

O manto superior subjacente à Crista Média Atlântica no sector dos Açores

The upper mantle beneath the Mid-Atlantic Ridge in the Azores sector

I. RIBEIRO DA COSTA* & F.J.A.S. BARRIGA*

Palavras-chave: Manto oceânico, harzburgito refractário, termobarometria, Crista Média Atlântica (CMA).

Resumo: Os serpentinitos aflorantes em zonas de falhas não-transformantes no sector Açoreano da Crista Média Atlântica apresentam aspectos texturais, mineralógicos e cristaloquímicos que permitiram caracterizar o manto superior subjacente a este sector e confirmar a influência do *hotspot* dos Açores nessa região.

O estudo de manto superior serpentinizado aflorante nas áreas Rainbow e Saldanha, neste sector da Crista Média Atlântica, pôs em evidência esses aspectos: a abundância de texturas pseudomórficas e a mineralogia reliquia ($Fo_{\text{olivina}} = 87-92$, $En_{\text{piroxena}} = 89-92$, $Cr\#_{\text{espinela}} = 46-52$) indicam um protólito refractário correspondente a um harzburgito com espinela, pontualmente associado a dunitos e harzburgitos tectonizados com anfíbola. O carácter refractário destas rochas ultramáficas e o metassomatismo anfibolítico, coadjuvados pelos dados termobarométricos obtidos por RIBEIRO DA COSTA *et al.* (2006), são consistentes com fusão parcial significativa do Manto Superior e com actividade metassomática intensificada nas proximidades do *hotspot* dos Açores, tal como sugerem estudos anteriores neste sector da Crista Média Atlântica.

Keywords: Refractory harzburgitic oceanic mantle, thermo-barometry, Mid-Atlantic Ridge (MAR).

Abstract: Low magma flow and significant crustal-scale extensional tectonics characterize the Mid-Atlantic Ridge (MAR), favouring seawater circulation down to the upper-mantle and fault-related exposures of serpentinitized upper-mantle peridotite (*e.g.*, FRANCIS, 1981; CANNAT, 1993; TUCHOLKE & LIN, 1994; ESCARTÍN & CANNAT, 1999). Samples of such serpentinitized ultramafic rocks were collected on two locations of the Azores sector of the MAR: the Rainbow hydrothermal field (36°14'N), and the Saldanha massif (36°34'N).

Textural, mineralogical and crystalchemical features of such serpentinite outcrops from non-transform *offsets* in the Azores *area* of the Mid-Atlantic Ridge (MAR) have provided enough evidence to identify their protolith and to characterize the upper mantle beneath this oceanic sector, confirming the relevance of the Azores hotspot on the nature of this mantle sector.

Serpentinitized upper mantle exposures on the Rainbow and Saldanha hydrothermal fields, located in the Azores sector of the Mid-Atlantic Ridge (MAR), exhibit pseudomorphic textures and relict mineralogy ($Fo_{\text{olivine}} = 87-92$, $En_{\text{pyroxene}} = 89-92$, $Cr\#_{\text{spinel}} = 46-52$) indicative of a dominant refractory spinel-harzburgite protolith, occasionally accompanied by minor dunites and strongly tectonized amphibole-bearing harzburgites. The refractory nature of these ultramafics and modal amphibole metasomatism are consistent with a significant extent of upper mantle partial melting and metasomatic activity on approaching the Azores hotspot, as suggested by previous studies in the area (*e.g.*, MICHAEL & BONATTI, 1985; BONATTI & MICHAEL, 1989; JUTEAU *et al.*, 1990; MÉVEL *et al.*, 1991). Moreover, mantle oxygen fugacities estimated by oxygen barometry in the relict mineralogy of the Rainbow and Saldanha rocks, considering likely harzburgite depths for mantle-melt segregation temperatures of 1200-1330°C (RIBEIRO DA COSTA *et al.*, 2006), also match the data and interpretations of those authors for the upper-mantle beneath the Azores sector of the MAR.

INTRODUÇÃO

Os peridotitos das cristas médias oceânicas são as rochas mantélicas mais de perto associadas com o vulcanismo das cristas oceânicas (MENZIES, 1991).

