

Cartografia de uma zona de falha em terrenos graníticos com recurso a métodos geofísicos

Mapping a fault zone in a granitic terrain using geophysical methods

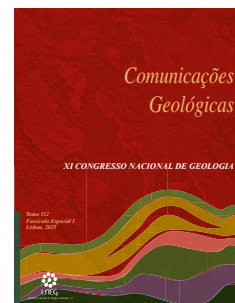
N. M. S. Alte-da-Veiga^{1*}

DOI: <https://doi.org/10.34637/cfyv-bk10>

Recebido em 01/10/2023 / Aceite em 22/03/2024

Publicado online em abril de 2025

© 2025 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP



Artigo original
Original article

Resumo: Na realização de cartografia geológica as condições de observação podem ser insuficientes para se obterem os resultados e o pormenor desejados. Nessas circunstâncias o uso de métodos geofísicos pode permitir ultrapassar as limitações existentes. O caso apresentado diz respeito a uma área perto da povoação de Arcozelo, no centro-norte de Portugal. Nesta zona a litologia dominante corresponde a granitos hercínicos, estando também presentes uma unidade sedimentar constituída por arenitos grosseiros, feldspáticos, de matriz argilosa, do Paleogénico, e aluviões no fundo do vale. Nesta área ocorre uma ampla zona de falha na junção de uma falha com orientação NNE-SSW com uma segunda com orientação NE-SW. No geral as condições de observação dos limites litológicos e dos limites de zona de falha são fracas. É neste contexto que o VLF-R e métodos de resistividade eléctrica foram usados com bons resultados para pôr em evidência esses limites.

Palavras-chave: Cartografia geológica, granito, zona de falha, resistividade eléctrica, VLF-R.

Abstract: In the execution of geological mapping the observation conditions may be insufficient to attain the desired detail and results. In such circumstances the use of geophysical methods may allow to overcome existing limitations. The present case concerns an area near the small town of Arcozelo, in centre-northern Portugal. In this area the dominant lithology corresponds to hercynian medium to coarse-grained granites. There are also Paleogene sediments constituted by coarse feldspathic arenites with argillaceous matrix, and alluvial deposits are present in the bottom of the local valley. In this area, a large fault zone is present in the junction of two NNE-SSW and NE-SW trending faults. The observation conditions of the limits between lithological units and fault-related limits are generally poor. VLF-R, electrical resistivity profiling and earth resistivity imaging methods have successfully been used to put in evidence those limits. Electrical resistivity profiling (Schlumberger array, AB = 20 m), with a shallow investigation depth, was effective in differentiating the alluvium from the Paleogene sediments, on the basis of contrasting resistivity values. VLF-R measurements with two transmitters led to the identification and positioning of fault zone limits, further assisted with the use of 2D resistivity methods. The resulting map shows a side band and a northern patch of the Paleogene sediments, a central patch of alluvium, and granite on both sides; and an overall control by fault zone limits. In this area, these limits have a multiple character, resulting in an elaborated fault zone pattern.

Keywords: Geological mapping, granite, fault zone, electrical resistivity, VLF-R.

1. Introdução

Na realização de cartografia geológica deparamo-nos frequentemente com zonas do terreno em que as condições de observação são difíceis. Tal poderá não constituir um entrave de maior se a escala de trabalho for de pormenor relativamente reduzido; em várias ocasiões haverá lateralmente locais onde essa observação será possível. Contudo, quando se pretende incidir com maior pormenor numa determinada área, condições de observação pobres, ou, não o sendo em absoluto, insuficientes para a escala de trabalho pretendida, são no geral acentuadamente limitativas. Numa tal circunstância, o uso de métodos geofísicos pode constituir uma mais-valia efectiva.

De entre os diversos métodos geofísicos alguns adaptam-se melhor a esta tarefa que outros. Desde logo, a possibilidade de utilização de um dado método geofísico deriva da existência de contraste na propriedade física relevante/no parâmetro medido. O método utilizado deverá permitir também uma cadência de medição razoavelmente rápida, bem como uma boa discriminação de variações laterais no terreno, ou seja, que tais variações se repercutam no parâmetro medido de forma suficientemente imediata, em termos espaciais, e suficientemente acentuada. No geral, há um grupo de métodos electromagnéticos que se enquadra bem nestes requisitos; métodos de resistividade eléctrica também têm características, nomeadamente de versatilidade quanto à escolha dos comprimentos de linha, que fazem com que sejam uma boa possibilidade de escolha.

