

# Geometria de rochas granitóides através da inversão de dados de campo-potencial na região centro de Portugal

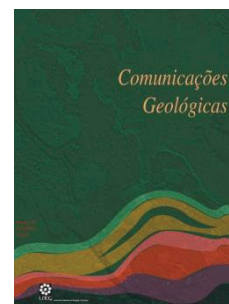
## Granitoid rocks geometry through potential-field data inversion in central Portugal

A. Machadinho<sup>1\*</sup>, F. Figueiredo<sup>1</sup>, A. Pereira<sup>2</sup>

Recebido em 27/02/2018 / Aceite em 16/12/2019

Publicado em agosto de 2020

© 2020 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP



Artigo original  
Original article

**Resumo:** O principal objectivo deste trabalho é conhecer em profundidade a geometria das rochas granitóides e, deste modo, contribuir com dados relevantes para a avaliação do potencial geotérmico na região. A área em estudo localiza-se na região centro de Portugal, onde afloram rochas granitóides variscas pertencentes ao batólito granítico das Beiras, que intruíram as seqüências metassedimentares do Complexo Xisto-Grauváquico. Para tal, realizaram-se campanhas de prospecção geofísica, por métodos gravimétricos e magnéticos, que permitem obter as cartas das anomalias de campo-potencial. Estas anomalias são modeladas em conjunto, demonstrando que a fracturação regional condiciona a geometria dos granitos e da seqüência encaixante. A estimativa da profundidade média e máxima dos corpos graníticos é de 5 km e de 11,6 km. O estudo desenvolvido mostra que as áreas com maior potencial geotérmico e mais promissoras para as aplicações geotérmicas, localizam-se em zonas de fraqueza estrutural e onde os corpos graníticos apresentam maior espessura.

**Palavras chave:** Anomalia de Bouguer, anomalia magnética, inversão, granitos, potencial geotérmico.

**Abstract:** The main goal of this work is to obtain a better understanding of the subsurface geometry of the granitic rocks in the central Portugal region for the assessment of the geothermal potential of the region. The study area is located in the Centro Iberian Zone where the Beiras granite batholiths outcrop. These granitoids were emplaced into the metasedimentary sequences of the Complexo Xisto-Grauváquico (CXG) and are attributed to the magmatic activity associated to the post-collisional stages of the Variscan orogeny during the D<sub>3</sub> stage. To achieve the study goal, magnetic and gravimetric surveys were performed in order to obtain the Bouguer and magnetic anomalies. Considering and integrating all the available geological and geophysical data the mentioned potential fields were simultaneously modelled. In this way it was possible to characterize the subsurface geometry of the granitic bodies in the region (Tábua-Santa Comba Dão (TSCD) and Serra da Estrela (SE) plutons). The modelling results show that the regional tectonic setting controls the geometry of the granitic rocks as well as the structure of the CXG sequence. Through the modelling of the potential field the overall geometry of the granitic bodies in the study area was obtained. The modelled average depth for the granitic bodies is 5 km, with a maximum depth of 11.6 km. This study demonstrates that the areas with greatest potential for future geothermal applications are located in zones of structural weakness and where the granitic bodies have a greater thickness.

**Keywords:** Bouguer anomaly, magnetic anomaly, inversion, granites, geothermal potential.

<sup>1</sup> Centro de Geociências, Rua Sílvio Lima, Pólo II, Universidade de Coimbra, 3030-790 Coimbra, Portugal.

<sup>2</sup> CITEUC – Centro de Investigação da Terra e do Espaço, Universidade de Coimbra, Almas de Freire - Sta. Clara, 3040-004 Coimbra, Portugal.

\* Autor correspondente/corresponding author: ana.machadinho@gmail.com

### 1. Introdução

A prospecção geofísica constitui um método indirecto para inferir o conhecimento geológico em subsuperfície, tendo um papel importante na pesquisa de recursos minerais e energéticos. A prospecção gravimétrica e magnética tem sido amplamente aplicada na definição da geometria em profundidade de rochas intrusivas. A integração de estudos geológicos e geofísicos resultou em avanços significativos na compreensão da formação de intrusões graníticas e na identificação de possíveis zonas de alimentação magmática (Améglio e Vignerresse, 1999).

