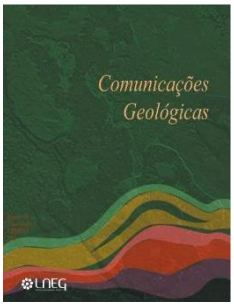
Comunicações Geológicas

Comunicações Geológicas (2022) 109, 1, 43-56
ISSN: 0873-948X; **e-ISSN:** 1647-581X

Geofísica e sondagens no estudo tectónico e geológico da região a Oeste de Estarreja

Geophysics and drilling in the tectonic and geological study of the region West of Estarreja



T. Marques[1], R. Moura[2], A. Machadinho[3], M. Matias[1*]

DOI: https://doi.org/10.34637/rsea-4y06
Recebido em 06/06/2022 / Aceite em 11/10/2022
Publicado online em outubro de 2022
© 2022 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP

Artigo original
Original article

Resumo: A região a Oeste de Estarreja, de topografia aplanada, é geologicamente caracterizada por formações quaternárias e cretácicas que assentam discordantemente sobre um *bedrock* xisto-grauváquico, do Precâmbrico, de topografia pouco conhecida. Esta topografia é investigada recorrendo a dados de sondagens mecânicas e prospeção geofísica que incluem dois perfis de sondagens elétricas e um mapeamento gravimétrico sobre uma área aproximada de 30 km^2, delimitada a Este pela linha do Norte e a Oeste pelo braço da ria de Aveiro que separa a Murtosa da Torreira. Os dados das sondagens mecânicas permitiram construir um modelo 3D da topografia do *bedrock* que conjuntamente com a inversão e modelação dos dados de prospeção geofísica propõem um modelo robusto para essa topografia. São identificados alinhamentos estruturais NW-SE, já inferidos por outros autores, propostas duas zonas delimitadas lateralmente, em que o *bedrock* se encontra mais profundo, que estão de acordo com modelação geofísica anterior a Sul desta região.

Palavras-chave: Sondagens mecânicas, anomalia de Bouguer, resistividade elétrica, Estarreja, profundidade do *bedrock*.

Abstract: The region West of Estarreja is topographically flat and, from the geological point of view, characterized by Quaternary and Cretaceous formations that lie discordantly over Pre-Cambrian schists. The topography of this contact is poorly known and, therefore, is investigated here. Data from drilling, electrical resistivity profiles and gravity mapping, over a 30 km^2 area bounded on the Eastern side by the "Norte" Railway line and on the Western by the Ria de Aveiro that separates Murtosa from Torreira, are jointly interpreted to produce a robust model for the topography of the *bedrock*. Hence, NW-SE alignments, inferred by previous works, are clearly identified. *Bedrock* depressions are also proposed and agree with previous geophysical models from areas to the South of the region herein investigated.

Keywords: Drilling, Bouguer anomaly, electrical resistivity, Estarreja, *bedrock* depth.

[1] Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, 3010-093 Aveiro, Portugal.
[2] Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, Universidade do Porto, 4169-007 Porto, Portugal.
[3] CGEO – Centro de Geociências, Universidade de Coimbra, Rua Sílvio Lima, Pólo II, 3030-790 Coimbra, Portugal.

* Corresponding author / Autor correspondente: mmatias@ua.pt

1. Introdução

O concelho de Estarreja está situado a Norte da cidade de Aveiro e, a sua parte ocidental constitui a parte mais setentrional do Baixo Vouga Lagunar. O Baixo Vouga Lagunar é uma região densamente povoada, de baixa altitude e topografia aplanada e, por isso, vulnerável aos efeitos das alterações climáticas, em particular, ao aumento do nível médio das águas do mar, ou seja, do Oceano Atlântico.

Do ponto de vista geológico esta região é caracterizada pelo afloramento de formações quaternárias recentes, com espessura variável, que assentam sobre formações cretácicas e xistos do Complexo Xisto Grauváquico (CXG) (Teixeira *et al.*, 1963, 1975, Barbosa, 1981). A geologia da região foi revista por Marques da Silva (1990). Este trabalho inclui profusa informação de furos de sondagem que, todavia, foram realizados para prospeção e exploração de água subterrânea, mas não para estudar a estrutura da região. Além disso, estas sondagens não cobrem toda a área de um modo uniforme e muitas delas não atingem o *bedrock* cristalino. No entanto, a informação obtida é muito importante no estudo da parte ocidental da bacia do Vouga onde predominam formações quaternárias recentes, mais ou menos espessas, que não permitem a investigação direta das formações subjacentes.

Tanto as formações quaternárias como as cretácicas contêm importantes recursos de água subterrânea que além da vulnerabilidade relacionada com a sobre-exploração e contaminação por atividades antrópicas, correm agora riscos acrescidos devido à subida consistente no nível médio das águas do mar que aumenta à medida que os efeitos das alterações climáticas se acumulam. Por isso, é importante o conhecimento da estrutura da bacia do Baixo Vouga Lagunar para que se possam tomar decisões estratégicas em relação à exploração de recursos de água subterrânea e à gestão e desenvolvimento da região.

Considerando as condições geológicas, geomorfológicas (terreno aplanado), geográficas com facilidades de transporte, acesso, boa cobertura de estradas e caminhos no terreno, a aplicação do método gravimétrico é uma boa opção para investigar a geologia e tectónica da região. Se o contraste de densidades entre as formações quaternárias, cretácicas e o *bedrock* cristalino for suficiente, aquele método constitui-se como uma ferramenta de

eleição para a caracterização da bacia. Num trabalho pioneiro e limitado espacialmente (Casas *et al*., 1995) veio demonstrar todos os benefícios da aplicação da gravimetria neste caso. Mapeamentos gravimétricos posteriores (Figueiredo, 2001; Mantlik *et al*., 2009; Mantlik e Matias, 2010) permitiram a investigação e modelação da parte da bacia a Sul de Aveiro.

Pretende-se agora investigar a parte a Norte de Aveiro. A região a Oeste de Estarreja (Fig. 1) tem sido objeto de inúmeros trabalhos de investigação no âmbito da contaminação de águas subterrâneas, citando por exemplo, Ordens (2007), Neves (2015), Marques (2017) ou Marques *et al*. (2021).

Nesta região existem dezenas de sondagens mecânicas executadas para explorar os aquíferos locais (Fig. 1). Tal como a região Sul de Aveiro, estas sondagens não foram executadas com o intuito de investigar a geologia local, nem cobrem sistematicamente a área em estudo. Todavia, o seu elevado número permite utilizá-las para obter um bloco 3D, embora incompleto, da região.

Muitos dos trabalhos previamente efetuados e publicados sobre esta região recorreram também a métodos de prospeção geofísica. No entanto, a sua aplicação teve como objetivo primordial investigar a contaminação das águas subterrâneas locais. Por isso, foram utilizados, quase em exclusivo, métodos de resistividade elétrica, quer em versão de sondagens elétricas quer em versão de tomografias elétricas, e método eletromagnético no domínio da frequência. Todavia as dimensões e especificidades dos dispositivos de medida utilizados não permitiram grandes profundidades de investigação pois não era essa a finalidade dos estudos.

De entre estes estudos, releva-se o trabalho notável realizado por A. Cavaco (1976) que propõe, pela primeira vez, a estimativa da localização do extremo oriental das formações cretácicas com base nas sondagens mecânicas existentes à data e em perfis de resistividade elétrica.

Aquele trabalho dá conta de centenas de sondagens elétricas, também denominadas por alguns autores, p.e. Telford *et al* (1990), por sondagens elétricas verticais-SEV, realizadas na região. No entanto, os dados disponíveis só permitem reconstruir completamente os perfis P1 e P2 nas figuras 1, 2, 3 e 4. Estes dois perfis foram executados com o dispositivo Schlumberger, distâncias AB variando de 4 a 900 metros, amostragem de 4 pontos para a primeira década, 10 pontos para a segunda década e 9 pontos para a terceira década. Para assegurar a expansão do dispositivo e manter a qualidade das leituras, sempre que o quociente entre as medidas de AB e MN atingia o valor 20, a leitura foi repetida para o mesmo valor de AB, mas utilizando um novo valor de MN igual a 5 vezes o anterior.

A amostragem efetuada permite uma boa definição da curva de sondagem elétrica nas segunda e terceira décadas, embora subamostre a primeira década. Deste modo, além do ruído nas leituras proveniente de maus contactos e diferentes resistências de contactos, é de esperar algum ruído adicional nos espaçamentos mais pequenos e uma menor definição da camada mais superficial.

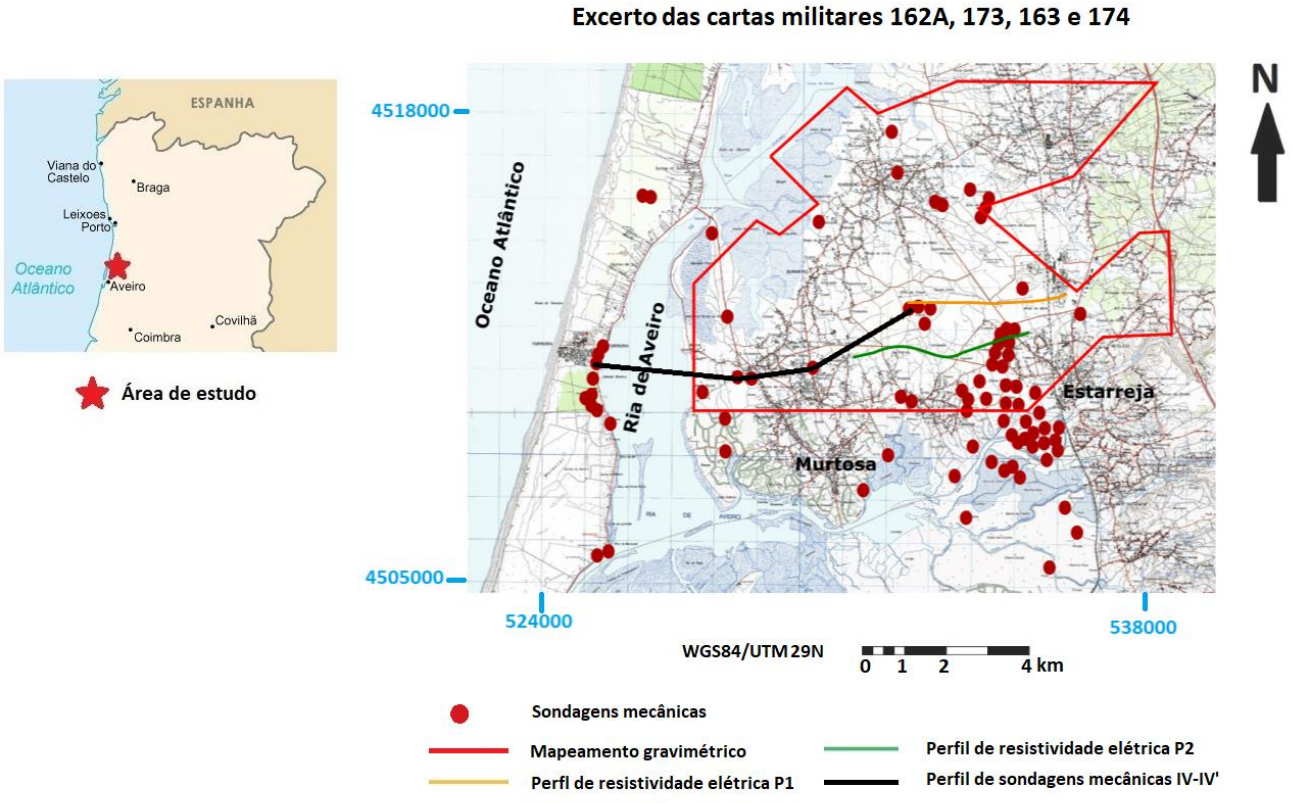


Figura 1. Área em estudo (excerto das cartas topográficas de Portugal na escala 1:25 000, nº 162-A, 163, 173, 174, CIGeoE), localizações do mapeamento gravimétrico, dos perfis de resistividade elétrica, do perfil de sondagens mecânicas e das sondagens mecânicas.