É neste contexto que se enquadra a cartografia de uma área nas proximidades da povoação de Arcozelo, concelho de Gouveia. Na elaboração da carta em causa concorreram levantamentos realizados com diversos métodos geofísicos, maioritariamente VLF-R, mas também métodos de resistividade eléctrica. Para além da carta em si e de mostrar a efectividade da utilização dos métodos geofísicos em causa, pretende-se neste trabalho abordar a própria construção da carta.

2. Localização e enquadramento geológico

A área circundante à povoação de Arcozelo enquadra-se regionalmente na zona de sopé da Serra da Estrela, que se define a NW do alinhamento Seia-Gouveia, em posição relativamente distal, já próxima do rio Mondego (Figura 1). Em termos de enquadramento geológico geral, nesta região de sopé afloram predominantemente rochas graníticas, formando duas manchas principais, correspondendo uma a um granito de grão grosseiro e a outra a um granito de grão médio (ou médio a grosseiro), ambos monzoníticos, porfiríodes, de duas micas, com

¹ Universidade de Coimbra, CITEUC, Departamento de Ciências da Terra, Rua Sílvio Lima, 3030-790 Coimbra, Portugal.

* Autor correspondente / Corresponding author: ndaveiga@ci.uc.pt

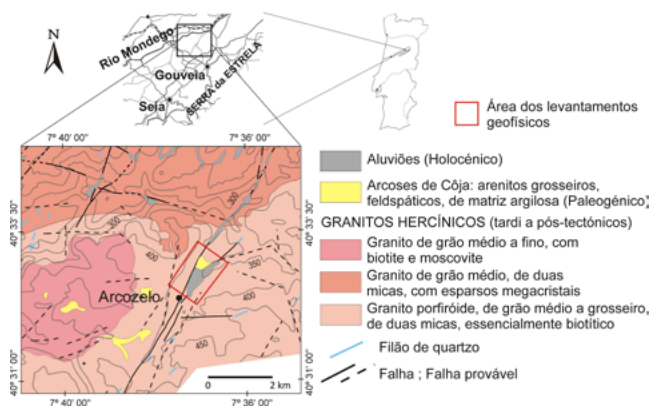


Figura 1. Carta Geológica da região de Arcozelo (adaptada de Teixeira et al., 1967; Severo Gonçalves et al., 1990), com localização da área dos levantamentos geofísicos (moldura a vermelho).

Figure 1. Geological map of the Arcozelo region (adapted from: Teixeira et al., 1967; Severo Gonçalves et al., 1990), with location of the geophysical survey area (red frame).

predominância da biotite, tardi a pós-tectónicos (Teixeira *et al.*, 1967; Severo Gonçalves *et al.*, 1990). Nesta região ocorre também, em algumas manchas dispersas e com menor extensão, a unidade “Arcoses de Côja”, atribuída ao Paleogénico (Cunha, 1999), constituída por arenitos grosseiros, feldspáticos, de matriz argilosa, que assentam em superfície de aplanamento sobre o soco. No sopé do relevo montanhoso, definido pela falha inversa de Lousã-Seia, existem depósitos de blocos de granito, pertencentes ao Grupo de Sacões; estes depósitos de leque aluvial são correlativos das várias fases de levantamento do relevo nos últimos ca. 9,7 Ma (Cunha, 2019).

Morfologicamente, na área de Arcozelo desenha-se um vale, com alongamento SW-NE, com uma parte baixa razoavelmente ampla, sita sensivelmente a uma cota de 350 m, e encostas com declive mais acentuado a ocidente e mais suave pelo lado oriental. Em termos litológicos, afloram os granitos de grão médio (ou médio a grosseiro) acima mencionados, os arenitos grosseiros, feldspáticos, de matriz argilosa e, na zona baixa do vale, ocorrem ainda aluviões (Figura 1).

