

# Fluxo magmático em diques do cortejo radial de diques de Mafra

C. R. Nogueira<sup>(a,1)</sup>, M. Moreira<sup>(b,c,2)</sup> & P. Terrinha<sup>(a,d,3)</sup>

a - LATTEX, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Ed. C2, 5º Piso, 1749-016 Lisboa, Portugal

b - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, R. Cons. Emídio Navarro, 1, 1949-014 Lisboa, Portugal

c - Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa, Ed. C8, 1749-016 Lisboa, Portugal

d - Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Ed. C2, 5º Piso, 1749-016 Lisboa, Portugal

1 - cepern@fc.ul.pt; 2 - mmoreira@deea.isel.pt; 3 - pagt@fc.ul.pt

## RESUMO

**Palavras-chave:** ASM; diques; fabric magnético; fabric magmático; cortejo radial de diques de Mafra; Bacia Lusitânica.

Apresenta-se um estudo comparativo de resultados obtidos de Anisotropia da Susceptibilidade Magnética, de orientação de vesículas gasosas e Orientação Preferencial de Formas em cerca de 200 amostras de 7 diques do cortejo radial de Mafra, concluindo-se que existe um controlo da ASM e orientação das vesículas gasosas pelo fluxo magmático. Dados experimentais mostram: i) concentração dos eixos mínimos de ASM ( $k_3$ ), junto ao pólo dos diques, ii) fabric magnético triaxial, definindo um plano de foliação magnética, sub-paralelo ao plano do dique ou fazendo um ângulo de imbricação com uma das margens, permitindo a determinação da direcção e sentido do fluxo magmático. A profundidade da câmara magmática alimentadora dos diques radiais é proposta, utilizando a distância horizontal entre os locais de amostragem e o mergulho do vector médio de fluxo magmático. A assimetria sistemática do ângulo de imbricação nas duas paredes de cada dique sugere que o campo de tensões fosse triaxial com  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ .

## ABSTRACT

**Keywords:** AMS; dykes; magnetic fabric; magmatic fabric; radial dyke swarm of Mafra; Lusitanian Basin.

A comparison of studies of magmatic flow in dykes from the radial dyke swarm of Mafra Complex (Lusitanian Basin) using anisotropy of magnetic susceptibility (AMS), analysis of magmatic mesoscale structures and SPO analyses of petrofabric, showed that the spatial orientation of the AMS tensor and the finite strain ellipsoid associated to vesicles are strongly dominated by magmatic flow. Experimental data showed: i) good clustering of minimum susceptibility axes,  $k_3$ , near the dyke pole; ii) tri-axial magnetic fabric, defining the magnetic foliation plane, sub-parallel to the dyke plane or with an imbrication angle to the dyke plane, which allowed the determination of the direction and sense of magmatic flow. Magmatic flow vectors were determined allowing an estimation of the possible depth of the magmatic chamber. Assymetry of imbrication angles on dyke margins indicate that the horizontal stress field was not isotropic at the time of emplacement.

## Introdução

A instalação de cortejos radiais de diques associados a câmaras magmáticas sub-vulcânicas instaladas em níveis superficiais da crosta continental podem ter um papel importante na avaliação do campo de tensões (Halls & Fahrig, 1987). Em alguns casos, quando a tensão desviacional é baixa, estando a crosta submetida a um campo de tensões quase isotrópico, estes corpos ígneos conseguem impor um campo de tensões local próprio. É assumido geralmente que a direcção dos diques é paralela ao plano definido pelas tensões máximas e intermédias e perpendicular à tensão principal mínima, e que o vector de fluxo magmático é dependente da profundidade da câmara magmática, mecanismo e sentido de propagação da fracturação.

O cortejo radial de diques de Mafra é atribuído ao ciclo alcalino do Cretácico superior da margem oeste Ibérica, estando geralmente associado à abertura do Atlântico Norte (Rock, 1982). No entanto, o seu padrão radial, único na Bacia Lusitânica (Zbyszewski *et al.*, 1955; Ribeiro *et al.*, 1979) juntamente com o facto de os diques cortarem sequências sedimentares "post-rifting" (e discontinuidades sedimentares pós "break up") de idade Cenomaniana da Bacia Lusitânica (Wilson *et al.*, 1989; Pinheiro *et al.*, 1996) sugere que a tensão desviacional à altura da instalação deveria ser muito baixa.

