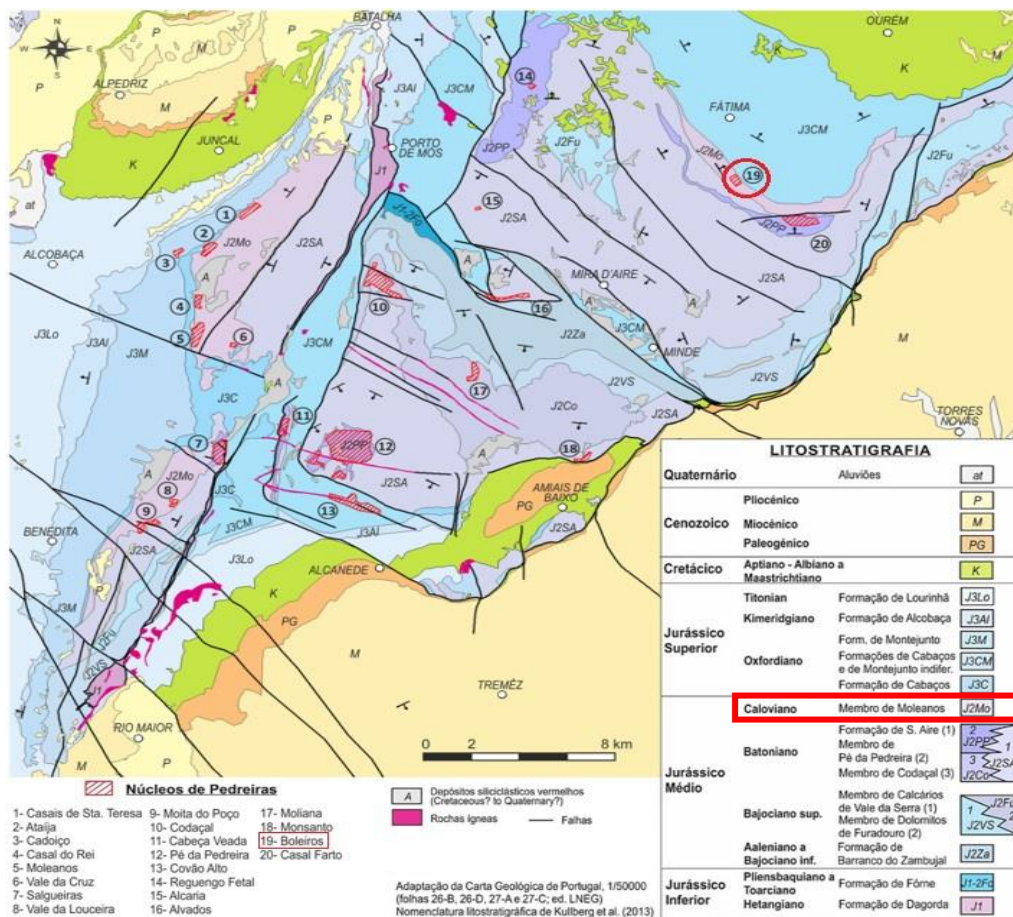


Figura 6 – Mapa geológico com localização de núcleos de pedreiras no MCE; assinalado com o círculo vermelho encontra-se a região em estudo e com o retângulo a litologia aflorante na área de estudo (adaptado de Carvalho & Lisboa, 2018).

## 2.3 - Caracterização Hidrológica

Segundo Carvalho *et al.* (2011), tendo como base os Sistemas Aquíferos de Portugal Continental, a área estudada fica inserida no Sistema Aquífero Maciço Calcário Estremenho (figura 7), parte integrante da unidade hidrogeológica Orla Ocidental. As formações geológicas que dão suporte ao sistema são, na sua grande maioria, rochas carbonatadas datada do Jurássico.

Ocupando uma área de 767,6 km<sup>2</sup>, este sistema aquífero constitui uma das principais reservas da água subterrânea do nosso país, com importante relevância no abastecimento de água a nível regional. Os limites do sistema não correspondem, na sua totalidade, aos limites da unidade geomorfológica designada por MCE, pois a circulação subterrânea é estendida além dos limites deste maciço.

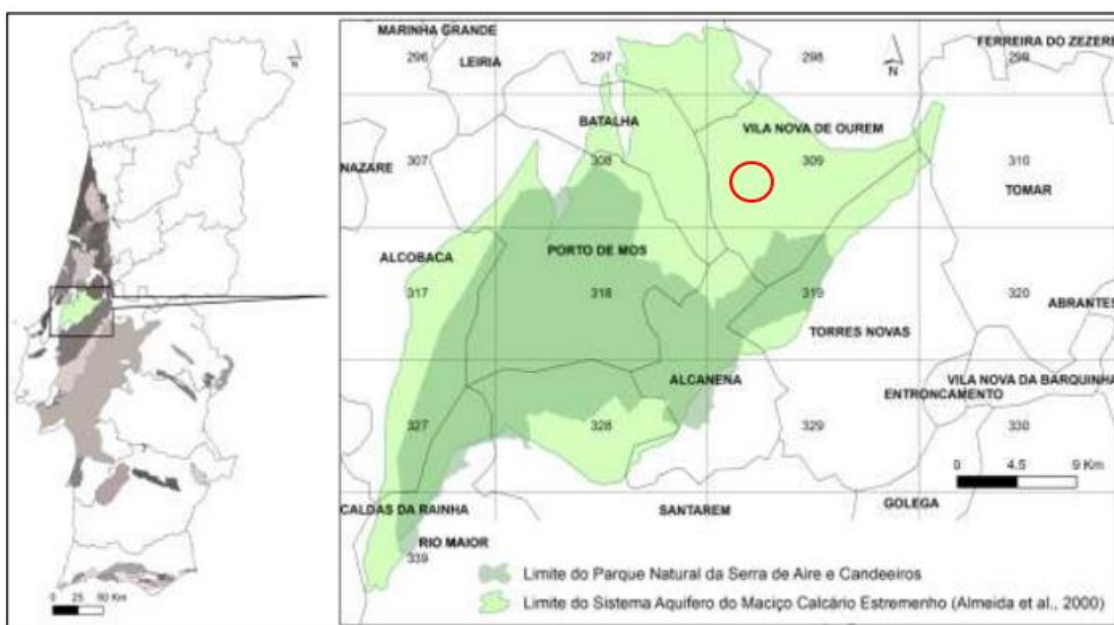


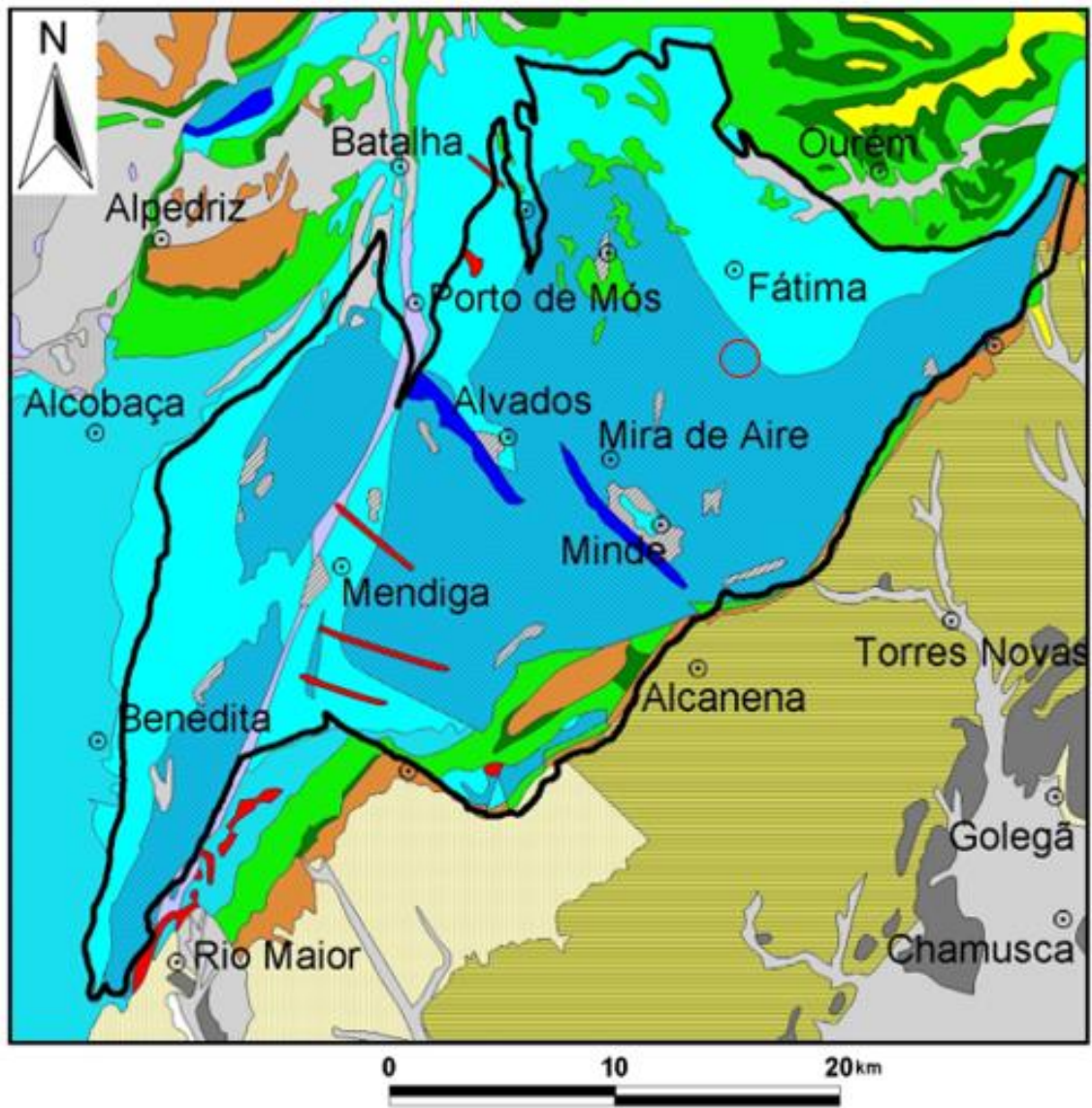
Figura 7 - Localização do Sistema Aquífero Maciço Calcário Estremenho; o círculo vermelho indica a localização da área de estudo (adaptado de Carvalho *et al.*, 2011).

As unidades litoestratigráficas do Jurássico Médio (onde se encontram as formações aquíferas), correspondem às formações cársicas por excelência. Apesar de representar um carso jovem, a carsificação desta região é intensa registando, ainda, vestígios de um regime de erosão ante-cársica e que em muitos lugares apresenta os depósitos detríticos que cobriam a superfície infracretácica. As estruturas cársicas

existentes são bastante variadas, como por exemplo megalapiás, lapiás de diversos tipos geralmente pouco profundos, dolinas e mais raramente uvalas, algares e redes de galerias subterrâneas (Manuppella *et al.*, (1985) *in* Almeida *et al.* (2000)).

Este Sistema Aquífero é bastante complexo, apresentando um comportamento típico de um aquífero cársico, caracterizado pela presença de um número reduzido de nascentes com um fluxo de água contínuo ao longo do ano (perene) e múltiplas nascentes temporárias com caudais elevados, no entanto com variações muito acentuadas ao longo do tempo (Almeida *et al.*, 2000).

Como verificado anteriormente, a área de estudo fica localizada no sector do Planalto de S. Mamede, e de acordo com Almeida *et al.* (2000), este é fundamentalmente drenado pelas nascentes dos rios Lis e Almonda, havendo outras nascentes não tão relevantes, temporárias ou permanentes, situadas no bordo NE, realçando-se a nascente de Bezelga. A nascente do rio Almonda é a mais importante, situando-se no contacto do maciço calcário com os terrenos menos permeáveis da Bacia do Tejo. A figura 8, diz respeito ao enquadramento litoestratigráfico do sistema aquífero do MCE.



Legenda:



Figura 8 - Enquadramento do sistema aquífero Maciço Calcário Estremenho (MCE); o círculo vermelho indica a localização da área-alvo estudada (adaptado de Almeida et al., 2000).



## 2.4 - Características físico-mecânicas do calcário em exploração

O calcário estudado neste trabalho é denominado comercialmente pelo nome de Creme Valinho (CVV). Ao nível da caracterização petrográfica este calcário ornamental é descrito como sendo um calcário de cor bege claro, apresentando uma leve tonalidade acinzentada, bioclástico e calciclástico, de tendência oolítica e, com finas pontuações ou nódulos acastanhados dispersos com esparite abundante (EM&R Lda, 2017).

A tabela 1 apresenta o desempenho declarado do calcário Creme Valinho, tendo em conta as características físico-mecânicas e as respetivas normas de ensaio.

*Tabela 1 - Desempenho declarado do Calcário Creme Valinho (CVV) (EM&R Lda (2017)).*

Características	Norma de Ensaio	Normas de referência
		EN 771
		Valores Declarados
<b>Resistência à flexão (MPa)</b>	NP EN (12372:2008)	10.1
Valor médio		
<b>Resistência ao congelamento (56 Ciclos)</b>	NP EN (12371:2010)	Não se verificaram quaisquer alterações ao fim de 56 ciclos de ensaios
<b>Densidade Aparente(kg/m<sup>3</sup>)</b>	NP EN (1936:2008)	2410
Valor médio		
<b>Porosidade aberta (%)</b>	NP EN (1936:2008)	11.2
Valor médio		
<b>Absorção de água por capilaridade (g/ m<sup>2</sup>·g<sup>0.5</sup>)</b>	NP EN (1925:2000)	33.5
Valor médio		
<b>Resistência a compressão (MPa)</b>	NP EN (1926:2008)	118
<b>Resistência ao desgaste (mm)</b>	NP EN (14157:2007)	25.5
<b>Absorção de água à pressão atmosférica (%)</b>	NP EN (13755:2008)	4.2
Valor médio		
<b>Resistência ao choque: altura mínima de queda (cm)</b>	NP EN (14158:2004)	37.5

## Capítulo 3 - Métodos

### 3.1 - Introdução

Tendo em conta o objetivo deste estudo, foi estabelecida uma metodologia de trabalho que se pode subdividir em três importantes e distintas fases: trabalhos de campo (*in situ*), laboratoriais e de gabinete. O fluxograma da figura 9 descreve essa mesma metodologia aplicada.

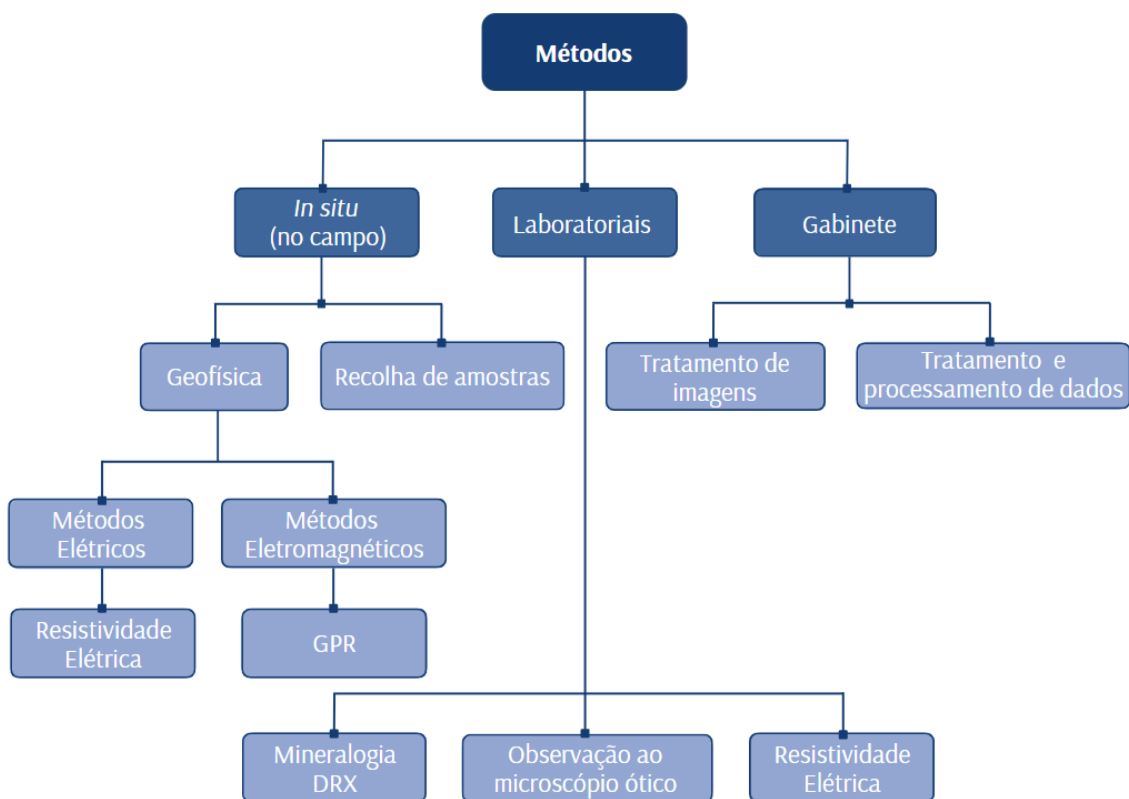


Figura 9 - Fluxograma descritivo dos métodos aplicados.

Na primeira fase, que inclui os trabalhos de campo, foi determinado qual o local da pedreira que iria ser alvo dos estudos de geofísica, tendo-se optado por o local onde, à data, se desenvolvia a principal frente de desmonte da pedreira (no terceiro patamar de exploração).

Os equipamentos utilizados, incluindo os de campo e de laboratórios são do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra.

### 3.2 - Localização das tomografias de resistividade elétrica (TRE) e da grelha do *Ground Penetrating Radar* (GPR)

A figura 10, situa o local onde foram feitas as tomografias de resistividade elétrica (TRE), bem como a área relativa à grelha de passagem com o *Ground Penetrating Radar* (GPR).

Foram efetuadas seis TRE com o dispositivo Wenner (P1 a P6), todas com comprimentos superiores a 20 metros e espaçamentos médios entre secções de 2 a 3 metros. A TRE mais curta foi a 4 com um comprimento total de 21 metros, já a TRE mais comprida foi a 2 prolongando-se até aos 23 metros. Em relação à grelha do GPR esta possui 19m de comprimento e 12m de largura, sendo que o espaçamento utilizando entre passagens foi de 1 metro. De notar que as passagens com o GPR foram feitas, respeitando sempre a distância entre passagens de 1 metro, e paralela e perpendicularmente à frente de desmorte, isto é, com orientações N-S e W-E.

Verificou-se ainda, a presença de uma descontinuidade relevante, a SW das campanhas geofísicas realizadas que, segundo Duarte (2010), apresenta uma direção preferencial N75°W.



Figura 10 - Localização das tomografias de resistividade elétrica (TRE) e da área da grelha do GPR; marcação (a tracejado) da descontinuidade relevante presente.

Procedeu-se ainda à recolha de amostras. Não sendo possível a recolha direta de amostras na exata zona de desmonte durante a aquisição de dados geofísicos, esta foi feita à medida que ocorria a extração de blocos na frente de desmonte, daí estar referenciado na figura 11 a localização dos locais de recolha das amostras dentro do maciço (2). Foram ainda recolhidas amostras numa bancada mais lateral e de cota ligeiramente superior em relação à zona estudada (1). Todavia, procurou-se que o material recolhido para amostragem fosse característico do mesmo tipo de litologia da frente de exploração. A figura 11 indica os locais de recolha das amostras que mais tarde foram analisadas no laboratório.



Figura 11 - Localização dos locais (1 e 2, retângulos vermelhos) onde foram recolhidas as amostras.

A segunda fase, no laboratório, consistiu na aplicação do método de resistividade elétrica Wenner (o mesmo aplicado no campo) em provetes, de maneira a comparar com os valores recolhidos *in situ*, sob condições ideais e com controlo de determinadas condições e características que não se conseguem no campo. Foi ainda feita a observação, de algumas amostras, através de microscópio ótico, bem como a identificação da sua composição mineralógica com recurso à difração de raios-X (DRX).

Na terceira e última fase, a de gabinete, foi efetuado o tratamento e processamento de dados geofísicos recolhidos no campo, o tratamento das imagens das bancadas, adquiridas à medida que iam sendo exploradas, complementados pelos trabalhos de laboratório.

### 3.3 - Método da resistividade elétrica

Foram realizadas seis tomografias de resistividade elétrica fazendo uso do dispositivo simétrico Wenner, tendo em conta um espaçamento inicial entre elétrodos de 1 metro (distância descrita por  $a$  na figura 12).

Este tipo de dispositivo é caracterizado por preservar uma distância fixa entre os quatro elétrodos e possuir uma configuração com relativa sensibilidade a variações de resistividade verticais, nomeadamente a estruturas dispostas horizontalmente, no entanto apresenta limitações quando estamos perante estruturas verticais, uma vez que apresenta uma menor suscetibilidade a variações horizontais, e que se vai intensificando à medida que o espaçamento entre elétrodos aumenta. No que diz respeito às profundidades de investigação com o dispositivo Wenner, podemos classificá-las como médias, conseguindo ser estas de aproximadamente 0,5 vezes o espaçamento utilizado entre os elétrodos, além de que manifesta a mais forte força de sinal, tornando-se bastante relevante quando temos um elevado ruído de fundo (Loke, 1999).

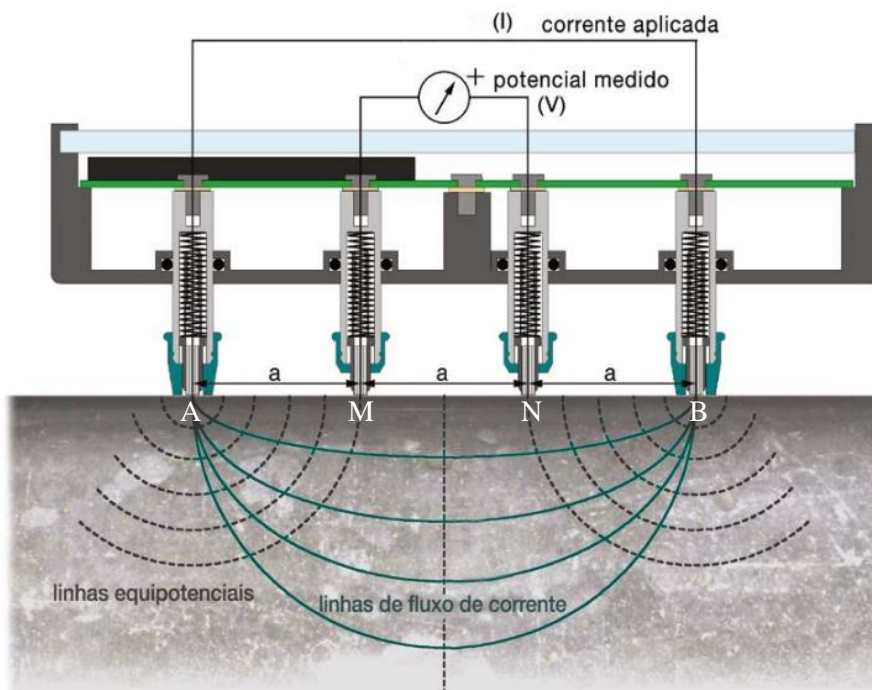


Figura 12 – Esquema do dispositivo Wenner (adaptado de Proceq SA, 2017).

O local onde foram efetuadas as seis TRE é o afeto ao terceiro patamar de exploração da pedreira, detendo um espaçamento entre secções de 2 a 3 metros (figura 10).

Para a aquisição dos dados de campo foi empregue um sistema de cabos com a possibilidade de utilização máxima de 24 elérodos.

Os elérodos que foram utilizados são compostos por varões de aço, de modo que tenham uma boa condutividade e sejam pouco resistivos à passagem da corrente elétrica. Para a boa realização da campanha de resistividade elétrica e, com o propósito de diminuir a resistência de contacto e, concomitantemente, os erros nas leituras, os elérodos foram regados com água salgada (Duarte, 2010).

Como o local onde foi executado o trabalho de campo é, maioritariamente, constituído por rocha, uma vez que as medições foram efetuadas em cima do patamar de exploração, era impossível conseguir cravar os elérodos no terreno. Perante isso, fez-se uso de recipientes constituídos por um tubo de plástico (PVC) com uma base porosa (pano + esponja), como ilustrado na figura 13, que acabaram por ser preenchidos com material arenoso e, posteriormente, regados com água salgada, de forma a facilitar a passagem de corrente e, conseqüentemente, a leitura com o resistímetro.