Em termos meramente descritivos, diremos que neste vale ocorre a junção em “Y” de duas falhas: uma, a ocidente, com orientação geral N20°-30°E, e uma segunda, a oriente, com orientação geral N45°E, que convergem para SW (Figura 1). Nesta junção gera-se uma zona de falha que na sua maior largura atinge ~500 m. A presença das arcoses de Côja no vale do Arcozelo resulta de as duas falhas em questão estarem na origem da formação de um *graben*. É de sublinhar que a orientação NNE-SSW da falha principal é subparalela à das grandes falhas com esse rumo presentes na metade norte do território português, nomeadamente à da falha Bragança-Unhais da Serra (distanciada lateralmente de ~12 km), às quais, localmente, há estruturas de tipo *graben* associadas (Cabral *et al.*, 1985).

A respeito destas falhas, da zona de falha e da terminologia utilizada, uma breve discussão poderá contribuir para uma maior clareza da situação. À escala de uma carta como a da figura 1, o termo geralmente usado é simplesmente o de «falha». Contudo, nestes granitos variscos, uma falha nunca é uma superfície planar sem espessura; é sempre uma zona de falha com maior ou menor largura à superfície do terreno. Quando observável em afloramento, a designação «caixa de falha» é frequentemente usada para designar uma faixa de terreno fortemente fracturada/ cataclásada/ milonitizada, faixa essa cujos bordos poderão ser razoavelmente bem definidos; poderemos ser levados a fazer equivaler as expressões «caixa de falha» e «zona de falha», mas no caso geral há vantagem em não o fazer.

Numa falha/ zona de falha que se alonga por vários quilómetros ou dezenas de km de extensão, como é o caso da falha ocidental do vale do Arcozelo, os seus bordos poderão não ser bem definidos. Tal é a situação aqui: não se pode falar num «limite da zona de falha»; pode-se sim falar de múltiplos «limites de zona de falha». Um limite de zona de falha constitui uma descontinuidade entre dois domínios, que se marcam por valores de resistividade aparente claramente diferenciados (como veremos abaixo), o que traduz um grau de fracturação/ alteração mais acentuado num que no outro. Mas o domínio menos fracturado/ alterado não corresponde forçosamente a rocha sã; pode ser somente «menos fracturado/ alterado», e atrás dele vir um outro com grau de fracturação/ alteração ainda mais baixo (ou mais elevado). Como complexidade adicional, um limite de zona de falha pode ser também, localmente, um limite litológico. Neste contexto, aqui no Arcozelo, a junção das duas falhas/ zonas de falha em questão gera o que poderemos designar como «uma ampla zona de falha».

3. Material e métodos

Na elaboração da carta em causa concorreram levantamentos realizados com diversos métodos geofísicos, maioritariamente VLF-R, usando os emissores NAA (24,0 kHz) e DHO (23,4 kHz), e perfis de resistividade aparente com um comprimento de linha AB = 20 m (dispositivo Schlumberger); houve também uma contribuição de levantamentos com métodos de resistividade eléctrica 2D, processados com o programa Res2DInv. Como equipamento, foi usado um receptor Geonics EM-16 e um resistivímetro Syscal Jr. A escala usada nos trabalhos de campo foi 1:5000.

4. Resultados

A carta geológica obtida na sequência dos levantamentos realizados com métodos geofísicos é mostrada na figura 2a. Nesta carta temos, lateralmente, o granito de grão médio a grosseiro, porfíroide, de duas micas, com biotite predominante, visível localmente em afloramento no terreno. Este granito circunscreve uma mancha de arenitos grosseiros, feldspáticos, de matriz argilosa (seguidamente designados como «arcoses de Côja»), mancha esta presente essencialmente na zona norte da carta e numa faixa a oeste; circunscreve também uma segunda mancha, de aluviões, que se desenha na parte central da carta. As linhas contínuas/ a tracejado, que numa carta geológica normalmente representam falhas, têm aqui o significado de «limite de zona de falha»; facilmente se depreende que, onde marcados sobre aluviões ou arcoses de Côja, estes limites são ocultos.