A anisotropia da susceptibilidade magnética (ASM) é uma técnica muito utilizada em estudos de determinação da direcção do fluxo magmático em diques. Para este fim, são exigidos dois pressupostos na disposição dos eixos principais de susceptibilidade magnética: (1) o plano de foliação magnética médio (definido pelo plano que contém a posição média dos eixos  $k_1$  e  $k_2$  das diferentes amostras) é paralelo ou sub-paralelo ao plano da margem do dique, e (2) os eixos  $k_1$  das diferentes amostras estão bem concentrados, definindo uma área de confiança pequena. A esta disposição dos eixos principais de susceptibilidade magnética denomina-se "fabric" magnético normal (Rochette *et al.*, 1991; Tarling & Hrouda, 1993).

Quando estas condições são observadas é habitualmente assumido que a direcção média de  $k_1$ , designada por lineação magnética, representa a direcção do alinhamento médio dos eixos maiores das partículas de óxidos de Fe e Ti (ferromagnéticas *sensus lato*) e que esse alinhamento é paralelo à direcção do fluxo magmático.

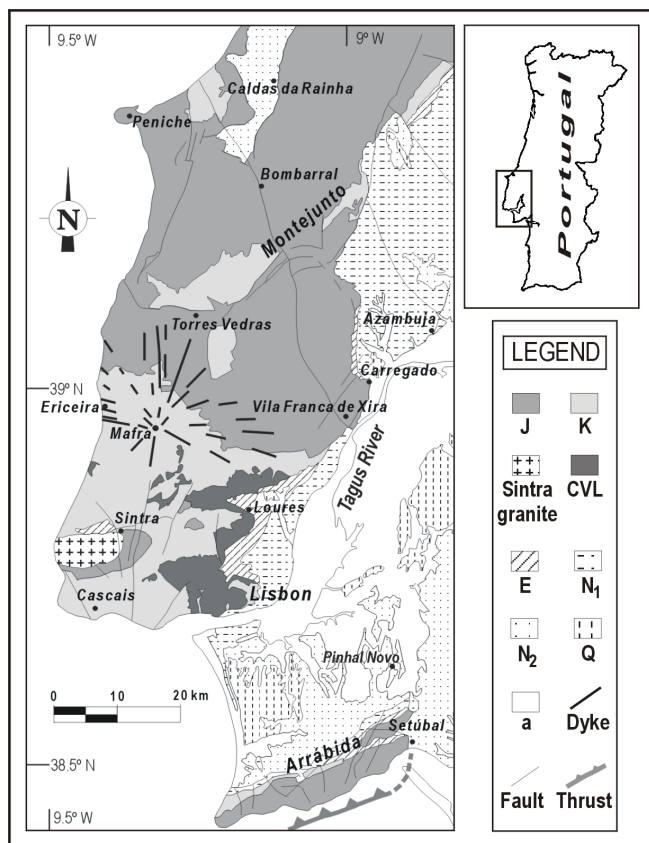


Figura 1 - Mapa Geológico do sector sul da Bacia Lusitânica adaptado da *Carta Geológica de Portugal*, escala 1:500 000 (I.G.M., 1992). Legenda: J- Jurássico; K- Cretácico; CVL- Complexo Vulcânico de Lisboa; E- Paleogénico; N<sub>1</sub>- Miocénico; N<sub>2</sub>- Pliocénico; Q- Quaternário; a- aluvial.

sedimentares do Albiano inferior ao Cenomaniano, são essencialmente rochas basálticas alcalinas sub-saturadas e doleritos, apresentando uma mineralogia composta por plagioclase calco-sódica, hornblenda, alguma piroxena da série pigeonite-hedenbergite (dominante) e augítica, óxidos de Fe, Ti e analcite.

## Métodos e resultados

Para a realização do estudo sobre o fluxo magmático em diques do CRD de Mafra foram efectuadas 4 campanhas de amostragem onde se recolheram cerca de 200 amostras das margens de 7 diques distribuídos ao longo de 4 km.

As medições da anisotropia da susceptibilidade magnética das amostras foram efectuadas utilizando para o efeito uma ponte de susceptibilidade Kappabridge KLY-2 (Agico, Brno).

