

“

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLOGICOS

Homenagem ao Professor Doutor Manuel Maria Godinho

”

L.J.P.F. NEVES, A.J.S.C. PEREIRA,
C.S.R. GOMES, L.C.G. PEREIRA,
A.O. TAVARES

IMPRESA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA
COIMBRA UNIVERSITY PRESS

MODELAÇÃO DE SISTEMAS GEOLÓGICOS

Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho

Modelos de anisotropia da susceptibilidade magnética *versus* modelação de processos geológicos

Celeste Gomes¹; Helena Sant’Ovaia²

¹Centro de Geofísica, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, PORTUGAL
romualdo@dct.uc.pt

²DGAOT e Centro de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, PORTUGAL
hsantov@fc.up.pt

Palavras-chave: Modelos, Anisotropia da Susceptibilidade Magnética, Processos geológicos

Resumo

O objectivo principal deste estudo consistiu em apresentar as noções essenciais do significado de modelo, dos modelos da Susceptibilidade Magnética e da Anisotropia da Susceptibilidade Magnética (ASM) e mostrar a possibilidade do desenvolvimento de modelos científicos, também ditos consensuais, para a interpretação de maciços graníticos da Geologia de Portugal. Os modelos com base nos dados da ASM, analisados neste estudo, contribuíram para uma compreensão diferente dos subsistemas estudados e têm ainda o mérito de constituírem *teaching models*, para exemplos da Geologia de Portugal.

Key-words: *Models, Anisotropy of magnetic susceptibility, Geological processes*

Abstract

The main goal of this study was to present the essential concepts of a model, of the models of Magnetic Susceptibility and Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) and to show the possibility of developing scientific models for the interpretation of granitic massifs of the Geology of Portugal. The models based on AMS data analyzed in this study contributed to a different understanding of the subsystems studied and are important “teaching models” for examples of the Geology of Portugal.

Introdução

A modelação é um processo importante na resolução de problemas de investigação em Ciência e, em particular, em Geologia. É igualmente importante no ensino e aprendizagem de temas e subtemas de Geologia.

A palavra modelo pode ser entendida com significados diferentes. Em linguagem científica, a palavra apresenta também significados diversos. Neste estudo, assumimos o termo modelo, no sentido de Gilbert e Boulter (2000) e de Prins *et al.*, (2008), como uma representação estruturada, incluindo elementos simbólicos, das características essenciais de uma ideia, um objecto, um processo, um subsistema, ou um sistema. O termo modelação significa construção, avaliação e/ou revisão de um modelo em resposta a um problema específico (Gobert e Buckley, 2000; Prins *et al.*, 2008). As representações dos modelos poderão ser pictóricas (mapas, gráficos, esquemas, desenhos) ou linguísticas.

Assim, podemos escrever sobre modelos da susceptibilidade magnética (SM), da Anisotropia da Susceptibilidade Magnética (ASM) e da obtenção de dados de ASM e sobre modelos que traduzem a interpretação destes dados em casos de aplicação a processos e objectos geológicos. Os primeiros resultam da evolução do conhecimento e, actualmente, podemos encontrar descrições e exemplos em manuais (*e.g.* Tarling e Hrouda, 1993), em dissertações académicas (*e.g.* Sant'Ovaia, 2000) e em artigos. Por sua vez, existem equipamentos comerciais com software específico e que permitem aplicar modelos estabelecidos e obter os dados necessários para a criação doutros que descrevem e traduzem os processos geológicos e o resultado destes processos. Estes últimos são habitualmente modelos expressos, por exemplo, sob a forma de mapas, gráficos ou esquemas, podendo também ser matemáticos, e consensuais em especial se, quando antes de publicados, forem revistos e aceites por membros da comunidade científica.

O objectivo principal deste estudo consistiu em apresentar as noções essenciais de modelo, dos modelos da SM e da ASM e mostrar a possibilidade do desenvolvimento de modelos científicos expressos, também ditos consensuais, para a interpretação de maciços graníticos da Geologia de Portugal, tendo por base colecções de dados de SM e ASM.

Modelos da Susceptibilidade Magnética

A SM, K , define-se como a capacidade que um mineral ou uma rocha têm em se magnetizar na presença de um campo magnético e traduz-se pela relação matemática: $M=KH$, em que M representa a magnetização e H o campo aplicado. No Sistema Internacional, a SM, por volume, é uma grandeza adimensional.