Os diversos limites são eventualmente observáveis localmente, mas, no geral, ou se observam muito sofrivelmente ou não são de todo observáveis. E, no que diz respeito aos limites de zona de falha, esses são ocultos ou não observáveis na esmagadora maioria (ou quase totalidade) dos casos. Na identificação e marcação dos diferentes limites – limites entre unidades litológicas e limites de zona de falha (nalguns casos coincidentes) – concorreram um ou mais dos métodos geofísicos já mencionados.

Uma vez que tanto as aluviões como as arcoses de Côja correspondem a depósitos superficiais e que, pelo menos no caso das aluviões, era expectável que a sua possança fosse reduzida, o método geofísico a usar na sua diferenciação teria que ter uma profundidade de investigação reduzida. Por conseguinte, foi usado um método eléctrico (dispositivo Schlumberger) com um comprimento de linha AB = 20 m, que preenche esse requisito.

Com base na carta de resistividades aparentes gerada (Figura 3) foi possível estabelecer o limite entre as aluviões e as arcoses de Côja, a norte e em grande parte a oeste, tendo em conta o facto destas arcoses de Côja, com uma fracção argilosa relevante, apresentarem

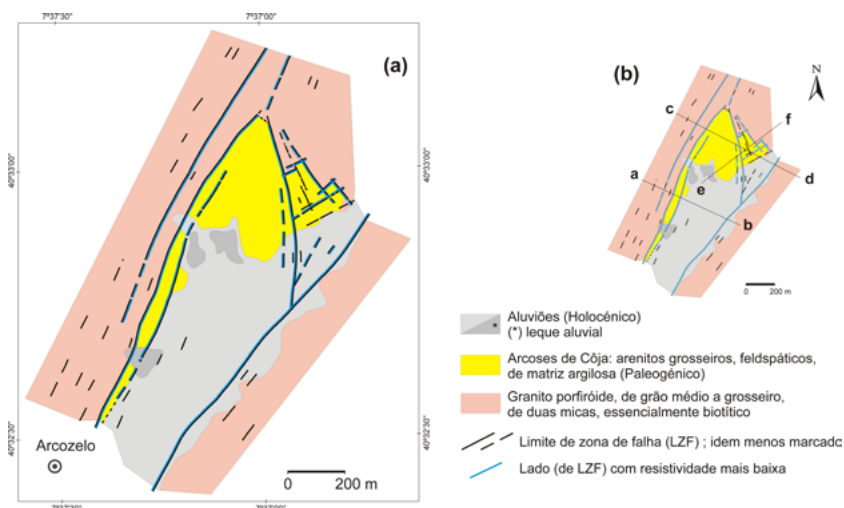


Figura 2. (a) Carta geológica da região a NE de Arcozelo, obtida através de levantamentos com métodos geofísicos. (b) Localização dos perfis das figuras 4 a 6.

Figure 2. (a) Geological map of the area to the NE of Arcozelo, obtained from geophysical methods surveys. (b) Location of the profiles in figures 4 to 6.

caracteristicamente uma resistividade aparente mais baixa que a das aluviões – inferior a 70/100 Ωm versus, no geral, resistividades aparentes das aluviões no intervalo 140-800 Ωm . Esta mesma carta de resistividades aparentes permitiu também fazer uma diferenciação no interior das próprias aluviões, tendo em conta a tendência geral de sedimentos com granulometria mais elevada apresentarem também resistividades mais elevadas; com base nisto e no seu posicionamento lateral, em relação com linhas de água, foram delimitados três pequenos leques aluviais correspondentes a manchas com resistividades aparentes no intervalo 400-800 Ωm .