Com a crescente importância das energias renováveis e sustentáveis, os recursos geotérmicos, pela sua disponibilidade e dimensão dos reservatórios, constituem uma promissora estratégia energética. Considerando este contexto, o principal objectivo deste estudo é conhecer em profundidade a geometria das rochas granitóides aflorantes na região centro de Portugal e, desta forma, contribuir com dados relevantes para a avaliação do potencial geotérmico na região.

### 2. Enquadramento geológico

A área em estudo localiza-se na região centro de Portugal, entre Mortágua e a Serra da Estrela, e enquadra-se no Maciço Hespérico, no sector da Zona Centro-Ibérica (ZCI). O Maciço Hespérico representa o segmento mais ocidental da cadeia Varisca europeia, sendo representado por formações ante-mesozóicas, deformadas e caracterizadas por metamorfismo de intensidade variável, e presença de abundante plutonismo granítico. As rochas granitóides aflorantes pertencem ao batólito granítico das Beiras formado aquando dos principais ciclos de actividade magmática varisca, sendo estes granitos considerados sin-D<sub>3</sub> e tardi-pós-D<sub>3</sub>. As rochas granitóides intruíram as seqüências metassedimentares ante-ordo-

víscas do Complexo Xisto-Grauváquico (CXG), variavelmente afectadas pela deformação polifásica varisca (Fig. 1).

Na região estão bem marcados os sistemas de fracturação NNE-SSW, como as falhas de Penacova-Régua-Verín (FPRV) e de Manteigas-Vilaríça-Bragança (FMVB), e NE-SW, como a falha de Lousã-Seia (FLS). Estas estruturas são reactivadas no Cenozóico, em consequência da orogenia Alpina. As falhas tardivariscas NNE-SSW são reactivadas predominantemente como desligamentos esquerdos, enquanto a estrutura da FLS funciona como falha inversa com componente cavalgente (Cabral, 1995), constituindo o limite norte da Cordilheira Central, sistema ao qual pertence a Serra da Estrela. Estes sistemas de fracturação propiciam abundante termalismo regional, sendo evidenciada em algumas nascentes termais a presença de circulação profunda de fluidos em zona de falha, constituindo potenciais áreas para a exploração de recursos geotérmicos (Fig. 1).

### 3. Dados de campo-potencial

Na área em estudo realizaram-se campanhas no terreno de prospecção gravimétrica e magnética, tendo-se registado 749 e 225 pontos de amostragem de gravidade e de magnética (Fig. 2). Os dados foram processados, tendo sido aplicadas as correcções padrão necessárias e construídas as respectivas malhas. No caso dos dados de gravidade foi aplicada a redução gravimétrica padrão, tendo sido usada uma densidade de Bouguer de  $2,67 \text{ g.cm}^{-3}$ . De forma a simplificar a interpretação das anomalias magnéticas e facilitar a

sua correlação com as anomalias gravimétricas, foi aplicado o filtro de redução ao pólo magnético. Na figura 2 apresentam-se os mapas de anomalia de Bouguer completa (BC) e da anomalia magnética reduzida ao pólo (MRP) da área em estudo. No mapa da anomalia de BC os valores estão compreendidos entre os -30 e os 38 mgal, sendo reconhecida uma correlação bem marcada nas variações de densidade ( $\rho$ ) e as unidades geológicas cartografadas na região. Os valores inferiores da anomalia de BC estão preferencialmente relacionados com as rochas menos densas, neste caso as rochas granitóides. Enquanto os valores superiores da anomalia de BC estão associados às rochas encaixantes, mais densas, constituídas pelo CXG (Figs. 1 e 2a). O mapa da anomalia MRP apresenta valores entre -137 e 109 nT, estando os valores superiores da anomalia relacionados com as rochas que apresentam maior susceptibilidade magnética ( $k$ ), neste caso o CXG, e os valores inferiores da anomalia estão preferencialmente relacionados com as rochas granitóides (Figs. 1 e 2b). No sector da Serra da Estrela a maioria dos granitos são paramagnéticos ( $k \sim 10^{-6} \text{ SI}$ ), estando a sua resposta magnética dependente do conteúdo em ferro presente nos silicatos ferromagnesianos (como a biotite) e na presença de ilmenite (Sant'Ovaia *et al.* 2013).

