

## Unidade de Pombais: - Ofiolito inferior do Maciço de Morais (NE de Trás-os-Montes Portugal)

E. Pereira<sup>(a,1)</sup>, A. Ribeiro<sup>(b,2)</sup>, D. de Oliveira<sup>(c,3)</sup>, M. J. Machado<sup>(a,4)</sup>,  
M. E. Moreira<sup>(a,5)</sup> & P. Castro<sup>(a,6)</sup>

a – I.G.M., Apartado 1089, 4466-956, S. Mamede Infesta, Portugal

b – Faculdade de Ciências, Campo Grande, C2, 5º Piso, 1749-016, Lisboa, Portugal

c - I.G.M., Apartado 7586, 2721-866 Alfragide, Portugal

1 – eurico.pereira@igm.pt; 2 - aribeiro@fc.ul.pt; 3 - daniel.oliveira@igm.pt; 4 - MJMachado@igm.pt;

5 - Eugénia.Moreira@igm.pt; 6 – paulo.castro@igm.pt

### RESUMO

**Palavras-chave:** Complexo ofiolítico; ofiolito inferior; mantos de carreamento; escamas tectónicas; petroquímica; ambiente geotectónico; rift oceânico inicial; Morais; NE de Trás-os-Montes; Portugal.

Várias escamas tectónicas de metavulcanitos básicos e xistos verdes dão corpo a uma unidade tectono-estratigráfica (Unidade de Pombais) intercalada entre o Complexo Ofiolítico de Morais de médio a alto grau metamórfico e a sequência vulcano-sedimentar (Unidades Centro-Transmontanas) de baixo grau.

Dado os metavulcanitos alcalinos e toleíticos das Unidades Centro-Transmontanas serem representativos de uma margem continental passiva, já anteriormente se havia reconhecido que os metavulcanitos da Unidade de Pombais, a topo desta sequência, mostravam características toleíticas com acentuada afinidade oceânica. Novos dados petroquímicos e presença de sulfuretos de actividade hidrotermal sugerem um ambiente de *rift* oceânico. Com efeito, o enriquecimento em elementos incompatíveis litófilos e REE leves, relativamente a casos estudados de cristas médias, dão consistência à hipótese de se tratar da ruptura inicial do Oceano da Galiza-Maciço Central.

### ABSTRACT

**Keywords:** Ophiolite Complex; Lower Ophiolite; Thrust sheets; Tectonic scales; initial rifting; Morais; NE Portugal.

Several tectonic scales comprising basic metavolcanic rocks and green schists make up a tectonostratigraphic unit (*Unidade de Pombais*), which is sandwiched between the medium to high metamorphic grade *Morais* Ophiolite Complex and the lower metamorphic grade volcano-sedimentary unit (*Unidades Centro-Transmontanas*).

The alkaline metavolcanic rocks and tholeiites belonging to the *Centro-Transmontanas* are representative of a passive continental margin. However, previously the metavolcanic rocks of the *Pombais* Unit, stratigraphically above this sequence, were recognised to show marked oceanic affinity. New petrochemical data and the presence of sulphides suggest an oceanic rifting environment. Effectively, the enrichment of incompatible lithophile elements and light REE relative to known cases in mid oceanic ridges, provide a solid argument for the initial rifting phase of the *Galiza-Maciço Central* Ocean.

### Introdução

Com o fecho do Oceano Iapetus norte, entre os blocos continentais Laurentia e Báltica e Oceano Iapetus sul, entre os blocos Laurentia e Gondwana, consuma-se a colisão Caledónica em que a culminância orogénica tem registo entre o Silúrico médio e início do Devónico. Neste mesmo período, a deslocação para norte do Gondwana consubstancia a convergência deste supercontinente com o continente Laurussia (Avalónia incluída), emergente da colisão Caledónica, dando início ao fecho dos Oceanos Rheic e Theic, este último também designado Oceano do Maciço Central ou Oceano da Galiza-Maciço Central (GMCO) (Matte, 1986; Ribeiro, 1993). No Devónico inferior (≈395 M.a.), a colisão entre estes últimos blocos continentais marca o início da colisão Varisca.

Vários modelos (Franke, 1989; Ribeiro *et al.*, 1990; Matte, 1991; Marques *et al.*, 1996; Martínez Catalán *et al.*, 1997; Rey *et al.*, 1997), para apenas referir aqueles suportados por dados objectivos de terreno e idades isotópicas consistentes, têm dedicado elaborada análise aos tempos de abertura e fecho dos oceanos Variscos e da polaridade cinemática, quer das suturas, quer das unidades envolvidas no processo de obducção dos complexos ofiolíticos.