Os limites de zona de falha foram estabelecidos com VLF-R, tendo sido também este método que permitiu a cartografia de parte da mancha de arcoses de Côja e a localização dos contactos entre estas e o granito (conjuntamente com observação visual, no que diz respeito às arcoses de Côja). Na figura 4 encontra-se um perfil 'a-b' com orientação NW-SE, orientado perpendicularmente ao vale e à orientação geral da estrutura a ele associada (Figura 2b). Neste perfil as medições com o emissor NAA correspondem ao modo TM. Este perfil permite marcar, a NW, um limite duplo para o domínio principal da zona de falha: há um primeiro limite cerca dos 190 m (A), com passagem do granito com resistividades aparentes superiores a 300/400 Ωm para 50 Ωm no domínio principal da zona de falha, acompanhada da subida característica da fase em modo TM; e há um segundo limite cerca dos 215 m (B), para lá do qual a resistividade aparente volta a descer, atingindo valores de 15/16 Ωm , e que marca também o limite das arcoses de Côja a ocidente. As arcoses de Côja estão aqui presentes numa faixa com 55-60 m de largura, basicamente numa zona lateral onde a encosta começa a subir; esta faixa marca-se no perfil sensivelmente entre os 215 m e os ~270 m (C). Na área da zona de falha que se estende para SE, as resistividades aparentes estão maioritariamente compreendidas no intervalo 65-110 Ωm , com tendência de decréscimo para SE, atingindo valores da ordem de 50 Ωm junto ao limite de zona de falha oriental, que se marca sensivelmente aos 620 m (D). Aqui, em modo TM, a resistividade aparente sobe de 50 Ωm para valores da ordem dos 300-400 Ωm ; neste modo, o padrão de descida da resistividade aparente/subida da fase, entre os ~580-620 m é indicador de uma faixa mais partida junto ao limite de zona de falha.

Um segundo perfil VLF-R (c-d), na figura 5, permite pôr em evidência que os limites de zona de falha nem sempre se marcam de

forma tão evidente como no perfil anterior. Neste perfil, a oeste, o limite que se marca de forma mais acentuada nas medições VLF-R não é sequer o que tem maior continuidade lateral: trata-se do limite mais externo, que se situa aos ~70 m (E) e é bem visível no perfil DHO (modo TE), não se marcando, contudo, bem no perfil NAA (modo TM). É o segundo limite de zona de falha, sensivelmente aos 140 m (F), que apresenta maior continuidade lateral para NNE e SSW; este limite, mais uma vez, marca-se principalmente no perfil DHO, embora de forma menos acentuada que o precedente. O terceiro limite, por seu turno, cerca dos 215 m (G), marca-se melhor no perfil NAA que no DHO, sendo este que também constitui o limite das arcoses de Côja a ocidente. Na parte da carta atravessada por este perfil, para SE deste limite, são as arcoses de Côja que estão presentes à superfície da área geral da zona de falha; até ao limite de zona de falha presente aos ~580 m (J), as resistividades aparentes nesta área coberta por arcoses de Côja situam-se na quase totalidade abaixo dos 50 Ωm . Entre os ~580 m e ~750 m (K) as resistividades aparentes estão compreendidas

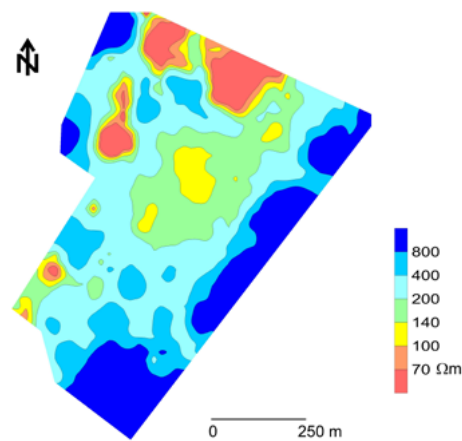


Figura 3. Carta de resistividades aparentes obtida com perfis de resistividade eléctrica Schlumberger com AB = 20 m

Figure 3. Apparent resistivity map obtained with Schlumberger electrical resistivity profiling with AB = 20 m

entre 100-220 Ωm , estando presentes no terreno, inicialmente, ainda as arcoses de Côja (até cerca dos 635 m), após o que vêm as aluviões; neste intervalo, a presença de arcoses de Côja não se marca no perfil, sendo observáveis apenas visualmente – tal indicia que após o limite de zona de falha aos ~580 m (J) a sua possança é muito reduzida. Aos ~750 m (K) temos o limite de zona de falha mais externo, no lado oriental da carta.