### 4. Inversão dos dados de campo-potencial

A modelação de anomalias de campo potencial é considerada intrinsecamente ambígua, isto é, modelos geológicos distintos podem produzir o mesmo campo potencial observado à superfície.

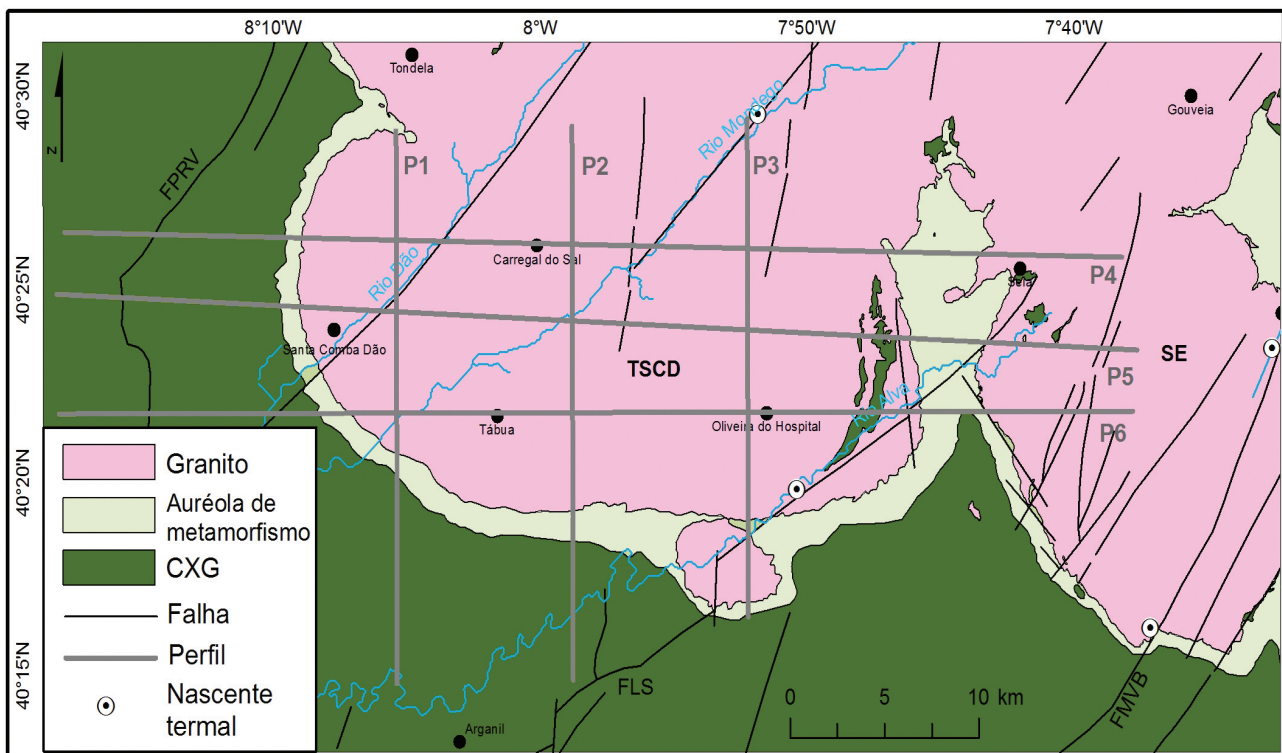


Figura 1. Mapa geológico da área em estudo e localização dos perfis modelados (FLS – falha Lousã-Seia, FPRV – falha Penacova-Régua-Verín e FMVB – falha Manteigas-Vilaríça-Bragança; Plutões graníticos: TSCD – Tábua-Santa-Comba-Dão e SE – Serra da Estrela). Adaptado da Carta Geológica de Portugal 1:500 000 (Carvalho *et al.*, 1992) e da Carta Geotectónica das Beiras 1: 250 000 (JEN, 1968).

Figure 1. Geological map of the study area and modelled profiles location (FLS – Lousã-Seia fault, FPRV – Penacova-Régua-Verín fault and FMVB – Manteigas-Vilaríça-Bragança fault; Granitic plutons: TSCD – Tábua-Santa-Comba-Dão and SE – Serra da Estrela). Adapted from Geological Map of Portugal 1: 500 000 (Carvalho *et al.*, 1992) and Geotectonic Map from Beiras 1: 250 000 (JEN, 1968).