A susceptibilidade absoluta da amostra é dada pela fórmula $K_{LF} = kd + Kp + Kaf + Kf$ que traduz a soma das diferentes respostas da amostra

(diamagnética, paramagnética, antiferromagnética e ferromagnética) (e.g. Borradaile, Henry, 1997).

Modelos da Anisotropia da Susceptibilidade Magnética

A ASM numa amostra de rocha, como em qualquer corpo anisotrópico, traduz-se por um tensor de 2ª ordem representado por um elipsóide cujos eixos principais, $K_{max} \geq K_{int} \geq K_{min}$, são determinados, em orientação e magnitude, pelas contribuições dos minerais individuais. Um conjunto de grãos minerais numa rocha gera uma ASM, que combina o alinhamento estatístico dos seus eixos e/ou direcções de fácil magnetização (Stacey e Banerjee, 1974; O'Reilly, 1984).

A ASM, para cada amostra de rocha, é o modelo que representa a variação da susceptibilidade magnética, em função da direcção. Combina, assim, a contribuição dos *fabric*s magnéticos de todos os minerais presentes na rocha, que podem ser ferromagnéticos *s.l.* (ferromagnéticos *s.s.*, ferrimagnéticos e antiferromagnéticos), paramagnéticos e diamagnéticos, e é controlada pela sua orientação cristalográfica, associada à composição mineralógica da rocha e à forma do *fabric* de cada grão, para além de considerar a distribuição e o tamanho de microfracturas presentes. Assim, cada mineral e cada rocha possuem ASM distintas (Borradaile, 2001; Parés e Pluijm, 2002).

A configuração espacial e geométrica dos minerais de uma rocha pode ser traduzida através dos estudos da AMS e é, normalmente, determinada a partir de medidas de susceptibilidade em campo fraco (< 1 mT). O modelo que melhor representa a variação da susceptibilidade com a direcção é um elipsóide de susceptibilidade magnética (Figura 1) (Tarling e Hrouda, 1993; Pares e Pluijm, 2002).

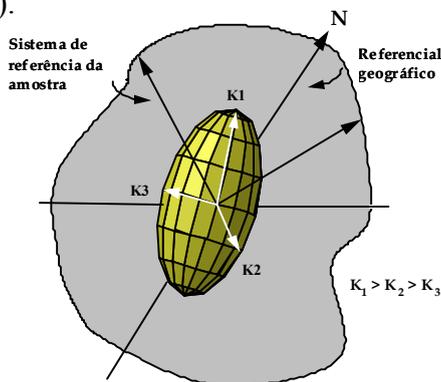


Figura 1. Modelo de elipsóide de susceptibilidade magnética.

Os três eixos ortogonais do elipsóide representam a SM segundo 3 direcções correspondentes aos eixos máximo, intermédio e mínimo, descritos, respectivamente, por K_1 (ou K_{\max}), K_2 (ou K_{int}) e K_3 (ou K_{\min}), em que a intensidade de magnetização maior é induzida ao longo do eixo maior, K_1 , e a intensidade mais fraca ao longo do eixo menor, K_3 (Tarling e Hrouda, 1993; Pares e Pluijm, 2002). Muitas vezes considera-se que as orientações dos eixos da ASM apresentam uma correlação directa com as direcções das tensões principais (e.g. Hrouda, 1982; Borradaile e Henry, 1997; Pares e Pluijm, 2002).

Os valores dos eixos de susceptibilidade descrevem o elipsóide da SM (Figura 2). Assim, se $K_1 \approx K_2 \approx K_3$, a forma geométrica será uma esfera e a susceptibilidade uma propriedade isotrópica. Se $K_1 > K_2$ e $K_2 \approx K_3$, estes dois eixos distribuir-se-ão na mesma direcção, criando um *fabric* linear, e o elipsóide é prolato (em forma de charuto). Se $K_1 \approx K_2$ e $K_2 > K_3$, os primeiros distribuem-se num plano, criando um *fabric* foliado, e o elipsóide é oblato (achatado, com uma forma discoidal). Finalmente, se $K_1 > K_2 > K_3$, o elipsóide é plano-linear (Winkler *et al.*, 1997; Butler, 1992; Borradaile, 2001).