É de notar que, neste perfil, o limite de zona de falha principal, a Este, é um outro que não aqueles atrás mencionados: situa-se aos ~490 m (H) e é marcado por uma faixa de muito baixa resistividade aparente, com 35-40 m de largura, tanto no perfil NAA como no DHO. O facto deste limite principal se marcar nas curvas de resistividade aparente de forma bem mais modesta que outros menos relevantes tem a ver com a circunstância das arcoses de Côja, que têm uma resistividade muito baixa, continuarem a estar presentes no lado oriental deste limite de zona de falha (que, evidentemente, é oculto). O que marca bem este limite é a queda acentuada dos valores da fase. Estes valores, na região a oeste do limite, estão próximo dos 45° ou mesmo acima deste valor, o que indica que os terrenos para lá da zona superficial (a maior profundidade) têm uma resistividade semelhante ou inferior à dos que se encontram mais à superfície. A Este deste limite de zona de falha, a fase cai para valores baixos, inferiores a 30°, o que indicia a existência de um terreno inferior com resistividade mais elevada que à superfície e com um forte contraste de resistividade: no contexto geológico em causa, o que temos é uma camada superficial de arcoses de Côja sobre um granito mais são.

A situação acima é evidenciada na secção de resistividade eléctrica 2D da figura 6 (em Wenner-Schlumberger; assinalada na figura 2b). Esta secção tem uma parte inicial sobre as aluviões, um tramo intermédio sobre as arcoses de Côja e uma parte final sobre o

granito. As aluviões apresentam aqui uma resistividade relativamente elevada, correspondendo em parte a um dos pequenos leques aluviais na bordadura das mesmas. O limite com as arcoses de Côja faz-se sensivelmente aos 140 m; à superfície, podendo ir aos 2-3 m de profundidade, estas podem apresentar uma resistividade acima dos 100 Ωm , mas para lá dos primeiros metros, caracteristicamente, é observável um nível destes depósitos arcóscos argilosos com resistividades abaixo dos 30/35 Ωm , com a base irregular, podendo ir aos 15/18 m de profundidade. As arcoses de Côja estão presentes até aos 490/495 m, onde se situa o limite de zona de falha que as limita a Este. Contudo, o limite de zona de falha principal (oculto) situa-se na zona dos 325-360 m; para lá deste limite, em profundidade, as resistividades superiores a 400 Ωm indiciam a presença de granito mais são.

5. Discussão

A diferenciação litológica por gamas de resistividade aparente funciona nesta situação de terreno muito bem entre as aluviões e as arcoses de Côja e dentro das próprias aluviões, desde que se utilize um método geofísico/dispositivo com uma profundidade de investigação adequada, o que foi o caso com um dispositivo eléctrico com comprimento de linha $AB = 20$ m. Há limites de zona de falha que se marcam muito bem, com um contraste muito acentuado de resistividade/resistividade aparente, de um e outro lado do limite, o que é evidenciado no perfil 'a-b' da figura 4 e também nas secções 2D da figura 6. Contudo, outros casos há em que esses limites não se marcam de forma tão evidente: no caso do perfil VLF-R 'c-d' da figura 5 foi determinante usar dois emissores diferentes, orientados para azimutes quase perpendiculares entre si, dando-se a situação de alguns limites de zona de falha se marcarem melhor com NAA ou com DHO; o uso do par resistividade aparente/ fase mostrou-se determinante na marcação do limite de zona de falha aos ~490 m (Figura 5) e na interpretação mais geral da situação de terreno nesse local.

Da análise de resultados e dos vários limites de zona de falha considerados, resulta que esta zona de falha em particular não é definida por um limite único por ocidente e outro limite único por oriente – os limites são múltiplos. É contudo possível definir um 'domínio

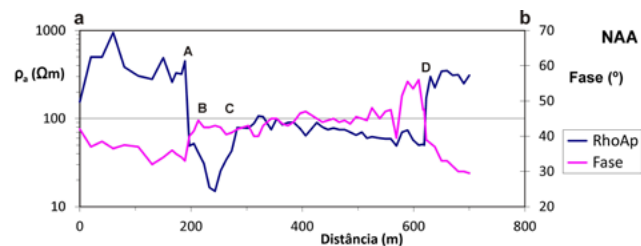


Figura 4. Perfil VLF-R 'a-b' (emissor NAA; modo TM).

Figure 4. 'a-b' VLF-R profile (NAA transmitter; TM mode).