A Crista Média Atlântica (CMA) caracteriza-se por baixo fluxo magmático e importante tectónica distensiva

à escala crustal, favorecendo a circulação de água do mar até ao Manto superior e, muitas vezes, a exumação de peridotito mantélico serpentinizado associada a grandes acidentes *tectónicos* (*e.g.*, FRANCIS, 1981; CANNAT, 1993; TUCHOLKE & LIN, 1994; ESCARTÍN & CANNAT, 1999), tal como ocorre nalguns locais no sector Açoreano da CMA, nomeadamente nos campos hidrotermais Rainbow

* Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e CREMINER / LA-ISR
Campo Grande – Edifício C6, Piso 4. 1749-016 Lisboa, Portugal – Telefone: 21.7500320
e-mails: isabelrc@fc.ul.pt e fbarriga@fc.ul.pt

(36°14'N) e Saldanha (36°34'N), em foco no presente trabalho.

Evidências de carácter textural, mineralógico e geoquímico permitiram a identificação dos protólitos destes serpentinitos. Estas evidências, e os dados obtidos através de cálculos geotermobarométricos mais recentes (RIBEIRO DA COSTA *et al.*, 2006) com base na mineralogia relíquia destas rochas, permitiram estimar a profundidade do protólito peridotítico no manto superior oceânico e as fugacidades de oxigénio nessas condições. Os resultados do presente trabalho são também confrontados com as interpretações de outros autores que levaram a cabo estudos afins neste sector especial da CMA.

As amostras utilizadas neste estudo foram recuperadas durante as missões oceanográficas FLORES (1997), SALDANHA (1998) e IRIS (2001).

ENQUADRAMENTO GEOTECTÓNICO

A anomalia de fluxo magmático associada ao *hotspot* dos Açores situa-se 100-200 km a leste da CMA, perto da ilha do Faial (GEORGEN & LIN, 2002, e referências incluídas) e é responsável por gradientes térmicos, batimétricos, geoquímicos e gravíticos significativos numa extensão de 1500-2000 km ao longo da CMA, que afectam em particular o sector 38°N – 40°N desta Crista (*e.g.*, MICHAEL & BONATTI, 1985; DETRICK *et al.*, 1995; FOUQUET *et al.*, 1997; GEORGEN & LIN, 2002; MOREIRA & ALLÈGRE, 2002).

Os campos hidrotermais Rainbow e Saldanha situam-se no sector da CMA entre a Zona de Fractura do Pico e a Zona de Fractura Oceanographer, constituído por vários segmentos menores ligados por descontinuidades não-transformantes com desligamento esquerdo (DETRICK *et*