Não entraremos aqui em tão aliciante discussão. Outrossim, tentaremos caracterizar uma lâmina tectónica compósita, conformada a uma posição entre o Complexo Ofiolítico de Morais ou Ofiolito superior (OSM) e as Unidades Centro-Transmontanas (Ribeiro, 1974). Anteriormente, designada Unidade de Pombais (Pereira *et al.*, 2000), esta lâmina pode incorporar exclusivamente rochas máficas ou constar de uma repetição de escamas tectónicas com xistos verdes, na base e rochas máficas, a topo. O empilhamento de escamas, num máximo de quatro, tem lugar na frente do OSM, ocorre a NE de Junqueira (Vimioso) e revela particular desenvolvimento de sulfuretos de ferro e cobre, associados ao vulcanismo básico, sublinhando os cavalgamentos.

## Enquadramento geológico do Ofiolito Inferior de Morais

Como é sabido, o Maciço de Morais resulta do empilhamento de três unidades tectono-estratigráficas ou Terrenos, separadas por grandes acidentes.

A unidade alóctone superior, de afinidade continental Avalónia e idade essencialmente do Precâmbrico, consta da base para o topo, de peridotitos com granada, granulitos máficos blastomiloníticos, a que se sobrepõe a espessa sequência de ortognaisses ocelados e micaxistos de Lagoa. O conjunto é intruído por gabros (idade isotópica Sm/Nd  $\approx$ 545 M.a. *e.g.* Marques *et al.*, 1995 para o Maciço de Bragança) e diques máficos (idade isotópica Sm/Nd  $\approx$ 640 M.a. *e.g.* Andriessen *et al.*, 1993, para o Maciço de Morais). Gabros e diques máficos apenas mostram deformação e metamorfismo Varisco, em fácies granulítica de baixo grau (IP) e anfibolítica com granada. No entanto, as rochas granulíticas de alto grau (HP) mostram pelo menos três fases de deformação pré-Varisca, registando provavelmente uma história Proterozóica de subducção e arco vulcânico na margem avalónica. O ciclo Varisco deforma e retromorfiza estas rochas em fácies de anfibolitos blastomiloníticos.

A unidade alóctone intermédia, subdividida em duas unidades tectónicas por um carreamento interno, corresponde ao Complexo Ofiolítico de Morais ou Ofiolito superior (OSM). A unidade tectónica superior define uma sequência normal, completa, de crosta oceânica, enquanto a inferior mostra uma sequência completa, mas desmembrada, de crosta oceânica. A sua zona de raízes será o oceano (GMCO), aberto desde o Silúrico ao início do Devónico, como adiante se discute. A deformação e metamorfismo da unidade alóctone intermédia é inteiramente Varisca e processa-se em fácies de anfibolitos com granada de transição para fácies granulítica, esta presente nos *flaser-gabros* da unidade tectónica superior.

Quanto à unidade alóctone inferior, de afinidade Gondwânica e zona de raízes na Zona de Ossa Morena, integra as Unidades Centro-Transmontanas. Representa uma sequência típica de margem continental passiva, constituída, da base para o topo, por tufitos e ortognaisses ocelados (Gnaisses de Saldanha), uma sequência siliciclástica com abundantes quartzitos (Quartzofilitos e Quartzitos), um Complexo vulcano-sedimentar composto de sedimentos pelíticos borra de vinho e calcários cinzentos lenticulares no topo, mostrando intercalações sucessivas de metavulcanitos básicos alcalinos e metavulcanitos félsicos, às vezes porfiricos, e culminando com a Fm de Macedo de Cavaleiros (Ribeiro, 1986) caracterizada por sedimentação marinha mais profunda e intercalação de metavulcanitos básicos toleíticos. A idade das Unidades Centro-Transmontanas está parcialmente balizada por achados de graptolitos do Landoveriano médio-superior em intercalações de ftanitos nos xistos borra de vinho (Romariz, 1969) e a presunção de os calcários do topo do Complexo vulcano-silicioso estabelecerem a transição para o Devónico, tal como se verifica nas unidades autóctones e paraúctones infrajacentes (Aldaya *et al.*, 1976; Quiroga, 1982; Sarmiento *et al.*, 1997; Clavijo, 1997). A deformação e metamorfismo da unidade alóctone inferior é inteiramente Varisca, situando-se em fácies de xistos verdes.