*Figura 13 – Elédrodo e recipiente constituído por um tubo de plástico (PVC) com uma base porosa (pano + esponja), preenchido com material arenoso e regado com água salgada.*

O tipo de equipamento utilizado na campanha de prospeção de resistividade elétrica no campo, foi o resistímetro comercializado pela empresa francesa IRIS *Instruments* e tem a denominação Syscal Jr Switch – 48 que é equipado com uma placa de comutação interna para 48 elétrodos sendo capaz de fazer o registo, simultaneamente, de duas medições. O segundo canal de medição tem uma melhoria significativa no que ao tempo de aquisição de dados diz respeito, tendo sido esse o utilizado na campanha de prospeção em análise. Uma outra especificação do resistímetro, é o facto de a corrente de saída ser ajustada de forma automática, de modo a otimizar os valores de tensão de entrada, garantindo, uma significativa melhoria na qualidade de medição. Este tipo de aparelho executa ainda, automaticamente, as medições de resistência ou resistividade, escolhidas pelo operador, (neste caso as medições foram de resistividade) e armazena-as na sua memória interna para, posteriormente, serem exportadas para um computador para fazer o tratamento e processamento dos dados.

No arranjo Wenner, constituído por quatro elétrodos, a injeção de corrente é feita nos elétrodos exteriores do dispositivo, isto é, no primeiro e no último, já as leituras da diferença de potencial são efetuadas nos elétrodos intermédios (segundo e terceiro). A comutação dos elétrodos é realizada de forma automática pelo equipamento, ao longo do alinhamento previamente determinado (figura 14).

Quando é percorrida a totalidade do alinhamento de elétrodos, o arranjo passa a ter um espaçamento  $a$  entre elétrodos de +1 metro do que o arranjo anterior e assim sucessivamente, até acabar de ser lido todo o alinhamento. Deste modo, é possível obter uma secção de resistividade de subsuperfície bidimensional (2D), onde a distância  $a$  entre elétrodos é sempre ampliada de acordo com a figura 15 (Sehah & Sugito, 2011).

As diferenças na condutividade dos materiais atravessados pela corrente elétrica determinam as variações sentidas de resistividade medidas.

Após a recolha dos dados por parte do aparelho, estes foram tratados e processados, com o auxílio do *software* Res2Dinv, pois os valores de resistividade obtidos com o resistímetro são valores referentes à resistividade aparente do material atravessado, uma vez que o subsolo não pode ser considerado um meio homogéneo e os valores obtidos são fruto de uma média ponderada dos valores de todas as resistividades verdadeiras num volume de material em subsuperfície relativamente grande (Braga, 2016), há a necessidade de recorrer a este *software* para processamento dos dados, com o objetivo de tornar os valores de resistividade aparente em valores de resistividade real ou muito perto disso.

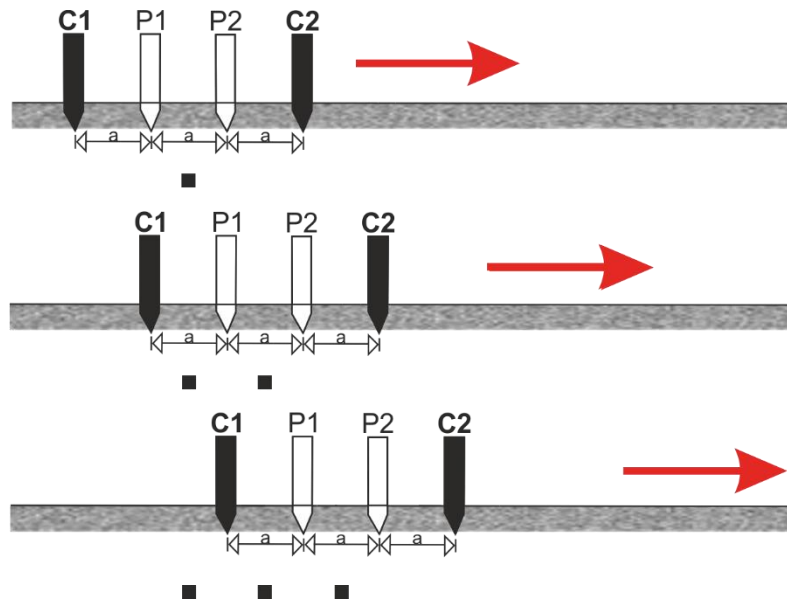


Figura 14 - Movimento dos eléttodos no levantamento de resistividade eléttica do dispositivo Wenner, realizada de forma automática pelo equipamento ao longo do alinhamento previamente determinado; C1 e C2 eléttodos de corrente, P1 e P2 eléttodos de potencial. O quadrado ■ corresponde ao local da medição efetuada.

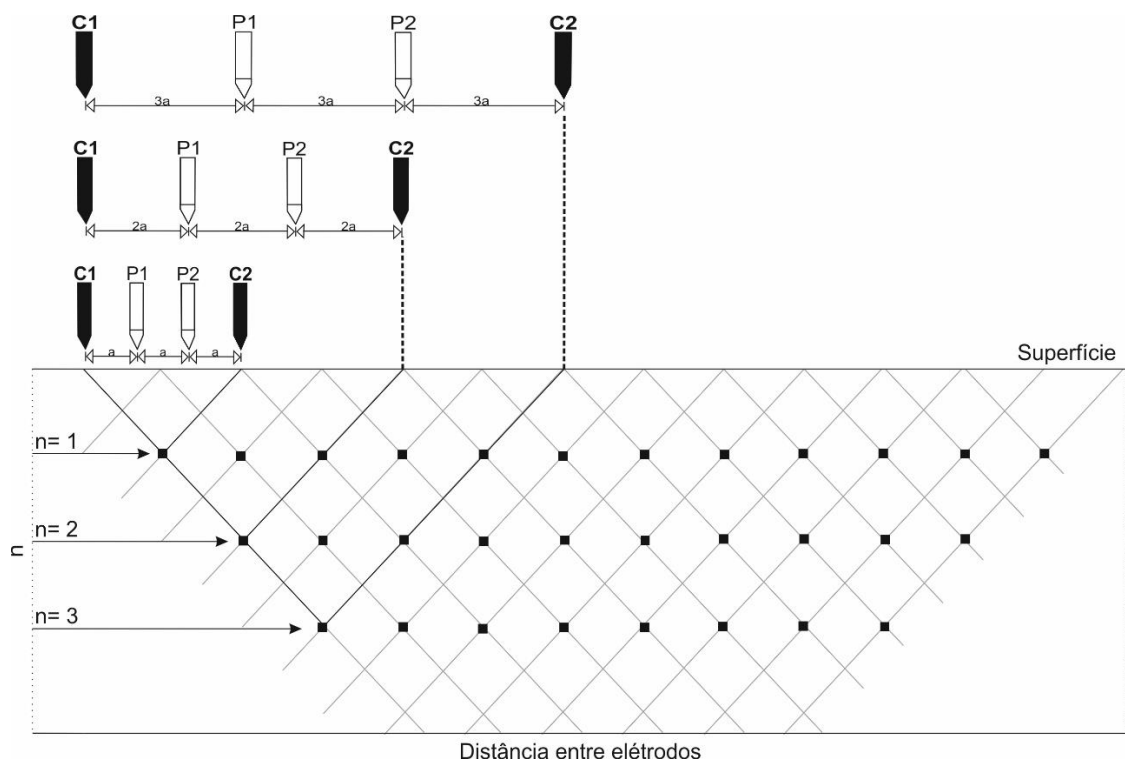


Figura 15 - Método de medição e ilustração gráfica de uma secção bidimensional (2D) de resistividade eléttica do dispositivo Wenner. Localização espacial dos eléttodos de corrente (C1 e C2), e de potencial (P1 e P2). O quadrado ■ corresponde ao local da medição efetuada.



### 3.4 – Método eletromagnético *Ground Penetrating Radar* (GPR)

O *Ground Penetrating Radar* (GPR), concerne a uma técnica de emissão e detecção de ondas eletromagnéticas com intervalos de frequência que variam, normalmente, entre 10 a 1000 MHz, ou seja, a mesma faixa de frequência das ondas rádio, tendo por isso, correspondência direta no espectro eletromagnético às ondas de alta frequência, sendo que enquanto menor a frequência maior a profundidade de investigação e conseqüentemente menor a resolução e frequências maiores ocorre o inverso. Este método, em princípio, pode ser comparado ao método da sísmica de refração (Pestana & Botelho, 1997), contudo, apresenta diferenças, sendo a principal devida ao tipo de ondas utilizadas por cada técnica, uma vez que, o método do GPR tem por base a propagação de ondas eletromagnéticas e o sísmico ondas mecânicas.

O método GPR é composto, essencialmente, por uma fonte geradora de pulsos eletromagnéticos de alta frequência, uma antena transmissora, uma antena recetora e uma unidade de controlo digital que tem como principal função armazenar os dados que serão posteriormente processados, no entanto permite ainda, aquando da aquisição desses mesmos dados, uma pré-visualização do radargrama do meio em análise. Pode ainda ser incorporado um GPS de modo a georreferenciar os perfis efetuados (figura 16).



Figura 16 - Sistema GPR utilizado, da empresa Sensors & Software Inc. a) unidade de controlo digital; b) antena transmissora; c) antena recetora; d) GPS.

O princípio básico de funcionamento do método GPR (figura 17) resume-se à reprodução de um pulso elétrico de curta duração e alta voltagem pela fonte, que por sua vez, é transmitido à antena transmissora que o transforma em ondas eletromagnéticas. Ao atravessar o subsolo, parte dessa onda é refletida, devido às diferentes propriedades elétricas do meio, nomeadamente, a condutividade elétrica e a permissividade dielétrica, o que leva à reflexão de parte da energia de volta a superfície, enquanto outra parte da energia é refratada no meio (Santos, 2019). As variações nas propriedades elétricas do material estão geralmente associadas, a variações do tipo de litologia, presença ou não de fluidos, argilas e características estruturais e geomorfológicas, como por exemplo falhas e algares.

A onda refletida é captada pela antena recetora sendo esse sinal amostrado, digitalizado e armazenado na unidade de controlo digital. Este armazenamento do sinal, é concretizado em função do tempo duplo de trânsito, isto é, o tempo que a onda eletromagnética leva para sair da antena transmissora, atravessar e percorrer a interface até ocorrer a reflexão, para, subsequentemente, ser captada pela antena recetora. De notar que esse tempo é expresso em nanossegundos (Santos, 2019).

Existem duas possibilidades de configuração de antenas, o modo mono estático e o bi estático. Na primeira configuração (mono estático), as antenas transmissora e recetora estão posicionadas no mesmo módulo, na configuração bi estática, as antenas estão colocadas em módulos separados (Mutiarra Sukma *et al.*, 2018). Neste trabalho o modo de antena utilizado foi o bi estático com antenas blindadas de 500 MHz.

Sendo o GPR uma técnica precisa, rápida, não invasiva e não destrutiva, segura e de alta resolução acaba por ser dos melhores métodos a ser aplicados quando estamos perante situações onde não pode haver perturbação do solo ou subsolo. Neste caso o GPR era o método que aliado à resistividade elétrica melhor servia para o estudo e descrição que se queria fazer do maciço.

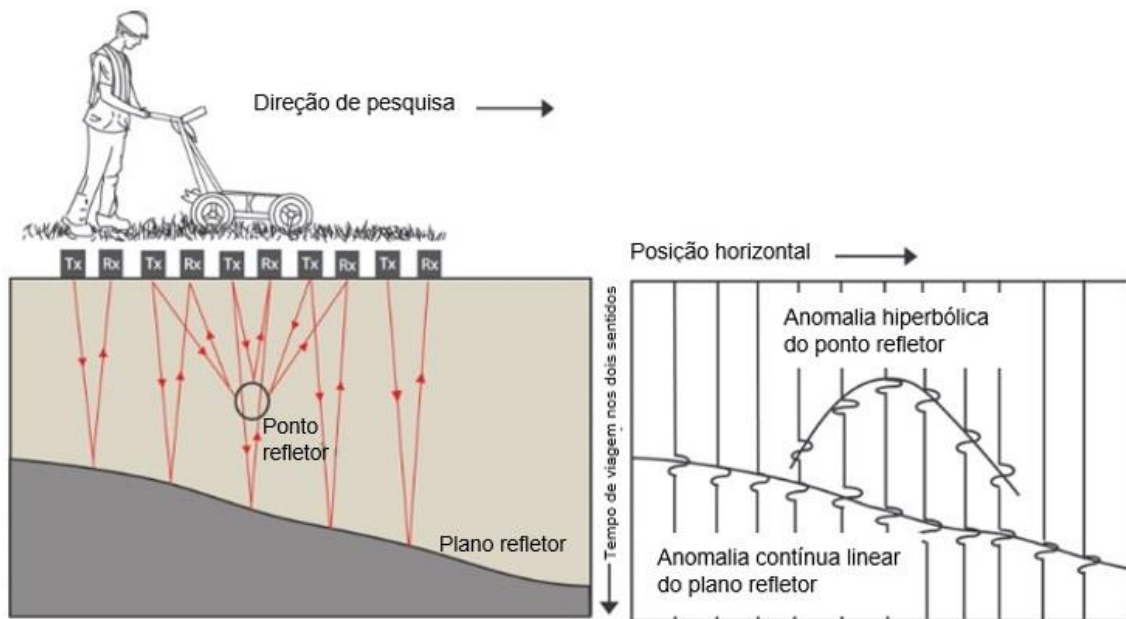


Figura 17 - Esquema do princípio básico de funcionamento do GPR (adaptado de Scantech Geoscience Ltd, 2021).

### 3.5 - Caracterização geral do calcário em exploração

#### 3.5.1 - Análise Petrográfica

Foram selecionados 2 provetes de rocha total com alguns centímetros, que se podem observar na figura 18. Um dos provetes (1), inclui o contacto entre as diferentes colorações (a) e b)) observadas no calcário a olho nu; o outro (2) foi selecionado a partir da área mais escura (azulada).

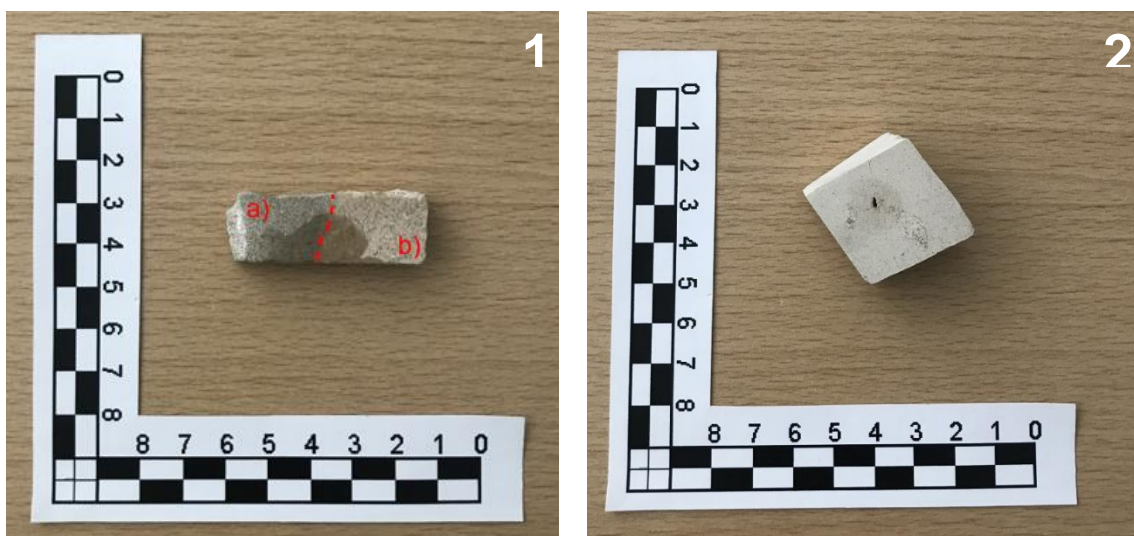


Figura 18 - (1) Limite (a tracejado) entre as diferentes colorações; a) mais azul; b) mais creme; (2) Amostra de calcário referente à área mais azul.

Após seleção e corte, foi realizado o polimento de uma das superfícies dos provetes em 2 fases principais, utilizando sempre água. Na 1ª fase utilizam-se 4 lixas sucessivamente mais finas e a 2ª fase compreende o polimento final com recurso a 2 panos e alumina como abrasivo.

A análise petrográfica dos provetes polidos foi realizada em microscópio ótico LEICA DM750P (figura 19), com câmara fotográfica acoplada para aquisição de imagens petrográficas. As observações foram feitas em luz branca refletida utilizando uma objetiva de 10x a ar e objetiva de 50x a óleo.



*Figura 19 - Microscópio ótico de reflexão LEICA DM750P utilizado nas observações petrográficas.*

### 3.5.2 - Difração de raios-X (DRX)

Das mesmas amostras a partir das quais foram selecionados provetes para análise petrográfica, foram selecionadas porções do calcário mais escuro (azulado) para análise através de difração de raios-X (figura 20) para determinação de componentes mineralógicos. A preparação das amostras incluiu, a sua redução a pó (<75  $\mu\text{m}$ ) e a descarbonatação através de ácido acético (15%).

A DRX é uma técnica utilizada para analisar a composição mineralógica e a estrutura cristalina de materiais, consistindo na incidência de radiação (raios X) sobre uma amostra e a deteção do feixe difratado (figura 20). Como os cristais são átomos ordenados e periodicamente arranjados no espaço, quando se faz incidir uma radiação eletromagnética (raios X) sobre esses cristais os seus átomos espalham essa radiação com um determinado ângulo, intensidade e comprimento de onda, que é a ordem do espaçamento interatômico do cristal. O padrão de difração de determinado material pode ser pensado como uma impressão digital química, pois cada cristal, mineral, etc. tem a sua, logo a identificação química poderá ser realizada comparando este padrão de difração com uma base de dados de padrões já conhecidos, e assim identificar o material (Nasrollahzadeh *et al.*, 2019).

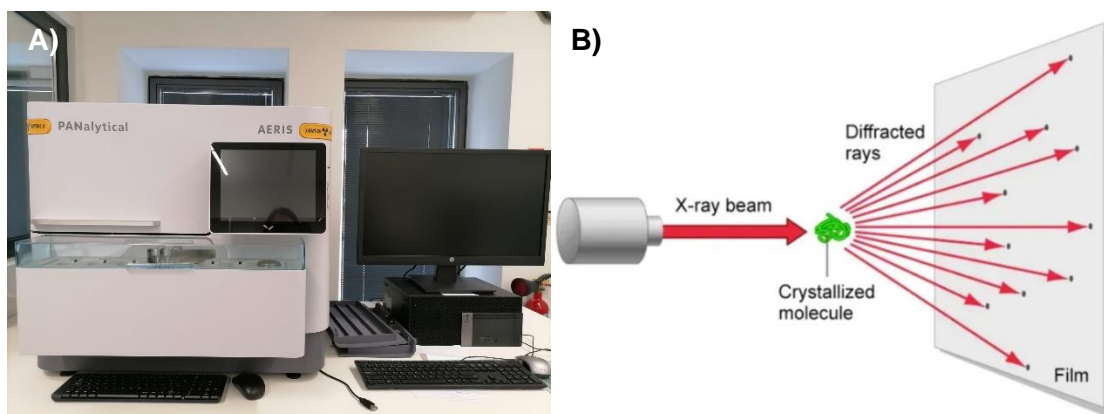


Figura 20 – A) Equipamento de DRX utilizado; B) Esquema simplificado do funcionamento da técnica de difração de raios-X (retirado de Caracterizze (2022)).

## 3.6 - Tratamento de imagens

### 3.6.1 - Realce da diferença de tonalidade do calcário na frente da pedreira com recurso ao editor de imagens da *Microsoft*

Este tópico aborda as correções necessárias e realizadas, tendo em vista uma melhor visualização e percepção da tonalidade mais azulada na frente de exploração da pedreira. Para isso recorreu-se, numa primeira fase de edição, ao editor de imagens da *Microsoft* e, fazendo alguns ajustes em determinados parâmetros (tabelas 2 a 5), foi possível destacar a tonalidade em causa (tom mais azul) para uma posterior, e melhor, análise.

As tabelas 2, 3, 4 e 5 dizem respeito aos ajustes e aos respetivos valores determinados desses mesmos ajustes, levando em consideração uma melhor visualização e destaque da coloração.

Nas figuras 21, 23, 25 e 27 estão representadas as frentes de desmonte sem qualquer tratamento da imagem, já nas figuras 22, 24, 26 e 28 é possível verificar as mesmas ilustrações das frentes de desmonte, mas, desta vez, com os ajustes necessários à sua melhor percepção de diferença de tonalidade.

## Frente de desmonte 1



Figura 21 - Frente de desmonte relativa à TRE 1 sem qualquer processamento de imagem.



Figura 22 - Frente de desmonte relativa à TRE 1 com recurso ao editor de imagens da Microsoft para processamento de imagem.

Tabela 2 - Ajustes e os seus respetivos valores, efetuados para uma melhor perceção da coloração mais azul presente no maciço (tomografia de resistividade elétrica 1).

Ajuste	Claro	Contraste	Exposição	Destaques	Sombras	Cor	Claridade	Vinheta
Valor Ajuste	-20	100	0	-100	100	100	100	0

## Frente de desmonte 2



Figura 23 - Frente de desmonte relativa à TRE 2 sem qualquer processamento de imagem.



Figura 24 - Frente de desmonte relativa à TRE 2 com recurso ao editor de imagens da Microsoft para processamento de imagem.

Tabela 3 - Ajustes e os seus respetivos valores, efetuados para uma melhor perceção da coloração mais azul presente no maciço (tomografia de resistividade elétrica 2).

Ajuste	Claro	Contraste	Exposição	Destaques	Sombras	Cor	Claridade	Vinheta
Valor Ajuste	0	100	0	0	100	100	100	0



### Frente de desmonte 3



Figura 25 - Frente de desmonte relativa à TRE 3 sem qualquer processamento de imagem.



Figura 26 - Frente de desmonte relativa à TRE 3 com recurso ao editor de imagens da Microsoft para processamento de imagem.

Tabela 4 - Ajustes e os seus respetivos valores, efetuados para uma melhor perceção da coloração mais azul presente no maciço (tomografia de resistividade elétrica 3).

Ajuste	Claro	Contraste	Exposição	Destaques	Sombras	Cor	Clareza	Vinheta
Valor Ajuste	62	100	0	0	100	100	100	0

#### Frente de desmonte 4



Figura 27 - Frente de desmonte relativa à TRE 4 sem qualquer processamento de imagem.



Figura 28 - Frente de desmonte relativa à TRE 4 com recurso ao editor de imagens da Microsoft para processamento de imagem.

Tabela 5 - Ajustes e os seus respetivos valores, efetuados para uma melhor perceção da coloração mais azul presente no maciço (tomografia de resistividade elétrica 4).

Ajuste	Claro	Contraste	Exposição	Destques	Sombras	Cor	Clareza	Vinheta
Valor Ajuste	100	0	0	0	0	0	0	0

### 3.6.2 - Realce da diferença de tonalidade do calcário na frente da pedra através do *software Inkscape*

Numa segunda fase de edição, fez-se uso do *software* gratuito Inkscape™ (2022) (versão 1.2.1) para, através de um filtro de fluorescência que o mesmo possui, utilizar a imagem previamente editada com o editor de imagens da *Microsoft* e melhorá-la, de modo que seja ainda mais nítida a interface mais creme e a mais azul.

O filtro de fluorescência usado tem por base, o fenómeno da fluorescência ótica que ocorre quando uma molécula absorve luz em comprimentos de onda dentro da sua banda de absorção e, posteriormente, de forma quase instantânea emite luz com comprimentos de onda mais longos e dentro da sua banda de emissão. A maioria dos filtros usados são conjuntos de alto brilho e alto contraste, atingindo o equilíbrio entre o brilho mais alto possível, mantendo um alto contraste e sendo a melhor escolha em condições de imagem padrão. Bandas de passagem mais estreitas reduzem a diafonia, isto é, a interferência elétrica, permitindo que apenas a porção mais forte do espectro de emissão de fluoróforo seja transmitida, reduzindo o ruído de autofluorescência e melhorando, desta forma, a relação sinal-ruído em amostras de autofluorescência de fundo alto (IDEX Health & Science LLC, 2022).