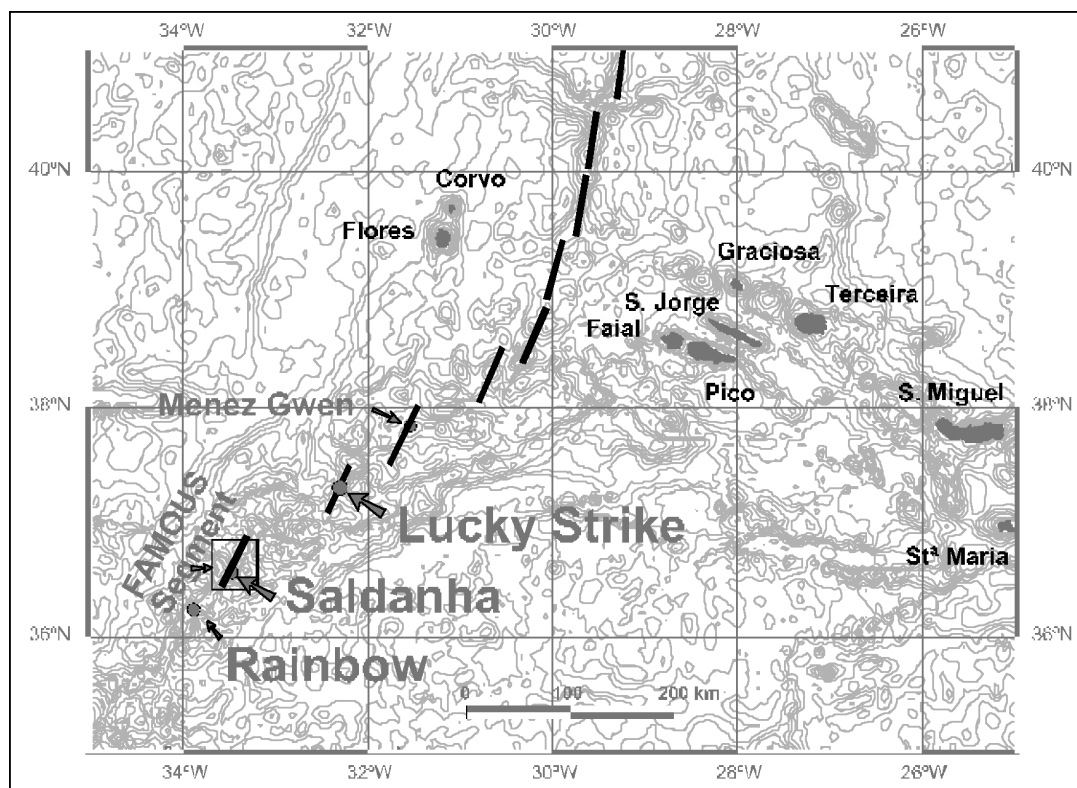


Fig. 1 – Mapa tectónico e batimétrico do sector da Crista Média Atlântica entre 33°N e 40°N, baseado nos dados coligidos durante a missão SIGMA (segundo NEEDHAM *et al.*, 1992, in DETRICK *et al.*, 1995): foram identificados 19 segmentos e numerosas descontinuidades não transformantes entre as Zonas de Fractura Oceanographer e Hayes. A figura incluída mostra a geometria tectónica da Junção Tripla dos Açores (segundo SEARLE, 1980, in DETRICK *et al.*, 1995).

- Regional-scale bathymetric and tectonic map of the MAR between 33°N and 40°N, based on data collected during campaign SIGMA (after NEEDHAM *et al.*, 1992, in DETRICK *et al.*, 1995): 19 spreading segments and numerous smaller non-transform discontinuities have been identified between the Oceanographer and Hayes Fracture Zones. Inset shows tectonic geometry of the Azores Triple Junction (after SEARLE, 1980, in DETRICK *et al.*, 1995).

al., 1995; CANNAT *et al.*, 1999; Fig. 1). A actividade magmática escassa (*e.g.*, TUCHOLKE & LIN, 1994) e a tectónica distensiva intensa (DETRICK *et al.*, 1995; CANNAT *et al.*, 1999) tornam estas descontinuidades não-transformantes favoráveis à exumação e ao afloramento de manto superior (mais ou menos serpentinizado e tectonizado) e de rochas da crosta inferior oceânica (gabros e doleritos).

É neste tipo de enquadramento que se localizam os dois campos hidrotermais, ambos em encaixante ultramáfico:

- o campo hidrotermal Rainbow (36°14'N 33°54'W), detectado em 1996 (GERMAN *et al.*, 1996) e inicialmente estudado durante a missão FLORES (BARRIGA *et al.*, 1997), ocupa um dos extremos da descontinuidade não-transformante AMAR/AMAR Sul (GERMAN *et al.*, 1996; FOUQUET *et al.*, 1997; FOUQUET & SCIENTIFIC PARTY, 1997); a cobertura sedimentar é extensa, mas são raras as ocorrências vulcânicas;
- o campo hidrotermal Saldanha (36°34'N 33°26'W), descoberto em 1998 durante a missão SALDANHA (BARRIGA *et al.*, 1999), situa-se no sector leste da descontinuidade não-transformante FAMOUS/AMAR (NEEDHAM *et al.*, 1992; GRÁCIA *et al.*, 1997, 2000; PARSON *et al.*, 2000; COSTA, 2001; MIRANDA *et al.*, 2003); esta ocorrência corresponde a uma secção exposta de manto superior serpentinizado, onde rochas ultramáficas, basálticas e gabróicas, variavelmente metassomatizadas, formam uma *mélange* tectónica heterogénea, entre a cobertura sedimentar abundante (BARRIGA *et al.*, 1999; COSTA, 2001; MIRANDA *et al.*, 2003).

A circulação hidrotermal nestes dois campos hidrotermais é naturalmente muito favorecida pela sua localização em domínios tectonicamente complexos, controlados por falhas (GERMAN *et al.*, 1996; FOUQUET *et al.*, 1997; PARSON *et al.*, 2000; GRÁCIA *et al.*, 1997, 2000; BARRIGA, 1999; COSTA, 2001; MIRANDA *et al.*, 2003).

PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS

As análises da mineralogia relíquia existente nos serpentinitos Rainbow e Saldanha foram realizadas por micro-sonda electrónica, em dois equipamentos: na micro-sonda JEOL JXA-733 do Centro de Geologia (Facul-

dade de Ciências, Universidade de Lisboa) e na micro-sonda CAMEBAX-CAMECA do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (S. Mamede de Infesta, Porto).

A corrente do feixe electrónico foi de 15 kV, para um diâmetro médio do feixe de 5µm. Utilizaram-se tempos de medida de 20 segundos no pico e 5 segundos em cada fundo.

Padrões utilizados na análise das olivinas e piroxenas: olivina (Si, Mg, Ni, and Fe), distena (Al), wollastonite (Ca), kaersutite (Ti), rodonite (Mn), Cr-metal (Cr), Cu-metal (Cu) e Co-metal (Co), na micro-sonda JEOL; MgO (Mg), ortose (Al and Si), andradite (Ca), MnTiO₃ (Mn and Ti), Cr₂O₃ (Cr), Fe₂O₃ (Fe), Co-metal (Co), Ni-metal (Ni) e Cu-metal (Cu), na micro-sonda CAMECA.

Padrões usados na análise das espinelas cromíferas: espinela (Al and Mg), magnetite (Fe), ilmenite (Ti), Cr-metal (Cr), na micro-sonda JEOL; MgO (Mg), ortose (Al), MnTiO₃ (Mn and Ti), Cr₂O₃ (Cr), Fe₂O₃ (Fe), Ni-metal (Ni) e esfalerite (Zn), na micro-sonda CAMECA.

As fórmulas estruturais das olivinas e das piroxenas foram determinadas assumindo o número de oxigénios caracterizando a estequiometria desses minerais e ocupação completa das posições aniónicas nas estruturas.

As fórmulas estruturais das espinelas cromíferas foram determinadas assumindo ocupação completa das posições aniónicas e das posições dos catiões trivalentes, permitindo assim uma distribuição ideal do Fe³⁺ and Fe²⁺ na estrutura, para um dado teor de Fe total: o cálculo é iterativo e prossegue até ambas as condições estarem asseguradas; para as espinelas cromíferas da CMA, obteve-se boa convergência após 4-5 iterações. O método, desenvolvido por J. Figueiras e A. Mateus (*pers. commun.*) foi previamente validado por estudos de espectroscopia de Mössbauer (WAERENBORGH *et al.*, 2002).

Os dados de química de rocha-total apresentados neste trabalho foram obtidos nos laboratórios ACTLABS (Ancaster, Canada), por ICP-fusão (elementos maiores) e INAA – activação neutrónica (Cr, Ni, Zn, As, and REE).

RESULTADOS

Evidências texturais

Apesar da sua intensa serpentinição, cerca de 75% dos serpentinitos amostrados apresentam texturas pseudomórficas reconhecíveis, tornando possível inferir

a mineralogia original destas rochas. Predominam os pseudomorfos de olivina, formando a bem conhecida textura reticulada de serpentina (textura “mesh”; Fig. 2a) ou as suas derivadas, o que permite deduzir que a olivina constituía mais de 80% dos peridotitos originais. Na maior parte das amostras, ocorrem também “bastites” resultantes da serpentinização de ortopiroxena (de acordo com os critérios definidos por DUNGAN, 1979; Fig. 2b); estes pseudomorfos, em proporções modais variáveis, que não ultrapassam 20%, são texturalmente mais estáveis do que os de olivina; as relíquias de ortopiroxena são raras.

A mineralogia relíquia ou deduzida a partir das texturas pseudomórficas dos serpentinitos estudados aponta para protólitos peridotíticos correspondentes a harzburgitos espinelíferos; no caso de raras amostras sem bastites nem cromite, o protólito terá sido dunítico.