Figure 1. Study area (extract from the topographic maps of Portugal in the scale 1:25 000, nº 162-A, 163, 173, 174, CIGeoE), gravity survey, electrical resistivity profiles, mechanical sounding profile and drilling locations.

Como era costume na época, as sondagens elétricas foram interpretadas, em modo 1D, recorrendo a comparação com curvas teóricas, Mooney e Orellana (1966), Van Damn e Meulenkamp (1969), Battacharya e Patra (1968) em modo 1D.

Mais tarde, Matias (2001) e Matias *et al.* (1994), agora também com dados de sísmica de refração e tomografia elétrica, voltaram a investigar o limite das formações cretácicas, embora estes dois trabalhos tivessem sido direcionados para a investigação da contaminação das águas subterrâneas nesta região.

De um modo semelhante à parte Sul da Bacia, a região a Oeste de Estarreja tem topografia bastante plana e uma densa rede de estradas e caminhos, que também a tornam elegível para a aplicação dos métodos gravimétricos.

Assim, foram recolhidos dados de gravimetria que permitiram cobrir uma área aproximada de 30 km^2, num total de 211 medidas na região definida pelo polígono vermelho nas figuras 1 e 2. Estas medidas foram recolhidas em várias campanhas que decorreram no âmbito de uma ação Luso-Britânica, B-19/02 com a Universidade de Leeds (Fox, 2001), além de trabalhos conduzidos somente pela Universidade de Aveiro. Nestas campanhas foram usados dois gravímetros Lacoste Romberg.

É objetivo deste trabalho reunir toda a informação disponível da região a Oeste de Estarreja, de modo a:

1) Construir um bloco 3D da área utilizando os dados das sondagens mecânicas existentes;
2) Reinterpretar dados de sondagens elétricas profundas em modo 2D a fim de estimar, quando possível, a profundidade e topografia do *bedrock* cristalino e identificar variações laterais de resistividade nas formações acima daquele *bedrock*;
3) Produzir o mapa de anomalia de Bouguer da região e interpretá-lo de acordo com a informação geológica e estrutural existente;
4) Modelar alguns perfis do mapa de anomalia de Bouguer, a fim de contribuir para o esclarecimento da profundidade e topografia do *bedrock* cristalino.

2. Geologia da região e trabalhos anteriores a este estudo

A região a Oeste de Estarreja constitui a parte mais setentrional da Baixo Vouga Lagunar. A área aqui investigada é caracterizada por afloramentos de depósitos sedimentares holocénicos e plio-plistocénicos que assentam de forma discordante sobre formações cretácicas (Fig. 2). Como se pode ver na parte mais a Este do mapa da figura 2, afloram xistos do CXG, de idade pré-câmbrica. A Oeste, nuns casos as formações quaternárias e, noutros casos, as formações cretácicas, assentam, também de forma discordante, sobre os xistos do CXG (Teixeira *et al.*, 1963, 1975).

Como mostra o mapa da figura 2, as formações sedimentares recentes não permitem a observação de afloramentos de formações mais antigas na região aqui discutida. Por isso, informações sobre estas formações só se podem obter por sondagens e prospeção geofísica.

Sob as formações cretácicas ocorrem as formações do CXG que constituem o *bedrock* da região. A topografia regional do *bedrock* também tem sido objeto de vários estudos. Os afloramentos do CXG na parte oriental da região permitem identificar dois sistemas de fraturas principais, ambos com direção NNW-SSE, um de idade Varisca e outro correspondente a deformações hercínicas tardias (Marques da Silva e Andrade, 1998). Embora as formações sedimentares mostrem pouca deformação, movimentos pós-hercínicos produziram fraturas no *bedrock* CXG e, em consequência, *horsts* e *grabens* (Teixeira *et al.*, 1973, 1975; Barbosa, 1981; Casas *et al.*, 1995). Um primeiro modelo para a topografia regional do *bedrock* foi proposto por Ribeiro *et al.* (1972) e, posteriormente um modelo mais elaborado foi proposto por Marques da Silva e Andrade (1998) (Fig. 4) a partir de dados de sondagens mecânicas na região.

Na área mais restrita (Fig. 2) a que se refere este trabalho, têm sido admitidos dois tipos de modelos geológicos. Um, mais simplista e esquemático, em que o *bedrock* mergulha gradualmente para Oeste, como sugerido por Ordens (2007) (Modelo 1, Fig. 5). Outro mais fino e detalhado, foi proposto por Marques da Silva (1990) (Modelo 2, Fig. 5).

Com base em dados de sondagens mecânicas e diagrafias, este último modelo admite falhas que afetam a topografia do *bedrock*

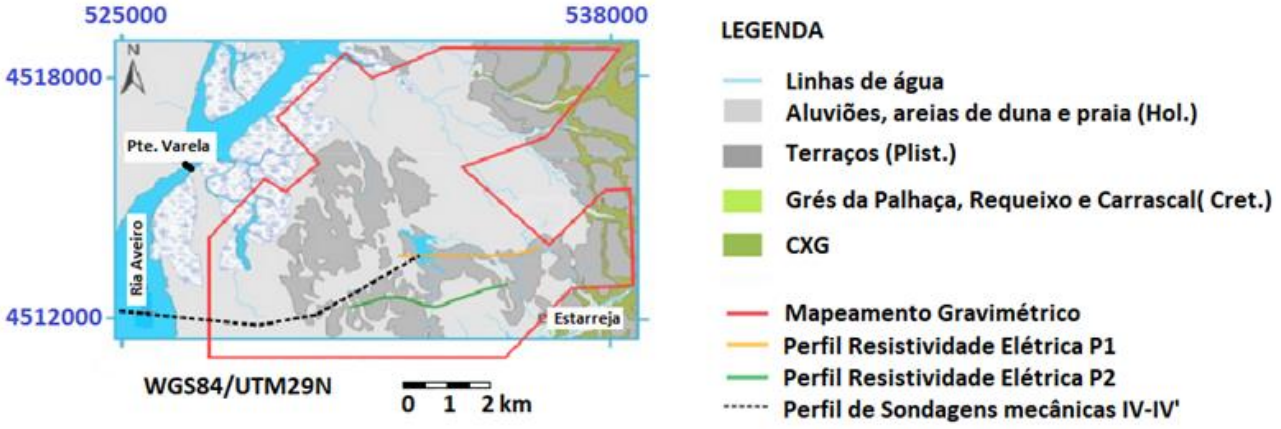


Figura 2. Geologia simplificada da região (baseada em Ordens, 2007; Teixeira *et al.*, 1963), área de mapeamento gravimétrico, perfis de resistividade elétrica e perfil de sondagens mecânicas.

Figure 2. Simplified Geology of the area (adapted from Ordens, 2007; Teixeira *et al.*, 1963), gravity survey area, electrical resistivity profiles and mechanical soundings profile.

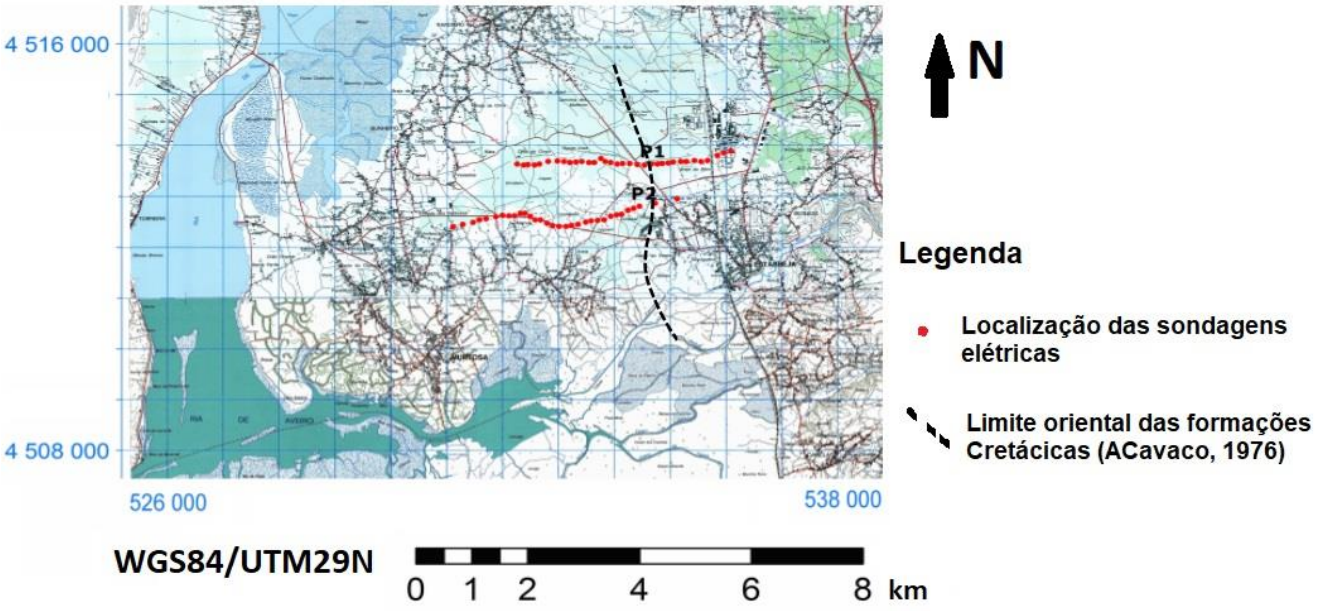


Figura 3. Localização dos perfis de resistividade elétrica, P1 e P2, e do limite oriental das formações cretácicas, proposto por A. Cavaco (1976) (excerto das cartas topográficas de Portugal na escala 1:25 000, nº 162-A, 163, 173, 174, CIGeoE).