O filtro usado pelo *software Inkscape*, satura as cores que podem ser fluorescentes na vida real, simulando este efeito digitalmente e não aquando da recolha da imagem, contudo a aplicação do método é semelhante ao que acontece durante a utilização contínua de um filtro acoplado na lente da câmara quando a fotografia é recolhida. Neste caso embora de modo digital e, posteriormente à recolha fotográfica da imagem, o filtro permitiu uma melhoria significativa na perceção da diferença de tonalidades existente na frente de desmorte da exploração.

As figuras 29 a 32 apresentam o resultado obtido com a utilização do filtro de fluorescência do *software Inkscape*. De notar que, para além da utilização do editor de imagens da *Microsoft* e do *Inkscape*, existiu sempre o critério de avaliação e comparação dos resultados de imagem alcançados digitalmente, com o que era visualizado no campo a olho nu, de forma a validar os resultados obtidos digitalmente.



*Figura 29 - Resultado final do tratamento de imagem, referente à frente de desmonte da tomografia de resistividade elétrica 1, com recurso ao software Inkscape.*



*Figura 30 - Resultado final do tratamento de imagem, referente à frente de desmonte da tomografia de resistividade elétrica 2, com recurso ao software Inkscape.*



*Figura 31 - Resultado final do tratamento de imagem, referente à frente de desmonte da tomografia de resistividade elétrica 3, com recurso ao software Inkscape.*



*Figura 32 - Resultado final do tratamento de imagem, referente à frente de desmonte da tomografia de resistividade elétrica 4, com recurso ao software Inkscape.*

### 3.6.3 - Delimitação da interface creme-azul

Com base no tratamento de imagem descrito anteriormente e com a verificação do que se observava *in situ*, foi possível delimitar a interface mais creme (b)) da mais azul (a)) e, a partir daí, poder proceder à análise dos dados já tratados, referentes às tomografias de resistividade elétrica efetuadas. As figuras 33 a 36, representam as frentes de desmonte de cada TRE, com a respetiva delimitação da interface do calcário mais creme e do mais azul.

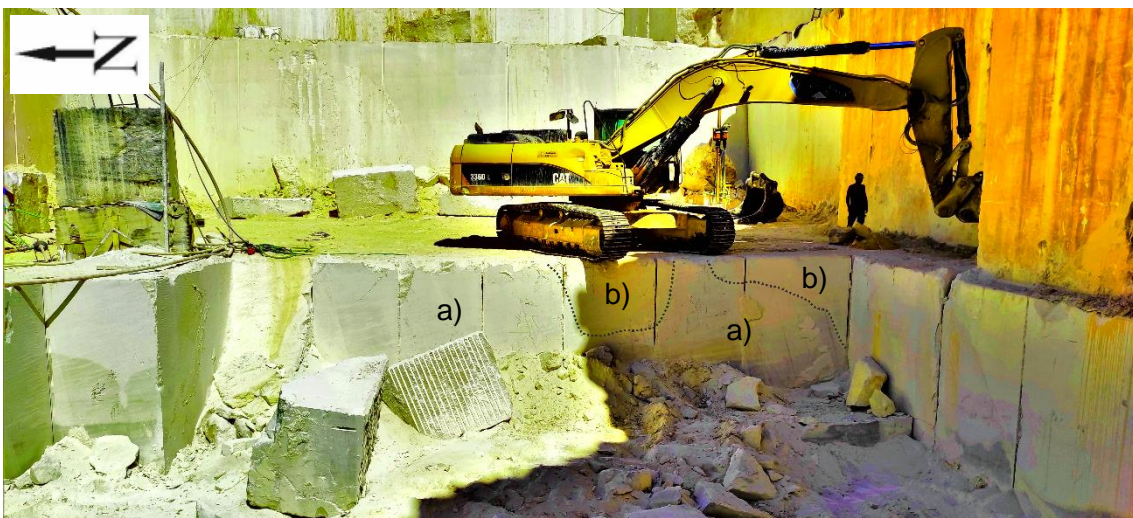


Figura 33 - Área de desmonte respeitante à TRE 1, com a delimitação do calcário mais azul (a)) e do mais creme (b)).



Figura 34 - Área de desmonte respeitante à TRE 2, com a delimitação do calcário mais azul (a)) e do mais creme (b)).



Figura 35 - Área de desmonte respeitante à TRE 3, com a delimitação do calcário mais azul (a)) e do mais creme (b)).

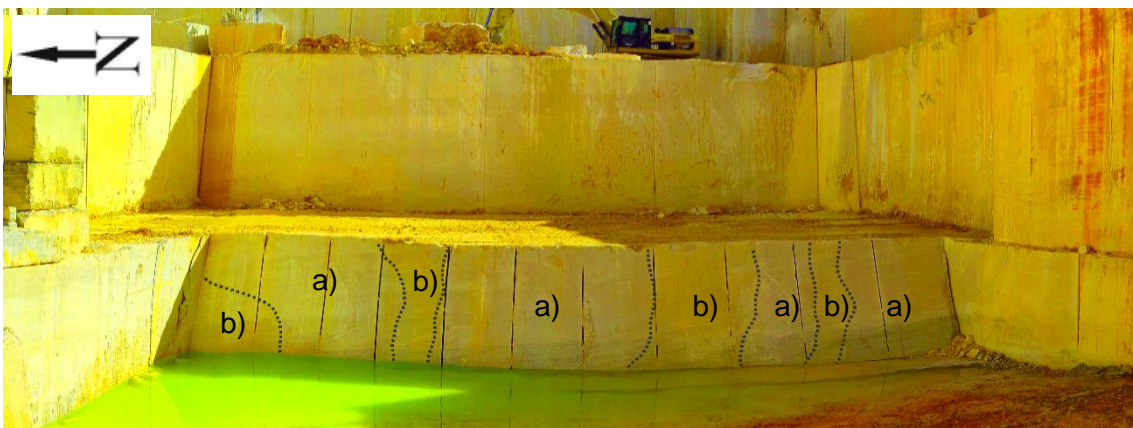


Figura 36 - Área de desmonte respeitante à TRE 4, com a delimitação do calcário mais azul (a)) e do mais creme (b)).

## Capítulo 4 - Resultados e Discussão

Neste capítulo irão ser apresentados os resultados obtidos, de acordo com a metodologia apresentada, bem como, conseqüentemente, a discussão dos mesmos. Será subdividindo ainda, em duas partes, o ponto 4.1 referente à resistividade elétrica e o ponto 4.2 relativo ao GPR.

No que toca à resistividade elétrica, tal como já foi mencionado ao longo deste trabalho, foram planeadas seis tomografias de resistividade elétrica (TRE), predispostas sub-paralelamente umas às outras e à própria frente de exploração, permitindo assim correlacionar os resultados obtidos com as ocorrências verificadas *in situ*, à medida que o desmonte ia progredindo (figuras 37 a 40).



Figura 37 - Localização das TRE, relativamente à frente de desmonte da TRE 1.



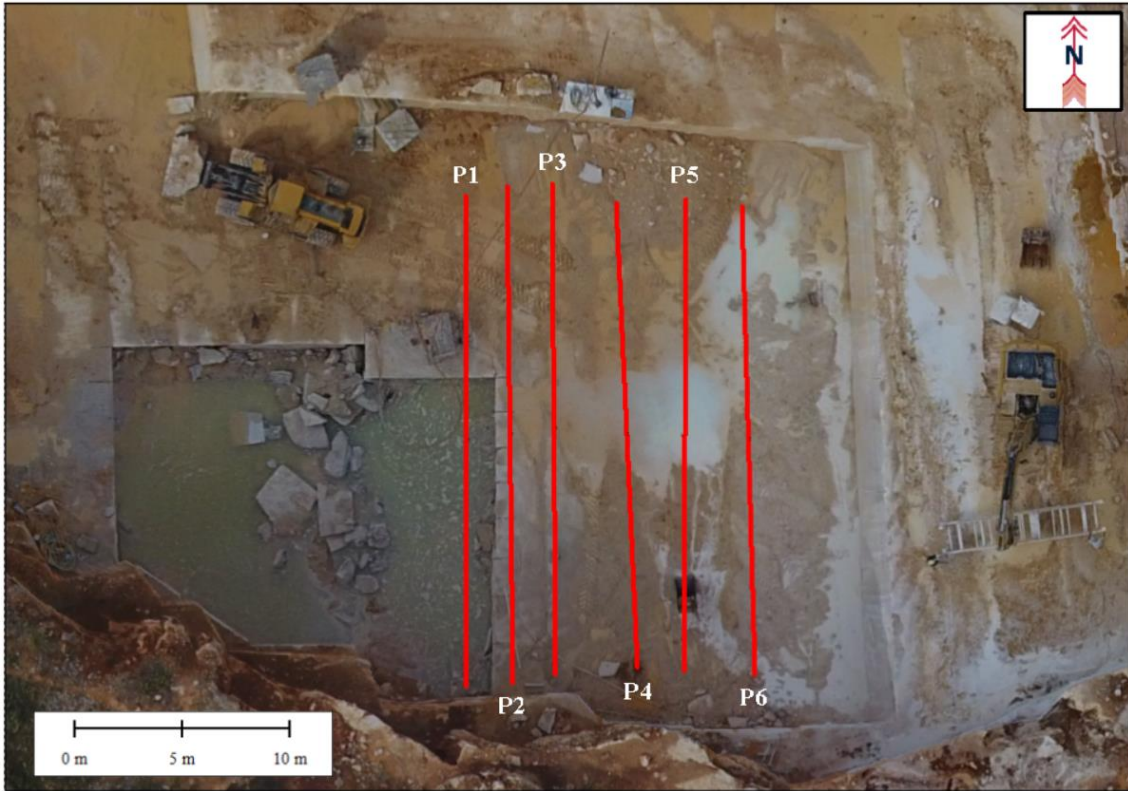


Figura 38 - Localização das TRE, relativamente à frente de desmonte da TRE 2.



Figura 39 - Localização das TRE, relativamente à frente de desmonte da TRE 3.

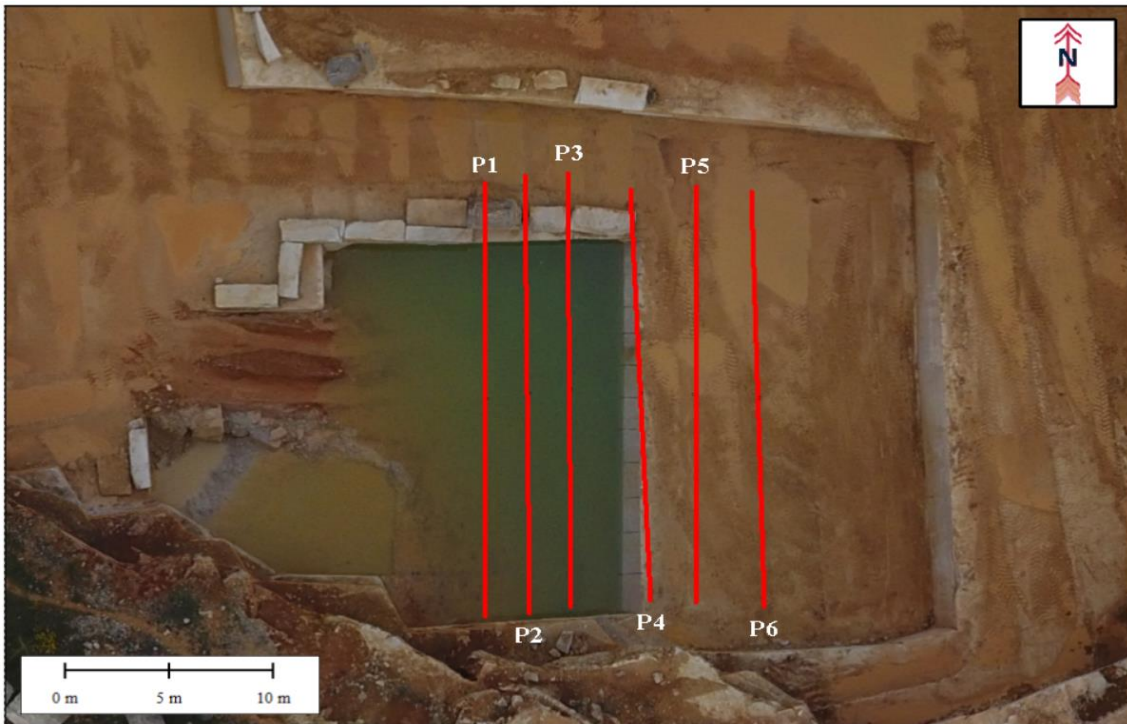


Figura 40 - Localização das TRE, relativamente à frente de desmonte da TRE 4.

Quanto ao método do GPR, este foi aplicado sobreposto às tomografias de resistividade elétrica (embora mais restrito à frente de desmonte), com o intuito de haver uma sobreposição de resultados com recurso a diferentes técnicas precisamente na mesma área, justamente para ser possível, à posteriori, um complemento e comparação de resultados quer de uma quer de outra técnica. A figura 41 representa a área e a localização da grelha GPR, no terceiro patamar de exploração da pedreira.



Figura 41 – Localização da grelha GPR.

## 4.1 - Resistividade elétrica

Iniciando pelo método de resistividade elétrica, este foi efetuado de duas maneiras, a primeira em campo e a segunda em laboratório, tendo como objetivo a de laboratório a comparação com os valores obtidos *in situ*, servindo meramente para confrontar os valores obtidos sob condições controladas, com os recolhidos no campo.

### 4.1.1 - Tomografias de resistividade elétrica medidas no campo

Tendo por base as tomografias de resistividade elétrica realizados no campo, apresentados no anexo 1, foram geradas secções com os valores de resistividade aparente, isto é, resistividade elétrica medida com o resistivímetro no campo. Após o processamento dos valores respeitantes à resistividade aparente, foi possível obter uma secção alusiva aos possíveis valores de resistividade real do maciço.

As figuras 42 a 47, traduzem essas secções de resistividade real, obtidas através do processamento dos dados recolhidos *in situ*, com recurso ao *software Res2Dinv*. Uma vez que, o comprimento das TRE foi superior ao comprimento total das bancadas, cingiu-se, numa fase inicial, apenas à análise das secções alusivas à frente de desmonte observada, dado que a validação e análise dos dados seria a mais fidedigna possível pois, o que estaríamos a ver nas secções era confirmado com o que ocorria no campo.

As figuras mencionadas descrevem ainda, o local e geometria das frentes de desmonte relativas a quatro das seis TRE realizadas (retângulos tracejados a vermelho).

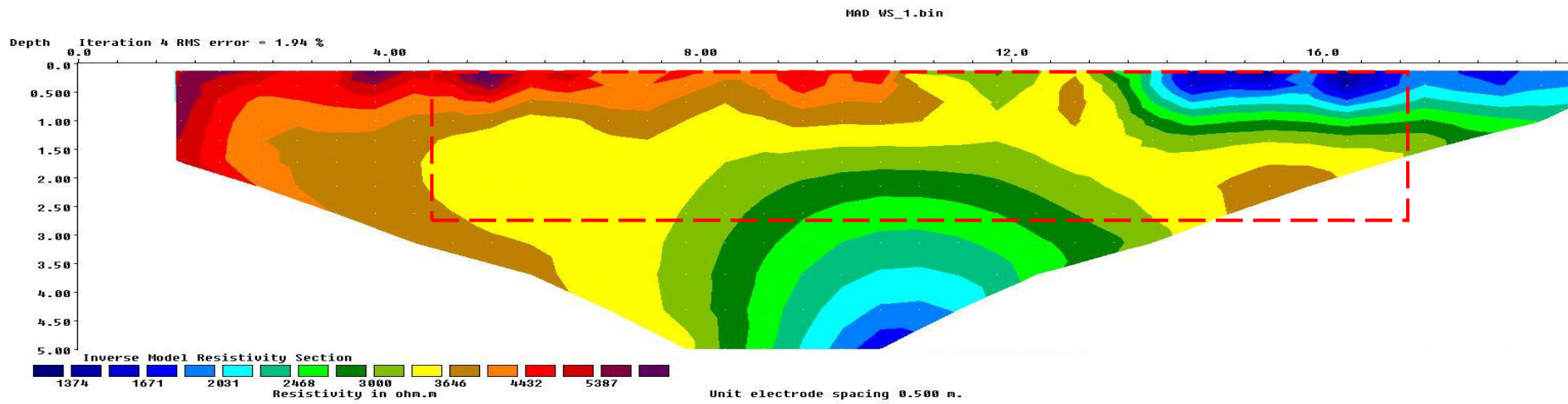


Figura 42 – Secção de resistividade elétrica processada, da TRE 1; delimitação da frente de desmorte (retângulo tracejado a vermelho).

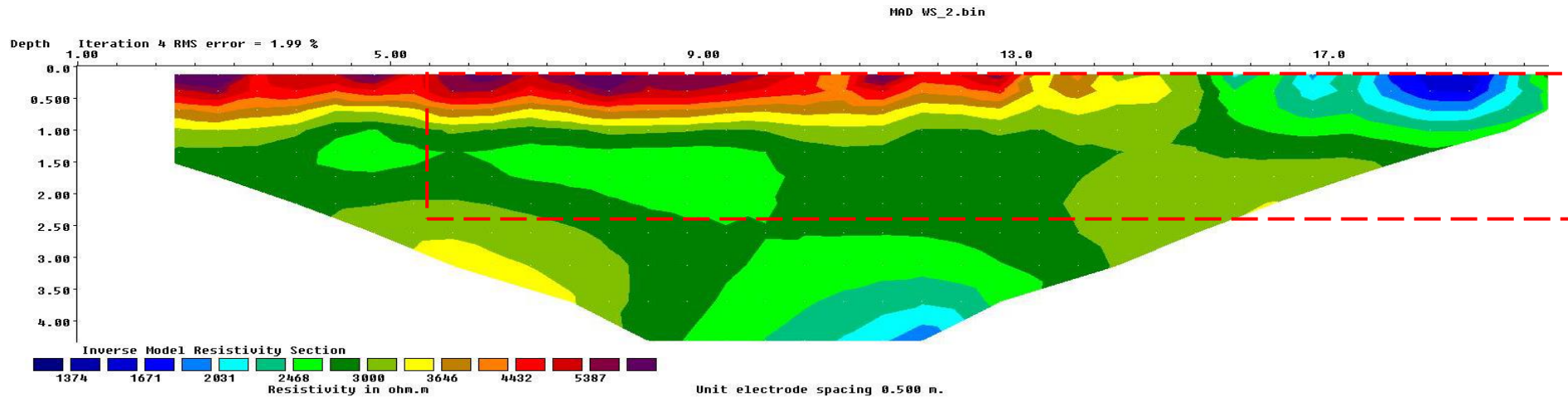


Figura 43 - Secção de resistividade elétrica processada, da TRE 2; delimitação da frente de desmorte (retângulo tracejado a vermelho).

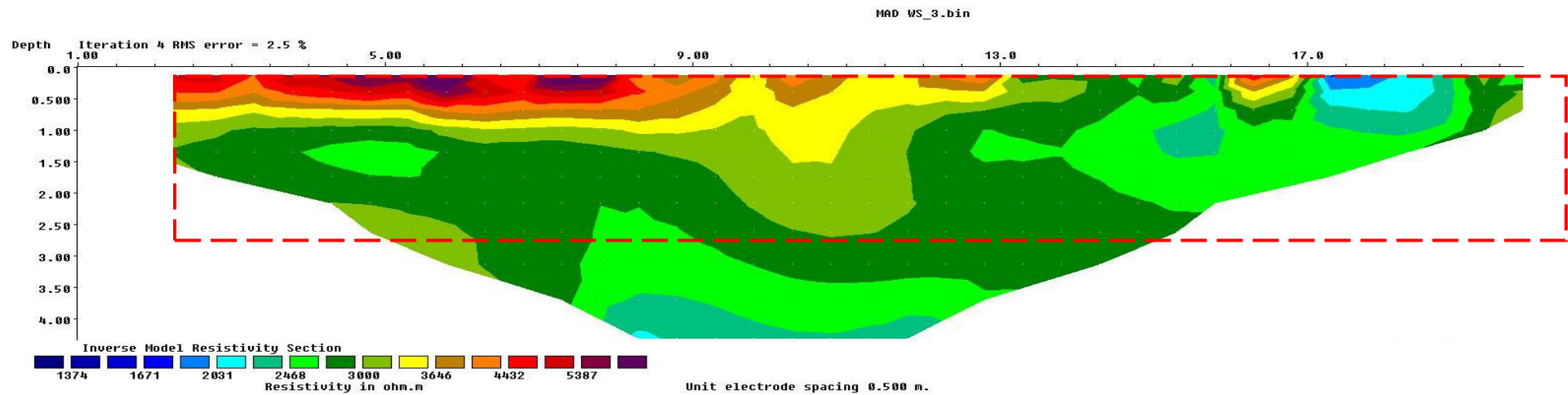


Figura 44 - Seção de resistividade elétrica processada, da TRE 3; delimitação da frente de desmonte (retângulo tracejado a vermelho).

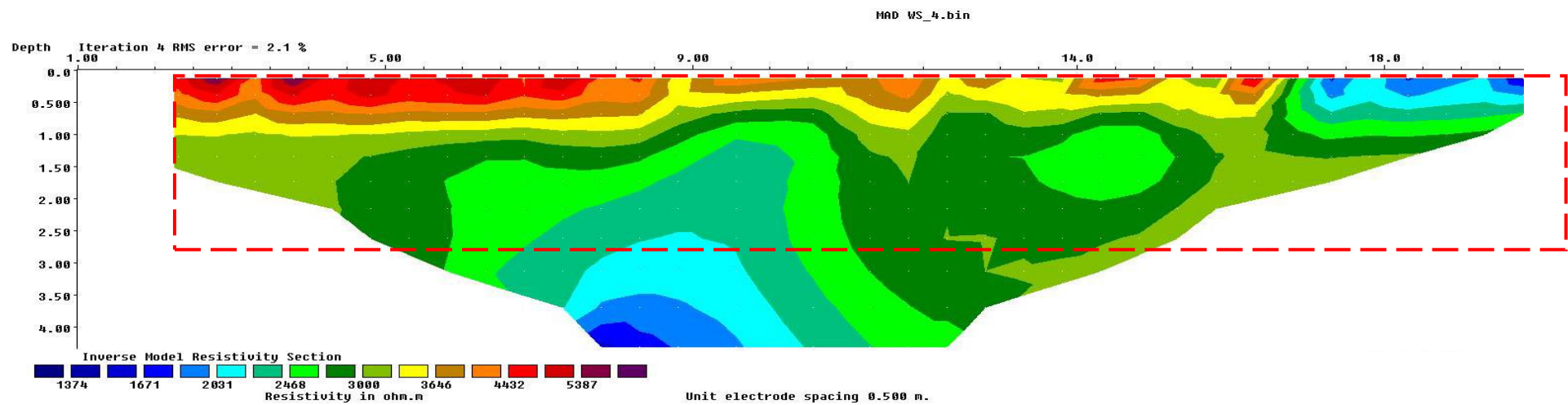


Figura 45 - Seção de resistividade elétrica processada, da TRE 4; delimitação da frente de desmonte (retângulo tracejado a vermelho).

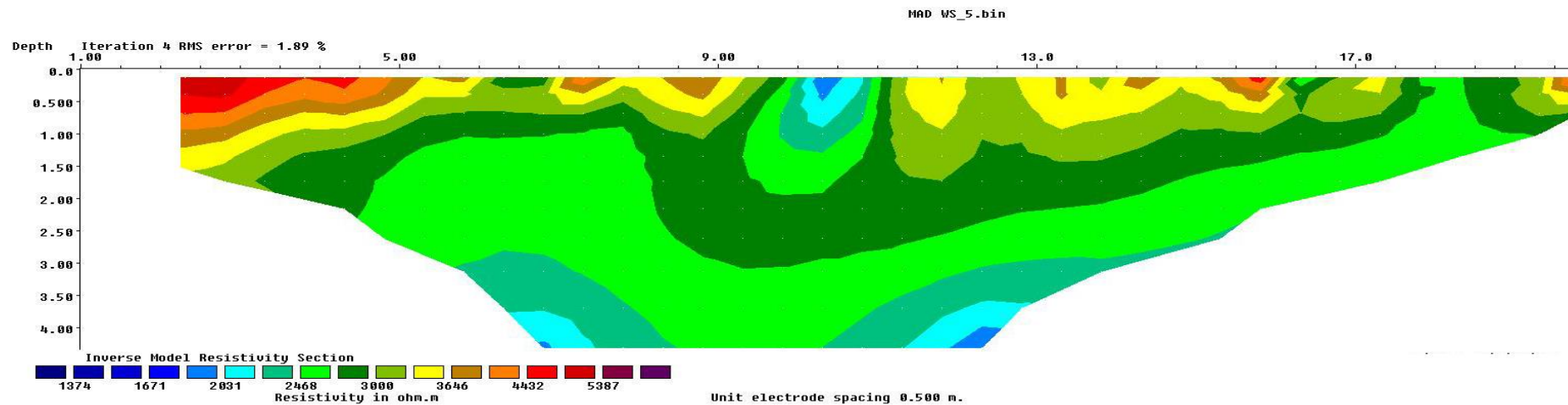


Figura 46 - Secção de resistividade elétrica processada, da TRE 5.