Minerais-relíquia

Alguns dos serpentinitos estudados retêm pequenas relíquias de olivina e ortopiroxena envolvidas pelas respectivas texturas pseudomórficas. As análises obtidas

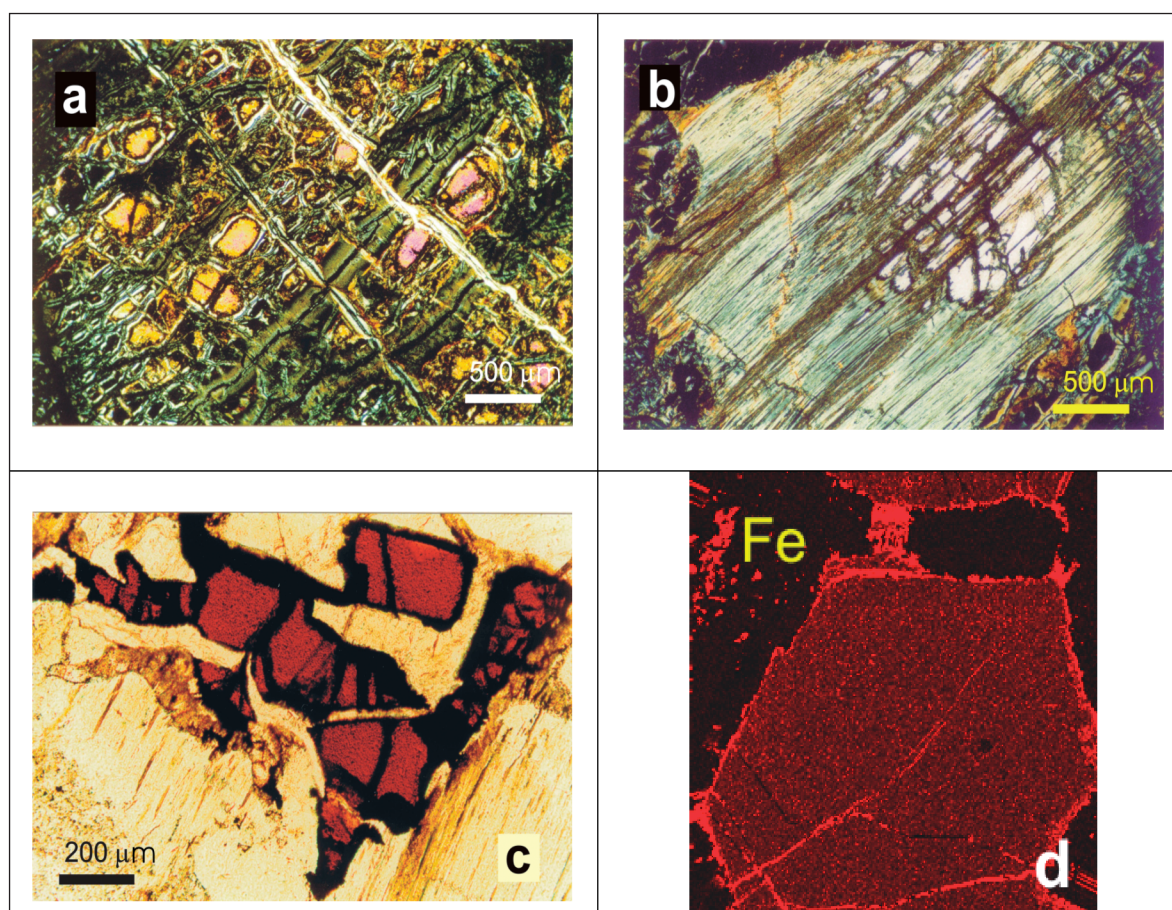


Fig. 2 – (a)-(c) Fotomicrografias da mineralogia relíquia nos serpentinitos estudados: (a) fragmentos de olivina relíquia envolvidos por serpentina reticulada pseudomórfica (amostra FL-02-04; polaróides cruzados); (b) ortopiroxena parcialmente pseudomorfizada por serpentina-bastite (amostra FL-08-12; polaróides cruzados); (c) Relíquias de espinela de Cr (amostra FL-02-04; luz plano-polarizada). (d) Mapa de raios-X (para o Fe) de um grão de espinela de Cr.

- (a)-(c) Photomicrographs of the relic mineralogy observed in the sampled serpentinites: (a) olivine relic fragments within mesh serpentine (sample FL-02-04; crossed polars); (b) orthopyroxene partly replaced by bastite serpentine (sample FL-08-12; crossed polars); (c) Cr-spinel relics (sample FL-02-04; plane-polarized light). (d) X-ray map of Cr-spinel grain showing Cr variation.

por micro-sonda electrónica (Tabela 1(a)) revelaram que ambos os silicatos-reliquia têm composições muito magnesianas (Fo_{87-92} para a olivina, En_{89-92} para a ortopiroxena), com a ortopiroxena a apresentar altos teores em Cr (0.69–0.91 % Cr_2O_3) e baixos teores de Al (2.07-2.68 % Al_2O_3).