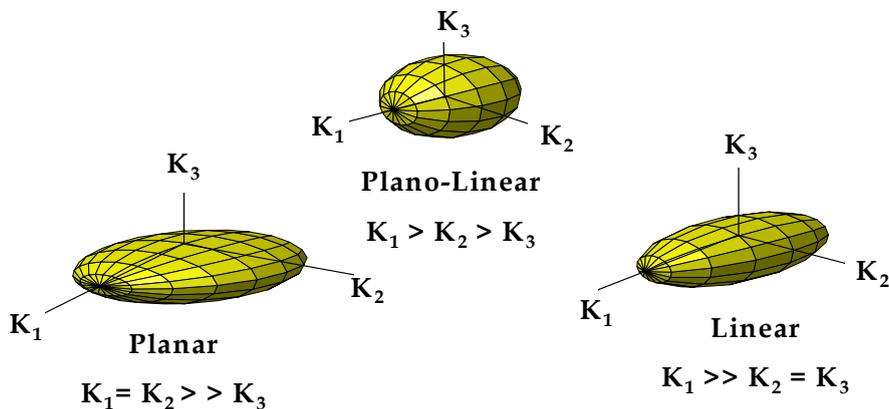


Figura 2. Modelos de elipsóides de ASM.

Metodologia

A metodologia usada na realização deste estudo consistiu na: 1) selecção de trabalhos de investigação sobre modelos e modelação; 2) selecção de

trabalhos sobre ASM e suas aplicações na modelagem de processos e objectos geológicos, especialmente, casos de aplicação em unidades da Geologia de Portugal; 3) na análise de representações e modelos para um entendimento da SM e da ASM aplicados em maciços graníticos da Geologia de Portugal.

Os trabalhos de investigação sobre modelos e modelagem são desenvolvidos, habitualmente, numa perspectiva do ensino, da aprendizagem e da construção de conhecimentos. Contudo, os modelos para o ensino e para a aprendizagem (*teaching models and learning models*) são construídos a partir dos modelos científicos e consensuais criados, revistos e aceites pelos investigadores. A importância dos modelos, apesar de serem sempre incompletos, consiste, neste caso, em permitir um melhor entendimento das representações obtidas a partir da interpretação de conjuntos de dados, medidos em equipamentos laboratoriais específicos, balanças de susceptibilidade ou susceptibilímetros. Neste contexto, são importantes os modelos mentais de todos os intervenientes. “*Norman’s (1983) distinguishes not only the learners’ mental models but also the scientist’s and designer’s conceptual models of the system, as well as the researchers’ conceptualization of the learner’s mental models.*” (Buckley *et al.*, 2004, p. 24).

Os trabalhos de ASM são muito específicos e com interesse para uma comunidade científica restrita. Contudo, podem também constituir recursos para o ensino e a aprendizagem nos domínios referidos acima e que se adequam ao ensino universitário. Para este estudo, seleccionámos, como foi dito, trabalhos de índole geral e outros desenvolvidos em unidades da Geologia de Portugal.

Modelos a Partir dos Dados da ASM

Os estudos da ASM, ou *fabric* magnético, em aplicações quantitativas e semi quantitativas passaram a ter grande divulgação, especialmente, desde Tarling e Hrouda (1993), embora existam muitos trabalhos anteriores, como se pode perceber através da leitura da obra citada. Como exemplo histórico, refere-se que John W. Graham, em 1954, escreveu um artigo intitulado “*Magnetic anisotropy: an unexploited petrofabric element.*” (Tarling e Hrouda, 1993)

Os estudos de ASM são efectuados com objectivos diversos e permitem dar resposta a questões de investigação em áreas distintas como o estudo das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, os seus processos de formação e de deformação. Possibilitam, ainda, num sentido mais amplo,

responder a questões de Paleogeografia e de Tectónica. “*Anisotropy of low field magnetic susceptibility (AMS) is a versatile petrofabric tool. For magnetite, AMS primarily defines grain-shape anisotropy; for other minerals, AMS expresses crystallographic control on magnetic properties. Thus, we may infer the orientation-distribution of a dominant mineral from the AMS of a rock. AMS principal directions can record current directions from sediment, flow-directions from magma, finite-strain directions from tectonized rocks and stress-directions from low-strain, low-temperature, neotectonic environments. AMS measurements may reveal some aspects of the strain-path, where carefully selected*” (Borradaile e Henry, 1997, 1).