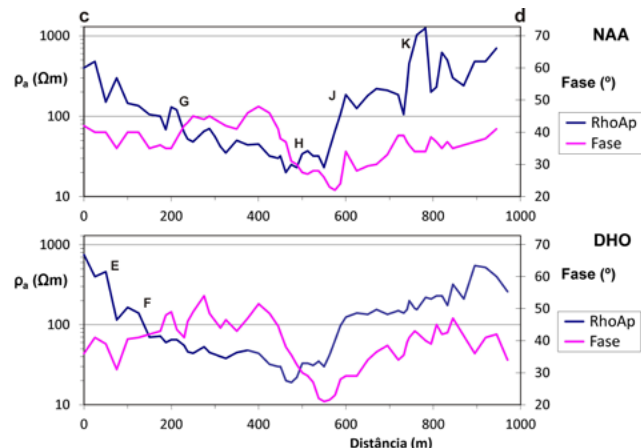


Figura 5. Perfil VLF-R 'c-d' (emissores NAA e DHO).

Figure 5. 'c-d' VLF-R profile (NAA and DHO transmitters).

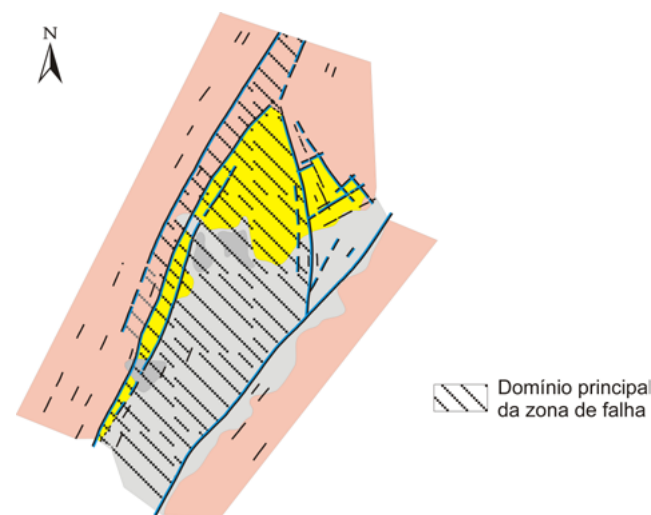


Figura 7. Carta geológica da região a NE de Arcozelo, com delimitação do domínio principal da zona de falha.

Figure 7. Geological map of the area to the NE of Arcozelo, with delimitation of the main domain of the fault zone.

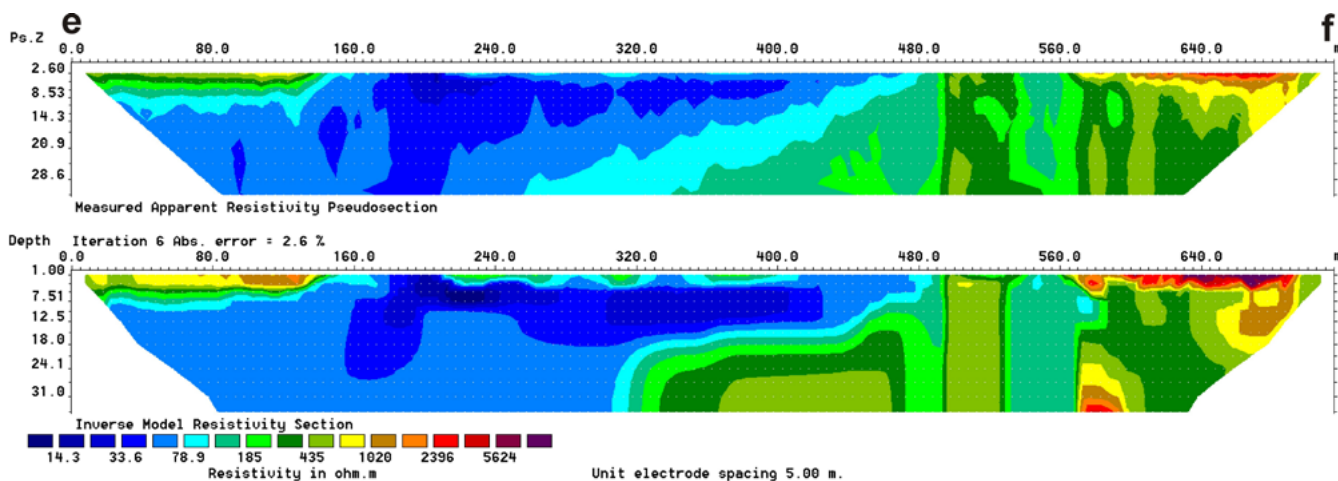


Figura 6. Pseudo-seção de resistividades aparentes e correspondente secção de resistividade obtida por inversão (dispositivo Wenner-Schlumberger).