A cromite primária, razoavelmente bem preservada, é um mineral acessório ubíquo na maioria destes serpentinitos (Fig. 2c). Esta espinela cromífera apresenta as seguin-

tes variações composicionais: # Cr = 45-65, # Fe = 30-50 (dados mais detalhados na (Tabela 1(b)). Tal como se verifica para as relíquias dos silicatos, as relíquias de cromite retêm composições originais bastante homogêneas, embora as análises de micro-sonda electrónica e os mapas de raios-X (Fig. 2d) efectuados nalguns grãos de cromite revelem alguma oxidação no bordo mais exterior, onde se regista enriquecimento relativo em Cr, Fe^{3+} e Fe^{2+} e perda de Mg e Al (ferritromite: Cr # = 53-95;

TABELA 1 (a)

Composição (analisada por micro-sonda electrónica) e proporções catiónicas dos silicatos-reliquia – olivina e ortopiroxena – dos serpentinitos Rainbow e Saldanha, e das anfíbulas metassomáticas dos peridotitos tectonizados do campo Saldanha.

Electron microprobe analyses and calculated cation proportions for relic olivine and orthopyroxene from the Rainbow and Saldanha serpentinites, and for metasomatic amphibole from the Saldanha tectonized peridotites.

Localização	<u>Olivinas</u>	<u>Olivinas</u>	Localização	<u>Ortopiroxenas</u>	<u>Ortopiroxenas</u>	<u>Anfíbulas</u>
Nº de análises	Rainbow	Saldanha	Nº de análises	Rainbow	Saldanha	Saldanha
	(7)	(4)		(5)	(3)	(3)
SiO₂	40.62 - 41.23	40.30 - 41.59	SiO₂	55.85 - 57.15	55.74 - 56.57	43.06 - 44.25
TiO₂	0.00 - 0.02	0.00 - 0.02	TiO₂	0.00 - 0.04	0.06 - 0.08	3.07 - 3.40
Al₂O₃	0.00 - 0.01	0.00 - 0.01	Al₂O₃	2.07 - 2.68	2.15 - 2.42	10.19 - 11.89
Cr₂O₃	0.00 - 0.03	0.00 - 0.03	Cr₂O₃	0.69 - 0.91	0.76 - 0.86	0.07 - 1.16
FeO	8.00 - 8.66	11.03 - 12.84	FeO	5.10 - 5.41	6.68 - 6.99	6.98 - 11.47
MnO	0.08 - 0.14	0.20 - 0.25	MnO	0.06 - 0.14	0.01 - 0.09	0.00 - 0.23
MgO	48.87 - 50.26	47.61 - 48.96	MgO	32.92 - 33.18	31.35 - 33.58	13.72 - 16.02
CaO	0.02 - 0.07	0.00 - 0.03	CaO	1.28 - 1.89	0.65 - 3.57	11.69 - 12.05
NiO	0.34 - 0.38	0.27 - 2.36	NiO	0.08 - 0.14	0.00 - 0.24	0.00 - 0.22
CuO	0.00 - 0.03	0.00 - 0.14	CuO	0.00 - 0.03	0.00 - 0.14	0.00
CoO	0.01 - 0.06	0.00 - 0.01	CoO	0.00 - 0.04	0.00 - 0.02	0.00
Cl₂	0.00 - 0.02	0.00 - 0.01	Cl₂	0.000 - 0.004	0.00 - 0.01	0.02 - 0.08
Total (%)	98.80 - 100.66	100.53 - 101.13	Total (%)	99.20 - 100.33	100.65 - 101.01	94.49 - 94.76
	<u>Catiões na base de 4 oxigénios</u>			<u>Catiões na base de 6 oxigénios</u>		<u>Cat. p/ 23 oxig.</u>
Si	0.097 - 1.014	0.987 - 1.008	Si	1.941 - 1.64	1.933 - 1.942	6.350 - 6.561
Al	0.000	0.000	Al^{IV}	0.036 - 0.059	0.058 - 0.067	1.439 - 1.650
Ti	0.000	0.000	Al^{VI}	0.041 - 0.059	0.021 - 0.040	0.357 - 0.558
Cr	0.000	0.000	Ti	0.000 - 0.001	0.002	0.242 - 0.383
Fe²⁺	0.164 - 0.178	0.226 - 0.261	Cr	0.019 - 0.025	0.021 - 0.023	0.008 - 0.135
Mn	0.002 - 0.003	0.004 - 0.005	Fe²⁺	0.148 - 0.155	0.192 - 0.203	0.861 - 1.435
Mg	1.792 - 1.820	1.732 - 1.749	Mn	0.002 - 0.004	0.000 - 0.003	0.000 - 0.029
Ni	0.007	0.005 - 0.045	Mg	1.687 - 1.716	1.621 - 1.724	3.059 - 3.522
Cu	0.000	0.000 - 0.003	Ca	0.047 - 0.069	0.024 - 0.133	1.873 - 1.904
Co	0.000 - 0.001	0.000	Ni	0.002 - 0.004	0.000 - 0.007	0.000 - 0.026
			Cu	0.000 - 0.001	0.000 - 0.004	0.000
Total catiões	2.983 - 3.003	2.990 - 3.011	Co	0.000 - 0.001	0.000 - 0.001	0.000
(%Fo)	91.0 - 91.7	86.9 - 88.5	Total catiões	3.980 - 3.994	3.997 - 4.011	15.115 - 15.207
			(%En)	91.6 - 92.1	88.9 - 89.8	-