Realizaram-se curvas termomagnéticas de susceptibilidade *versus* temperatura, em atmosfera controlada de argon, para amostras de todos os diques (utilizando para o efeito um forno CS-3 ligado ao Kappabridge KLY-2) com o objectivo de determinar a mineralogia ferromagnética (*s.l.*), já que os resultados de análise de microsonda se revelaram inconclusivos. O estudo de temperaturas de Curie das amostras indicam, com alguma exactidão, que as principais fases magnéticas são titanomagnetites com diversos graus de oxidação.

Os resultados de AMS obtidos (Nogueira *et al.*, 2001) mostraram um fabric magnético com boa concentração dos eixos de susceptibilidade magnética mínimos, eixos k3, junto ao pólo dos diques, e geralmente, com disposição tri-axial dos eixos principais de susceptibilidade magnética, definindo assim um plano de foliação magnética. Na maioria dos casos, observou-se uma imbricação do plano de foliação em relação à margem do dique, nas margens sul, enquanto nas margens norte o planos de foliação magnética encontram-se sub-paralelos (Fig. 2).

Esta diferença de atitudes do plano de foliação magnético é considerada primária, ou seja, adquirida durante a instalação dos diques, pois os valores do factor de anisotropia, P, são inferiores a 1,07 indicando ausência de deformação dos diques após a sua instalação (Tarling & Hrouda, 1993).

Neste trabalho são comparados resultados de estudos sobre diques pertencentes à parte menos alterada do cortejo radial de diques de Mafra, usando o método de ASM (Nogueira *et al.*, 2001) juntamente com a análise de vesículas, consideradas como estruturas magmáticas primárias mesoscópicas (Nogueira *et al.*, 2000) e a análise de orientações preferenciais (OPF) dos fabrics magnético e magmático em lâminas delgadas (Moreira *et al.*, 2003, neste volume).

## Enquadramento geológico

O cortejo radial de diques de Mafra dispõe-se em redor da intrusão dos gabros de Mafra, estando atribuído ao início do último ciclo magmático (ciclo alcalino) do Cretácico superior (Portugal Ferreira & Macedo, 1979; Ribeiro *et al.*, 1979), na margem oeste Ibérica, geralmente associado à abertura do Atlântico Norte (Rock, 1982) ou, segundo Ribeiro (2002) consequência de um impacto meteorítico na montanha submarina de Tore, despoletando a sua intrusão a partir de uma câmara magmática mais profunda. Apesar do estado geral extremamente alterado dos diques do cortejo radial de diques de Mafra (CRD de Mafra), é possível encontrar algumas excepções nas arribas litorais da zona da Ericeira (Fig. 1). Estes diques com orientação geral WNW-ESE, sub-verticais, de espessuras inferiores a 2m, instalados em sequências