Figure 3. Location of the electrical resistivity profiles, P1 e P2, and of the interpreted eastern limit of the Cretaceous formations, A. Cavaco (1976) (extract from the topographic maps of Portugal in the scale 1:25 000, nº 162-A, 163, 173, 174, CIGeoE).

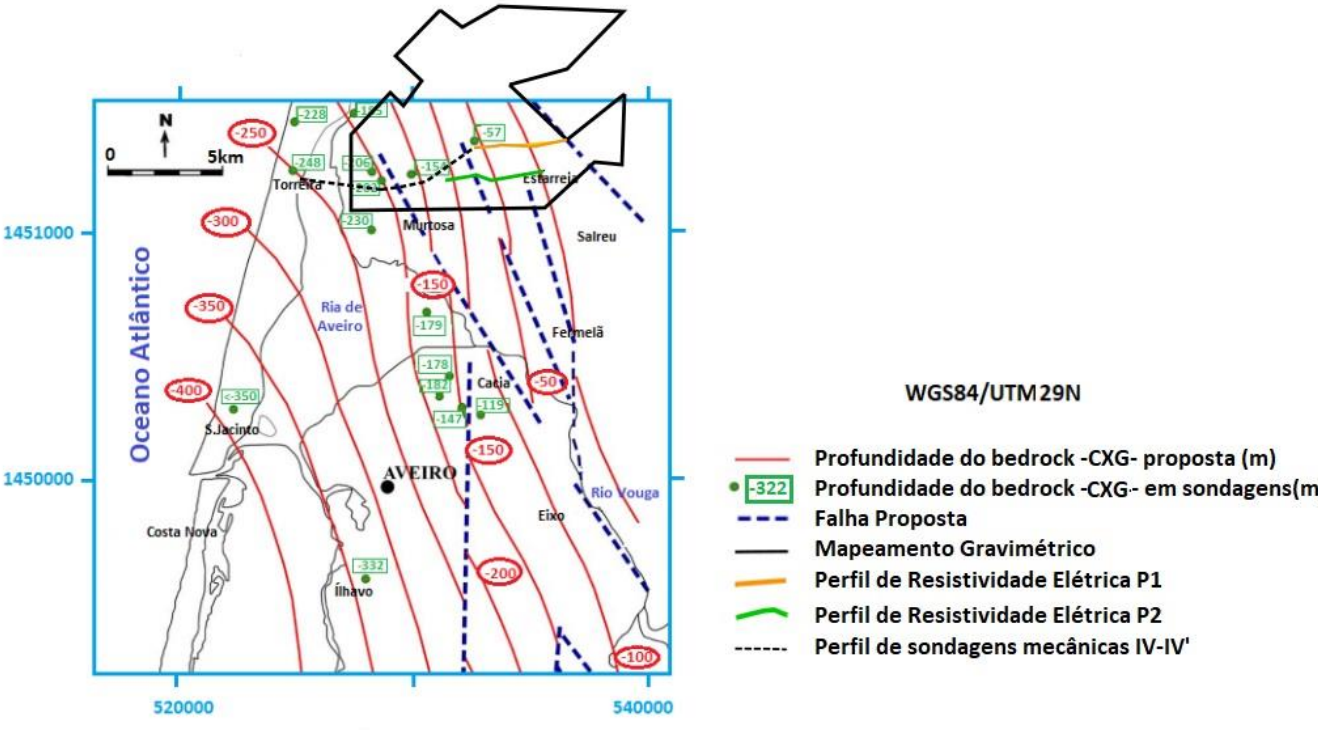
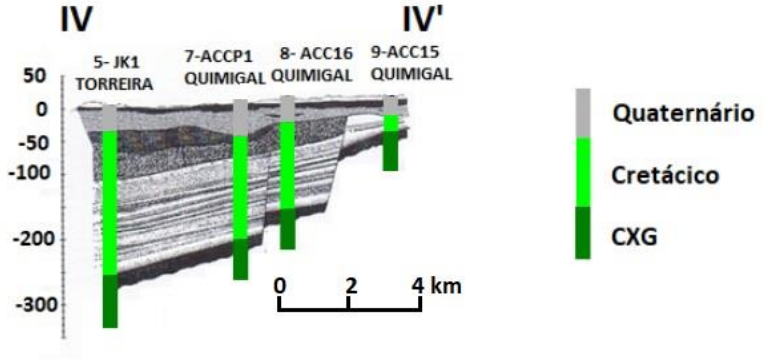


Figura 4. Modelo proposto para a topografia do bedrock CXG, adaptado de Marques da Silva e Andrade (1998).

Figure 4. CXG Bedrock topography model, adapted from Marques da Silva e Andrade (1998).

Modelo 1: modelo geológico simplificado da área de estudo (Fig. 2) adaptado de Ordens (2007)



Modelo 2: Perfil IV-IV' adaptado de Marques da Silva (1990)

Figura 5. Modelo do *bedrock* (CXG) na região em estudo: Modelo 1(topo) – adaptado de Ordens (2007), Modelo 2 (baixo) – perfil IV-IV' adaptado de Marques da Silva (1990).
Figure 5. CXG bedrock model for the study area: Model 1(top) – adapted from Ordens (2007), Model 2 (bottom) – profile IV-IV'adapted from Marques da Silva (1990).

CXG e as formações quaternárias e cretácicas e, por isso, é mais consentâneo com toda a informação disponível até à data.

3. Modelo 3D da topografia do *bedrock* (CXG) a partir de sondagens mecânicas

Na região a Oeste de Estarreja têm sido efetuados furos de sondagem para abastecimento local de água subterrânea a partir dos aquíferos superficiais locais. O modelo hidrogeológico da região está fora do contexto deste trabalho, mas encontra-se descrito, por exemplo, em Ordens (2007) ou Marques (2017).

Aqueles furos não foram projetados nem executados para esclarecer a geologia da região e por isso não cobrem o terreno de forma sistemática e abrangente. Não obstante, as colunas e informação estratigráfica obtidas revelam-se muito importantes para a construção de um modelo 3D da topografia do *bedrock* (CXG), doravante designado simplesmente por modelo 3D. Dados sobre estes furos podem ser encontrados em diversas fontes como A. Cavaco (1976), Marques da Silva (1990), Ordens (2007) ou Marques (2017). Este último trabalho procedeu à inventariação de todos os furos e permitiu apresentar agora um modelo 3D da região baseado em observações diretas.

Para a construção do modelo 3D foram digitalizadas e georreferenciadas 125 sondagens (Fig. 1) com profundidade máxima de 289 metros. Das 125 sondagens usadas, 80 alcançaram o topo do CXG (A. Cavaco, 1976). As sondagens estendem-se por uma área de 129,32 km^2, nos concelhos de Estarreja e da Murtosa, e a densidade de amostragem é aproximadamente uma sondagem por quilómetro quadrado. Apesar da densidade de amostragem poder ser considerada bastante razoável, como se pode verificar na figura 1, a distribuição espacial é muito irregular, sendo particularmente densa no sector SE. Nesta zona, o topo do CXG está a menor profundidade do que no resto da região, e raramente é superior a 30 metros. A distribuição da profundidade do CXG é muito irregular e, mais para Oeste, o topo dos Xistos encontra-se a profundidade bastante mais elevada, superior a 100 metros.

Devido à menor densidade de amostragem nesta zona, a modelação 3D do topo dos Xistos deve ser tida com mais reserva quando comparada com os dados a Este e Sudeste.

O modelo foi obtido a partir da aplicação RockWorks 16, utilizando o método "*Closest Point*", que melhor se adaptou à anteriormente referida irregularidade espacial das amostras abordadas anteriormente.

O modelo geral, A, está representado no topo da figura 6. Como se pode ver a espessura das formações cretácicas e a profundidade do *bedrock* aumentam significativamente para Oeste, ou seja, em direção ao mar. No entanto, a topografia proposta para o *bedrock* não é regular, pelo contrário existem sucessivas escarpas, sendo a mais pronunciada a Este da coordenada 530000 e com amplitude da ordem dos 100 metros.

O bloco B (Fig. 6) sobrepõe o modelo A com os dados obtidos a partir das sondagens mecânicas com o proposto em Marques da Silva (1990). O bloco C (Fig. 6) mostra uma ampliação da parte central do bloco B. Para não se perder informação e obter a melhor visualização possível estes dois modelos foram rodados em relação ao modelo A. Como se pode ver, em particular no grande plano do modelo C existe uma boa correspondência entre a arquitetura aqui proposta e a interpretação apresentada em Marques da Silva (1990) para esta região em particular.

Em conclusão, as formações cretácicas aumentam de espessura para Oeste e o *bedrock* CXG está cada vez mais profundo. No entanto, pelo menos nesta região, o aumento de profundidade não é contínuo, mas ocorre em sucessivas escarpas, como interpretado em Marques da Silva (1990).

4. Perfis de Resistividade Elétrica.

Os dados dos perfis de resistividade elétrica P1 e P2 (Figs. 1, 2 ,3 e 4) são agora reinterpretados recorrendo a *software* de inversão 2D Res2Dinv, Loke (2000) e Loke e Barker (1996). Os resultados desta inversão estão na figura 7 e, os modelos propostos correspondem a valores de RMS de 11,7% e 5 iterações para P1, e 9,6% e 4 iterações para P2. Embora estes valores de RMS possam ser considerados como algo elevados, importa relembrar que os dados de campo foram recolhidos como sondagens elétricas independentes e espaçadas, sem preocupações para posterior processamento 2D, aliás, inexistente à data.

Não obstante a escala vertical estar exagerada em relação à escala horizontal, aproximadamente 1 para 7, havendo, por isso, um exagero nas dimensões das variações laterais, é possível obter informação muito relevante dos modelos da figura 7.

A análise dos modelos obtidos permite observar, perto da superfície topográfica, linhas de contorno subhorizontais, que refletem a geometria das formações superficiais, mas, ao mesmo tempo, uma pequena definição destas formações como seria de esperar pela subamostragem da primeira década da curva de medidas. De qualquer modo, esta geometria é observada até profundidades interpretadas de cerca de 20 metros e devem corresponder às formações quaternárias, de acordo com as sondagens mecânicas na região.

No entanto, para estas pequenas profundidades podem ainda salientar-se as áreas marcadas pelas ovais laranja, na parte oriental dos perfis, que correspondem a zonas muito condutoras originadas pela pluma de contaminação dos efluentes do Complexo Químico de Estarreja à altura do trabalho de campo (A. Cavaco, 1976).

Para profundidades superiores, prevalecem variações laterais de resistividade que devem corresponder a variações de composição das formações cretácicas e às diferentes profundidades a que se encontra o *bedrock* do CXG na região.