Modelos para o Estudo de Maciços Graníticos

Estes modelos, embora não possam ser considerados simples, são sempre simplificações dos sistemas e/ou subsistemas geológicos. Não são simples nem de fácil construção porque resultam de trabalhos: 1) de revisão da bibliografia; 2) de campo e amostragem; 3) laboratoriais de preparação de amostras; 4) de utilização de equipamentos específicos para obtenção dos dados; 5) da interpretação dos resultados; e 6) da criação dos modelos. Os modelos são construídos não só com base nos resultados, mas também em modelos prévios das áreas estudadas (por exemplo, cartas geológicas), e doutros para casos similares e traduzem as representações mentais dos seus autores (Johnson-Laird, 1983; Norman, 1983, *in* Buckley *et al.*, 2004). Para todas estas etapas existem modelos estabelecidos e que devem ser seguidos adequadamente. Por exemplo, a amostragem deve ser feita segundo uma malha regular, as amostras devem ser devidamente orientadas e as subamostras a medir, por local de amostragem devem ser, pelo menos, 8. Cada amostra deve ser medida pelo menos em 3 posições distintas mutuamente perpendiculares.

Neste estudo usámos os modelos desenvolvidos com rochas de maciços graníticos de Portugal (Martins *et al.*, 2009; Sant’Ovaia, 2000, Sant’Ovaia *et al.*, 2000, Sant’Ovaia *et al.*, 2008, Sant’Ovaia *et al.*, 2010) que traduzem a interpretação dos dados da SM, da ASM e acrescentam às cartas geológicas representações da foliação e da lineação magnéticas calculadas para os maciços estudados. Estes dados permitiram ainda, em conjunto com outros de gravimetria, construir modelos para a geometria e as formas dos corpos ígneos e para a localização das suas “raízes” para os granitos de Vila Pouca de Aguiar e de Águas Frias - Chaves (Martins *et al.* 2009; Sant’Ovaia, 2000, Sant’Ovaia *et al.*, 2000).

Os valores da SM nos granitos do plutão de Vila Pouca de Aguiar são fracos e estão compreendidos entre 40,0 e $220,0 \times 10^{-6}$ SI. A distribuição espacial das curvas de isovalores de susceptibilidade revela que há uma zonação magnética normal, concêntrica. O mapa estrutural das lineações magnéticas mostra que estas estão organizadas segundo duas direcções principais, uma aproximadamente N-S e a outra NW-SE. As direcções das foliações magnéticas são, dum modo geral, paralelas ao alongamento do plutão de Vila Pouca de Aguiar, isto é, apresentam a direcção NNE-SSW (Martins *et al.*, 2009; Sant’Ovaia, 2000, Sant’Ovaia *et al.*, 2000).

No plutonito de Água Frias, a SM apresenta um valor médio de $80,7 \times 10^{-6}$ SI. Os valores de anisotropia paramagnética são sempre inferiores a 2,0%, com um valor médio de 1,6%. As foliações magnéticas tendem a ser paralelas ao contorno do plutão, apresentando uma direcção média de E-W e inclinando cerca de 30° para o exterior do plutão. As lineações magnéticas são, na sua maioria, sub-horizontais e com direcção média em torno de WNW-ESE (Martins *et al.*, 2009).

A modelação da anomalia residual gravimétrica de cada um dos plutões mostrou que as respectivas geometrias apresentadas são bastante diferentes (Martins *et al.* 2009). A geometria global do plutão de Vila Pouca de Aguiar, com a sua extremidade sul laminar, espessura inferior a 1 km em 2/3 da sua área, e a parte central mais espessa, com uma profundidade média de 2 a 3 km e com uma estrutura de domo, sugere a forma de um lacólito. Foi possível distinguir três zonas de alimentação cuja profundidade não ultrapassa os 6 km. Estas zonas de alimentação encontram-se alinhadas ao longo do sistema Penacova-Régua-Verin desenhando um alinhamento em Y.