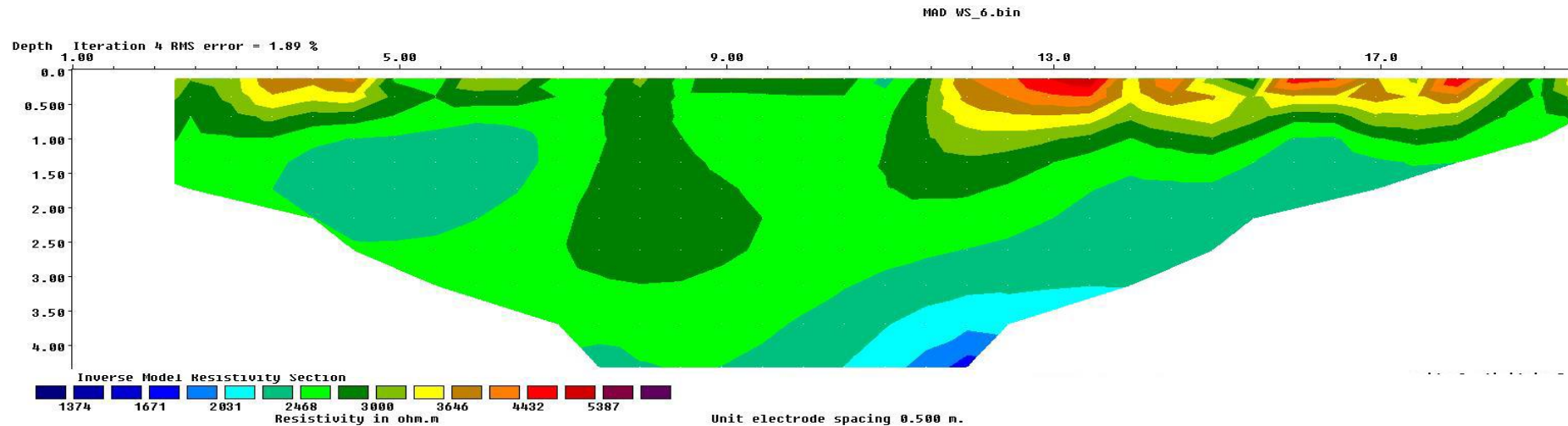


Figura 47 - Secção de resistividade elétrica processada, da TRE 6.

De seguida, foram projetadas as secções de resistividade elétrica nas imagens recolhidas fotograficamente da frente de desmonte (figuras 48 a 51), bem como a marcação de possíveis descontinuidades estruturais, que podem estar na base dos valores de resistividade apresentados. No entanto, por motivos técnicos, alheios ao nosso interesse, apenas foi executável essa projeção em quatro das seis TRE realizadas, uma vez que, até à data de termino deste trabalho a zona-alvo de estudo não teve mais nenhum avanço, estando a sua exploração intermitente no local alusivo à TRE 4.

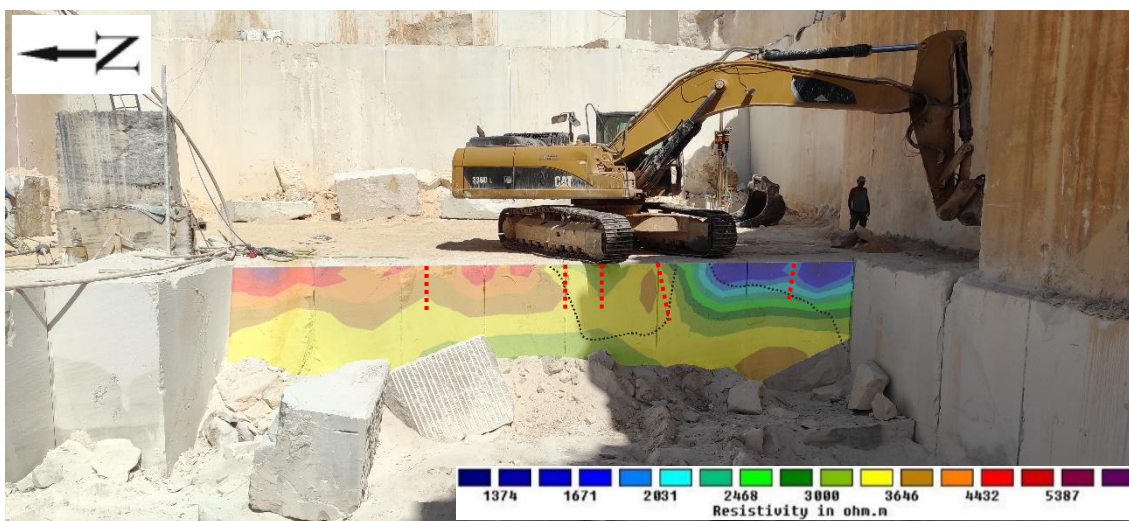


Figura 48 - Secção de resistividade elétrica, projetada na frente de desmonte da TRE 1 e marcação (tracejado a vermelho), de possíveis descontinuidades estruturais.

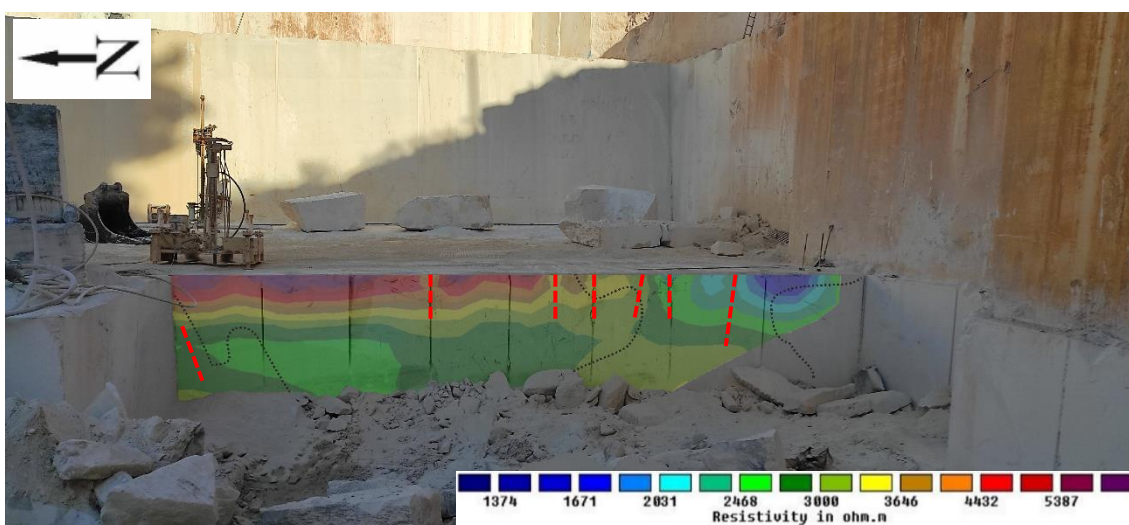


Figura 49 - Secção de resistividade elétrica, projetada na frente de desmonte da TRE 2 e marcação (tracejado a vermelho), de possíveis descontinuidades estruturais.

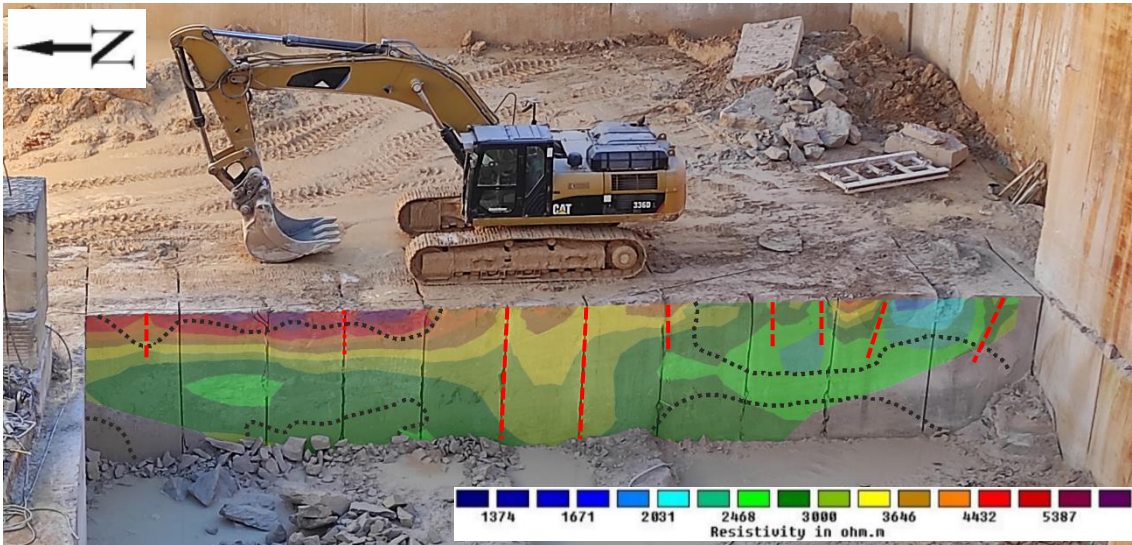


Figura 50 - Secção de resistividade elétrica, projetada na frente de desmonte da TRE 3 e marcação (tracejado a vermelho), de possíveis descontinuidades estruturais.

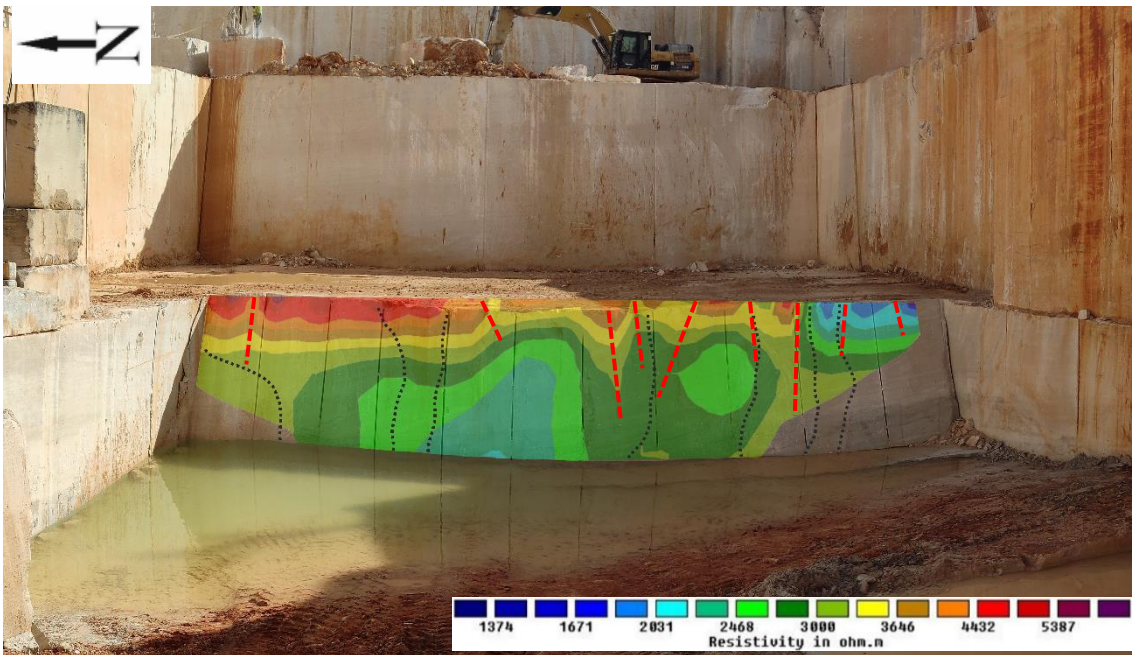


Figura 51 - Secção de resistividade elétrica, projetada na frente de desmonte da TRE 4 e marcação (tracejado a vermelho), de possíveis descontinuidades estruturais.



Comparando, numa fase inicial, as quatro secções de resistividade elétrica que puderam ser projetadas na frente de desmonte para uma melhor interpretação e compreensão do maciço, verifica-se que existe uma correlação entre todas elas, face aos valores de resistividade apresentados, relativamente à localização e presença de descontinuidades na frente de exploração e, coincidentemente, em zonas onde o calcário apresenta uma tonalidade mais creme.

De modo geral, é possível verificar uma contínua associação do interrompimento e/ou mudança dos valores de resistividade, em zonas de maior concentração de descontinuidades estruturais, ou seja, onde existem ou é muito provável a sua existência, constata-se que os valores de resistividade sofrem alterações. Consequentemente, dessa mudança de valores de resistividade elétrica e, ao que tudo indica, junto de sistemas de descontinuidade, o calcário apresenta uma tonalidade mais clara (mais creme), quando comparada com o restante da frente de desmonte, onde o suposto sistema de descontinuidades, aparenta não ser tão marcado e predomina o calcário mais azul.

É de ter em conta que os cortes verticais que se encontram feitos na frente de desmonte são para, à posteriori, subdividir a bancada em blocos mais pequenos para facilitar o seu transporte e transformação futuros. Os cortes verticais mencionados são realizados, preferencialmente, em zonas onde existe uma ou mais descontinuidades estruturais, o que corrobora os valores de resistividade obtidos e apresentados nessas mesmas zonas, bem como as suposições relativas às descontinuidades presentes (assinaladas a vermelho).

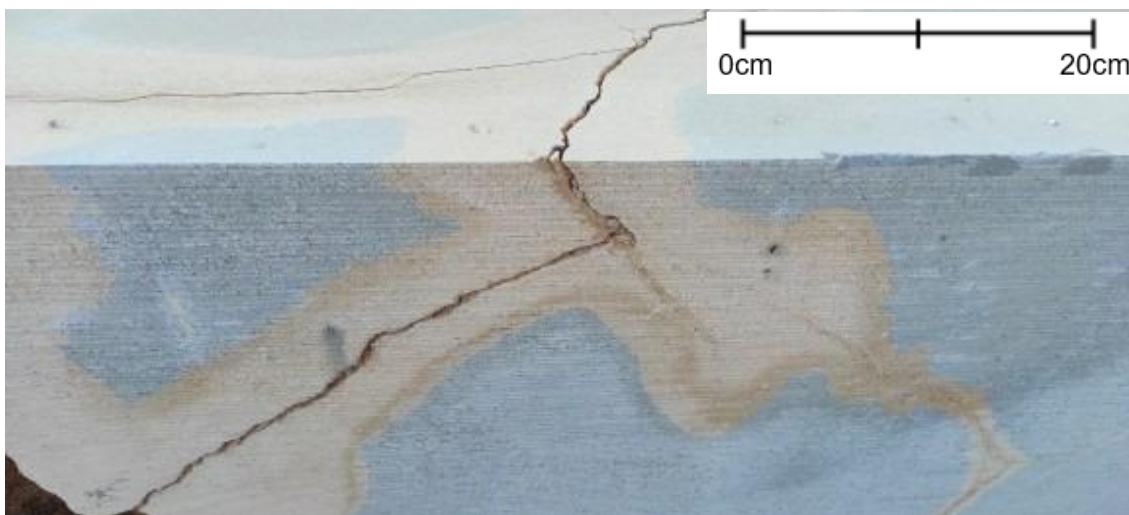
Pode-se pressupor que um dos principais agentes desencadeadores da alteração dos valores de resistividade local e pontualmente, seja precisamente o sistema de descontinuidades que o maciço apresenta. No entanto, também é possível visualizar e verificar, recorrentemente, uma notória associação do calcário de coloração mais creme com os diversos sistemas de descontinuidades estruturais do maciço, havendo evidências mesmo de “descoloração” ou “lixiviação” do calcário mais azul para calcário mais creme, precisamente nessas mesmas feições estruturais.

Segundo Santos (2017) a cor azul tem tendência a perder-se por processos oxidantes, o que leva a acreditar que a cor original da rocha é “azul”, e que a sua intensidade varia consoante o tipo de fácies da rocha em cada ponto. A cor creme observada resulta de uma meteorização oxidante incipiente promovida por fluidos meteóricos. O autor refere ainda que, é de esperar que os níveis mais próximos da superfície topográfica natural não se apresentem azuis, e que o mesmo aconteça perto

de discontinuidades que possam servir como canais de percolação de fluidos meteóricos. Nas zonas adjacentes a acidentes tectônicos principais, o calcário de cor azul não aparece pois sofreu descoloração por parte dos fluidos que circulam nessas regiões.

O que é descrito por Santos (2017), é verificado na pedra em estudo, e mais, em zonas mais altas da pedra apresentam calcários de tonalidade mais creme e, à medida que a profundidade na área de exploração aumenta o calcário de tonalidade mais azul tende a ser mais comum.

As figuras seguintes (figuras 52 e 53), ilustram, na perfeição, a evidência dessa “descoloração” ou “lixiviação” do calcário mais azul para um calcário mais creme, sempre junto a sistemas de discontinuidades estruturais, seja eles fraturas, falhas, superfícies de estratificação, entre outros. É possível verificar que o calcário de tonalidade mais creme se encontra junto de feições estruturais.



*Figura 52 – Evidências da “descoloração” e/ou “lixiviação” do calcário mais azul para calcário mais creme, junto de uma discontinuidade estrutural, num bloco da “pedreira EM&R”.*



*Figura 53 - Destaque da coloração mais creme junto de descontinuidades estruturais (pedreira contígua).*

Tendo em conta que a tonalidade mais creme do calcário, tende a estar associada a descontinuidades estruturais, o que se verifica de forma recorrente, quer na pedreira em estudo quer na pedreira contígua (Ovelheiro&Filhos, Lda (Lagoa nº6720) (figuras 52 e 53, respetivamente), acaba, de certa forma, por validar os valores de resistividade obtidos, uma vez que próximo à mudança desses valores existem sempre descontinuidades e, por consequência ou não, calcário de tonalidade mais creme, quando comparado com o calcário com menos descontinuidades e mais azul.

Estando as frentes de desmonte muito próximas à falha de desligamento, assinalada por Duarte (2010) na sua dissertação de mestrado, é natural que exista um aumento significativo na ocorrência de descontinuidades mais próximo à falha do que mais afastado dela. Verifica-se que o maciço se encontra com índices de fracturação muito mais acentuados a Sul do que a Norte da área estudada. A figura 54, pretende realçar a localização da caixa da falha referida, próxima ao local de estudo.



Figura 54 - Localização da caixa de falha (assinalada a vermelho); localização da TRE 1.

Os valores de resistividade elétrica mais elevados, localizados no topo esquerdo da frente de desmonte, não devem ser tidos em conta como valores de possível resistividade real do maciço naqueles locais, pois esses mesmos valores justificam-se seguramente, em virtude de serem os locais onde os eléctodos estavam colocados e que, devido a uma dificuldade na passagem de corrente elétrica dos eléctodos para o maciço, houve o registo dessa mesma dificuldade, sendo traduzida em elevados valores de resistividade, pontualmente verificados nessas áreas.

O inverso aconteceu no canto oposto, no topo superior direito da frente de desmonte. Devido à presença de sombra, no lado direito da área estudada, aquando da aquisição dos dados, levou a uma saturação superficial do maciço, uma vez que se colocou água salgada e material arenoso (junto aos eléctodos), de modo a aumentar a condutividade elétrica. Esse lado ao estar mais resguardado do sol, garantiu valores de resistividade baixos superficialmente, como se pode verificar em quase todas as secções de resistividade elétrica.

Relativamente às duas últimas secções, as quais não se conseguiram comparar diretamente com o maciço devido à sua frente de desmonte não estar visualmente disponível, verifica-se que os valores de resistividade apesar de se apresentarem ligeiramente mais baixos, de modo global, as próprias zonas onde poderão existir discontinuidades continuam a estar bem representadas por meio de picos nos valores de resistividade.

Também é aceitável esta ligeira diminuição da resistividade uma vez que, o maciço poderá ter maior percentagem de água no seu interior (TRE 4, 5 e 6) do que na sua extremidade (TRE 1, 2 e 3), o que leva a que à medida que vamos progredindo com as tomografias de resistividade elétrica, para dentro do maciço, estas tendem a apresentar valores de resistividade mais baixos devido ao teor de água do próprio maciço, pois este tende a secar desde as suas extremidades até ao seu interior.

## 4.1.2 - Valores de resistividade medidos no laboratório

Com o objetivo de comparar os valores de resistividade elétrica obtidos no campo, foi programada uma campanha de resistividade elétrica em laboratório. Esta campanha foi realizada tendo em conta o mesmo método aplicado no campo (Wenner), com a finalidade de comparar os resultados das medições efetuadas em laboratório, sob condições controladas, com os que se obtiveram no campo. Para o efeito foi utilizado, para a aquisição dos dados, um resistímetro *ABEM Terrameter SAS 300B* da empresa sueca ABEM (1980).

A figura 55, mostra o resistímetro com a respetiva ligação dos elétrodos predispostos para a medição através do método Wenner. Como se pode verificar na imagem, os elétrodos de corrente (C1 e C2) estão localizados nas margens exteriores e os de potencial (P1 e P2) ao centro. Note-se que, a distância entre os elétrodos é de 2,5 centímetros.

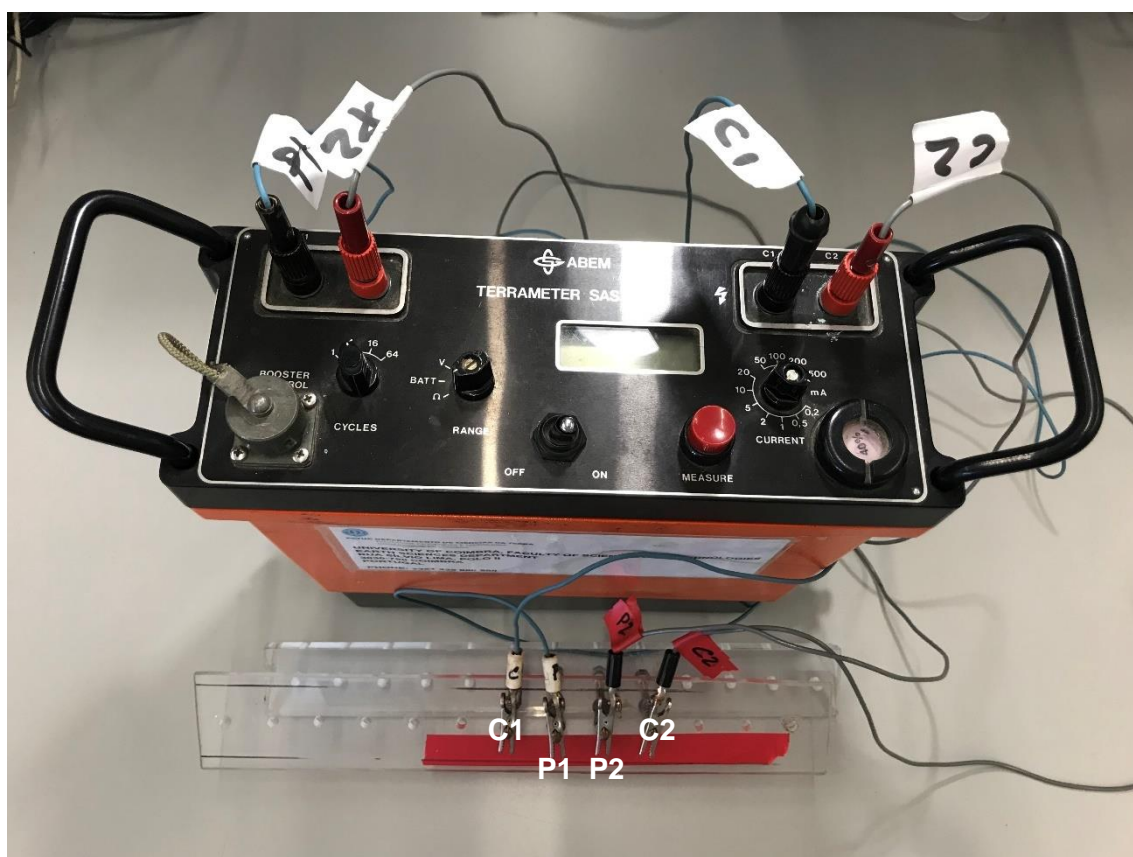


Figura 55 - Equipamento ABEM com a respetiva ligação dos cabos para medição através do método Wenner.