O limite oriental das formações cretácicas, como proposto na figura 3, está marcado pela linha a preto junto à localização das sondagens 15 em P1 e 37 em P2. Em ambos os casos, verificam-se variações laterais pronunciadas, mais resistivas para Oeste e mais condutoras para Este, que devem ser provocadas por aquele limite.

No entanto para profundidades superiores, prevalecem evidentes variações laterais de resistividade em ambos os perfis e identificadas como v1, v2, v3 e v4. Na figura 7, é claro que as áreas definidas por v1-v2 e por v3-v4 correspondem a zonas mais resistivas e mais próximas da superfície, em particular no caso de P2. Ou seja, se estas zonas mais resistivas corresponderem ao *bedrock*, ter-se-ão dois blocos mais próximos da superfície entre v1v2 e v3v4 e uma depressão entre v2v3. Esta interpretação implica que para Oeste de v1 o *bedrock* se afunde. Ou seja, a topografia do *bedrock* CXG será muito irregular e pode estar afetada por uma estrutura de *horsts* e *grabens* ou por escarpas de erosão que terão afetado toda a região.

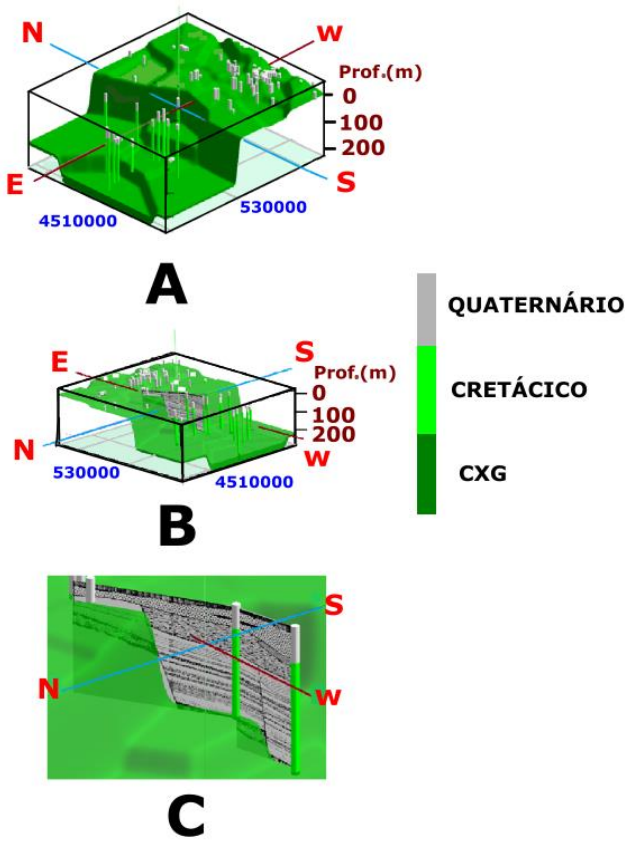


Figura 6. Modelo 3D da topografia do *bedrock* CXG da área a partir de sondagens mecânicas.

Figure 6. 3D model for the topography of the CXG bedrock in the area from drilling data.

No entanto, estas variações também podem ser provocadas por variações laterais de natureza geológica nos terrenos sobrejacentes ao *bedrock* do CXG, como se mostra no modelo 2 da figura 5. Estas variações podem ser provocadas por alterações na deposição dos sedimentos ou por falhas que se mantiveram ativas até tempos recentes.

A densidade de sondagens mecânicas não permite a interpretação a esta escala, mas mesmo assim, as localizações das variações laterais estão representadas na figura 8, conjuntamente com a localização de acidentes tectónicos propostos por Marques da Silva (1990) e Marques da Silva e Andrade (1998) – A (à esquerda) e com o bloco 3D desenhado a partir das sondagens mecânicas (Fig. 6A) – B (à direita).

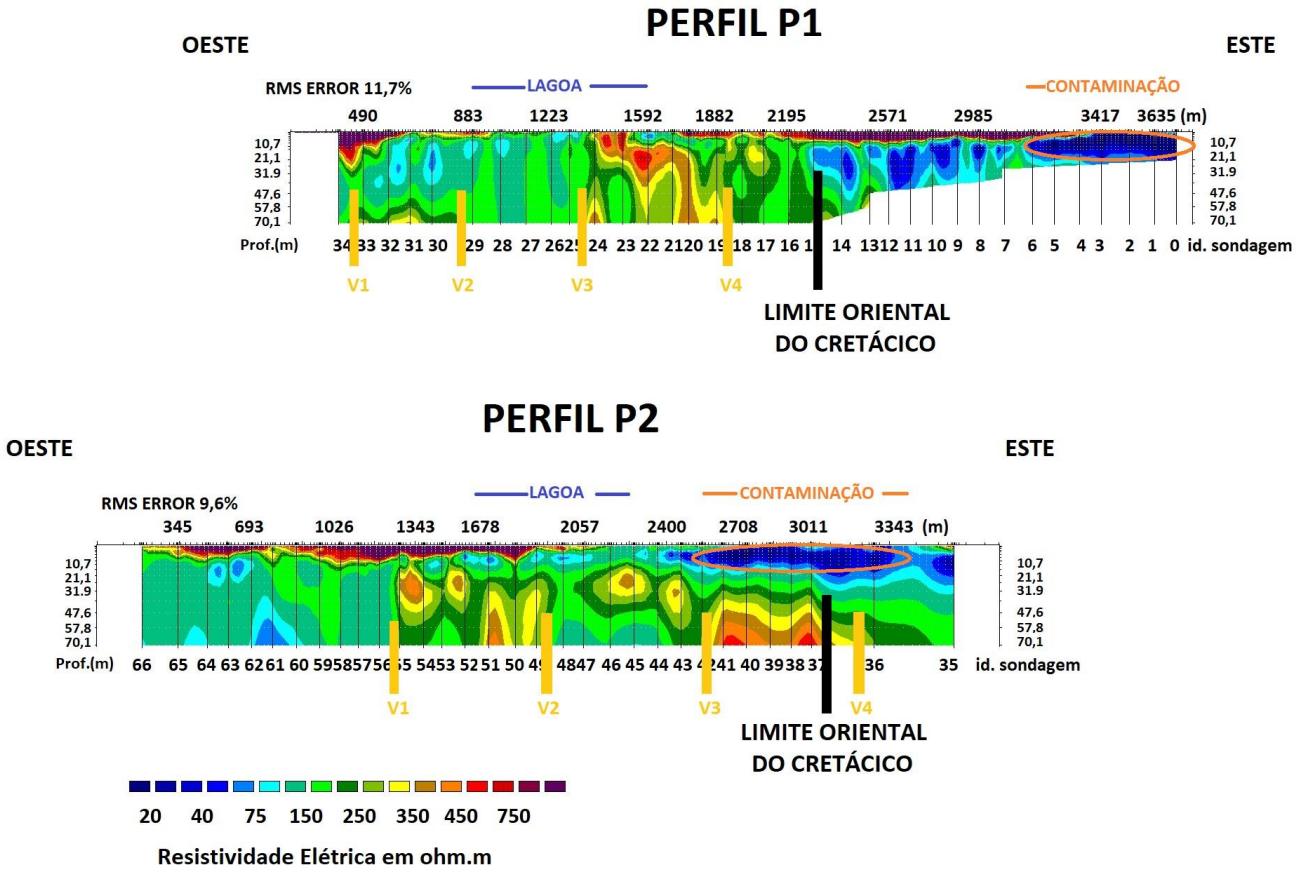


Figura 7. Modelos de Resistividade Elétrica dos perfis P1 e P2.

Figure 7. Electrical Resistivity models for profiles P1 and P2.

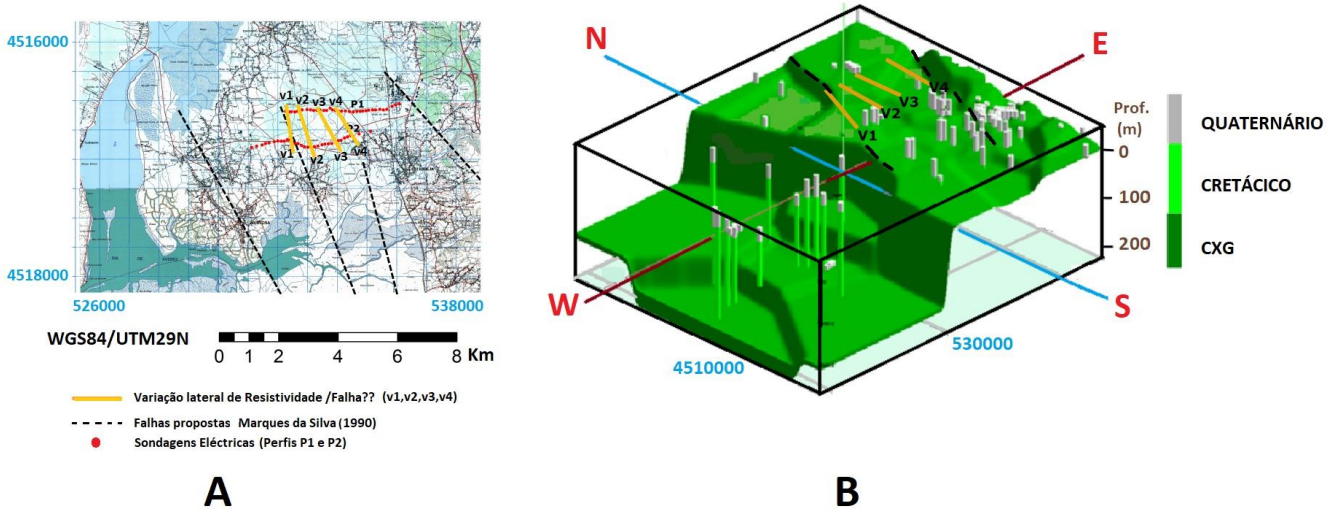


Figura 8. Variações laterais de resistividade nos perfis P1 e P2, falhas no *bedrock* CXG (Marques da Silva e Andrade, 1999) – A – e Bloco 3D – B.

Figure 8. Interpreted lateral variations in P1 and P2, faults in the CXG bedrock (Marques da Silva e Andrade, 1998) – A – and 3D block – B.

Apesar das limitações inerentes à utilização de escalas diferentes, existe correspondência espacial entre v1 e v4, em A (Fig. 8), e duas falhas em B (Fig. 8). O alinhamento v1 está associado a um afundamento do *bedrock* marcado a tracejado em B. Por sua vez, imediatamente a Este de v4, existe outro alinhamento (também a tracejado) em B.