A modelação dos dados gravimétricos do plutonito de Água Frias mostra uma forma geométrica próxima dos “*wedge-shaped plutons*” e um enraizamento profundo que atinge cerca de 10 km segundo um alinhamento subparalelo à falha de Penacova-Régua-Verin. A maior depressão localiza-se no centro do plutonito sugerindo a existência de uma conduta profunda de alimentação do magma granítico. A estruturação magmática dos dois plutões é semelhante, como indica o *fabric* magnético em torno de direcções NNE-SSW e WNW-ESSE sugerindo direcções de estiramento magmático compatível com as direcções tardi-variscas. A inversão dos dados gravimétricos é compatível com a presença de zonas de alimentação alinhadas segundo a Falha Penacova-Régua-Verin. Esta zona de alimentação comum não implica, no entanto, geometrias iguais para os dois plutões, o que mostra que embora alimentados por condutas localizadas ao

longo do mesmo acidente, terão aproveitado sectores da falha com características de profundidade/geometria diferentes que terão condicionado a maior espessura do plutónio de Águas Frias - Chaves (Martins *et al.*, 2009).

Para o Complexo Granítico de Castelo Branco, os resultados da SM, da ASM, petrográficos e de inclusões fluidas permitiram construir um modelo para a sua instalação (Sant’Ovaia *et al.*, 2008, Dória *et al.*, 2010). Os estudos ASM realizados no complexo granítico de Castelo Branco revelaram que a SM caracteriza bem a diferença entre fácies central e periféricas e relaciona-se com a maior abundância de biotite e a presença de cordierite nas fácies periféricas. A maior anisotropia magnética das fácies periféricas sugere um maior estiramento co-magmático no bordo do maciço. A orientação das foliações magnéticas NNW-SSE paralelas às estruturas regionais indica que a instalação destes granitos decorreu num período tardiectónico. Por outro lado, estas foliações desenvolveram-se numa fase magmática a tardimagmática como atestam as microestruturas e os valores da anisotropia magnética (Sant’Ovaia *et al.*, 2008).

Para os granitos da Serra da Estrela, Mangualde, Castro Daire e Trancoso, para além dos modelos, à escala, da foliação e da lineação magnéticas e da caracterização magnética das rochas, foram construídos modelos que explicam, sem esquecer as variáveis espaço e tempo, a intrusão dos próprios corpos graníticos, bem como as componentes de deformação associadas (Sant’Ovaia *et al.*, 2010).

Os granitos tardi- D3 variscos, da Serra da Estrela, Mangualde, Castro Daire e Guarda representam o volume mais importante de granitos do Centro de Portugal. Duas direcções principais de lineações magnéticas, N150E e N20E, consideradas como lineações de estiramento foram obtidas, indicando que a instalação destes granitóides foi controlada tectonicamente. Sant’Ovaia *et al.* (2010) desenvolveram um modelo para a instalação destes granitos que envolve três fases.

A primeira fase foi despoletada pelo movimento de desligamentos direitos de direcção N150. A abertura ao longo destas falhas promoveu o começo da instalação dos granitos da zona Cota – Seia.

A segunda fase terá correspondido ao crescimento dos granitos anteriormente instalados e ao começo da instalação dos plutões circulares de Castro Daire e da Estrela. Foi também nesta fase que os granitos da Guarda se instalaram possivelmente ao longo de aberturas relacionadas com desligamentos esquerdos de direcção N20 que podem ser consideradas como conjugadas das falhas N150.

A terceira fase foi caracterizada pelo crescimento dos plutões graníticos, de forma mais ou menos independente da tectónica regional, segundo várias direcções ou, por outras palavras, o final da instalação seria forçado, isto é, inteiramente relacionado com a pressão magmática.

Conclusões

Neste trabalho pretendemos mostrar como a partir dos modelos da SM e da ASM se desenvolvem estudos aplicados a rochas graníticas, permitindo não só a construção de outros modelos para a instalação dos maciços mas também para a sua forma, estrutura e zonas de alimentação. Os processos de deformação são igualmente traduzidos através dos referidos modelos. Ficou igualmente expresso a importância da inclusão de dados obtidos por outros métodos como, por exemplo, o gravimético.

Nestes como noutros trabalhos de investigação, são igualmente importantes os modelos cartográficos estabelecidos para os locais a estudar como outros modelos construídos para situações geológicas similares. Os modelos científicos constroem-se partindo do conhecimento acumulado e, conseqüentemente, tendo como suporte modelos existentes. Contudo, a sua evolução e a construção de modelos novos para os maciços graníticos deve muito, no caso em análise, à realização de mais trabalhos de campo, de laboratório e de interpretação de dados.