A figura 56, diz respeito à talhada da bancada mais lateral (assinalada pelo retângulo 1, na figura 11), relativamente à frente estudada, onde foram recolhidas as amostras a serem analisadas em laboratório. É possível verificar que, quer pela imagem quer pela observação no campo, existe uma progressão da coloração, desde o mais azul na base (5) até ao mais creme no topo (1).

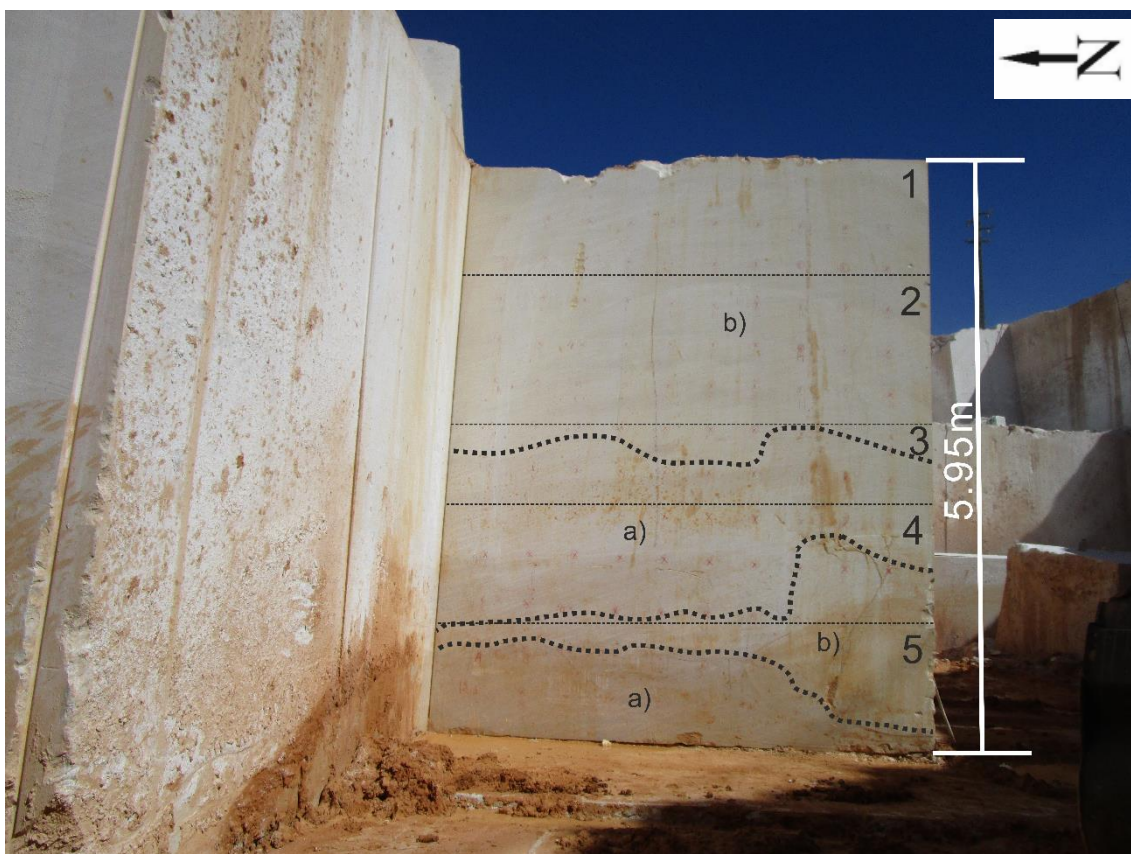


Figura 56 - Talhada onde foram recolhidas as amostras (1 a 5); a) calcário com coloração mais azulada; b) calcário com coloração mais creme.

As amostras retiradas da talhada mencionada na figura 56, encontram-se ilustradas nas figuras 57 a 61. Tentou-se ao máximo que a amostragem fosse a mais representativa, do tipo de litologia e tonalidade estudada na própria frente de desmonte. Como tal, houve sempre especial atenção relativamente à zona na própria talhada onde se recolhiam as amostras, de forma a evitar que estas não fossem expressivas da tonalidade amostrada. As zonas marcadas como 4 e 5 (figura 56), são as mais perto de serem o constituinte homólogo da litologia presente na frente de desmonte analisada, por consequência, serão o alvo de comparação direta.

Após a recolha das amostras em campo, estas foram objeto de estudo em laboratório. A campanha geofísica de resistividade elétrica em laboratório incidiu sobre 5 amostras, as 5 da talhada mais lateral e a cota moderadamente mais elevada, quando comparada com a frente estudada (figuras 57 a 61),



*Figura 57 - Amostra característica da zona 1.*

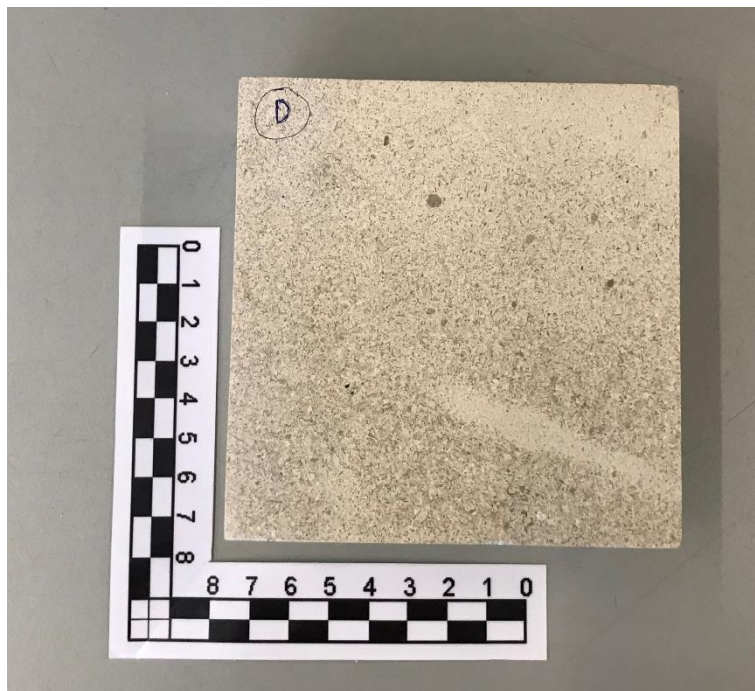


*Figura 58 - Amostra característica da zona 2.*





*Figura 59 - Amostra característica da zona 3.*



*Figura 60 - Amostra característica da zona 4.*



Figura 61 - Amostra característica da zona 5.

A tabela 6, representa os valores de resistividade medidos para cada uma das cinco amostras, no laboratório. Foram realizadas cinco medições de resistividade com uma orientação perpendicular à estratificação, sendo a primeira com as amostras saturadas em água e as restantes quatro após a medição saturada, tendo estado uma hora dentro da estufa a 14°C (valor relativo à temperatura média anual para a zona em estudo), ou seja, foram colocadas na estufa durante 1h a 14°C após a medição de resistividade anterior até realizar um total de cinco medições (uma saturada e quatro progressivamente mais secas). O objetivo da medição das amostras com diferentes graus de saturação foi verificar a influência da água na resistividade da amostragem.

Tabela 6 - Valores de resistividade elétrica medidos perpendicularmente à estratificação.

Valores de resistividade medidos ( $\Omega.m$ )					
Amostras	Medições efetuadas				
	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>
1	3658,10	4553,00	4443,10	5620,60	7033,60
2	4364,60	4929,80	5730,50	6327,10	7740,10
3	2741,22	3202,80	3658,10	4505,90	6452,70
4	1639,08	1852,60	2041,00	2290,63	2706,68
5	4019,20	4082,00	4411,70	4694,30	5149,60


 Diminuição da % de água

Verificou-se que os valores de resistividade tendem a aumentar à medida que a saturação em água diminui, concluindo que o teor em água tem influência direta nos valores de resistividade final, conseqüentemente, um dos fatores que poderá ter influência direta nos valores de resistividade elétrica obtidos é a porosidade do calcário estudado.

As amostras 4 e 5 foram as que serviram de termo de comparação com os valores registados no campo, uma vez que se tratam do constituinte homólogo do tipo de litologia analisada. Como tal, depois de efetuada a medição individual de resistividade elétrica, para cada uma das amostras, procurou-se calcular a média dos valores de resistividade obtidos para as amostras 4 e 5 (tabela 7).

Este cálculo da média, visou encontrar um valor intermédio de resistividade medido, visto que, o que se tem na frente de desmonte ser um entremeio das duas amostras.

*Tabela 7 - Média dos valores de resistividade elétrica das amostras 4 e 5.*

<b>Valores de resistividade medidos (<math>\Omega.m</math>)</b>					
<b>Amostras</b>	<b>Medições efetuadas</b>				
	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>
<b>4</b>	1639,08	1852,60	2041,00	2290,63	2706,68
<b>5</b>	4019,20	4082,00	4411,70	4694,30	5149,60
<b>Média</b>	<b>2190,15</b>	<b>2967,30</b>	<b>3226,35</b>	<b>3492,47</b>	<b>3928,14</b>

Após a realização dos cálculos para determinar a média das duas amostras (4 e 5) referentes a cada medição efetuada, voltou a fazer-se novamente o cálculo da média, mas desta vez com os valores de média obtidos (tabela 8). Este procedimento visou encontrar um valor adequado, coerente e intermédio de resistividade elétrica, que fosse representativo do tipo de litologia estudada.

*Tabela 8 - Média final, obtida através da média dos valores médios registados na tabela 7.*

	<b>Medições efetuadas (<math>\Omega.m</math>)</b>					<b>Média final</b>
	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	
<b>Média</b>	2190,15	2967,30	3226,35	3492,47	3928,14	3160,88

Na tabela 8 está indicado o valor de resistividade médio final, medido em laboratório, respeitante ao calcário analisado nesta dissertação. Podemos verificar que,

o valor médio de resistividade para o calcário de tonalidade mais azulada ronda os 3160  $\Omega.m$ , o que fica muito próximo daqueles que foram os valores registados em campo. Podendo com isso concluir que, tanto os valores de campo como os valores de laboratório, se assemelham e são coerentes para o tipo de calcário em questão (calcário com tonalidade mais azul).

De modo a comparar o calcário com a tonalidade mais azul com o calcário de tonalidade mais creme, fez-se exatamente o mesmo procedimento de cálculo médio de resistividades, mas desta vez, para as amostras 1, 2 e 3, que são as que mais se aproximam ao calcário de tonalidade mais creme. A tabela 9, indica o valor médio de resistividade obtido recorrendo-se à mesma técnica utilizada para as amostras 4 e 5.

*Tabela 9 - Média final, obtida através da média dos valores médios de resistividade elétrica das amostras 1, 2 e 3.*

	<b>Medições efetuadas (<math>\Omega.m</math>)</b>					<b>Média final</b>
	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	
<b>Média</b>	3587,97	4228,53	4610,57	5484,53	7075,47	4997,41

É possível verificar que, os calcários de tonalidade mais creme apresentam valores de resistividades, consecutivamente, sempre mais elevados do que o calcário de tonalidade mais azul. O que leva a acreditar que poderá existir algo na sua composição mineralógica, textural, etc. que acaba por influenciar estes valores significativamente diferentes entre os calcários mais cremes e os calcários mais azuis.

### 4.1.3 - Análise petrográfica e mineralógica (DRX)

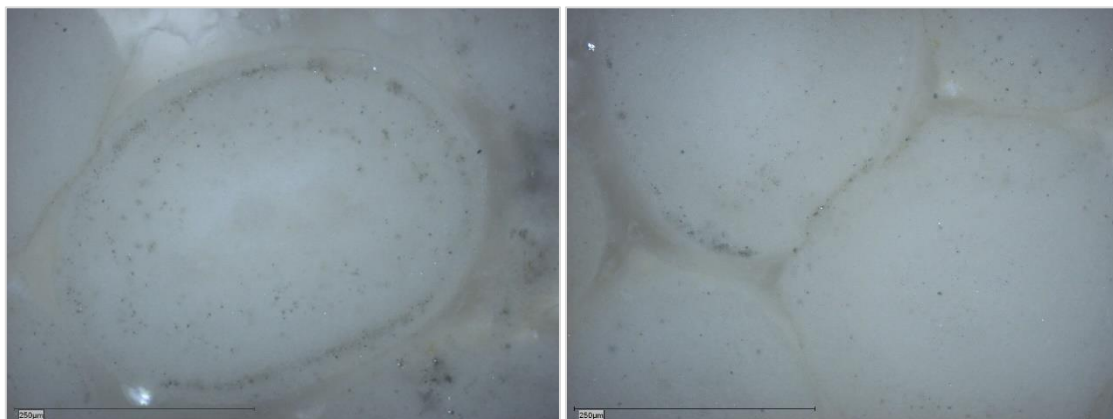
Após a análise e comparação dos valores de resistividade medidos, quer no campo quer no laboratório, surgiu a necessidade de analisar petrograficamente e mineralogicamente os calcários, de modo a verificar se existiam diferenças a nível mineralógico que pudessem influenciar os valores de resistividade, até agora estudados.

Posto isto, analisaram-se duas amostras recolhidas precisamente na zona de desmonte (assinalada pelo retângulo 2, na figura 11), onde se podem identificar as duas tonalidades do calcário, como ilustra a figura 18.

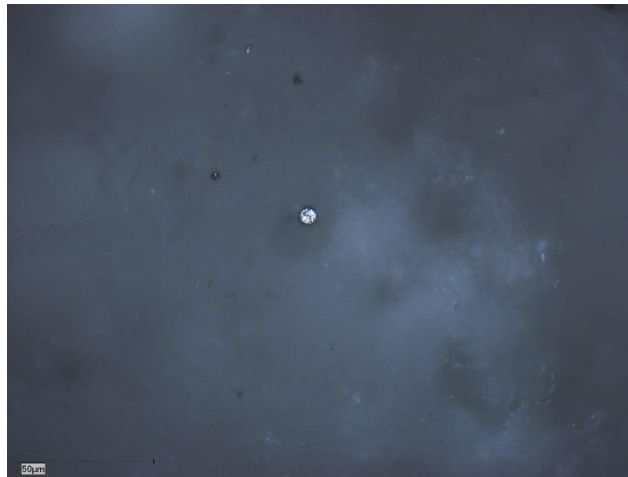
Através da observação com recurso ao microscópio ótico, com a objetiva de 50x a óleo, dos dois provetes polidos, ilustrados na figura 18, verificou-se que na área do provete 1 com a coloração mais clara, os cristais de calcite apresentam-se mais limpos e mais claros (figura 62), quando comparada com a área mais escura (figura 63). Esta, por sua vez, apresenta uma pigmentação mais escura e os cristais de calcite apresentam no bordo interior partículas minerais escuras de dimensão muito reduzida, que se acredita serem uma fração detrítica argilosa. Foi possível constatar ainda, a presença de pirite (figura 64), um sulfureto de ferro, que foi também identificado a olho nú, com relativa abundância, na amostra 4 na qual foi medida a resistividade no laboratório, tal como já foi mencionado e, que acabou por apresentar valores de resistividade mais baixos, seguramente, devido à presença do sulfureto na sua composição. A análise feita no provete 2 é consistente com o observado no provete 1, para a zona mais escura, tendo-se também observado material argiloso.



*Figura 62 – Imagem petrográfica da área mais clara (creme) do provete 1 com a objetiva de 50x a óleo.*



*Figura 63 - Imagens petrográficas da área mais escura (azulada) do provete 1 com a objetiva de 50x a óleo.*



*Figura 64 - Mineral de pirite observado na área mais escura (azulada) do provete 1 com a objetiva de 50x a óleo.*

Recorreu-se também à técnica de DRX com o intuito de fazer a identificação mineralógica das amostras analisadas. Para isso foi necessário reduzir a pó (<75  $\mu\text{m}$ ) e descarbonatar com recurso a ácido acético (15%), de modo a eliminar a fração mais abundante que, de outra forma, poderia ocultar a componente argilosa na análise por DRX.

Na análise das amostras por meio da DRX identificou-se a presença de argilas, corroborando as observações petrográficas. Os difratogramas das amostras examinadas encontram-se no anexo 2.

No que diz respeito à composição mineralógica das amostras, identificaram-se os seguintes minerais:

- Na amostra do provete 1 da figura 18: esmectite, ilite, caulinite, quartzo, feldspatos e dolomite;
- Na amostra do provete 2 da figura 18: esmectite, ilite, caulinite, quartzo, feldspatos, dolomite e calcite.

A presença de argilas poderá justificar os valores de resistividades mais baixos no calcário mais escuro, relativamente ao mais creme. Dado que, e segundo trabalhos elaborados por Abu-Hassanein *et al.* (1996) e Kibria & Hossain (2012), em argilas compactadas, estas tendem a ter um comportamento mais condutor, logo menos resistivo, uma vez que a condutividade é a razão inversa da resistividade, quando se encontram com maiores teores de água.

Como discutido anteriormente, foi verificado que um dos possíveis agentes causadores dos valores de resistividade, localmente, poderia ser o sistema de descontinuidades do maciço. No entanto, um outro agente que pode estar na base dessa mesma alteração de resistividades, e que acaba por ser corroborado, quer pelo que se visualiza quer pelos valores apresentados *in situ* e no laboratório, é a presença de argilas.

É provável que, além de poderem estar na base da tonalidade mais azulada uma vez que não foram identificadas argilas no calcário mais creme, podem igualmente estar na base dos valores mais baixos de resistividade obtidos para o calcário mais azul contrariamente aos valores obtidos no calcário mais creme. Esta constatação vem em parte corroborar o facto de que quando temos a presença de argilas no calcário este tende a apresentar valores de resistividade globalmente mais baixos.

#### 4.1.4 - Modelo 3D da resistividade elétrica

De forma a tornar a perceção e interpretação geral da resistividade elétrica do maciço mais fácil, criou-se um modelo 3D (figura 65) correspondente ao comprimento e profundidade total das tomografias de resistividade elétrica, com recurso a uma versão de teste gratuita do *software Voxler*, da empresa *Golden Software*. Através do modelo podemos apurar, resumir a totalidade das seis TRE e das seis secções de resistividade elétrica e agrupá-las num único modelo sólido.

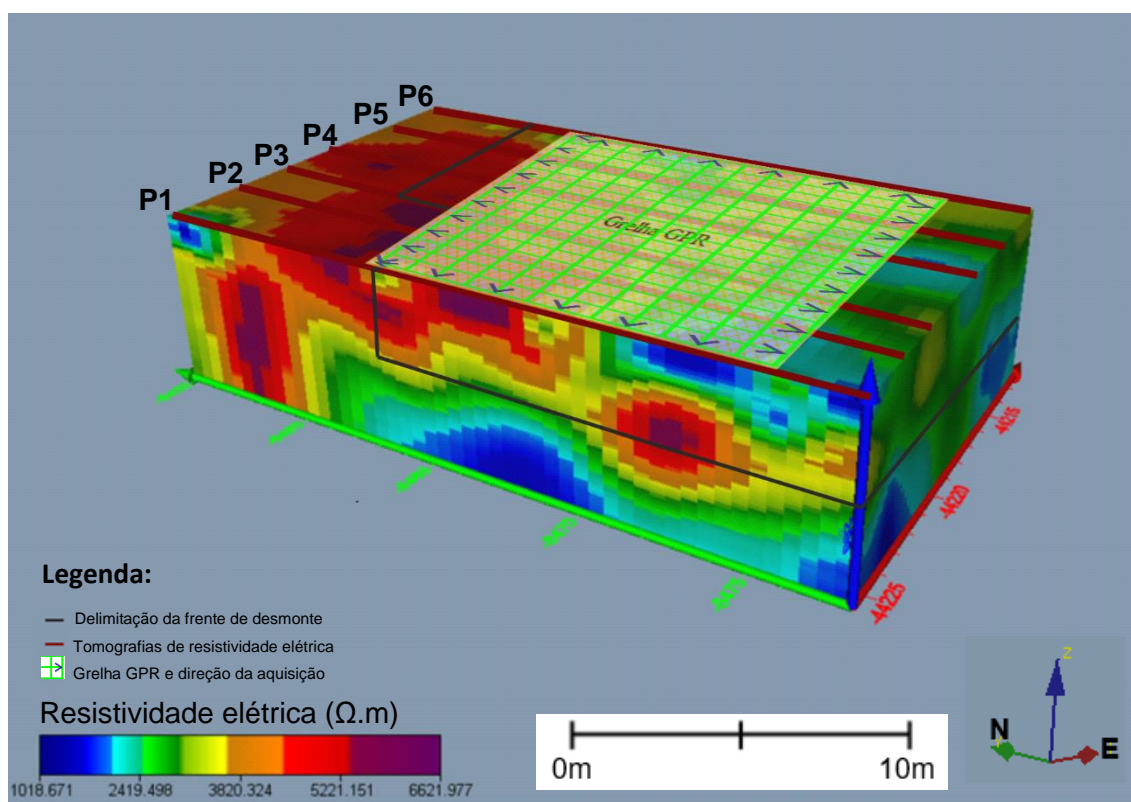


Figura 65 – Representação 2.5D do modelo tridimensional (3D) da campanha de resistividade elétrica.

Apesar de existir uma limitação visual do maciço em prol da totalidade do comprimento das tomografias de resistividade elétrica e da sua profundidade, uma vez que a frente de desmonte analisada corresponde apenas a uma parte das mesmas, o modelo criado acaba por ser bastante coerente quer com o que se pode confrontar e confirmar na frente de desmonte, quer com o restante, visto que é congruente com o que será espetável de se ter nas zonas onde não foi possível validar os dados.



## 4.2 - GPR

Finalizando com o método eletromagnético GPR, este teve como objetivo caracterizar estrutural e sequencialmente o maciço, de forma a perceber quais as orientações preferenciais dos planos estruturais e estratigráficos. Contudo, existiu a possibilidade de testar e processar os dados GPR, a título de curiosidade, por meio de um *software* denominado por *GEORADAR-EXPERT* na sua versão 2.0 que, tende a usar os valores de reflectância do GPR e, através de um algoritmo matemático, convertê-los em valores de resistividade elétrica (GEORADAR-EXPERT, 2009a).

### 4.2.1 - Grelha do GPR

Tendo em consideração que, a aplicação deste método coincidiu na mesma área das tomografias de resistividade elétrica, partiu-se do pressuposto que conjugando os dois métodos se iria fazer uma melhor caracterização do maciço naquele local. Isto porque a resistividade elétrica é um método bastante utilizado para a caracterização de maciços com diferenças litológicas, função da mineralogia, presença de fluidos, parâmetros esses que influenciam os valores obtidos, e o GPR é indicado para uma caracterização estrutural e estratigráfica com elevada resolução.

Tal acontece, devido aos valores obtidos por meio do método GPR serem valores de reflectância dos materiais. O anexo 3, exprime os radargramas conseguidos através da passagem do GPR, com uma antena blindada de 500 MHz e um espaçamento de passagens ao longo dos 19 e 12 metros, correspondentes à área abrangida pelo método, de 1 metro.

De notar que, de modo a rentabilizar o tempo das passagens, estas foram alternando o seu sentido (N-S para S-N e W-E para E-W e vice-versa) à medida que se iam fazendo passagens, isto é, uma passagem anterior com sentido N-S na passagem seguinte (1 metro de espaçamento) foi efetuada no sentido oposto (S-N), o mesmo aconteceu para a direção W-E. Começou-se a grelha do GPR, com sentido N-S (direção N-S) e sentido W-E (direção W-E).

Tratando-se de um método de alta resolução, é normal esperar elevada precisão e detalhe nos resultados, e este não foi exceção, apresentando resoluções centimétricas.

## 4.2.2 - Modelo 3D do GPR

À semelhança do que foi realizado com a resistividade elétrica, para uma melhor interpretação e percepção dos radargramas obtidos recorreu-se, mais uma vez, à versão de teste gratuita do *software Voxler* para criação do modelo 3D do GPR. Neste caso foi possível criar um modelo tridimensional através de coordenadas e uma componente, sendo a componente neste caso, os valores medidos nessas mesmas coordenadas.

A figura 66, diz respeito ao modelo criado no Voxler respeitante aos valores de reflectância adquiridos com o método eletromagnético GPR.