Claro que a escala do mapa, bem como os dados disponíveis por aqueles autores, não terá permitido a marcação de outras estruturas que, porventura, possam existir na zona. Assim, os alinhamentos v2 e v3 situam-se em regiões onde estão marcadas pequenas variações de profundidade do *bedrock*, embora não tão evidentes como nos casos de v1 e de v4. No entanto, parece, à escala do bloco definido pelas sondagens, que v2 e v3 não correspondem a subida e descida de blocos no sentido Este-Oeste.

Do bloco B (Fig. 8) é possível interpretar que o *bedrock* CXG estará mais profundo na região do perfil 2. Esta interpretação implica que as variações laterais de resistividade elétrica verificadas em P2 (Fig. 7), por serem mais superficiais, devem corresponder a variações laterais de resistividade nas formações mais próximas da superfície e, por isso, mais recentes. Saliente-se ainda que o limite oriental das formações cretácicas se estima para Este de v4 no perfil P1 e muito próximo, embora para Este, de v4 no perfil 2, como se confirma no bloco da figura 8B.

5. Mapeamento Gravimétrico - Análise qualitativa

O mapa da anomalia de Bouguer da região definida pelo polígono vermelho nas figuras 1 e 2, está representado na figura 9.

A análise qualitativa do mapa A desta figura revela quatro zonas distintas: I, a Norte, com valores mais elevados de anomalia de Bouguer devidos à proximidade do *bedrock* CXG à superfície, como é evidente no bloco 3D A (Fig. 6). Nesta zona, sondagens mecânicas atingem o *bedrock* CXG a profundidades entre os 5 e os 15 metros (A. Cavaco, 1976).

A Sul, salientam-se duas zonas, II e III, onde se registam os menores valores de anomalia de Bouguer e que devem corresponder a depressões do *bedrock*. Na zona II, duas sondagens atingem o *bedrock* CXG a 160 metros e 187 metros de profundidade (A. Cavaco, 1976). Uma terceira sondagem no bordo Este da anomalia, já na área representada a verde, atinge o *bedrock* CXG aos 62 metros (A. Cavaco, 1976). Na Zona III não existem sondagens registadas e, por isso, não se podem avançar profundidades para o *bedrock*. Contudo, a Sul desta zona III, algumas sondagens revelam formações cretácicas a profundidades superiores a 40 metros, mas sem atingir o *bedrock* CXG (A. Cavaco, 1976).

Entre estas duas zonas, uma zona IV com orientação NNE-SSW e valores de Bouguer mais elevados pode corresponder a uma elevação do *bedrock*. De facto, várias sondagens nesta zona atingem o *bedrock* a profundidades que variam entre os 25 e os 50 metros, com a particularidade de não revelaram formações cretácicas (A. Cavaco, 1976). Ora a linha a tracejado (Fig. 9) representa o limite oriental das formações cretácicas, como proposto por A. Cavaco (1976) (Fig. 2). Esta linha coincide com a área onde os valores mais elevados de Bouguer são registados, ou seja, com a maior proximidade à superfície do *bedrock* CXG, o que confirma toda a interpretação anterior. Assim, o comportamento de Norte para Sul é o que se poderia esperar dos mapas propostos para a estrutura da região (Fig. 4), ou seja, a profundidade do CXG aumenta para Sul.

Por outro lado, de Este para Oeste, existem variações dos valores de anomalia de Bouguer, alternando valores máximos com valores mínimos, A na figura 9, que associadas aos dados das sondagens mecânicas, B na figura 9, sugerem que de Este para Oeste existam variações laterais da profundidade do *bedrock* CXG, aliás como sugerido no bloco 3D nas figuras 6 e 8 e propostos por Marques da Silva e Andrade (1998) na figura 4.

O mapa B da figura 9 mostra a distribuição dos valores da anomalia de Bouguer ao qual foi sobreposta a informação das sondagens mecânicas. As profundidades foram marcadas a partir dos valores medidos nas sondagens mecânicas incluídas na área da prospeção gravimétrica, cuja localização se mostra na figura 1. A castanho indica-se a profundidade a que são atingidas as formações do Complexo Xisto Grauváquico (CXG) e a vermelho a profundidade a que são atingidas as formações cretácicas (Cret). Facilmente se verifica que os valores registados de anomalia de Bouguer seguem o comportamento da profundidade das formações CXG. Assim os valores mais baixos de anomalia de Bouguer correspondem a maiores profundidades do CXG, enquanto os mais elevados correspondem a menores profundidades do CXG. A Norte, com profundidades entre os 5 e os 15 metros registadas para o CXG os valores de anomalia de Bouguer atingem os valores máximos na região. Por outro lado, os valores mínimos de Bouguer registados a Sudoeste coincidem com a zona onde a profundidade do CXG, registada nas sondagens mecânicas, é máxima.

Saliente-se que o limite Oriental das formações cretácicas, interpretado em A. Cavaco (1976), corresponde espacialmente a um alinhamento de máximos locais da anomalia de Bouguer. Este alinhamento de máximos locais, além de seguir aproximadamente o limite proposto para as formações cretácicas, coincide com a aproximação à superfície do CXG, pois existe uma diferença da ordem dos 30 metros entre a profundidade do CXG a Ocidente e a Oriente do alinhamento marcado, mapa B na figura 9.

Por sua vez, onde são registadas formações cretácicas, a sua profundidade sofre algumas oscilações, variando entre os 20m e os 50m a profundidade em que são intersectadas pelas sondagens.

A figura 10 mostra o mapa da anomalia de Bouguer projetado sobre a fracturação proposta por Marques da Silva e Andrade (1998).

Na figura 10 é notável a coincidência geográfica entre as zonas II e III, que correspondem a mínimos de anomalia de Bouguer na figura 9, e os alinhamentos das falhas propostas por Marques da Silva e Andrade (1998). É, pois, claro que as zonas onde a anomalia de Bouguer é mínima podem ter controle tectónico.

A zona Norte do mapa corresponde a uma significativa menor profundidade do *bedrock*, o que coincide com os valores mais elevados de anomalia de Bouguer (zona I na figura 9).

Infelizmente, nem toda a zona mapeada por gravimetria está coberta por sondagens mecânicas. Contudo, a densidade das sondagens mecânicas permite que a zona II do mapa de anomalia de Bouguer possa ser comparada com os dados do bloco 3D da figura 6.

Na figura 11 mostra-se o bloco 3D construído a partir das sondagens mecânicas e parte do mapa de anomalia de Bouguer da figura 9. A análise desta figura revela uma concordância notável entre o "eixo" da anomalia de Bouguer e um pronunciado degrau no *bedrock*, que corresponde a um afundamento das formações do CXG da ordem dos 100 metros para Oeste, assinalado como falha 1. Contudo, é ainda possível definir outro alinhamento, de amplitude muito menor, que corresponde a outro afundamento, agora menos pronunciado, do *bedrock*, assinalado como falha 2.

5.1. Gravimetria versus Resistividade Elétrica.

Os alinhamentos v1 a v4 interpretados nos modelos dos perfis de resistividade elétrica (Fig. 7) foram marcados sobre o mapa de anomalia de Bouguer, como se mostra na figura 12.

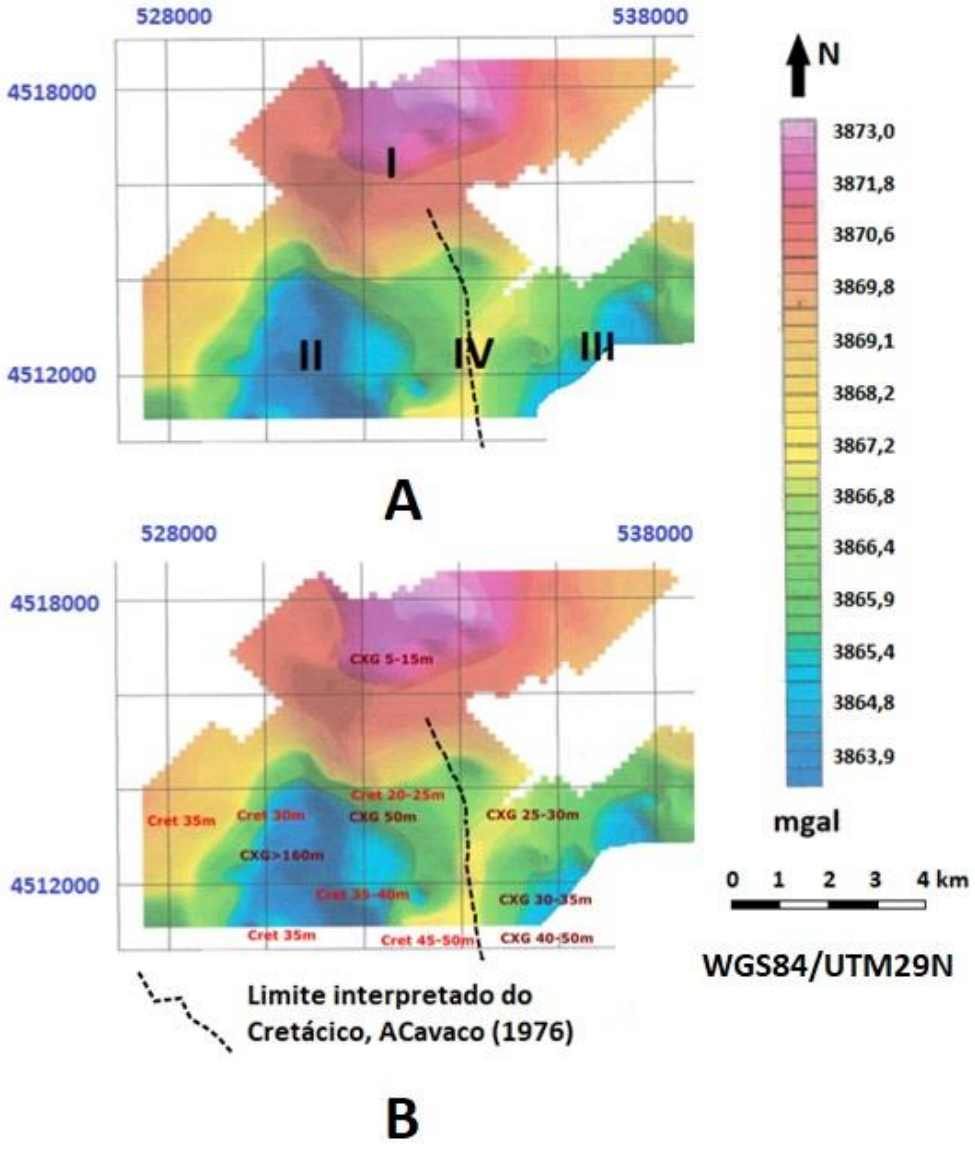


Figura 9. Mapa de anomalia de Bouguer: A - anomalia de Bouguer e zonas anómalas I, II, III e IV; B - Anomalia de Bouguer e profundidade do bedrock (CXG) medida nas sondagens mecânicas.