Figure 6. Apparent resistivity pseudo-section and corresponding inverse model resistivity section (Wenner-Schlumberger array).

principal da zona de falha' (DPZF), com base na continuidade dos limites e da sua relevância em termos locais (Figura 7). Em particular, a ocidente, no granito, há diversos limites que se marcam num perfil mas que não têm continuidade lateral nos perfis adjacentes: a imagem que resulta é a de uma região no granito, adjacente ao DPZF, onde a rocha fractura e altera acentuadamente aqui e ali. O limite mais ocidental do DPZF (Figura 7), com continuidade lateral nos vários perfis, é também aquele que constitui o bordo oeste principal da falha/zona de falha com carácter regional que se prolonga para NNE; este limite é duplicado parcialmente por um segundo (e terceiro) limite de zona de falha que delimita por ocidente uma faixa de arcoses de Côja, e que constitui o limite do DPZF para SSW. A Este, o limite do DPZF corresponde ao bordo principal da falha N45°E. Globalmente, o DPZF alarga de SW para NE entre as duas falhas regionais até atingir ~500 m de largura máxima, momento em que começa a fechar para N, inflectindo posteriormente para NNW. Na extremidade NE da carta há uma mancha de arcoses de Côja, contígua à restante, mas externa ao DPZF, que é controlada e delimitada por múltiplos limites de zona de falha secundários; aqui, as medições em VLF-R e 2D mostram que sob as arcoses de Côja está presente um granito mais são.

6. Conclusão

A título de notas finais, há a sublinhar que os métodos geofísicos utilizados, que têm por base a medição do parâmetro resistividade eléctrica – VLF-R, conjuntamente com métodos 2D e perfis de resistividade eléctrica – permitiram com sucesso a realização de uma cartografia de pormenor no vale do Arcozelo, num contexto de observação directa difícil; há a sublinhar, também, a complementaridade

dos métodos usados em vista aos resultados obtidos. De modo específico, os métodos usados permitiram com sucesso a cartografia das manchas de aluviões e arcoses de Côja existentes nesta área, em particular dos seus limites, entre si e com o granito; e foram determinantes na detecção e posicionamento dos limites de zona de falha, que são ocultos ou não observáveis em afloramento na quase totalidade dos casos.

Referências

- Cabral, J., Rebelo, J., Ribeiro, A., 1985. Neotectónica de Trás-os-Montes Oriental. *Boletim da Sociedade Geológica de Portugal*, **14**: 193-197.
- Cunha, P. P., 1999. Unidades litostratigráficas do Terciário na região de Miranda do Corvo - Viseu (Bacia do Mondego - Portugal). *Comunicações do Instituto Geológico e Mineiro*, **86**: 143-196.
- Cunha, P. P., 2019. Cenozoic Basins of Western Iberia: Mondego, Lower Tejo and Alvalade basins. In: Quesada, C., Oliveira, J. T. (Eds.), *The Geology of Iberia: A Geodynamic Approach*. Regional Geology Reviews, Springer International Publishing, 105-130. DOI: 10.1007/978-3-030-11190-8.
- Severo Gonçalves, L., Araújo, J. R. F., Ferreira Pinto, A. F., Fonseca, E. C., Serrano Pinto, M. C., 1990. *Folha 17-B Fornos de Algodres da Carta Geológica de Portugal na escala 1/50 000*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Teixeira C., Brito de Carvalho, L. H., Paula Santos, J., Martins Peres, A., Barros, R. F. (Coords.), 1967. *Notícia Explicativa da Folha 17-D Gouveia da Carta Geológica de Portugal na escala 1/50 000*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 28.