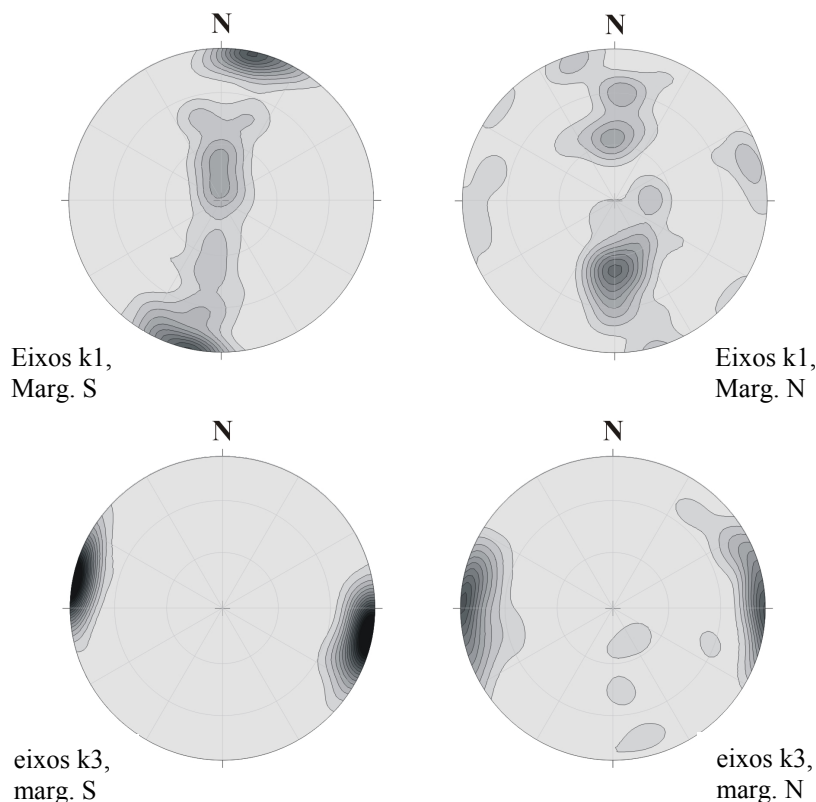


Figura 2 - Projecção de contornos de densidade dos eixos principais de susceptibilidade magnética k1 e k3 dos diques do CRDM. Diques rodados para orientação N-S, verticais. Projecção Schmidt, hemisfério inferior. Eixos k1 em cima; eixos k3 em baixo. Margens S à esquerda, margens N à direita.

Os resultados obtidos através da comparação da orientação do elipsóide de ASM com as orientações dos elipsóides-envolventes das vesículas de gás, alongadas e preenchidas por calcite, presentes em alguns dos diques mostraram uma relação geométrica entre si. Ambos os elipsóides apresentam uma tendência para as formas oblatas, sendo que no elipsóide-envolvente das vesículas essa tendência é nítida, apresentando no geral, formas oblatas alongadas com uma relação axial  $X \gg Y > Z$ . Os elipsóides-envolventes das vesículas dispõem-se, junto às margens, com uma orientação sub-paralela relativamente à atitude do dique, ou seja, com o eixo mínimo próximo do pólo do dique, tal como o elipsóide magnético. Também se analisou a disposição das vesículas no interior de um dos diques, numa secção/perfil horizontal, verificando-se em geral uma disposição dos planos X-Y dos elipsóides-envolventes das vesículas, na vertical. As vesículas alongadas e alinhadas são consideradas como bons marcadores do fluxo magmático em diques (Coward, 1980; Smith, 1987) pelo que se infere que a relação geométrica entre o elipsóide de ASM e os elipsóides-envolventes das vesículas seja de natureza magmática. No entanto, foram encontradas situações junto aos bordos do dique em que o eixo intermédio de susceptibilidade magnética, eixo k2, se apresentava sub-paralelo com o eixo máximo das vesículas, eixo X.

Os resultados obtidos no estudo de orientação preferencial de formas - OPF (Moreira *et al.*, 2003, neste volume) confirmam que o fabric magnético é coaxial com o fabric magmático. Esta relação é estabelecida através da comparação do fabric magnético com o fabric magmático, em particular, pela comparação da disposição da mineralogia ferromagnética *s.l.* (óxidos de Fe, Ti), principal responsável pelo fabric magnético em diques básicos, e a disposição das plagioclases, assumidas como bons indicadores do escoamento magmático, no plano de foliação magnético (plano k1-k2) e no plano k1-k3, plano ortogonal à foliação magnética e à direcção do dique. No entanto, este estudo também revelou que uma percentagem considerável de casos (40%) em que a direcção dos elementos do fabric magmático considerados como indicadores de fluxo magmático (neste caso, as plagioclases) se dispõem sub-paralelamente (ângulos  $< 30^\circ$ ) à direcção do eixo intermédio de susceptibilidade magnética, eixo k2.

## Discussão

Os resultados obtidos nestes trabalhos sugerem que tanto o eixo k1 como o eixo k2 poderão estar eventualmente associados à direcção do fluxo magmático, ou ainda, que este poderá estar contido no plano de foliação magnética k1-k2, sendo independente da orientação destes dois eixos.

Tendo em consideração que os resultados experimentais de ASM em diques do CDR de Mafra evidenciaram um fabric magnético em que: (1) o eixo k3, pólo do plano da foliação magnética, é sistematicamente mais estável que o eixo k1, e (2) o plano da foliação magnética das amostras de cada margem é sistematicamente subparalelo ou ligeiramente oblíquo a essa margem, o fluxo magmático nos diques do CRD de Mafra foi deduzido através da utilização de um método geométrico simples e independente da orientação média da lineação magnética (eixo k1).

O método baseia-se num critério geométrico que tem em conta a posição relativa do plano de foliação magnética, eixo k1-k2, relativamente à margem e que permite o cálculo de um vector de fluxo magmático (Moreira *et al.*, 1999; Geoffroy *et al.*, 2002). Este ângulo, habitualmente denominado de imbricação magnética e que normalmente não ultrapassa os 20°, é interpretado como resultante da disposição imbricada dos grãos dos óxidos de (Fe, Ti), nas margens do dique.