Numa sequência lógica, os metavulcanitos básicos da Unidade de Pombais com quimismo MORB, adiante demonstrado, deformação e metamorfismo idênticos aos da unidade alóctone inferior e situação tectono-estratigráfica entre esta unidade e o OSM, representam a primeira manifestação do *rift* oceânico (GMCO). Com efeito, a Unidade de Pombais, que passaremos a designar Ofiolito Inferior de Morais (OIM), encontra-se no topo da sequência evolutiva vulcânica de margem continental passiva e prenuncia a definitiva ruptura continental e formação da primeira crosta oceânica Varisca. Conhecendo-se a idade do metamorfismo do OSM (idade isotópica  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  385 - 390 M.a. *e.g.* Peucat *et al.*, 1990; Marques *et al.*, 1990; Dallmeyer & Ibarguchi, 1990; Dallmeyer *et al.*, 1991), equivalente à primeira fase de deformação Varisca D<sub>1</sub>, a idade do Ofiolito inferior estará compreendida entre o Silúrico médio por inferência stratigráfica e o Devónico inferior por inferência tectono-metamórfica.

## Deformação e metamorfismo

Em trabalho anterior (Pereira *et al.*, 2000), havíamos colocado a Unidade de Pombais no topo das Unidades Centro-Transmontanas, considerando-a uma repetição de escamas fora de sequência, carregadas na base do Complexo Ofiolítico de Morais (OSM). Tais lâminas tectónicas, a norte de Izeda e Talhas, podem ser exclusivamente constituídas por metabasaltos. Na região de Junqueira, constam de metavulcanitos básicos, na base, e tufitos ou xistos verdes, a topo.

Uns e outros mostram duas fases de deformação penetrativas com S<sub>1</sub> dominante, subparalela aos cavalgamentos e desenvolvendo uma lineação de estiramento lx<sub>1</sub> consistentemente orientada segundo o azimute 255° ± 5 e sentido de transporte para ENE. A segunda xistosidade S<sub>2</sub> retranspõe S<sub>1</sub> e encontra-se associada a dobras de eixos curvos, geralmente antitéticas relativamente ao movimento observado nos cavalgamentos. O metamorfismo da unidade verifica-se em fácies de xistos verdes, exibindo blastese de plagioclase sin-cinemática, enquadrada por textura grano-lepidoblástica onde se identificam plagioclase, anfíbolos da série tremolite-actinolite, biotite verde, moscovite e outros minerais subordinados, tais como epídoto, esfena, apatite, zircão, limonite de alteração de sulfuretos, quartzo, carbonatos e turmalina.

## Petroquímica e ambiente geodinâmico

A quando da publicação da Carta Geológica de Macedo de Cavaleiros - Folha 7D (Pereira *et al.* 2000), apoiados em escassos dados químicos, consideraram-se os metabasaltos básicos da Unidade de Pombais como toleitos com acentuada afinidade oceânica. O estudo das mineralizações de sulfuretos associados a este vulcanismo (Oliveira *et al.*, neste volume), motivaram nova colheita de amostras e obtenção de dados químicos mais representativos da unidade (Quadro I).

Quadro I:- Análises Químicas de metabasaltos do Ofiolito inferior do Maciço de Morais*							
Amostra	277	294	65-JD	79-JÁ	79-JC	79-JE	Média
SiO <sub>2</sub>	48,57	46,24	47,17	46,46	45,72	46,62	46,79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,38	17,06	14,93	14,52	17,09	15,13	15,51
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	12,47	10,37	12,53	11,53	11,32	11,79	11,67
MnO	0,16	0,15	0,16	0,15	0,17	0,17	0,16
CaO	10,45	12,4	10,24	9,23	11,07	14,74	11,35
MgO	5,98	5,16	5,92	6,74	6,21	6,16	6,03
Na <sub>2</sub> O	3,35	3,56	3,35	2,78	2,7	1,17	2,82
K <sub>2</sub> O	0,11	0,25	0,73	1,08	0,35	0,11	0,44
TiO <sub>2</sub>	1,79	1,3	1,88	1,64	1,5	1,73	1,64
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,17	0,13	0,19	0,16	0,15	0,16	0,16
P.Rub.	2,15	3,1	2,62	5,42	3,62	2,03	3,16
TOTAL	99,58	99,72	99,72	99,71	99,9	99,81	99,74
Cr	225	260	237	228	217	268	238
Ni	84	93	82	80	99	90	88
Co	42	39	43	39	41	39	40
V	300	303	318	262	169	309	264
Cu	60	72	58	80	68	58	66
Zn	65	72	74	82	76	64	74
Rb	3	4	14	22	7	3	9
K	913	2075	6060	8965	2905	913	3653
Sr	138	144	188	157	156	248	172
Ba	18	32	28	51	18	7	26
Ta	15	15	15	15	15	15	15
Nb	4	3	8	7	8	8	6
Zr	102	72	124	107	98	110	102
Ti	10731	7794	11271	9832	8993	10371	9832
Y	39	26	42	34	33	39	36
Th	3	3	5	5	5	5	4
La			4,2	4,9	3,9	3,4	4,1
Ce			14,2	14,3	12,2	11,8	13,12
Pr			2,5	2,4	2	2,1	2,25
Nd			13,5	13,1	10,9	11,5	12,25
Sm			4,3	4,1	3,6	3,8	3,95
Eu			1,6	1,5	1,4	1,5	1,5
Gd			5,5	5,1	4,4	5,2	5,05
Tb			1,1	0,9	0,8	0,9	0,92
Dy			6,8	6,2	5,4	6,1	6,12
Ho			1,4	1,4	1,2	1,3	1,32
Er			4	3,7	3,4	3,8	3,72
Yb			4	3,6	3,3	3,8	3,68
Lu			0,6	0,5	0,5	0,6	0,55