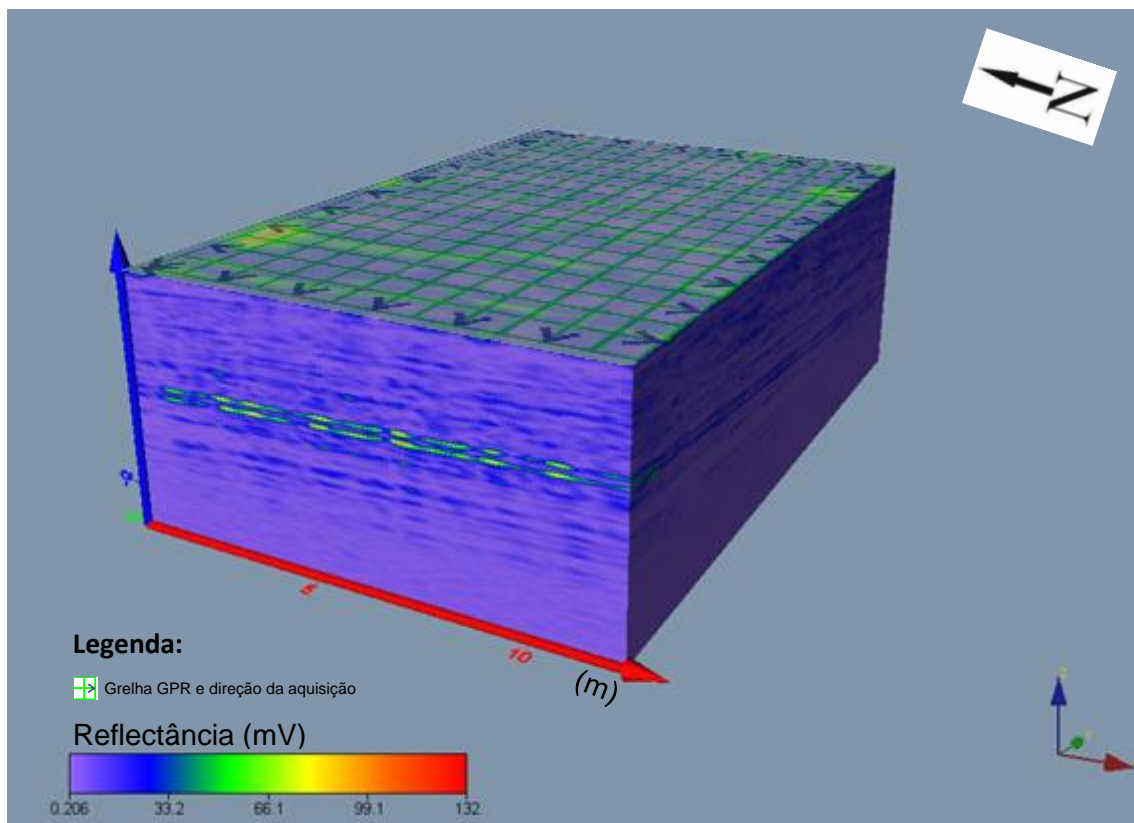


Figura 66 – Representação 2.5D do modelo tridimensional (3D) dos valores de reflectância do GPR.

É possível verificar que, a utilização do Voxler é, em tudo, muito prática e de melhor interpretação e percepção do que somente com os radargramas. Verifica-se perfeitamente, a orientação preferencial da estratificação, que mostra ser para E, e a nível estrutural a presença de algumas discontinuidades. As linhas mais superficiais destacadas, com direção N-S representadas no modelo, correspondem aos locais onde foram extraídos os blocos, referentes ao anterior patamar de exploração, ou seja, é possível visualizar o exato local onde foi subdivido o maciço em talhadas.

### 4.2.3 - Software GEORADAR-EXPERT 2.0

Existiu a oportunidade, em colaboração com um geólogo/geofísico da empresa "GPR Investigation" group, Leonid Krinitsky de utilizar um *software* de tratamento de dados GPR denominado *GEORADAR-EXPERT*. Este *software* permite calcular os valores de resistividade elétrica de um determinado meio, com base nos valores de reflectância obtidos pelo GPR, através de um algoritmo matemático criado para esse fim.

Um dos objetivos que levou à execução do teste deste *software*, foi verificar a possibilidade de obter com a utilização de um só método, os valores obtidos pelos vários métodos utilizados para caracterizar o maciço. Como tal, e garantindo que o *software* consegue mesmo calcular os valores de resistividade elétrica de determinado maciço ou meio, seria uma mais-valia futura, visto que, a caracterização do maciço que até à data só era possível, conjugando várias técnicas, deste modo conseguiríamos chegar aos mesmos resultados dessas mesmas técnicas combinadas, mas aplicando apenas um único método.

Tendo sido impossível ter acesso direto ao *software*, o processamento dos dados obtidos com o GPR, pelo *GEORADAR-EXPERT*, foram da exclusiva responsabilidade do geólogo/geofísico Leonid Krinitsky. Com o *software* obtivemos as secções de resistividade elétrica referentes a cada passagem do GPR, ou seja, cada radargrama obtido resultou numa secção de resistividade elétrica (anexo 3).

Após o processamento e tratamento dos dados obtidos e gerados as secções de resistividade elétrica referentes aos radargramas, estes foram alinhados sequencialmente e, por ordem, de forma a criar uma representação 2.5D do modelo 3D (figura 67).

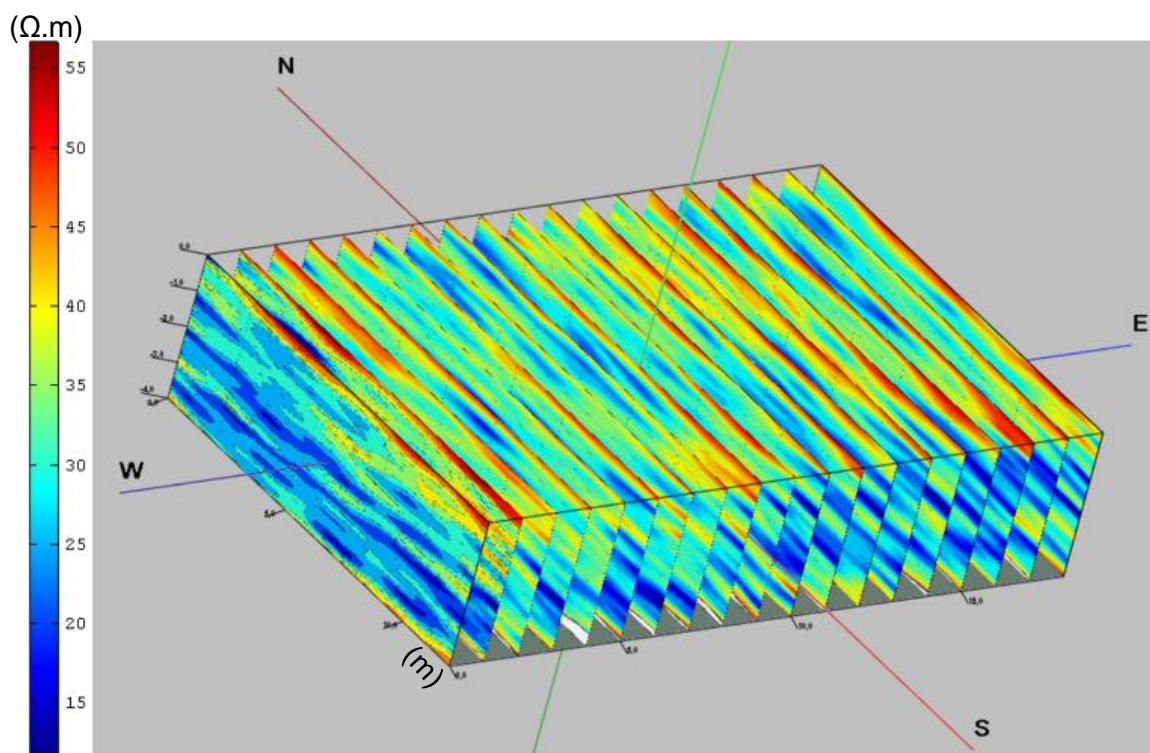


Figura 67 – Representação 2.5D do modelo 3D do alinhamento das secções de resistividade elétrica, obtidas através dos radargramas do GPR.

#### 4.2.4 - Comparação dos modelos 3D

Por fim, efetuou-se uma comparação dos resultados obtidos, através do *GEORADAR-EXPERT*, com os da resistividade elétrica efetuada no campo, de forma a encontrar semelhanças que corroborem os resultados alcançados com este processamento e o processamento da resistividade elétrica convencional.

De forma a fazer essa comparação, foram colocados os modelos de resistividade elétrica tridimensionais criados, perto um do outro (figuras 68 e 69), nomeadamente, o da resistividade elétrica obtida no campo e a representação 2.5D, fruto do alinhamento das secções de resistividade elétrica do GPR.

De notar que, devido à área estudada com o GPR não abranger a área total do modelo 3D da resistividade elétrica do campo, uma vez que esta é menor, existiu a necessidade de limitar este mesmo modelo, quer em comprimento quer em altura, correspondente ao GPR. Existiram alterações também na representação 2.5D do GPR, nomeadamente, a remoção das 5 primeiras secções de resistividade, pois a campanha de resistividade elétrica foi feita cerca de 5 metros depois da frente da área do GPR. Desta forma garantimos que estávamos a comparar a mesma zona do maciço estudado.

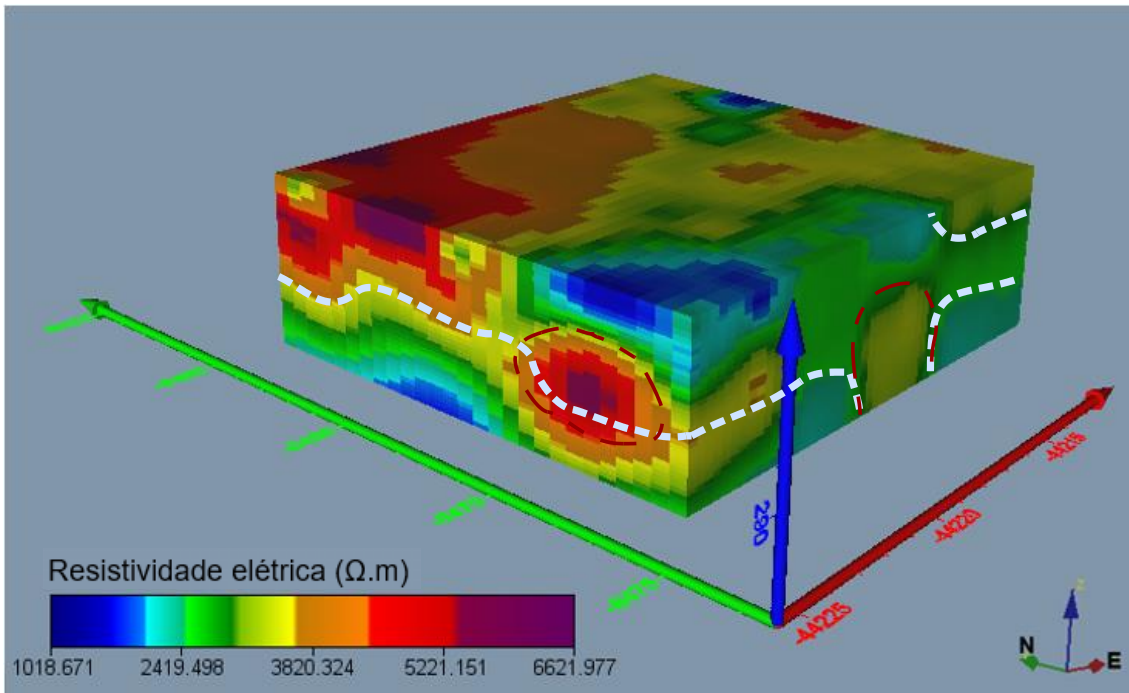


Figura 68 – Representação 2.5D do modelo 3D de resistividade elétrica, limitado à área do GPR.

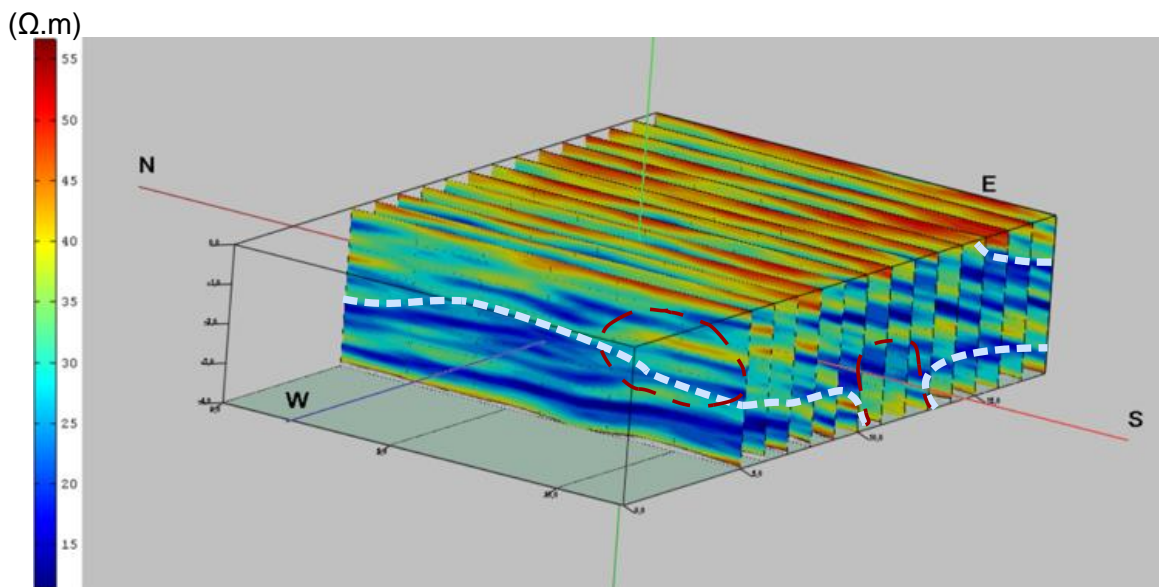


Figura 69 - Representação 2.5D do modelo 3D de resistividade elétrica com base em dados GPR, limitado à área das secções de resistividade elétrica.

Quando comparamos os dois modelos facilmente nos apercebemos que existem semelhanças.

Embora que se tenha feito uma comparação genérica, uma vez que a resolução que se consegue ter com um método (GPR) é muito superior à do outro (resistividade elétrica), daí não se verificar uma correlação na sua totalidade. Pontualmente, consegue-se verificar que, neste caso em específico, a técnica apresentou um resultado muito próximo do que se obteve no campo, com um método totalmente distinto.

O tracejado nos modelos, delimita as zonas onde é perceptível uma correspondência geométrica dos valores de resistividade. Em primeira instância poderá não ser tão perceptível essa afinidade, visto que, a escala de cores utilizada num modelo não é exatamente a mesma utilizada no outro, o que pode induzir em erro. Como tal, é necessário ter em conta os valores genéricos para aquela zona, quer de um quer de outro modelo. Foi tendo isso em conta que se fez a delimitação geométrica desses valores.

## Capítulo 5 - Conclusões

Finalizando este estudo, podemos concluir que a composição mineralógica e química do calcário de tonalidade mais azul, que difere do calcário mais claro, poderá ser um fator determinante para as diferentes respostas encontradas nos resultados obtidos nos diferentes métodos geofísicos aplicados. Pode mesmo ser um “marcador” para identificar e localizar este tipo de litologia num maciço calcário. Como se verificou no decorrer deste trabalho, existem diversos fatores que poderão estar na base da coloração mais azul apresentada pela rocha, nomeadamente, a presença de frações argilosas. Em oposição, existem outros que também poderão ser o motor desencadear da coloração mais creme que serão importantes de estudar pois, ao que tudo indica, um poderá ser a alteração do outro.

Coincidentemente, os calcários mais azuis, com maior percentagem de argilas, tendem a ser menos resistivos do que os calcários mais cremes, pelo que a identificação quer de um quer de outro, poderá ser facilitada com a aplicação de métodos de resistividade elétrica, uma vez que, os valores apresentados em cada tipo de calcário tendem a ser significativos ao ponto de, possivelmente, se conseguirem diferenciar por meio dessa particularidade.

Poderá ser vantajoso executar trabalhos futuros nessa vertente, a fim de caracterizar melhor um e outro e qual a influência da composição mineral nos valores de resistividade. Se assumirmos que os valores de laboratório são representativos, para o calcário em questão, seja ele mais creme ou mais azul, podemos usar esta diferença de resistividade elétrica para distinguir os tipos de calcário e assim, deste modo, localizar e identificar tanto o calcário mais creme como o mais azul e conduzir a lavra em direção ao calcário de interesse.

Relativamente ao método GPR, este mostrou-se, mais uma vez, eficaz na caracterização estrutural e sequencial do maciço. No entanto, o facto de se ter conseguido testar um novo *software* de tratamento dos dados, abriu uma janela de possibilidades que será importante de estudar futuramente, dado que apesar desta técnica de tratamento de dados aparentar ser competente para este caso em específico, carece de verificação futura noutros locais, noutras litologias e acima de tudo mais análise, de modo a validar os seus resultados.

Se, e após a devida verificação, o algoritmo matemático do *software GEORADAR-EXPERT*, se mostrar competente e eficaz para tal, será proveitoso em termos práticos, uma vez que, com apenas um único método poderíamos fazer a caracterização de um maciço que, até à data, só é possível recorrendo a vários.

Fruto deste trabalho, foi possível retirar resultados e conclusões que se mostraram bastante importantes no planeamento futuro da lavra da pedreira em estudo. Em virtude deste estudo existiu uma caracterização, embora que localizada em parte da pedreira, que irá permitir futuramente planejar, direcionar e otimizar a lavra de modo a rentabilizar ao máximo a sua exploração, evitando, neste caso, o calcário de coloração mais azul que, por meio dos métodos e técnicas utilizados nesta dissertação, acabou por ser localizado.

Desta forma conclui-se que cumprido o objetivo do trabalho, os resultados revelaram ser possível localizar e identificar as diferenças litológicas existentes no maciço, o que permite um melhor planeamento e rentabilização do processo extrativo, utilizando esta metodologia. É de referir que esta metodologia foi aplicada neste contexto específico, com resultados animadores. Para ser universalmente aceite e comprovada, será preciso aplicá-la noutros locais e contextos distintos, verificando aí a sua validade.



## Referências Bibliográficas

- ABEM. (1980). – *Instruction Manual. Atlas Copco ABEM AB, Bromma, Suécia.*
- Abu-Hassanein, Z. S., Benson, C. H., & Blotz, L. R. (1996). Electrical resistivity of compacted clays. *Journal of geotechnical engineering*, 122(5), 397-406.
- Almeida, C., Lopo, M., Jesus, M., & Gomes, A. (2000). *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental, vol. II.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5182.3440>
- Azerêdo, A. C. (2007). Formalização da litostratigrafia do Jurássico inferior e médio do Maciço Calcário Estremenho (Bacia Lusitânica). *Comunicacoes Geologicas*, 94, 29-51.
- Braga, A. C. O. (2016). *Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia.* Oficina de textos.
- Caracterizze. (2022). *O Que é o Drx e Como Pode Ajudar Meu Projeto?* <https://caracterizze.com/blog/o-que-e-drx>
- Carvalho, J. (2014). Photointerpretation of fracturing patterns in the Maciço Calcário Estremenho. *Comunicacoes Geologicas*, 101, 247-250.
- Carvalho, J., Lopes, C., Mateus, A., Martins, L., & Goulão, M. (2018). Planning the future exploitation of ornamental stones in Portugal using a weighed multi-dimensional approach. *Resources Policy*, 59, 298-317.
- Carvalho, J., Midões, C., Machado, S., Sampaio, J., Costa, A., & Lisboa, V. (2011). Maciço Calcário Estremenho Caracterização da Situação de Referência. *Relatorio interno*, 1-42.
- Carvalho, J. M., & Lisboa, J. V. (2018). Ornamental stone potential areas for land use planning: a case study in a limestone massif from Portugal. *Environmental earth sciences*, 77(5), 1-13.

- Carvalho, J. M. F. (2013). *Tectónica e Caracterização da Fracturação do Maciço Calcário Estremenho Bacia Lusitaniana Contributo Para a Prospeção de Rochas Ornamentais e Ordenamento da Atividade Extrativa* [Doutoramento, Universidade de Lisboa].
- Casal Moura, A., Carvalho, C., Almeida, I., Saúde, J. G., Farinha Ramos, J., Augusto, J., Rodrigues, J. D., Carvalho, J., Martins, I., Matos, M. J., Machado, M., Sobreiro, M. J., Peres, M., Martins, N., Bonito, N., Henriques, P., & Sobreiro, S. (2007). *Mármore e Calcários Ornamentais de Portugal*. INETI (National Institute of Engineering, Technology and Innovation).
- DGEG. (2021a). *Dados anuais (2001-2021)*. Direção de Serviços de Estratégia e Fomento dos Recursos Geológicos. <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/geologia/dados-globais-da-industria-extractiva/producao/>
- DGEG. (2021b). *Produção global por Subsetores (2011-2020)*. Direção de Serviços de Estratégia e Fomento dos Recursos Geológicos. <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/geologia/dados-globais-da-industria-extractiva/producao/>
- Duarte, J. A. M. (2010). *Estudo de áreas com potencial para extração de rochas ornamentais: Aplicação prática ao estudo da pedreira “EM&R” nº 6478. Aplicação conjunta de dados de prospeção geofísica, análise estrutural e modelação informática*. [Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica e de Minas.].
- EM&R Lda. (2017). Ficha técnica de produto. *Eduardo Marques e Rosa, Lda*.
- GEORADAR-EXPERT. (2009a). Software System for Automated Processing of GPR Data. [http://www.georadar-expert.ru/download/ge\\_brochure\\_eng.pdf](http://www.georadar-expert.ru/download/ge_brochure_eng.pdf).
- GEORADAR-EXPERT (2009b). *Roman Denisov & GEORADAR-EXPERT Team*. (Version 2.0) <https://gpr-soft.com/index.html>