É assumido na maioria dos casos, o magma se comporte no interior dos diques estreitos como um fluido Newtoniano em que o fluxo magmático ocorre em regime laminar. O fabric magmático próximo das margens dos diques é controlado por fenómenos de cisalhamento simples, provocado pelos diferenciais de velocidade do fluxo magmático junto às margens, actuando num fluido contendo fenocristais formados em estádios iniciais de cristalização, pelo que, em condições de elevada deformação cisalhante (diferenciais elevados) mesmo que com baixas concentrações de fenocristais anisotrópicos, as partículas interagem e tendem a alinhar os seus eixos longos fazendo um determinado ângulo com a direcção de cisalhamento, ou seja, com a direcção de fluxo (Knight & Walker, 1988; Ildefonse *et al.*, 1992; Arbaret *et al.*, 1996).

Assim, a direcção de fluxo magmático é definida pela normal à intersecção entre o plano da foliação magnética e a margem do dique, e o sentido é definido através da orientação do ângulo de imbricação magnética (o sentido do fluxo é indicado pelo ângulo agudo entre o plano da margem do dique e o plano de foliação magnética).

Os vectores de fluxo magmático determinados segundo este método apresentam um vector médio com a inclinação de 28°, de sentido ascendente para WNW, coincidente com o centro do CDRM. O sentido do fluxo é corroborado pela direcção das vesículas quer nos bordos quer no interior do dique em que foi efectuada esta análise.

Atendendo à inclinação média do vector médio de fluxo magmático e a distância horizontal entre o local dos diques estudados e o centro do CDR de Mafra ( $\approx 7$  km), através de uma relação geométrica simples deduziu-se uma profundidade estimada de 3,2 km para a câmara magmática.

Como termo de comparação, refere-se que para a mesma intrusão, o centro do CDR de Mafra, Represas (2000) calculou uma profundidade de 4,7 km para o centro de massa da câmara magmática associada à intrusão de gabros de Mafra, com base em dados gravimétricos.

O padrão da imbricação do plano de foliação magnético, assimétrico entre as margens N e S dos diques estudados sugere que o campo de tensões contemporâneo da instalação dos diques do CRD de Mafra não corresponda a um campo de tensões uniaxial ( $\sigma_1$  = tensão máxima compressiva, vertical; e  $\sigma_3 = \sigma_2 \approx 0$ , horizontais) como o seu padrão radial leva a sugerir. Este padrão é ainda interpretado como sendo resultante de movimentação horizontal dextrógira das margens dos diques contemporânea com a instalação dos diques de orientação WNW-ESE.

## Agradecimentos

C. R. Nogueira, beneficiou de uma bolsa BIIC da FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia) no âmbito do projecto GEOSTES (ref. PRAXIS/P/CTE/11052/1998).