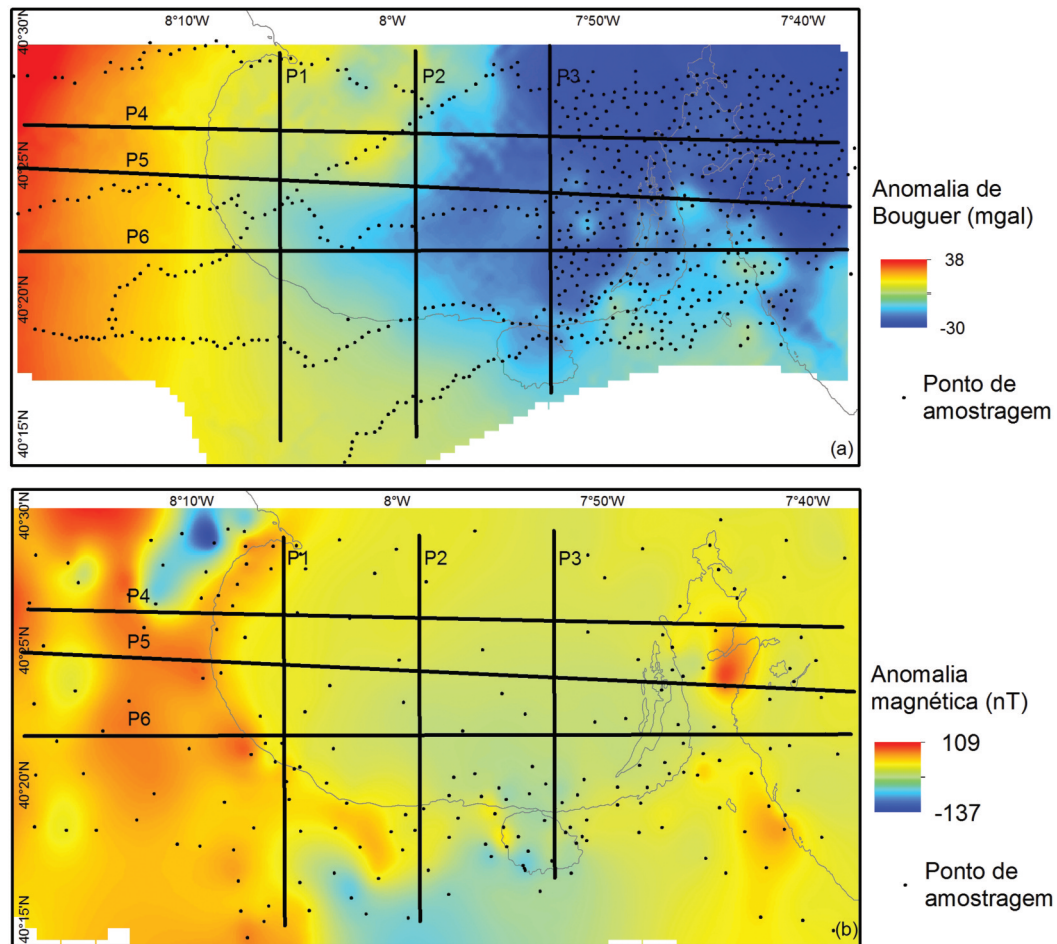


Figura 2. Mapas das anomalias de campo-potencial e localização dos perfis modelados (linha cinzenta indica o contacto geológico entre o granito e o encaixante). (a) Mapa da anomalia de Bouguer completa; (b) mapa da anomalia magnética reduzida ao pólo.

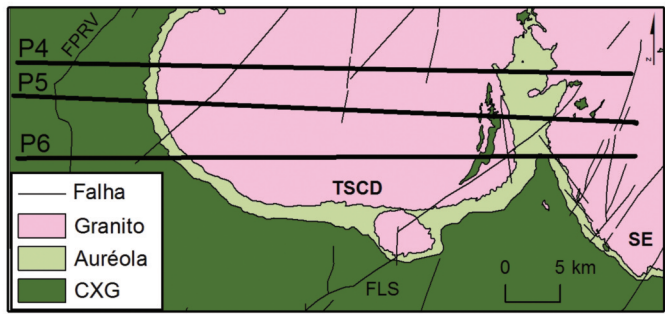
Figure 2. Potential-field anomalies maps and modelled profiles location (gray line represents the geologic contact between granite and host rock). (a) Complete Bouguer anomaly map; (b) reduced to the pole magnetic anomaly map.