\* - Análises efectuadas no Laboratório do IGM por FRX, ICP-Plasma e ICP-MS

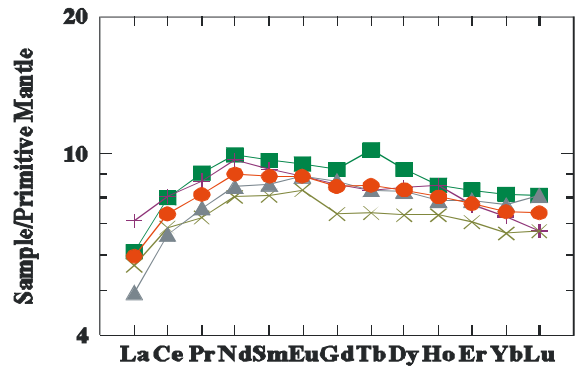


Figura 1 – Diagrama multielementar de metabasaltos do Ofiolito inferior de Morais comparado com casos estudados; OIM: ofiolito inferior de Morais; MORB-I: dorsal de Juan de Fuca; MORB-N: dorsal médio-atlântica (in: Juteau & Maury, 1997).

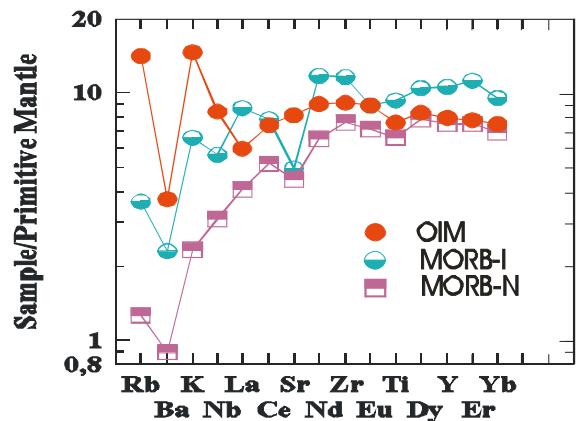


Figura 2 – Diagrama de REE de metabasaltos do Ofiolito inferior de Morais (inclui o valor médio da Fig.1).

Projectados os dados químicos nos diagramas discriminantes de paleoambientes geotectónicos, que utilizam as relações V-Ti, Ti-Zr-Sr, Ti-Cr, Nb-Zr-Y, TiO<sub>2</sub>-MnO-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, FeO-Ti-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, etc (Pearce, 1975; Meschede, 1986; Peace & Norry, 1979; Mullen, 1983), fazem invariavelmente recair os metabasaltos, em análise, nos ambientes MORB. Em particular, os limites de variação dos elementos incompatíveis são perfeitamente consentâneos com os atribuídos aos basaltos MORB (Sun *et al.*, 1979). Confrontando, por outro lado, os valores médios dos elementos LIL (large ion lithophile) e HFS (high field strength) do Ofiolito inferior, normalizados para o manto primitivo (Sun & McDonough, 1989), comparativamente ao MORB-N, empobrecido, da crista Atlântica e MORB-I, “intermédio-enriquecido” da crista Juan de Fuca (Juteau & Maury, 1997), verifica-se que todos têm perfis muito semelhantes, com algumas particularidades que merecem ser realçadas (Fig. 1). Nota-se, no Ofiolito Inferior de Morais, ligeiro enriquecimento em Rb, Ba, K, e Nb, relativamente ao MORB-I de Juan de Fuca, explicável, por uma via, por fusão parcial, no primitivo rift oceânico pouco produtivo portanto, de um material mantélico enriquecido e, por outra via, pelo facto destes metabasaltos se situarem na transição evolutiva do vulcanismo alcalino e toleítico de margem