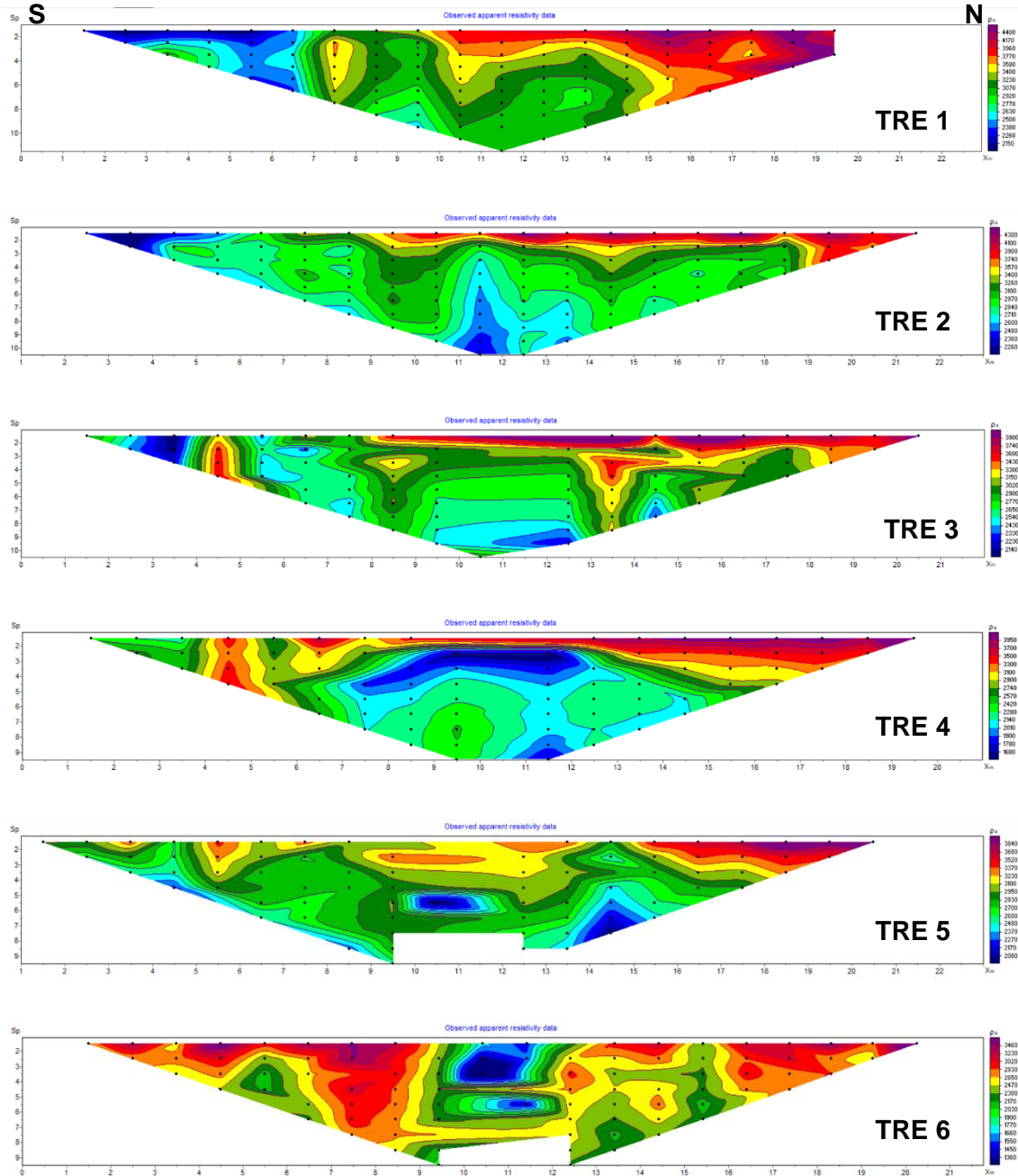
- GOLDEN SOFTWARE, L. (2022). *Voxler*.  
<https://www.goldensoftware.com/products/voxler/trial>
- IDEX Health & Science LLC (2022). *Introduction to Fluorescence Filters*.  
<https://www.semrock.com/introduction-to-fluorescence-filters.aspx>
- Inkscape™ (2022). (Version 1.2.1) Boston, USA. <https://inkscape.org/release/inkscape-1.2.1/?switchlang=en>
- Kibria, G., & Hossain, M. (2012). Investigation of geotechnical parameters affecting electrical resistivity of compacted clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(12), 1520-1529.
- Kullberg, J., Rocha, R., A.F, S., Rey, J., Terrinha, P., Azerêdo, A., Callapez, P., Duarte, L., Kullberg, M., Martins, L., J.R, M., C, A., Mata, J., Madeira, J., Mateus, O., Moreira, M., & Nogueira, C. (2013). III.3. A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica.(Vol. 2, pp. 195-347).
- Loke, M. H. (1999). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. *A practical guide to 2-D and 3-D surveys*, 2, 70.
- Manuppella, G., Telles Antunes, M., Costa Almeida, C. A., Azerêdo, A. C., Barbosa, B., Cardoso, J. L., Crispim, J. A., Duarte, L. V., Henriques, M. H., Martins, L. T., Ramalho, M. M., F., S. V., & Terrinha, P. (2000). *Notícia explicativa da folha 27-A: Vila Nova de Ourém*. Instituto Geológico e Mineiro.
- Martins, A. F. (1949). *Maçço Calcário Estremenho. Contribuição para um Estudo de Geografia Física*. [Tese de Doutoramento em Ciências Geográficas]. Universidade de Coimbra.
- Montani, C. (2020). *XXXI Rapporto Marmo e pietre nel mondo*.  
[https://issuu.com/marmonews/docs/impaginato\\_xxxi\\_mailing](https://issuu.com/marmonews/docs/impaginato_xxxi_mailing)
- Mutiara Sukma, A., Krisningrum, N. N., Nandya Assyiffa, T., ALAMI, F., Rasimeng, S., & Alhadi, A. (2018). Ground Penetrating Radar (GPR) fot indentifying the depth of Spun Pile gas station at Batam.

- Nasrollahzadeh, M., Atarod, M., Sajjadi, M., Sajadi, S. M., & Issaabadi, Z. (2019). *Chapter 6 - Plant-Mediated Green Synthesis of Nanostructures: Mechanisms, Characterization, and Applications* (Vol. 28). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813586-0.00006-7>
- Pestana, R. C., & Botelho, M. A. B. (1997). Migração de dados de radar de penetração no solo com correção topográfica simultânea. *Rev. Bras. Geof.*, vol.15, n.1, 3-10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S0102-261X1997000100001>
- Proceq SA. (2017). O equipamento para medir resistividade superficial do concreto de maior acurácia em todo o mundo. [https://d3d9uh9i6bytyw.cloudfront.net/asset/Downloads/Resipod\\_Sales%20Flyer\\_Portuguese\\_high.pdf](https://d3d9uh9i6bytyw.cloudfront.net/asset/Downloads/Resipod_Sales%20Flyer_Portuguese_high.pdf)
- Santos, M. A. C. d. (2017). *Mecanismos de descoloração dos calcários “azuis” do Maciço Calcário Estremenho*. [Dissertação Mestrado, Universidade de Lisboa - Faculdade de Ciências].
- Santos, R. V. (2019). *Aplicação do método GPR (Ground Penetrating Radar) no estudo de vazios em rochas carbonáticas*. Universidade Federal da Bahia.
- Scantech Geoscience Ltd. (2021). *About GPR - GPR Method*. <https://scantech.ie/scantech-about-gpr.html>
- Sehah, S., & Sugito, S. (2011). 2D subsurface resistivity imaging of teak (Tectona Grandis Sp.) using Wenner configuration (case study: teak plantation area behind unsoed mipa building). *BERKALA FISIKA*, 14(1), 1-10 (original em Indonésio).
- Sousa, F. T. A. M. e. (2019). *Análise estrutural de uma pedreira de rocha ornamental carbonatada - utilização e comparação dos métodos fotogramétricos e clássico*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

# **Anexos**

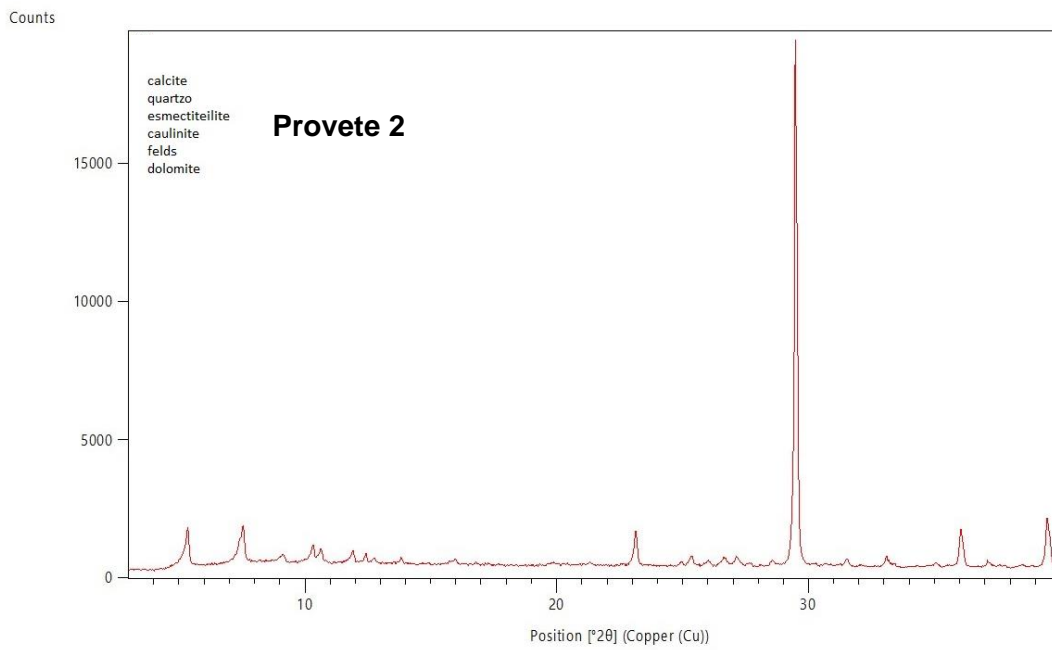
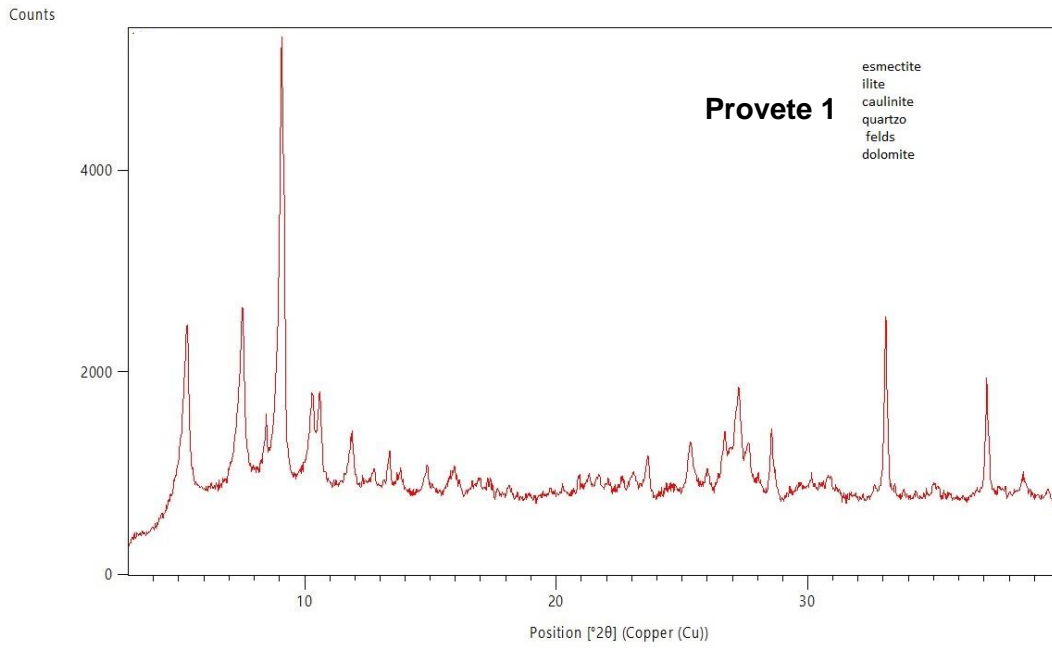
# Anexo 1

## Secções de resistividade elétrica aparente



## Anexo 2

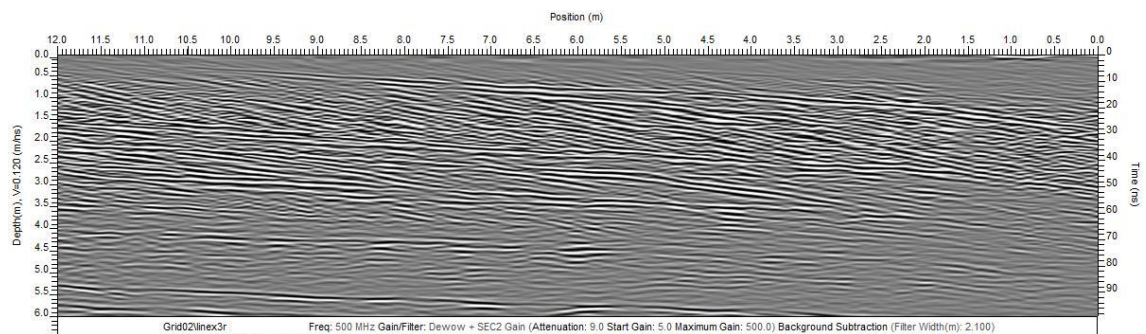
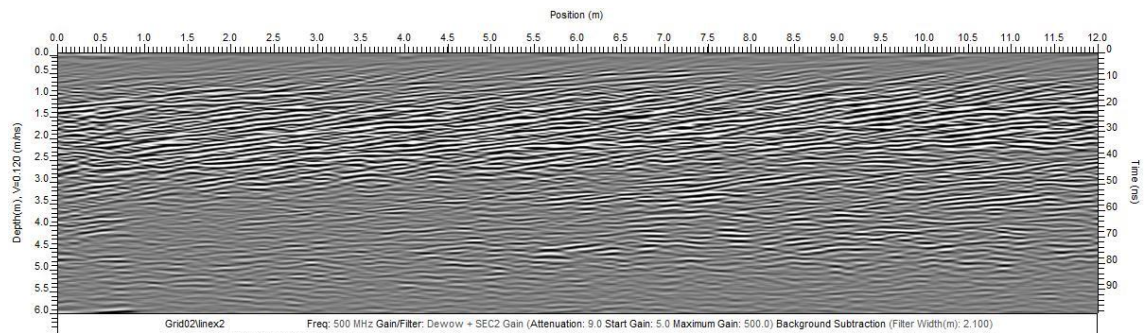
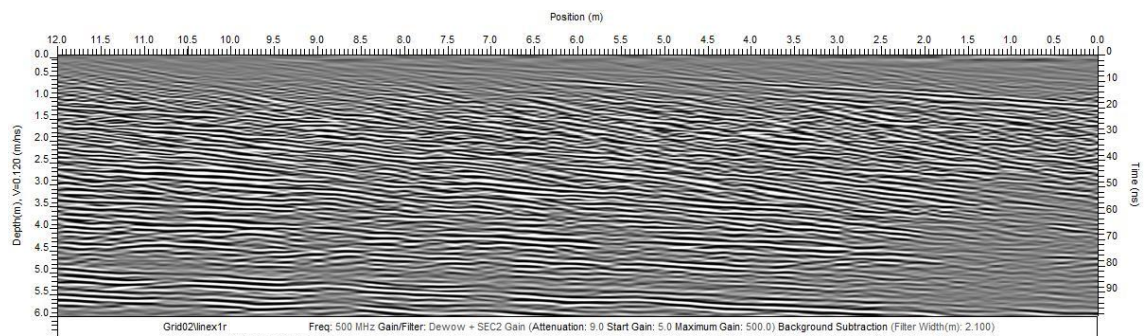
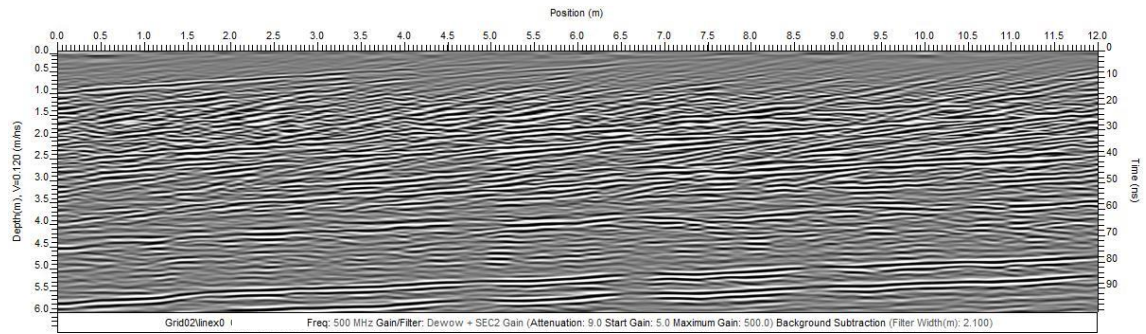
### Difratogramas dos provetes 1 e 2



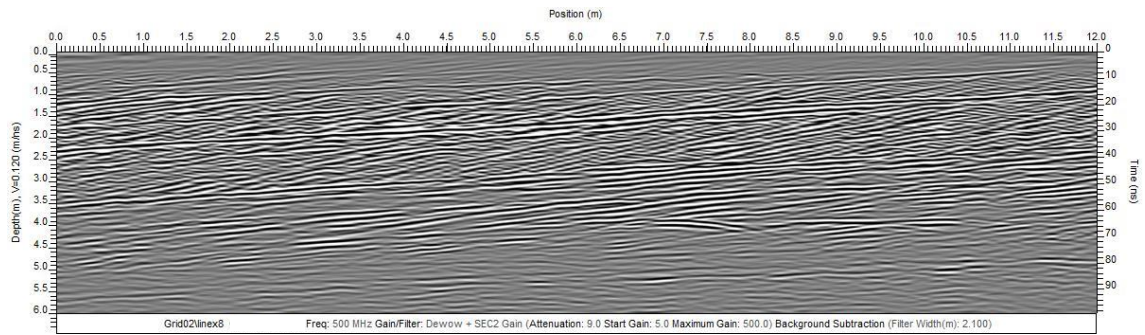
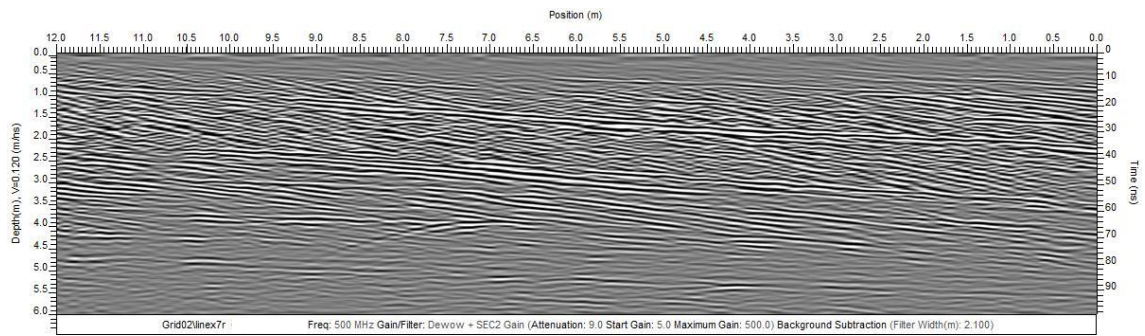
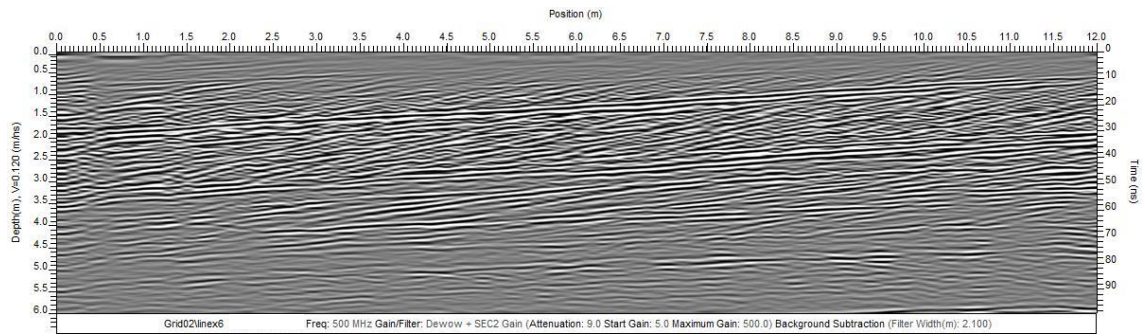
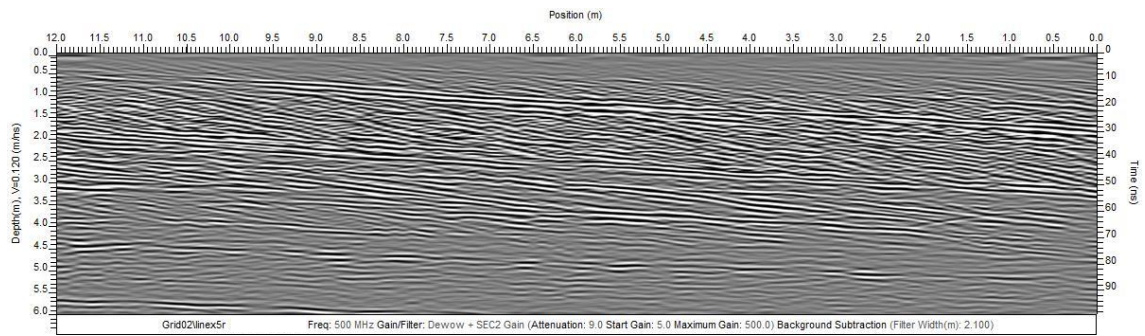
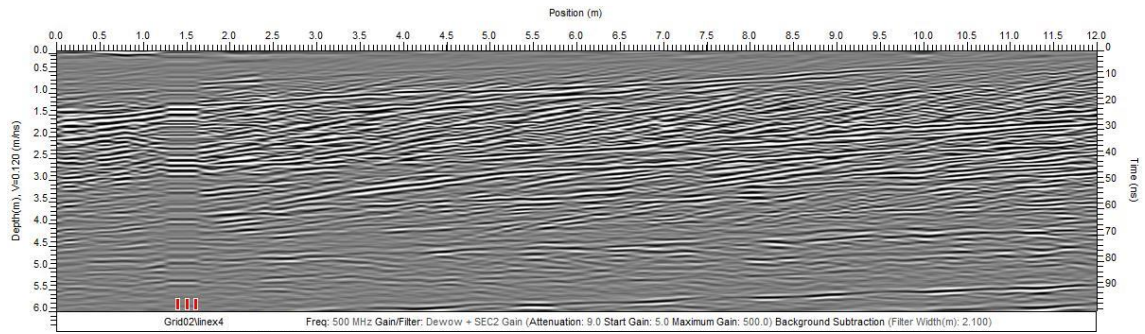
# Anexo 3

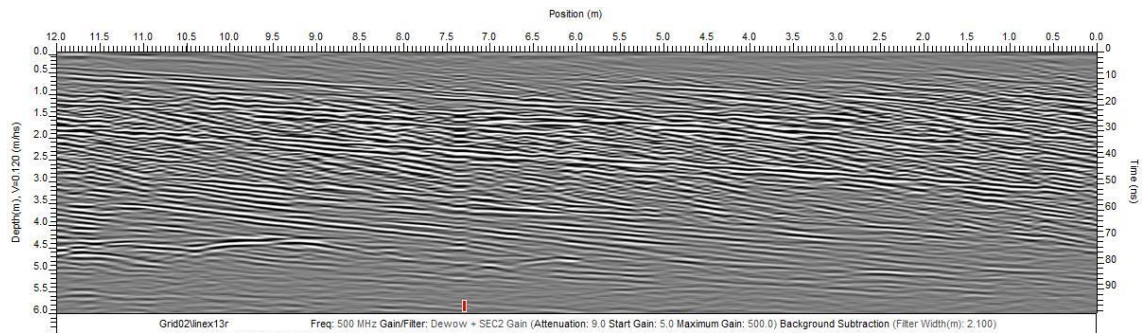
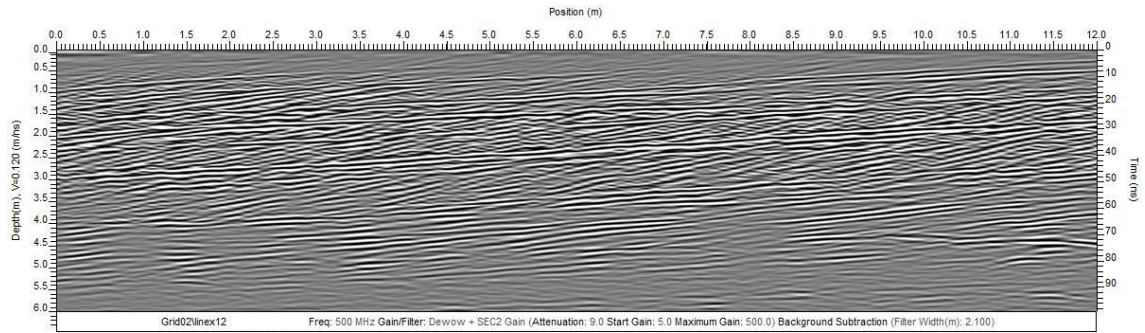
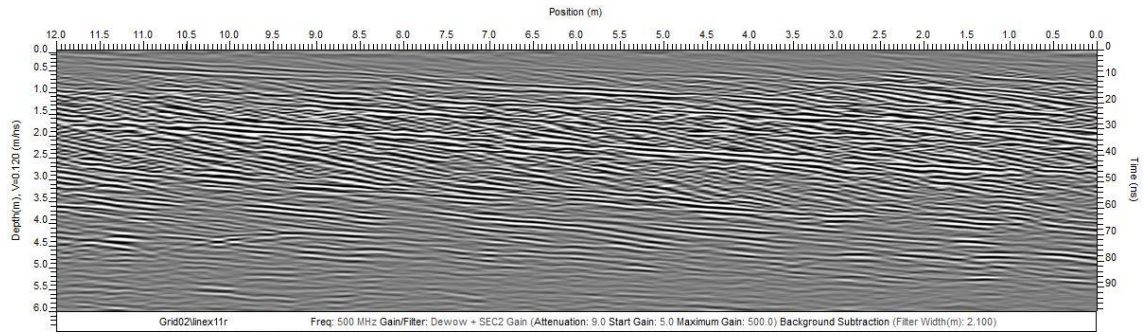
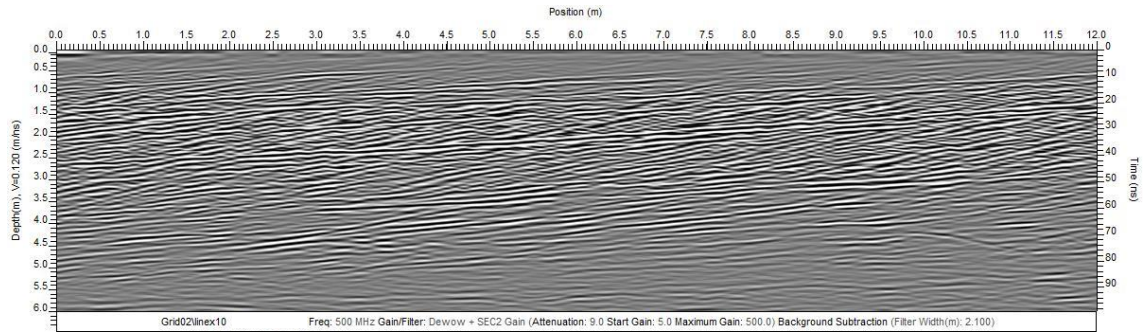
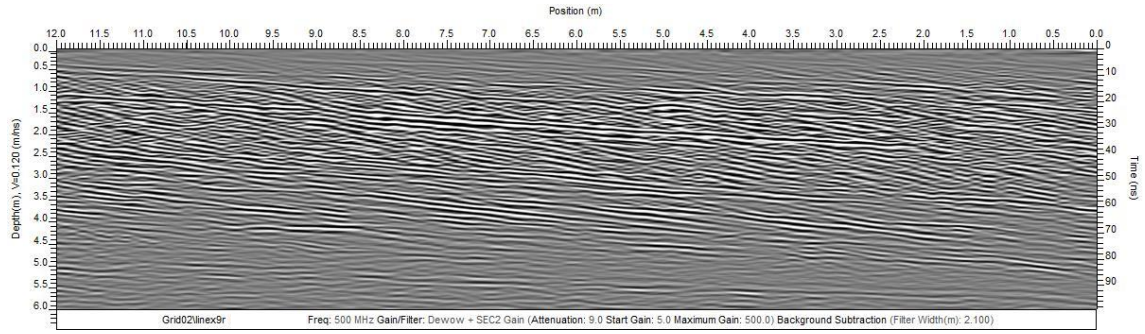
## Radargramas do GPR