Figure. 9. Bouguer Anomaly map: A - Bouguer anomaly and areas I, II, III and IV; B - Bouguer anomaly and bedrock (CXG) depth measured from drilling.

Como se pode ver nesta figura, v1 está localizado na zona em que os valores da anomalia de Bouguer começam a diminuir rapidamente (lado Este da anomalia II da figura 9). A direção definida por v1 também corresponde à direção do lado oriental da anomalia e da tectónica segundo Marques da Silva e Andrade (1998) (Fig. 8). Portanto, v1 deve corresponder a uma falha e na região a Oeste de v1 o *bedrock* do CXG está mais profundo. Por outro lado, os alinhamentos v2 e v3 no mapa de anomalia de Bouguer correspondem a zonas em que os valores de gravidade aumentam gradualmente e, por isso, é mais plausível que correspondam a variações laterais das formações ou, em alternativa, a pequenas variações da profundidade do *bedrock* que, contudo, não são suficientes para provocar grandes variações na anomalia de Bouguer.

Finalmente v4 encontra-se numa região onde já se registam valores mais elevados de anomalia de Bouguer. Para oriente deste alinhamento os valores de anomalia de Bouguer diminuem e inicia-se a zona III da figura 9, que pode marcar uma nova descida no *bedrock* do CXG.

A figura 13 mostra os modelos de resistividade sobre o mapa de anomalia de Bouguer. Nesta figura, é claro que o alinhamento mais ocidental, v1, corresponde ao bordo oriental da anomalia II (Fig. 9) ou seja, confirma o início de uma grande depressão no *bedrock* CXG. A informação obtida relativamente aos outros alinhamentos nada acrescenta à discussão da figura 12.

Infelizmente os dados de resistividade elétrica não se estendem suficientemente para Este, de modo a permitir caracterizar as anomalias III e IV da figura 9.

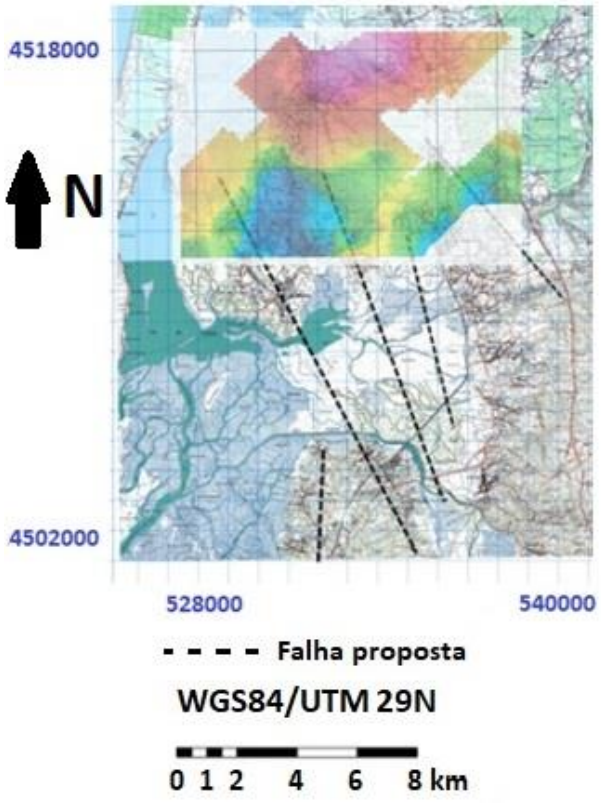


Figura 10. Mapa de anomalia de Bouguer, topografia e tectónica segundo Marques da Silva e Andrade (1998).

Figure 10. Bouguer Anomaly map, topography and tectonics after Marques da Silva e Andrade (1998).

5.2. Modelação Gravimétrica

A modelação de dados de campo de potencial, como é o caso de dados de gravimetria, está sempre sujeita a ambiguidade que é tanto maior quanto menores são as restrições, ou condições inicias, impostas à modelação. A modelação foi efetuada com o software GM-SYS, Oasis Montaj (2021), e, neste estudo, modelaram-se três perfis (Fig. 14) mas impuseram-se fortes restrições, ou seja, informação das sondagens mecânicas existentes na área em estudo, de modo que a ambiguidade da interpretação proposta seja consideravelmente reduzida.

A atribuição de valores de massa volúmica considerou que a geologia da região consiste em formações recentes, areias de praia, lodos e formações cretácicas assentes sobre xistos de idade Pré-Câmbrica. Assim, de acordo com tabelas de valores de densidade, Telford *et al* (1990), foram atribuídos valores de massa volúmica entre 1400 e 2000 kg/m^3 às formações que jazem sobre os xistos. Quanto aos xistos, como são de idade Pré-Câmbrica, foi-lhes atribuído um valor de massa volúmica de 2800 kg/m^3, um pouco superior aos valores normalmente atribuídos a formações mais recentes.

Na figura 14, onde se mostra a localização de todos os perfis modelados, o perfil NS tem como finalidade modelar as formações na direção Norte-Sul, desde a região em que o substrato CXG está mais próximo da superfície, a Norte, até à região onde se registaram valores mínimos de anomalia de Bouguer, na extremidade Sul.

Os perfis EO1 e EO2 destinam-se a modelar as variações Este-Oeste das formações, passando pelas duas regiões onde os valores de Bouguer são menores.

O perfil NS está representado na figura 15. Como se pode ver a profundidade do *bedrock* – CXG – é muito pequena a Norte e, neste local, só é proposta uma camada de baixa densidade sobre aquelas formações. Esta camada, representada a azul e massa volúmica de 1400 kg/m^3, corresponde a formações muito recentes com estratificação horizontal.

À medida que se caminha para Sul, a profundidade do *bedrock* aumenta e com a modelação só é possível ir distinguindo as camadas acima do *bedrock*. É possível que estas camadas correspondam a formações recentes com estratificação horizontal ou sub-horizontal (camadas representadas a azul e a verde, massas volúmicas respetivamente 1400 kg/m^3 e 1800 kg/m^3) e, a maior profundidade (camada amarela, massa volúmica 2000 kg/m^3) devem surgir as formações cretácicas, o que está de acordo com as informações das sondagens mecânicas. O aumento da profundidade do *bedrock*, para Sul do ponto 1200, é rápido e a sua profundidade estabiliza cerca do ponto 2000. Este comportamento pode ser devido a causas tectónicas, até à data desconhecidas, ou a fenómenos de erosão acentuada.

A modelação gravimétrica dos perfis Este-Oeste encontra-se na figura 16 (EO1 topo da figura e EO2 na parte inferior da figura). De modo semelhante ao perfil NS, em ambos os perfis, as camadas representadas a azul e a verde, de menor densidade, devem corresponder a formações recentes.

No entanto, abaixo daquelas camadas, ambos os perfis mostram a irregularidade do *bedrock* e a formação de um vale na região correspondente à zona II da figura 9.

Este vale é acentuado e está delimitado por acidentes tectónicos (Figs. 10 e 11). No entanto, mais para Este o modelo da figura 16 revela que o *bedrock*, CXG, se aproxima da superfície e a camada amarela (Cretácico?) desaparece, o que corresponde à região IV da figura 9 e ao limite oriental das formações cretácicas.

Mais para Este, o *bedrock* torna a descer e a formação amarela volta a aparecer. Este comportamento do *bedrock* é semelhante ao verificado no perfil gravimétrico mais setentrional em Mantlik e Matias (2010) e é consistente com a informação tectónica disponível

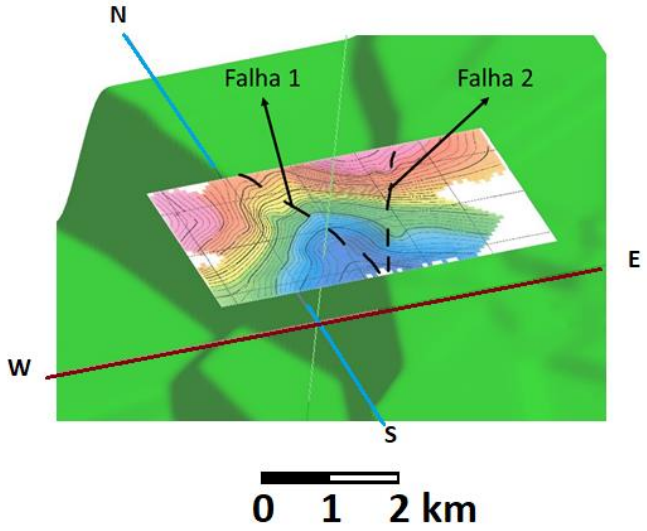


Figura 11. Mapa de anomalia de Bouguer e bloco de sondagens.

Figure 11. Bouguer Anomaly map and 3D block from drilling data.

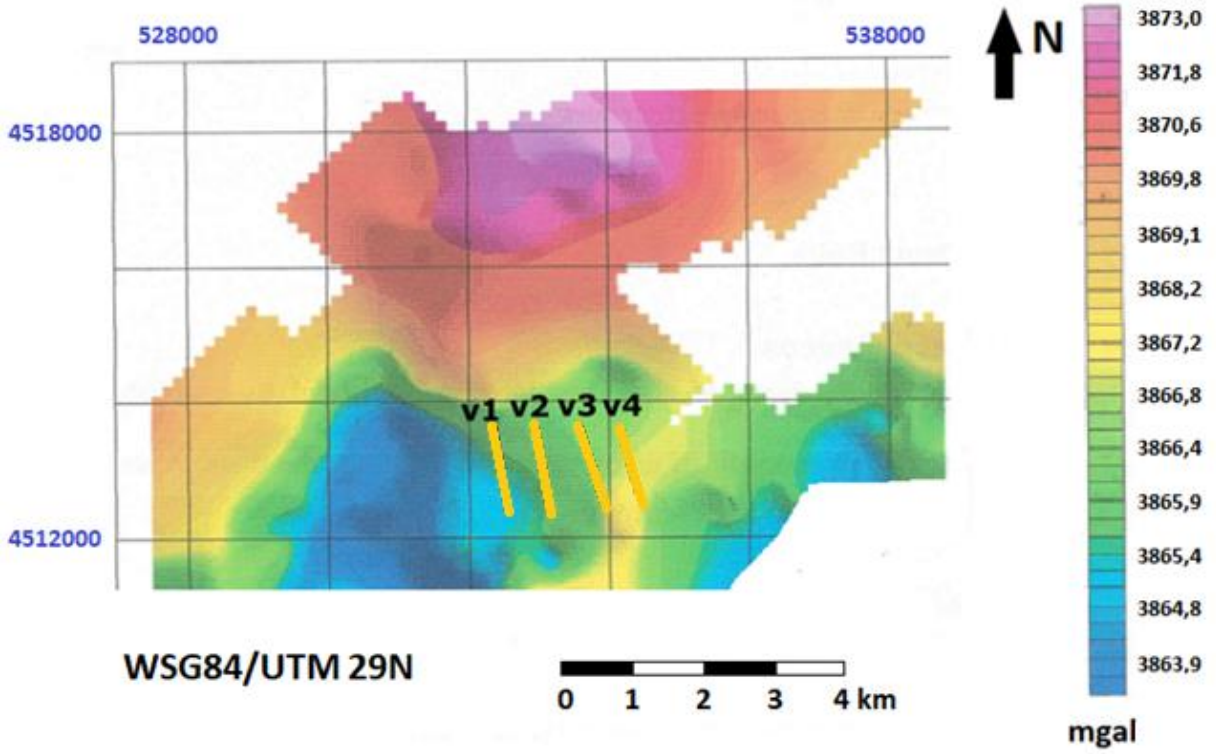


Figura 12. Alinhamentos v1, v2, v3 e v4 interpretados nos modelos de resistividade elétrica e mapa de Anomalia de Bouguer.