No entanto, esta ambiguidade pode ser atenuada integrando toda a informação geológica e geofísica disponíveis na área em investigação (cartografia geológica, propriedades físicas das rochas e diversos métodos de prospecção geofísica) (Saltus e Blakely, 2011). A modelação quantitativa indirecta de anomalias de campo potencial permite obter estimativas de diversos parâmetros (localização, profundidade, geometria e contraste de propriedades físicas) que caracterizam os corpos-fonte causadores das anomalias observadas. Com recurso a programas informáticos de inversão de campos potenciais por ajustes iterativos, considerando toda a informação geológica regional e as propriedades físicas das rochas, as anomalias de BC e MRP foram modeladas em conjunto segundo 6 perfis 2,75D (Fig. 2). Em Machado (2014) pode ser consultada a informação das propriedades físicas (densidade ( $\rho$ ), susceptibilidade magnética ( $k$ ) e profundidade ( $z$ )) definidas para cada unidade geológica considerada na modelação, assim como os respectivos modelos dos perfis magnético-gravimétricos. A modelação iterativa foi realizada no *software Oasis montaj*, extensão *GM-SYS*. No cálculo da resposta geofísica em 2D, o *GM-SYS* utiliza métodos baseados em programas tipo *Talwani* (Talwani *et al.*, 1959; Talwani e Heirtzler, 1964) e no algoritmo descrito por Won e Bevis (1987). A modelação de corpos de dimensão 2,5D e 2,75D baseia-se na formulação analítica desenvolvida por Rasmussen e Pedersen (1979).

## 5. Geometria das rochas granitóides

A partir dos perfis 2,75D modelados construiu-se um modelo de densidade/susceptibilidade magnética tridimensional, que mostra a geometria irregular dos corpos graníticos, estando as variações de profundidade do granito condicionadas pela fracturação regional. Salienta-se a fracturação de direcção geral NE-SW, nomeadamente o alinhamento do rio Mondego (Fig. 1), que condiciona a espessura do plutão de TSCD. No perfil P4 pode-se observar uma diminuição brusca para Oeste e um aumento para Este da espessura deste plutão (Fig. 3). O plutão de TSCD apresenta uma forma achatada, com profundidade mínima de 0,2 km e máxima de 11,6 km. Este corpo granítico não está individualizado aflorando em continuidade com outros plutões que constituem a mancha granítica do batólito das Beiras. Como o plutão da Serra da Estrela, que apresenta forma semi-circular, profundidade mínima de 4 km e máxima de 8 km.

A geometria irregular dos granitos vem denunciar a influência da fracturação regional também na sequência encaixante. Os granitos terão intruído em planos de fraqueza estrutural que favoreceram a ascensão magmática, com expansão do magma e preenchimento preferencial dos espaços com menor tensão. Tal sugere uma instalação dos corpos intrusivos através de falhas activas, com