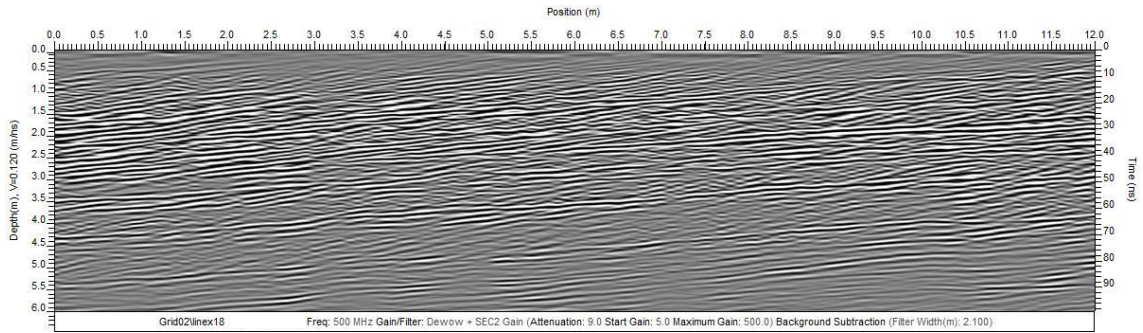
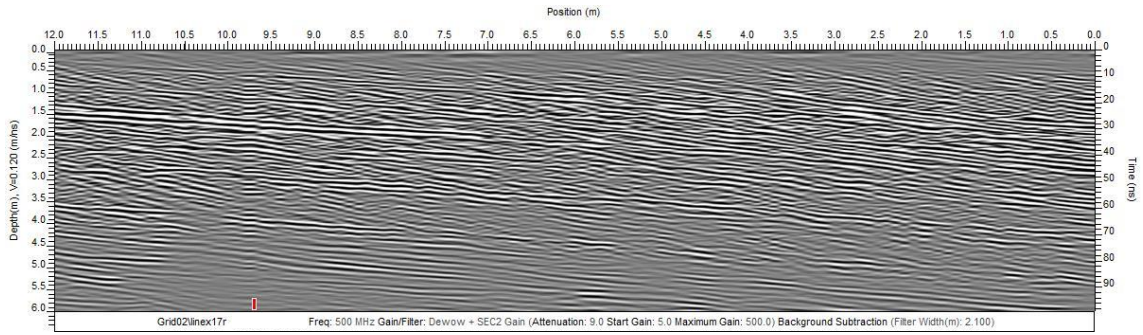
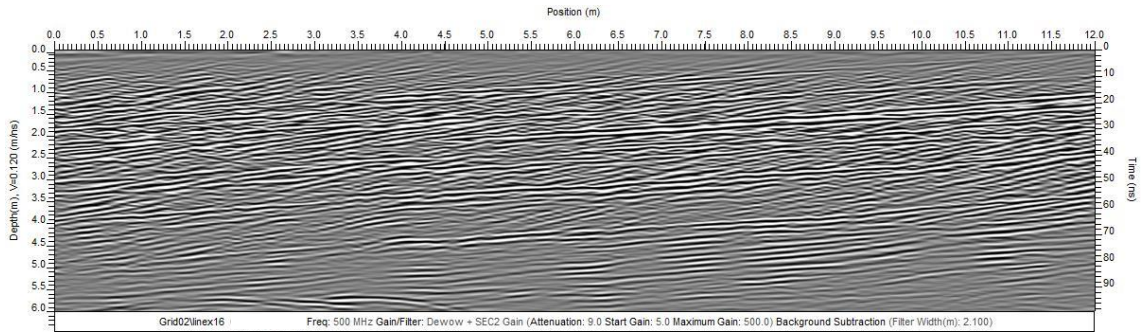
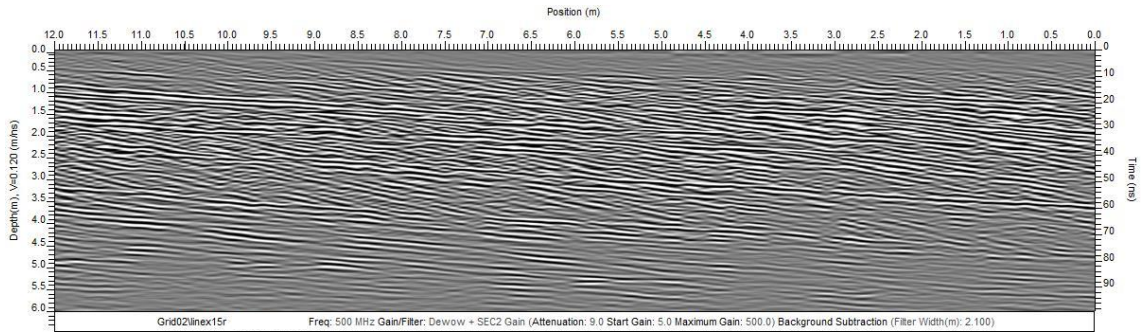
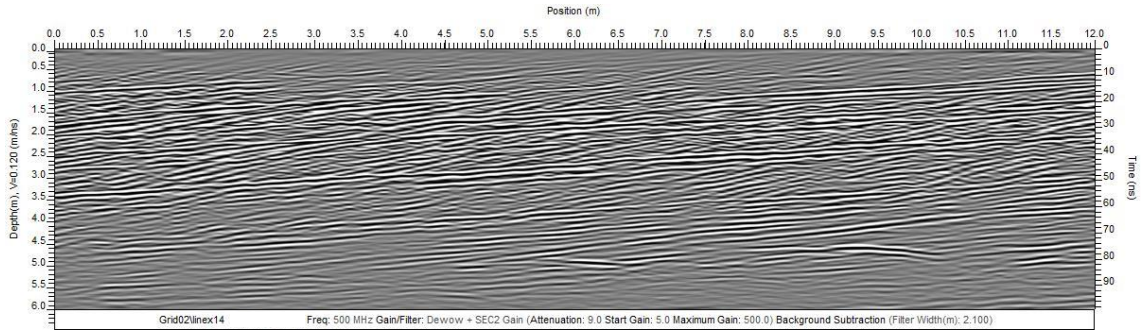
(Segundo direção N-S)



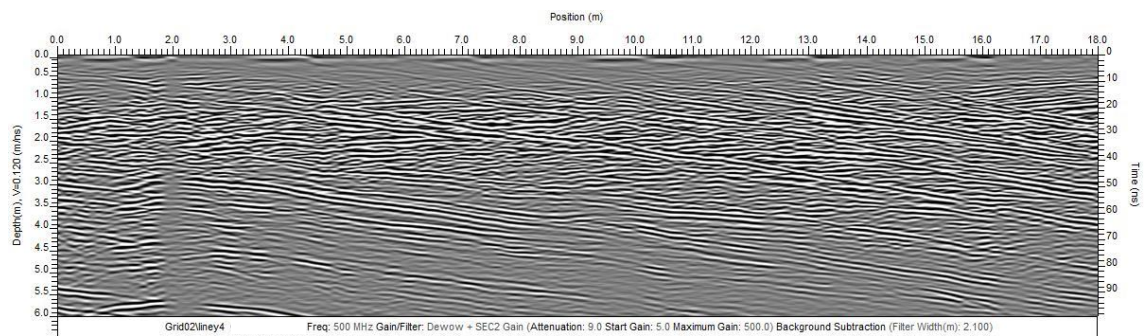
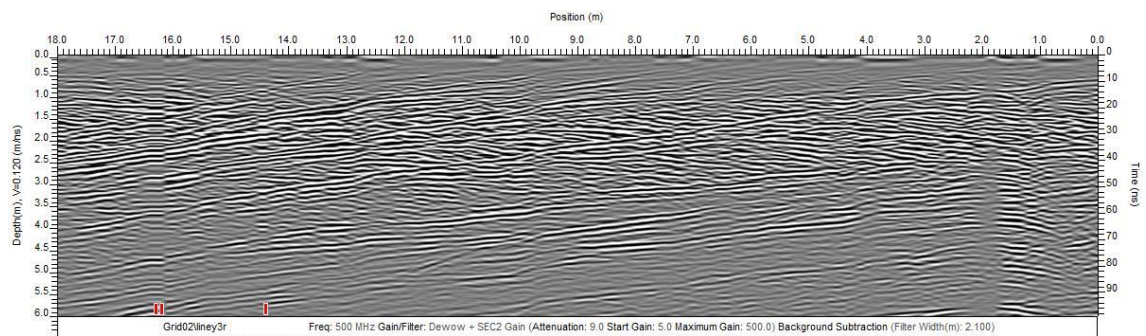
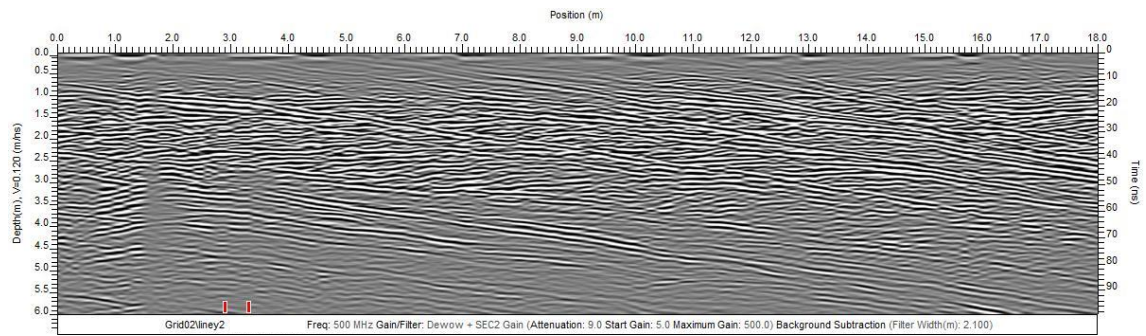
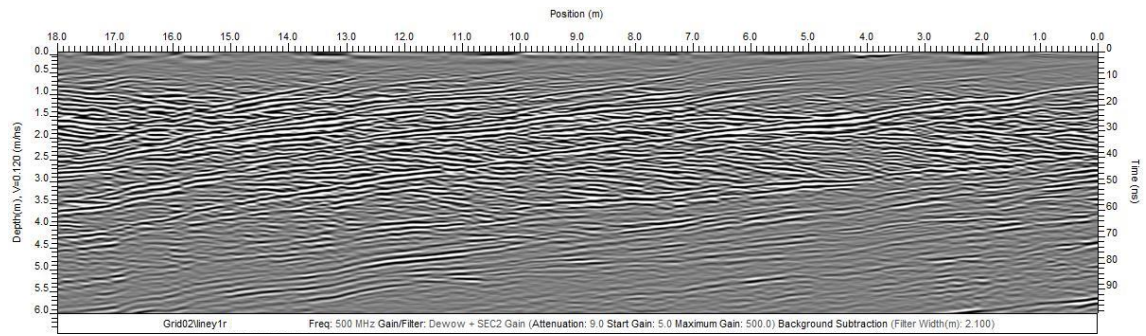
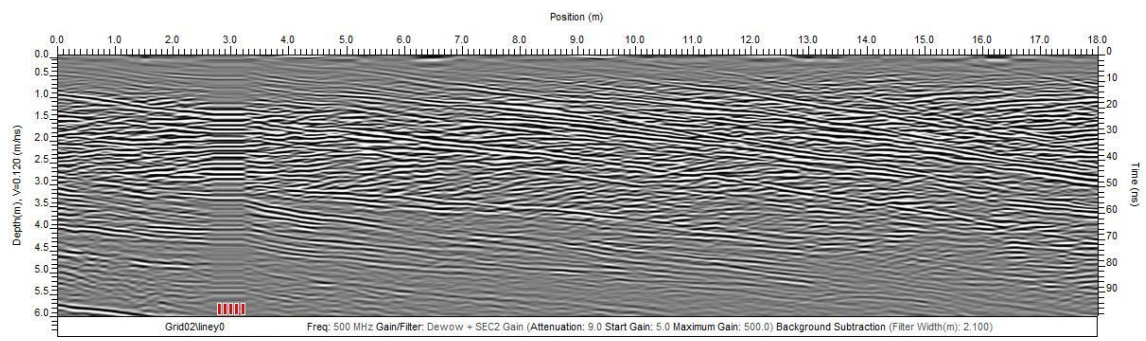


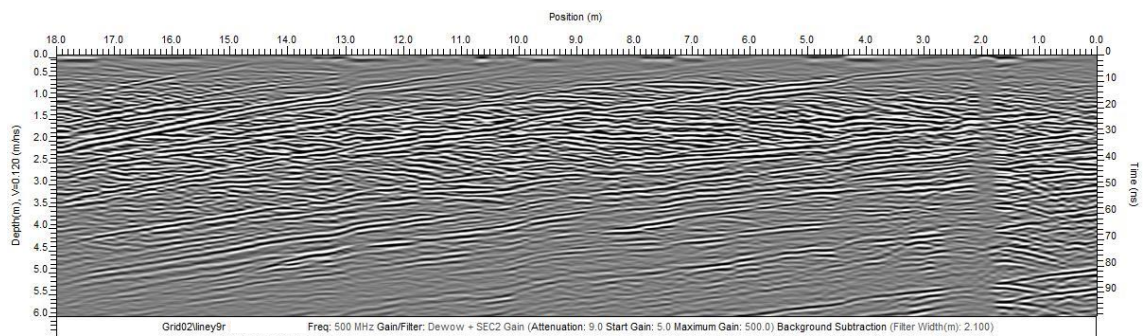
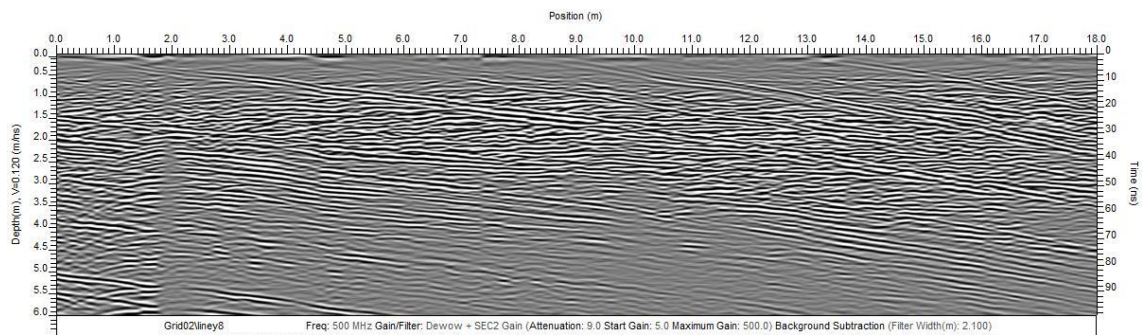
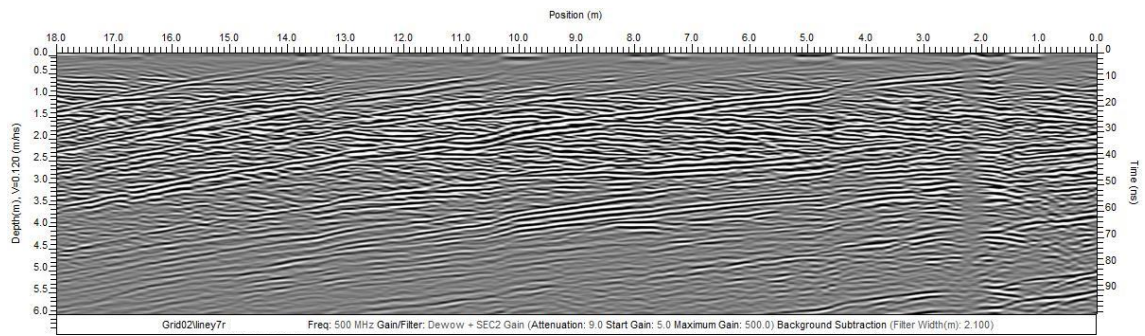
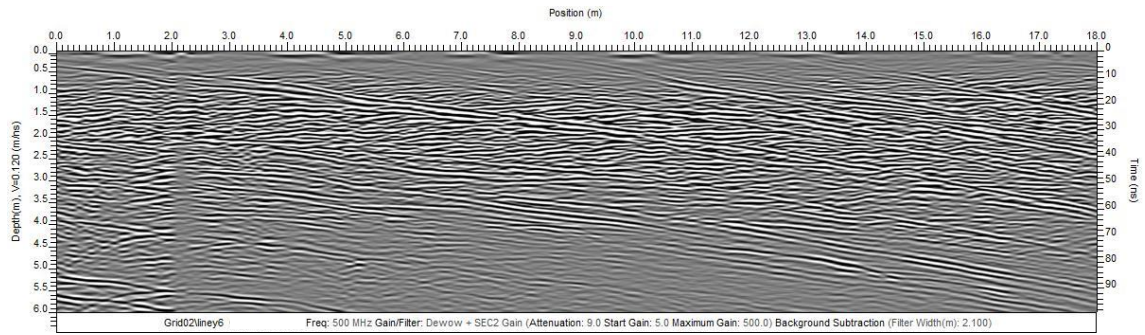
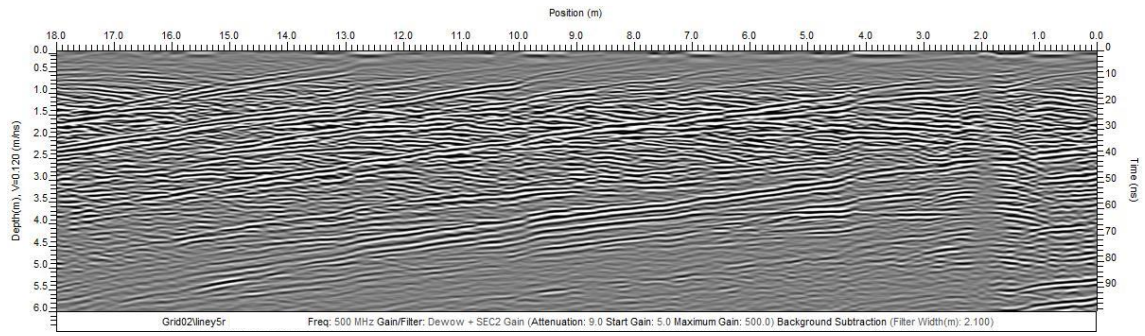


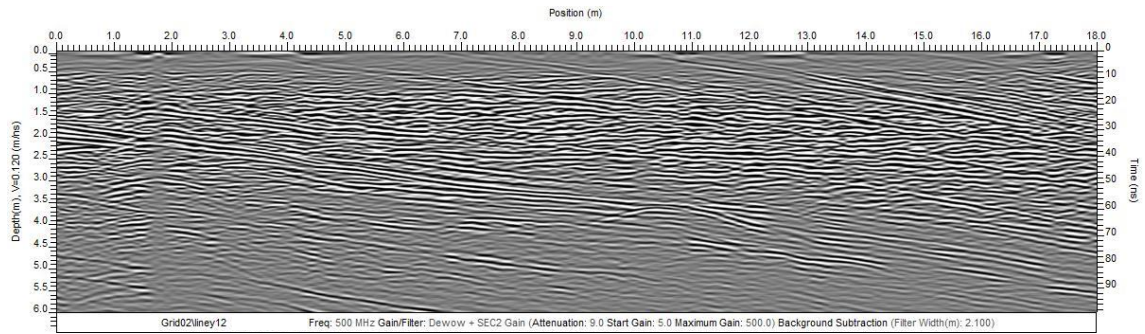
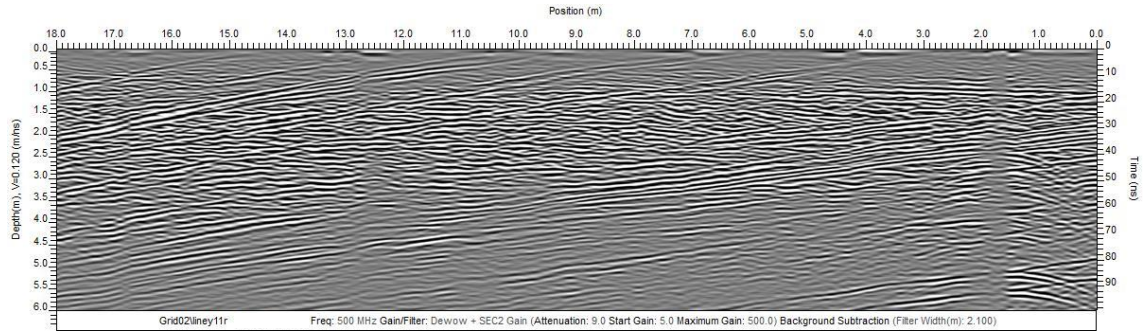
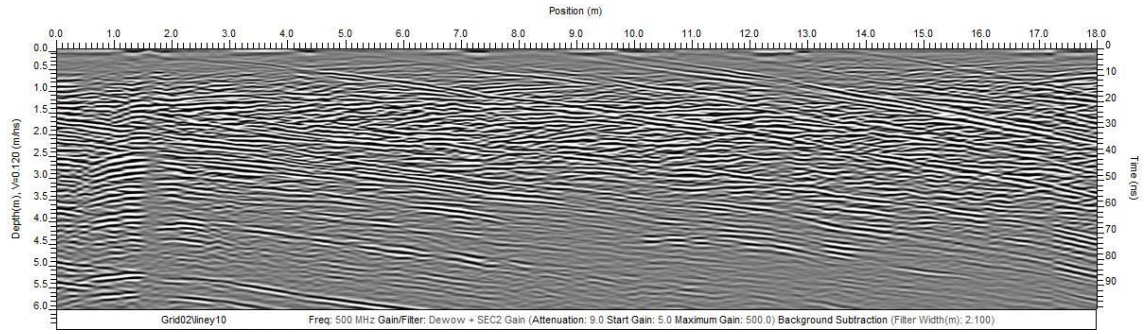




(Segundo direção W-E)







# Secções de resistividade elétrica do GPR, com recurso ao GEORADAR-EXPERT

(Sentido W-E)