Figure 12. Alignments v1, v2 v3 and v4 interpreted from the electrical resistivity models and the Bouguer Anomaly map.

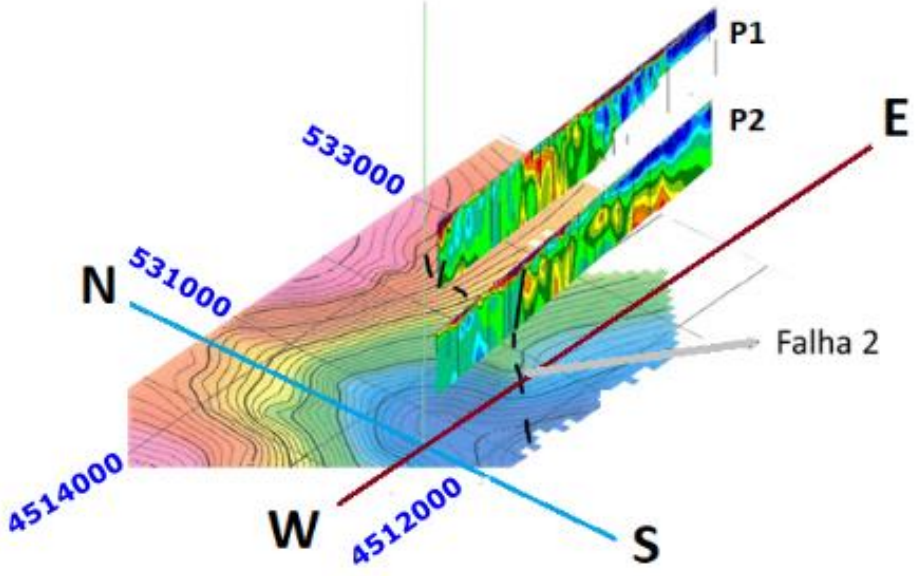


Figura 13. Modelos de resistividade elétrica e mapa de anomalia de Bouguer.

Figure 13. Electrical Resistivity models and the Bouguer anomaly map.

em Marques da Silva e Andrade (1998). Acima do bedrock, a formação representada a amarelo, parece seguir o comportamento do mesmo e, de acordo com as profundidades modeladas, conjugadas com a informação das sondagens mecânicas, pode corresponder às formações cretácicas na região a Oeste da subida do bedrock CXG.

Para Oeste, a modelação proposta mostra o *bedrock* a descer para profundidades cada vez maiores, até ao limite Oeste do perfil EO2, de acordo com o esperado pela informação da figura 4. A possível interpretação de formações cretácicas para Este do limite oriental proposto para as mesmas é discutível.

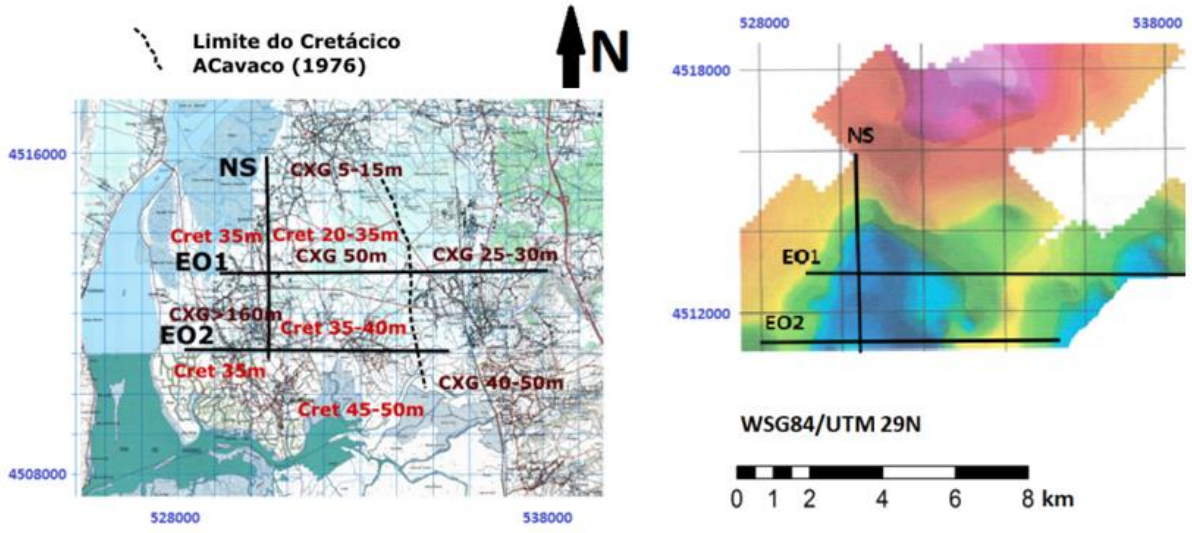


Figura 14. Localização dos perfis modelados por GM-SYS.

Figure 14. Location of the modelled profiles by GM-SYS.

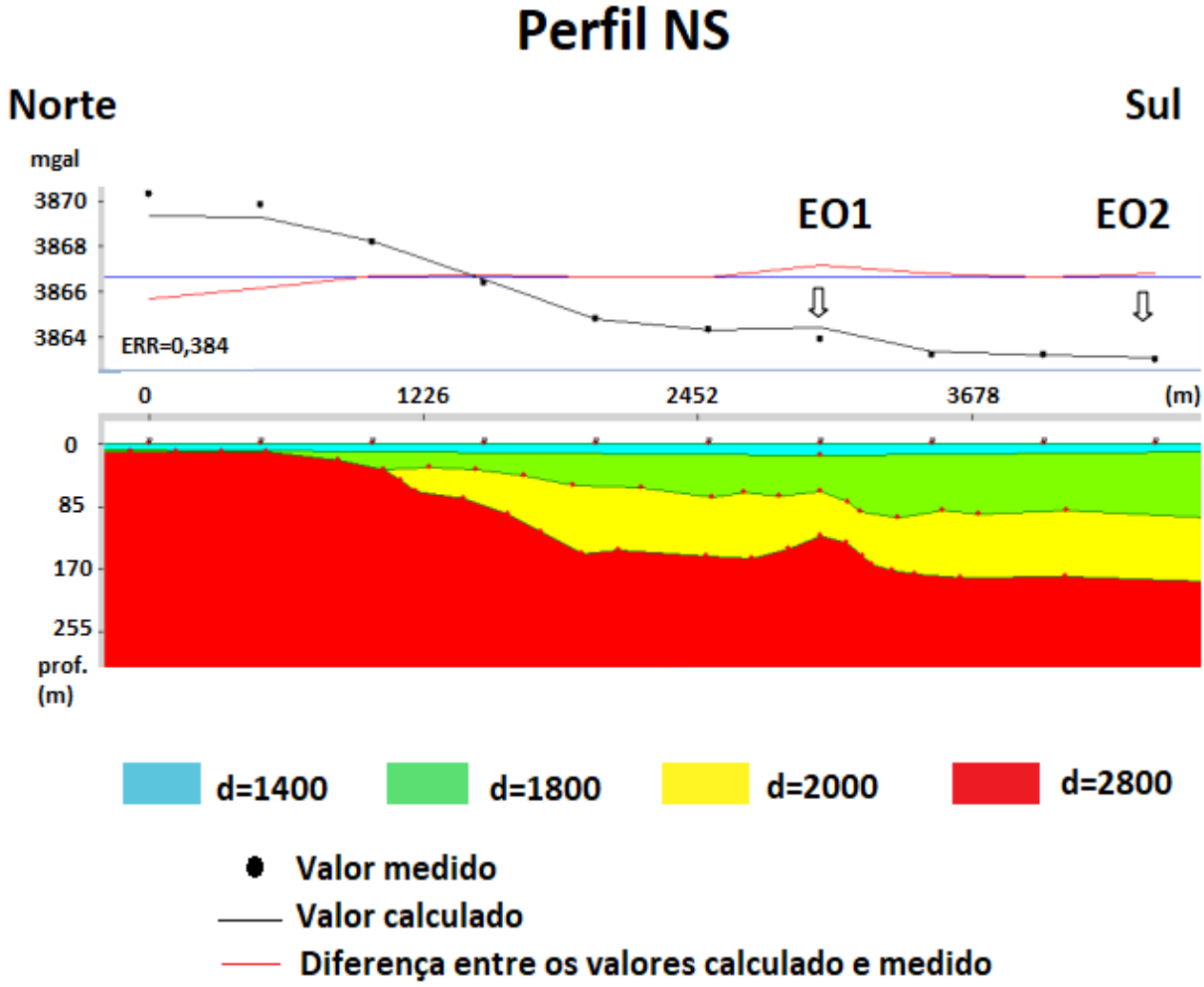


Figura 15. Modelação gravimétrica do perfil NS (EO1, EO2 pontos de interseção com os perfis EO1, EO2 e NS); d – massa volúmica em kg/m^3.

Figure 15. Gravity modelling of Profile NS (EO1, EO2 intercept points with profiles EO1, EO2 and NS); d – density in kg/m^3.