Granito Auréola de metamorfismo CXG

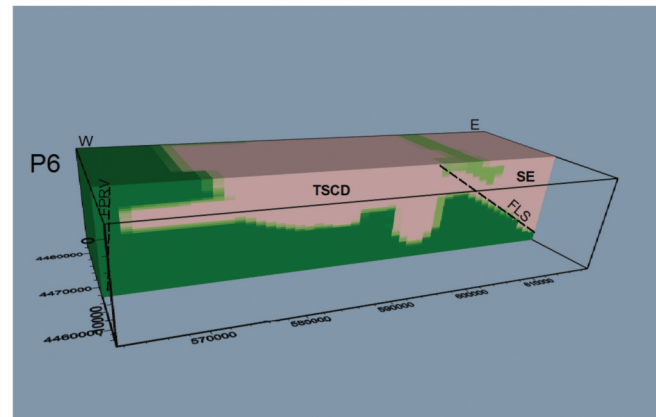
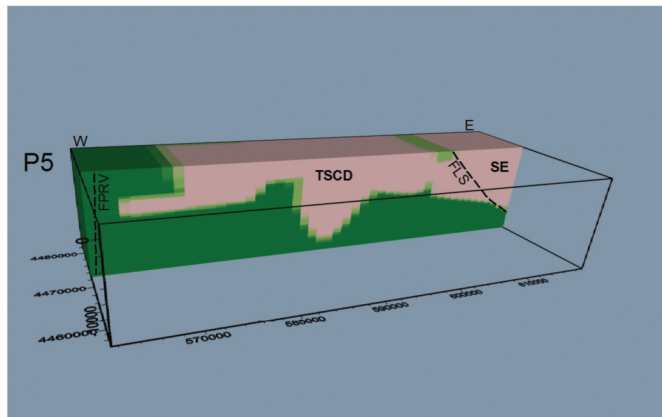
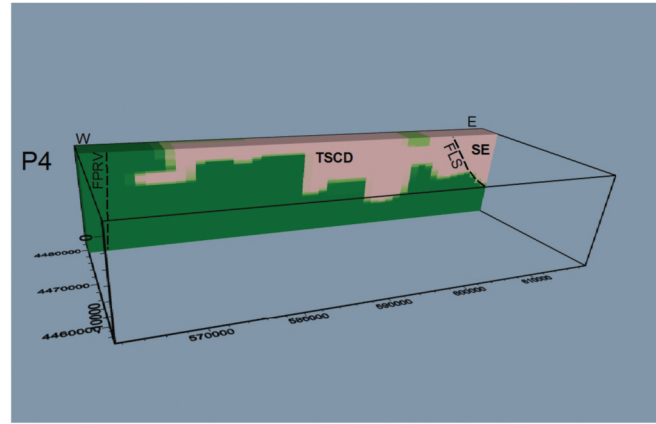


Figura 3. Representação tridimensional do modelo de densidade/susceptibilidade magnética (FLS – falha Lousã-Seia e FPRV – falha Penacova-Régua-Verín; Plutões graníticos: TSCD – Tábua-Santa-Comba-Dão e SE – Serra da Estrela).

Figure 3. Three-dimensional representation of the density/magnetic susceptibility model (FLS – Lousã-Seia fault and FPRV – Penacova-Régua-Verín fault; Granitic plutons: TSCD – Tábua-Santa-Comba-Dão and SE – Serra da Estrela).

formação de plutões concordantes ou discordantes consoante actua ou não deformação regional.

No presente modelo não são evidentes as zonas de alimentação magmática sob o plutão de TSCD. No entanto, dada a continuidade em profundidade dos plutões de TSCD e da SE, e sendo-lhe atribuída uma idade similar (granitóides tardi-pós  $D_3$ ), poderá inferir-se a presença de uma zona de alimentação (ou mais que uma) comum aos dois plutões. Esta zona de alimentação magmática poderá localizar-se onde o granito apresenta uma maior espessura e contacta directamente com a crosta média. Estas condições são satisfeitas a Este da FLS onde o plutão da SE apresenta uma profundidade máxima de 8 km. Deste modo, ter-se-ia instalado o plutão da SE com a propagação do granito para Oeste, dando origem ao corpo de TSCD localizado no bordo do batólito das Beiras (Fig. 3). Este modelo é suportado por outras evidências, como a forma e o zonamento semi-circular do plutão da SE, que é geometricamente consistente com a presença de uma zona de alimentação em profundidade (Sant’Ovaia *et al.*, 2010). Por outro lado, a presença de nascentes termais associadas às principais falhas activas na região e suas direcções conjugadas, demonstram que estamos em presença de uma circulação profunda de fluidos na zona de falha, podendo evidenciar uma maior profundidade dos corpos granitóides e/ou a possibilidade de coincidente localização de zonas de alimentação magmática. Refere-se no plutão de TSCD a nascente termal associada à FLS e no plutão da SE as nascentes associadas

à FMVB onde os granitos atingem profundidades de 7 km e 8 km, respectivamente (Figs. 1 e 3).