passiva continental para o início da oceanização. Acresce ainda que, associados aos metabasaltos oceânicos e a sublinhar os cavalgamentos, ocorrem importantes concentrações de sulfuretos, indiciando actividade hidrotermal contemporânea do vulcanismo oceânico. A anomalia positiva em Sr e inexistência de anomalia de Eu, ao invés dos perfis MORB–N/I, reforçam as asserções anteriores, além de apontarem baixa fraccionaço de plagioclase na primitiva câmara magmática oceânica.

Quanto ao perfil de REE (Fig. 2), também normalizado para o manto primitivo de Sun & McDonough, 1989), é característico de uma crosta oceânica, com perfil suavemente positivo das terras raras leves e perfil plano das terras raras pesadas (Juteau & Maury, 1997; Grenne, 1989).

Assim, o Ofiolito inferior de Morais, conformado a uma unidade tectono-estratigráfica intercalada entre o Complexo Ofiolítico em fácies anfibolítica com granada de transição para granulítica e uma sequência vulcano-sedimentar típica de margem continental passiva em fácies de xistos verdes (Unidades Centro-Transmontanas), é representativo do *rift* inicial oceânico (GMCO) com uma idade relativamente bem estabelecida entre o Silúrico médio e o Devónico inferior. O enriquecimento em sulfuretos, dispersos na matriz dos metavulcanitos ou concentrados nos planos de cavalgamento, dão consistência à hipótese de se estar em presença de uma ruptura oceânica.