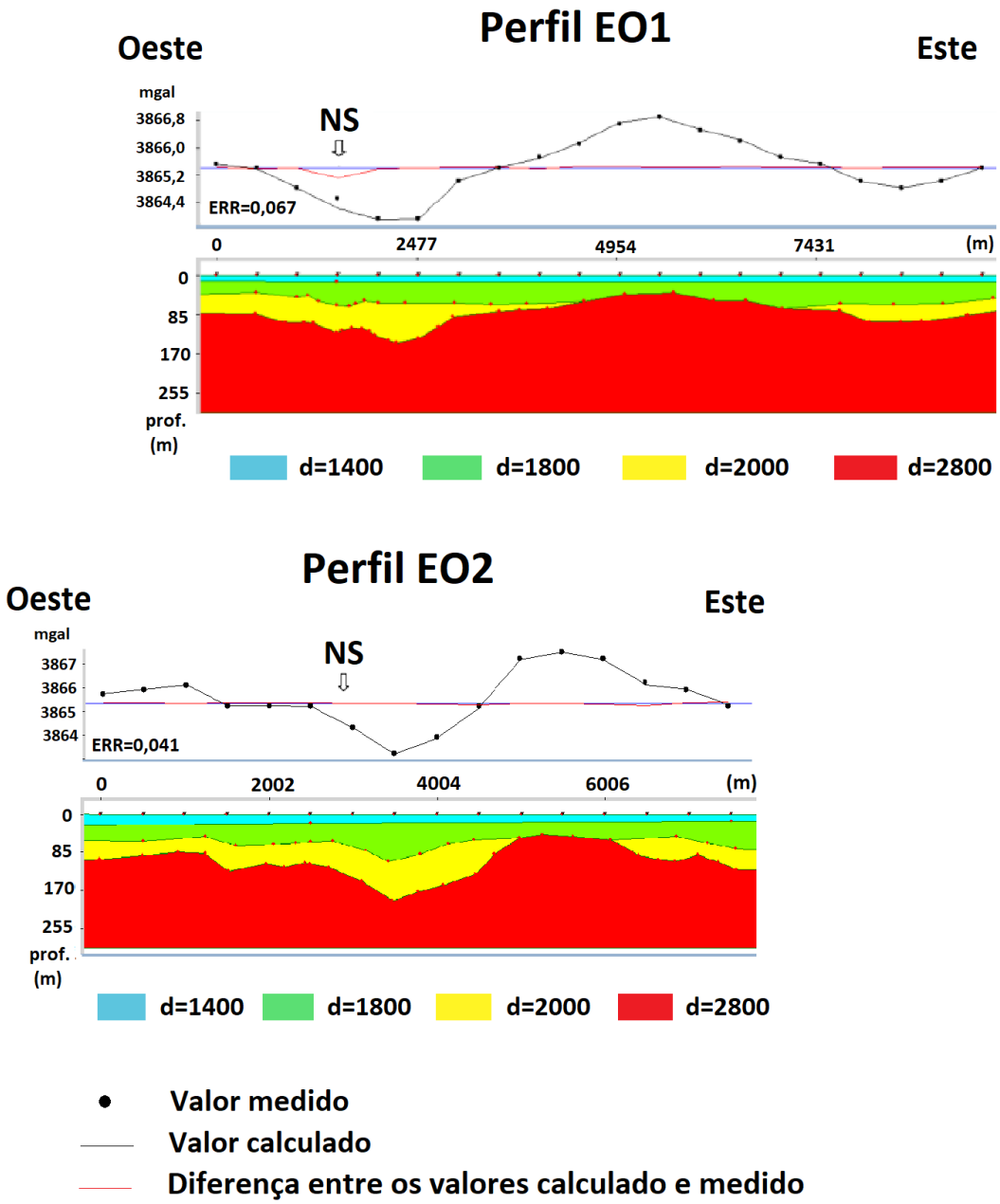


Figura 16. Modelação Gravimétrica dos perfis Este-Oeste: EO1 (topo) e EO2 (baixo) (NS ponto de interseção entre os perfis NS e EO1); d - massa volúmica em kg/m^3.

Figure 16. Gravity modelling of the profiles East-West: EO1 (top) and EO2 (bottom) (NS intercept point between profiles NS and EO1); d - density in kg/m^3.

proposto limite oriental das formações cretácicas, onde se verifica um aumento da profundidade do *bedrock*, a extensão da camada é limitada e a informação de sondagens mecânicas é pouca.

Refira-se que, mais a Sul, voltam a existir registos de formações cretácicas nas sondagens (ver mapa à direita da figura 14), embora a profundidade mais elevada.

6. Conclusão

Este trabalho analisa informação conjunta de sondagens mecânicas e prospeção geofísica (gravimetria e resistividade elétrica) para investigar a topografia do *bedrock* CXG na região a Oeste de Estarreja, bem como a eventual existência de fenómenos de origem tectónica que tenham condicionado aquela topografia.

A conjugação dos dados utilizados permite propor que a topografia do *bedrock* é muito irregular e não desce progressivamente para Oeste, sendo mais próxima do modelo 2 da figura 5. Acresce que esta topografia é condicionada por fenómenos de origem tectónica com orientação geral NNW-SSE, referidos previamente por outros autores e aqui justificados pelos dados de gravimetria e resistividade.

O aumento da profundidade do *bedrock* de Norte para Sul é evidente no mapa da anomalia de Bouguer e no perfil NS modelado. No entanto, as razões para este aumento não são possíveis de adiantar no âmbito deste trabalho e dos dados disponíveis. Pode existir controle tectónico com direção próxima E-O ou, simplesmente, erosão acentuada do bloco CXG.

Finalmente, a ausência de formações cretácicas para além do seu limite oriental, referidos por outros autores, é justificado pela aproximação à superfície do *bedrock* CXG, como modelado nos perfis EO1 e EO2, e que pode ser conjugado com a análise qualitativa do mapa da anomalia de Bouguer (Fig.9).

Trabalhos futuros deverão incluir uma rede mais apertada de observações gravimétricas, esclarecer a origem do aumento da profundidade do *bedrock* verificado no perfil NS e sugerida pela análise qualitativa do mapa de anomalia de Bouguer e, finalmente, estender a cobertura gravimétrica para regiões mais a Sul ligando aos dados em Mantlik e Matias (2010).

Agradecimentos

Este trabalho inseriu-se no projeto REMIVO, projeto estruturante aquando da formação e organização do Departamento de Geociências e, só foi possível apresentá-lo, após mais de trinta anos de trabalho, com a colaboração de muitas pessoas, algumas das quais já não estão entre nós. Correndo o risco de esquecer algumas, mesmo assim, os autores desejam agradecer aos Profs. António Soares de Andrade e Manuel Marques da Silva, Eng. João Ribeiro, aos alunos do curso de Engenharia Geológica da Universidade de Aveiro, ao Sr. João Graça, à memória do Sr. Óscar Carvalho† e do Prof. Luís Severo Gonçalves†, que contribuíram para que fosse possível realizar todo o trabalho de campo. Os autores ainda agradecem o apoio da Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia, GeoBioTec UIDB/04035/2020 e das Ações Integradas Luso-Britânicas financiadas no âmbito do Tratado de Windsor.

Bibliografia

A. Cavaco, 1976. Prospeção Geofísica em Estarreja. Relatório final, obra nº 1175.

Barbosa, B. P., 1981. *Folha 16-C Vagos da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000*, Serv. Geol. Portugal, Lisboa, Portugal.

Battacharya, P. K., Patra, H. P., 1968. *Direct Current Geoelectric sounding princioples and interpretation*, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands, **9**: 135.

Casas, A., Matias, M., Rivero, L., Silva, M., 1995. Estudio gravimetrico preliminar de la Ria de Aveiro, *Geociências*, **9**: 23-33.

Figueiredo, F., 2001. *Aplicação da Gravimetria ao estudo da organização geométrica das formações Meso-Cenozoicas do Baixo Vouga*. Tese de Doutoramento, Coimbra, Portugal, 223.

Fox, T., 2001. *Gravity Survey in Estarreja, Portugal*. BSc dissertation, University of Leeds, Leeds, UK.

Oasis Montaj, 2021. GM-SYS free version, https://en.freedownloadmanager.org/Windows-PC/GM-SYS.html.

Loke, M. H., 2000. *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies, A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys*, 59. http://www.geoelectrical.com.

Loke, M. H., Barker, R. D., 1996. *Rapid least-square inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method*. *Geophysical Prospecting*, **44**: 131-152. https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x.

Mantlik, F., Matias, M., Lourenço, J., Grangeia, C., Tareco, H., 2009. *The use of gravity methods in the internal characterization of landfills – a case study. Journal of Geophysics and Engineering*, **6**: 357-364. https://doi.org/10.1088/1742-2132/6/4/003.

Mantlik, F., Matias, M., 2010. *Interpretation and modelling of regional gravity data of the Aveiro Basin (Northwest Portugal)*, C.R. Geoscience, **342**(11): 823-836. https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.06.005.

Marques, T. D. J., 2017. *Estudo 4D da contaminação de aquíferos a oeste de Estarreja: Geoquímica e Geofísica.* Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 313.

Marques, T., Matias, M., Silva, E., Durães, N., Patinha, C., 2021. Temporal and Spatial Groundwater Contamination Assessment Using Geophysical and Hydrochemical Methods: The Industrial Chemical Complex of Estarreja (Portugal) Case Study. *Appl. Sci*., **11**: 6732. https://doi.org/10.3390/app11156732.

Marques da Silva, M., 1990. *Hidrogeologia del sistema multiacuifero cretácico del bajo Vouga-Aveiro (Portugal)*. Tese de Doutoramento, Universidade de Barcelona, Barcelona, Espanha.

Marques da Silva, M., Andrade, A., 1998. *On the depth of the hercynian basement in Aveiro region*. Actas do V Congresso Nacional de Geologia, Lisboa. *Comunicações do Instituto Geológico e Mineiro*. **84**: D40-D43.

Matias, M. J. S., 2001. Geofísica aplicada ao ambiente: objetivos, âmbito e alguns exemplos. *Comum. Inst. Geol. e Mineiro*, **88**: 223-236.

Matias, M., Whaler, K., Stuart, G., Clark, R., Marques da Silva, M., 1994. An Integrated Geophysical Survey of Aquifers Contamination to the West of Estarreja (Portugal). *European Association of Exploration Geophysicists, Extended Abstracts of Papers*, PO36.

Mooney, H. M., Orellana, E., 1966. *Master tables and curves for vertical electrical soundings over layered structures*. Intersciencia, Madrid, Espanha, 159.

Neves, C., 2015. *Estudo da contaminação das águas subterrâneas e respetivos processos de atenuação natural na zona industrial de Estarreja*. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa, Portugal, 379.

Ordens, C. M., 2007. *Estudo da contaminação do aquífero superior na região de Estarreja*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 150.

Ribeiro, A., Conde, L., Monteiro, J., 1972. *Tectonic map of Portugal, scale 1:1000000*. Serv. Geol. Portugal, Lisboa, Portugal.

Teixeira, C., Oliveira, J., Nery, F. 1963. *Folha 13-C Ovar da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000*, Serv. Geol. Portugal, Lisboa.

Teixeira, C., Oliveira, J., Carreira de Deus, P. 1975. *Folha 16-A Aveiro da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000*, Serv. Geol. Portugal, Lisboa.

Telford, W. M, Gerdart, L. P., Sherif, R. E., 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 770, ISBN: 9781139632256.

Van Damn, J. C., Meulenkamp, J. J., 1969. *Standard graphs for resistivity prospecting.* prepared by Rikswaterstaat, The Netherlands, European Association of Exploration Geophysicists, 324.