## 6. Considerações finais

A modelação demonstra que a fracturação regional condiciona a geometria dos corpos graníticos e da sequência do CXG, sendo observadas as principais direcções de alinhamentos estruturais característicos na região. O modelo de densidade/susceptibilidade magnética resultante caracteriza as estruturas geológicas em profundidade e nomeadamente define uma geometria para os principais plutões graníticos aflorantes na região (TSCD e SE). No modelo proposto a estimativa da profundidade média dos corpos graníticos é de 5 km, com uma profundidade mínima de 0,2 km e máxima de 11,6 km.

De acordo com os dados obtidos neste estudo, as áreas com valores da anomalia de Bouguer inferiores coincidem com zonas de maior espessura dos corpos graníticos. Estas áreas, em particular quando associadas a alinhamentos estruturais activos, podem ser vistas como áreas promissoras para a prospecção e pesquisa de recursos geotérmicos, de baixa ou alta entalpia. Considerando um gradiente geotérmico médio na crosta de  $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$  podemos atingir  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  na base de um granito com 5 km de profundidade. No modelo apresentado os granitos atingem espessura superior a 5 km em diversas zonas, nomeadamente no quadrante sudoeste do plutão de TSCD e nas regiões graníticas a Este da FLS, no plutão da SE (Fig. 3).

Desta forma, o estudo desenvolvido constitui uma importante contribuição para a futura avaliação do potencial geotérmico na região em estudo, uma vez que o conhecimento da espessura dos granitos, entre outros parâmetros, é imprescindível para a execução de uma modelação geotérmica mais realista.

### Agradecimentos

Trabalho financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito da Bolsa de Doutoramento SFRH/48628/2008 e do projeto de investigação UID/Multi/00073/2013 do Centro de Geociências da Universidade de Coimbra. Agradece-se os comentários dos revisores que contribuíram para melhorar este trabalho.

### Referências

- Améglio, L., Vigneresse, J. L., 1999. Geophysical imaging of the shape of granitic intrusions at depth: a review. In: A. Castro, A., Fernández, C., Vigneresse J. L. (Eds.), *Understanding granites: integratin g new and classical technique*, Special Publications, Geological Society, London, **168**: 39-54.
- Cabral, J., 1995. Neotectónica em Portugal Continental. *Memórias do Instituto Geológico e Mineiro*, **31**: 265.
- Carvalho, D., Oliveira, J. T., Pereira, E., Ramalho, M., Antunes, M. T., Monteiro, J. H., 1992. *Carta Geológica de Portugal à escala 1:500 000*, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- JEN, 1968. *A província uranífera do centro de Portugal: suas características estruturais, tectónicas e metalogénicas*. Junta de Energia Nuclear – JEN, Lisboa, 131.
- Machadinho, A., 2014. *Modelação da geometria de rochas granitóides recorrendo a métodos geofísicos gravimétricos e magnéticos: uma contribuição para a avaliação do potencial geotérmico na região Centro de Portugal*. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, 320.
- Rasmussen, R., Pedersen, L. B., 1979. End corrections in potential field modeling. *Geophysical Prospecting*, **27**: 749-760.
- Saltus, R. W., Blakely, R. J., 2011. Unique geologic insights from “non-unique” gravity and magnetic interpretation. *GSA Today*, **21**(12): 4-11.
- Sant’Ovaia, H., Olivier, P., Ferreira, N., Noronha, F., Leblanc, D., 2010. Magmatic structures and kinematics emplacement of the Variscan granites from Central Portugal (Serra da Estrela and Castro Daire areas). *Journal of Structural Geology*, **32**(10): 1450-1465.
- Sant’Ovaia, H., Martins, H., Noronha, F., 2013. Oxidized and reduced portuguese variscan granites associated with W and Sn hydrothermal lode deposits: magnetic susceptibility results. *Comunicações Geológicas*, **100**(1): 33-39.
- Talwani, M., Heirtzler, J. R., 1964. Computation of magnetic anomalies caused by two dimensional bodies of arbitrary shape. In: Parks, G. A., (Ed.), *Computers in the mineral industries*, Part I. Stanford Univ. Publ. Geological Sciences, **9**: 464-480.
- Talwani, M., Worzel, J. L., Landisman, M., 1959. Rapid gravity computations dor two dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. *Journal of Geophysical Research*, **64**(1): 49-59.
- Won, I. J., Bevis, M., 1987. Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon; algorithms and Fortran subroutines. *Geophysics*, **52**(2): 232-238.