## Bibliografia

- Arbaret, L.; Diot, H. & Bouchez, J. L. (1996) - Shape fabric of particles in low concentration suspensions: 2D analogue experiments and application to tilting in magma. *Journal Structural Geology*, 18: 941-950.
- Coward, M. P. (1980) - The analysis of flow profiles in a basaltic dyke using strained vesicles. *J. Geol. Soc. London*, 137 : 605-615.
- Geoffroy, L.; Callot, J. P.; Aubourg, C. & Moreira, M. (2002) - Magnetic and plagioclase linear fabric discrepancy in dykes: a new way to define the flow vector using magnetic foliation. *Terra Nova*, 14: 183-190.
- Halls, H. C. & Fahrig, W. F. (Editors) (1987) - Mafic Dyke Swarms. *Geological Association Canada*, special paper 34, Ottawa, 503 p.
- Ildefonse, B.; Launeau, P.; Bouchez, J. L. & Fernandez, A. (1992) - Effect of mechanical interactions on the development of shape preferred orientation: a two-dimensional experimental approach. *Journal Structural Geology*, 14: 73-83.
- Knight, M. D. & Walker, G. P. L. (1988) - Magma flow directions in dikes of the Koolau Complex, Oahu, determined from magnetic fabric studies. *Journal Geophysical Research*, 93: 4301-4319.
- Moreira, M.; Geoffroy, L. & Pozzi, J. P. (1999) - Ecoulement magmatique dans les dykes du point chaud des Açores: étude préliminaire par anisotropie de susceptibilité magnétique (ASM) dans l'île de San Jorge. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 329: 15-22.
- Moreira, M.; Nogueira, C. R. & Terrinha, P. (2003, neste volume) - Fabrics Magnéticos e Magmáticos: Concordâncias e Discrepâncias. *VI Cong. Nacional Geologia*.
- Nogueira, C. R.; Moreira, M.; Terrinha, P. & Kullberg, M. C. (2000) - Fluxo magmático em filões do Complexo Intrusivo de Mafra: correlação de estudos magnéticos (ASM) e análise estrutural - primeiros resultados, *Resumos 6ª Conf. Anual G. G. E. T. - Soc. Geol. Portugal*, Évora, 16-20.
- Nogueira, C. R.; Moreira, M.; Monteiro, J. F. & Terrinha, P. (2001) - The Radial Dike Swarm of the Mafra Complex, Lusitanian Basin, Portugal. AMS results and implications on the emplacement mechanism. *Resumos da MAGIBER-I, Paleomagnetismo em Espanha e Portugal*, Burgos, 32-33.
- Pinheiro, L. M.; Wilson, R. C. L.; Pena dos Reis, R.; Whitmarsh, R. B. & Ribeiro, A. (1996) - The Western Iberia Margin: a geophysical and geological overview. In: R.B. Whitmarsh, D.S. Sawyer, A. Klaus & D.G. Masson (Editors), *Proceedings of the Ocean Drilling Program*, Scientific Results. College Station, TX, 3-23.

- Portugal-Ferreira, M. & Macedo, C. R. (1979) - K-Ar ages of the Permian-Mesozoic basaltic activity in Portugal. *ECOG VI Abstracts*, 26-27.
- Represas, P. M. M. F. (2000) - Estudos de Gravimetria na Zona de Mafra. Relatório de Estágio, Licenciatura em Ciências Geofísicas (Var. Geofísica Interna), Fac. Ciências, Univ. de Lisboa, 71p.
- Ribeiro, A.; Antunes, M. T.; Ferreira, M. P.; Rocha, R.; Soares, A.; Zbyszewski, G.; Moitinho de Almeida, F.; Carvalho, D. & Monteiro, J. (1979) - Introduction à la Géologie Générale du Portugal. *Serv. Geol. Portugal*, Lisboa, 114 p.
- Ribeiro, A. (2002) - Soft Plate and Impact Tectonics. *Springer-Verlag*, Berlin, 324p.
- Rochette, P.; Jenatton, L.; Dupuy, C.; Boudier, F. & Reuber, I. (1991) - Emplacement modes of basaltic dykes in the Oman ophiolite: Evidence from magnetic anisotropy with reference to geochemical studies. In: T.J. Peters *et al.* (Editors), *Ophiolite Genesis and the Oceanic Lithosphere*. *Kluwer*, Dordrecht: 55-82.
- Rock, N. M. S. (1982) - The late Cretaceous alkaline igneous province in the Iberian Peninsula, and its tectonic significance. *Lithos*, 15: 111-131.
- Smith, R. P. (1987) - Dyke emplacement at Spanish Peaks, Colorado. In: Halls, H. C. & Fahrig, W. F. (Editors) *Mafic Dyke Swarms*. *Geological Association Canada*, special paper 34, Ottawa: 47-54.
- Tarling, D. H. & Hrouda, F. (1993) - The Magnetic Anisotropy of Rocks. *Chapman & Hall*, London, 217 p.
- Wilson, R. C. L.; Hiscott, R. N.; Willis, M.G. & Gradstein, F. M. (1989) - The Lusitanian Basin of West-Central Portugal: Mesozoic and Tertiary tectonic, stratigraphic and subsidence history. In: A.J. Tankard and H.R. Balkwill (Editors), *Extensional Tectonics and Stratigraphy of North Atlantic Margins*. *AAPG Mem*: 341-361.
- Zbyszewski, G.; Moitinho de Almeida, F. & Torre de Assunção, C. (1955) - Carta Geológica de Portugal na escala 1/50 000. Notícia explicativa da folha 30-C (Torres Vedras). *Serv. Geol. Portugal*, Lisboa, 33 p.