Estamos certos que os modelos com base nos dados da ASM, apresentados neste estudo, contribuiram para uma compreensão diferente dos subsistemas estudados. Estes modelos têm ainda o mérito de constituírem *teaching models*, exemplos da Geologia de Portugal, para o ensino da Geologia Estrutural e Tectónica.

Dedicatória: As autoras dedicam este estudo ao Professor Doutor Manuel Maria Godinho, associando-se à Homenagem ao Homem, ao Geólogo e ao Professor.

Bibliografia

- Borradaile, G. J. (2001) - Magnetic fabrics and petrofabrics; their orientation distributions and anisotropies. *Journal of Structural Geology*; 23, 1581–1596.
- Borradaile, G.J., Henry, B. (1997) - Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy. *Earth-Science Reviews*; 42 (1-2), 49-93.
- Buckley, B.C., Gobert, J.D., Kindfield, A.C.H., Horwitz, P., Tinker, R.F., Gerlits, B., Wilensky, U., Dede, C., Willett, J. (2004) - Model-Based Teaching and Learning With BioLogicaTM: What

- Do They Learn? How Do They Learn? How Do We Know? *Journal of Science Education and Technology*; 13 (1), 23-41.
- Butler, R (1992) - *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Blackwell Scientific Publications, 319 p.
- Dória, A., Morais, P., Santos, M., Gomes, C.R., Sant’ovaia, H., Noronha, F. (2010) -. Estudo da microfracturação do maciço granítico de Castelo Branco através dos Planos de Inclusões Fluidas. VIII Congresso Nacional de Geologia. *Revista Electrónica de Ciências da Terra, e – Terra*; 11 (21), 4p.
- Gobert, J. D., Buckley, B. C. (2000) - Introduction to model based teaching and learning in science education. *International Journal of Science Education*; 22, 891–894.
- Gilbert, J. K., Boulter C. J. (2000) - *Developing models in science education*. Dordrecht, Kluwer, 386 p.
- Hrouda, F. (1982) - Magnetic anisotropy of rocks and its application in Geology and geophysics. *Geophysical Surveys*; 5, 37-82.
- Johnson-Laird, P.N. (1983) - *Mental Models*. Cambridge University Press.
- Martins, H.C.B., Sant’Ovaia, H., Noronha, F. (2009) - Genesis and emplacement of felsic Variscan plutons within a deep crustal lineation, the Penacova-Régua-Verín fault: an integrated geophysics and geochemical study (NW Iberian Peninsula). *Lithos*; 111 (3-4), 142-155.
- O’Reilly, W. (1984) - *Rock and Mineral Magnetism*. Chapman and Hall, 220 p.
- Parés, J.M., Pluijm, B.A. (2002) - Evaluating magnetic lineations (AMS) in deformed rocks. *Tectonophysics*; 350, 283- 298.
- Prins, G.T., Bulte, A.M.W., Van Driel, J.L., Pilot, A. (2008) - Selection of Authentic Modeling Practices as Contexts for Chemistry Education” *International Journal of Science Education*; 30(14), 1867-1890.
- Sant’Ovaia, H. (2000) - O Maciço granítico pós-tectónico de Vila Pouca de Aguiar. Estudo petroestrutural e mecanismo de instalação. Tese de Doutoramento. Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Laboratoire des Mécanismes de Transfer en Géologie, Université Paul Sabatier, Toulouse III; 314 pp.
- Sant’Ovaia, H., Bouchez, J.L., Noronha, F., Leblanc, D., Vignerresse, J.L. (2000) - Composite-laccolith emplacement of the post-tectonic Vila Pouca de Aguiar granite pluton (northern Portugal): a combined AMS and gravity study. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*; 91, 123-137.
- Sant’Ovaia, H., Gomes, C.R., Rocha, A.L. (2008) - Parâmetros magnéticos das rochas do Complexo Granítico de Castelo Branco, Portugal Central. In: Callapez, P.M.; Rocha, R.B.; Cunha L.; Marques, J.F., Dinis, P.M. (Eds.) - *A Terra Conflitos e Ordem*. Livro de Homenagem ao Professor António Ferreira Soares, pp. 265-272. Ed. M.M.G.U.C., Coimbra, XXII + 478 p.
- 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.
- Stacey, F.D., Banerjee, S.K. (1974) - The physical principles of rock magnetism. *Earth Planetary and Science Letters*; 4, 451–455.
- Tarling, D.H., Hrouda, F. (1993) - *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Chapman and Hall, 217 p.