## Bibliografia

- Andriessen, P.; Beetsma, J.; Ferreira, N.; Ing. Soen, O. & Ribeiro, M. L. (1993) - Precambrian Sm-Nd ages in UATC of Morais (NE Portugal). *E.U.G. VII* (Strasbourg), abstract.
- Aldaya, F.; Carls, P.; Martínez-García, E. & Quiroga, J. L. (1976) – Nouvelles précisions sur la série de San Vitero (Zamora, nord-ouest de l’Espagne). *Comp. Rend de l’Académie des Sci. de Paris, D*, 283 : 881-883.
- Clavijo, E. J. G. (1997) – *La Geología del Sinforme de Alcañices Oeste de Zamora*. Tese, Dep. de Geología, Universidad de Salamanca, 330 p.
- Dallmeyer, R. D. & Ibarguchi, J. G. (1990) - Age of amphibolitic metamorphism in the ophiolitic unit of the Morais allocthon (Portugal): Implications for early Hercynian orogenesis in the Iberian Massif. *J. Geol. Soc. London*, 147: 873-878.
- Dallmeyer, R. D.; Ribeiro, A. & Marques, F. (1991) - Polyphase Variscan emplacement of exotic terranes ( Morais and Bragança Massifs ) onto Iberian successions: evidence from 40Ar/39Ar mineral ages. *Lithos*, 27: 133-144.
- Franke, W. (1989) – Variscan plate tectonics in Central Europe – current ideas and open questions. *Tectonophysics*, 169: 221-228.
- Grenne, T. (1989) - Magmatic evolution of the Lokken SSZ Ophiolite, Norwegian Caledonides: relationships between anomalous lavas and high-level intrusions. *Geological Journal*, vol. 24: 251-274
- Juteau, T & Maury, R. (1997) - *Géologie de la Croûte Océanique - Pétrologie et dynamique endogènes*. Masson, Ed.,
- Marques, F.; Dallmeyer, R. & Ribeiro, A. (1990) – Tectonothermal evolution of the Morais and Bragança Nappe Complexes, Iberian Massif. *Geol. Soc. Am. Abstract Programs*, 22: 7
- Marques, F.; Munhá, J.; Ribeiro, A.; Rogers, G. & Santos, J. (1995) – Lower paleozoic metamorphism during extension of Precambrian continental crust in the Bragança CAT: New Nd isotopic data. *Terra Nova*, 7 abstr. suppl. 1. 106.
- Marques, F.; Ribeiro, A. & Munhá, J. M. (1996) - Geodynamic evolution of the Continental Allocthonous Terrane (CAT) of the Bragança Nappe Complex, NE Portugal. *Tectonics*, Vol. 15 n° 4: 747-762.
- Martínez Catalán, J. R.; Arenas, R.; Díaz García, F. & Abati, J. (1997) – The Variscan accretionary complex of NW Iberia: involved Terranes and succession of tectonothermal events. *XIV Reunión de Geología do Oeste Peninsular*: 117-122
- Matte, P. (1986) - La chaîne varisque parmi les chaînes periatlantiques: modèle d’évolution et position des grandes blocs continentaux au Permo-Carbonifère. *Bull. Soc. Geol. France*, II: 1-24.
- Matte, P. (1991) – Accretionary history and crustal evolution of the Variscan belt in Western Europe. *Tectonophysics*, 196: 309-337
- Meschede, M. (1986) - A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, 56: 207-218.
- Mullen, E. D. (1983) – MnO/TiO<sub>2</sub>/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth and Plan. Science Letters*, 62: 53-62
- Oliveira, D.; Pereira, E. & Machado, M. J. (2003) - “Pombais Unit”, Lower Morais Ophiolite Complex, (NE Portugal): Sulphide mineralisation & litho-geochemistry; This volume.
- Pearce, J. A. (1975) – Basalt geochemistry used to investigate past tectonic environments on Cyprus. *Tectonophysics*, 25: 41-67.
- Pearce, J. A. & Norry, M. J. (1979) - Petrogenetic Implications of Ti, Zr. and Nb variations in volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.* 69: 33-47.
- Pereira, E.; Ribeiro A. & Castro, P. (2000) – Carta Geológica de Portugal à escala 1: 50 000. Notícia Explicativa da Folha 7-D (Macedo de Cavaleiros). *Inst. Geol. Min. Portugal*, Lisboa: 63 p.
- Peucat, J.-J.; Bernard-Griffiths, J.; Ibarguchi, J. G.; Dallmeyer, R. D.; Menot, R. P.; Cormichet, J. & Iglésias, M. P. L. (1990) - Geochemical and geochronological cross-section of the deep Variscan crust: The Cabo Ortegal high-pressure nappe (northwestern Spain). *Tectonophysics*, 177: 263-292.
- Quiroga, J. L. (1982) – Estudio geológico del Paleozoico del W de Zamora. *Trabajos de Geología, Univ. Oviedo*, 12: 205-226
- Rey, P.; Burg, J.-P. & Casey, M. (1997) – The Scandinavian Caledonides and their relationship to the Variscan belt. In: Burg, J.-P. & Ford, M. (Eds.), *Orogeny Through Time, Geological Soc. Spec. Public. N°121*: 179-200
- Ribeiro, A. (1974) - Contribution à l’étude tectonique de Trás-os-Montes Oriental. *Serv. Geol. de Portugal Mem.* 24: 168 p.
- Ribeiro, A. (1993) – Variscan and Cadomian sutures in the Ibero-Armorican Arc. *Ossa Morena Meeting, Univ. Évora*, Portugal;

- Ribeiro, A.; Pereira, E & Dias, R. (1990,a) - Structure in the NW of the Iberia Peninsula (Alloctonous sequences). In: Dallmeyer, R.D. & Martinez Garcia, E. (Eds.): *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Springer-Verlag: 220-236
- Ribeiro, M. L. (1986) - *Geologia e Petrologia da região SW de Macedo de Cavaleiros (Trás-os-Montes oriental)*. Tese, Univ. Lisboa: 202 p.
- Romariz, C. (1969) - Graptolitos Silúricos do Noroeste Peninsular. *Com. Serv. Geol. Portugal*. T. LIII: 107-156.
- Sarmiento, G. N.; Piçarra, J. M.; Rebelo, J. A.; Robardet, M.; Gutiérrez-Marco, J. C.; Storch, P. & Rábano, I. (1997) - Le Silurien du Synclinorium de Moncorvo (NE du Portugal): Biostratigraphie et Importance Paléogéographique. *Geobios*, 32, 5: 749-767.
- Sun, S. S. & MacDonough, W. F. (1989) - Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. Magmatism in the Ocean Basin, *Geol. Soc. Sp. Publ.*, 42: 313-345.
- Sun, S. S.; Nesbitt, R. W. & Sharaskin, A. (1979) – Geochemical characteristics of mid-ocean ridge basalts. *Earth Planet. Sci. Letters*, V. 44 : 119-138.