TABELA 1 (b)

Composição (analisada por micro-sonda electrónica) e proporções catiónicas de cromites-reliquia dos serpentinitos Rainbow e Saldanha.

Electron microprobe analyses and calculated cation proportions for relic chromite from the Rainbow and Saldanha serpentinites.

Localização (Nº de análises)	Rainbow (26)		Saldanha (36)	
	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
TiO₂	0.18	0.15	0.19	0.20
Cr₂O₃	42.36	2.59	42.84	3.58
Al₂O₃	22.56	8.07	22.24	5.14
V₂O₃	0.19	0.05	0.18	0.08
FeO	21.30	9.46	21.61	4.99
MnO	0.35	0.13	0.33	0.15
NiO	0.10	0.06	0.09	0.04
ZnO	0.15	0.05	0.24	0.10
MgO	11.41	3.52	10.98	2.52
Total	98.59	2.21	98.70	1.09
Proporções catiónicas calculadas na base de 4 oxigénios e assumindo total de 2 catiões trivalentes				
Ti	0.004	0.004	0.005	0.005
Cr	1.055	0.108	1.069	0.120
Al	0.815	0.275	0.818	0.164
Fe³⁺	0.120	0.192	0.104	0.062
V	0.005	0.002	0.005	0.003
Total (catiões trivalentes)	2.000	0.000	2.000	0.000
Fe²⁺	0.458	0.140	0.470	0.103
Mn	0.010	0.005	0.009	0.004
Mg	0.524	0.147	0.511	0.106
Ni	0.003	0.002	0.002	0.001
Zn	0.003	0.001	0.006	0.002
Total (catiões divalentes)	0.998	0.002	0.998	0.003
Total de catiões	2.998	0.002	2.998	0.003
# Cr = Cr/(Cr+Al) x 100	56		57	
# Fe = Fe/(Fe+Mg) x 100	47		48	

Fe # = 39-90), idênticos aos descritos para muitas outras cromites associadas a peridotitos serpentinizados (*e.g.*, BEESON & JACKSON, 1969; ONYEAGOGCHA, 1974; KIMBALL, 1990; TESALINA *et al.*, 2003).

Alguns harzburgitos granoblásticos tectonizados do campo Saldanha (SAL-09-05B/C; RIBEIRO DA COSTA, 2005) incluem bandas ricas em hornblenda titanífera (Tabela 1(a)): embora haja registo de ocorrências de veios anfíbolíticos em peridotitos serpentinizados das zonas de intersecção da CMA com a Zona de Fractura Kane (MÉVEL *et al.*, 1991) e com a falha transformante Vema (CANNAT & SEYLER, 1995), atribuindo-se essa anfíbola à substituição de piroxena durante processos hidrotermais

decorrentes em níveis profundos da litosfera, a composição da hornblenda encontrada nestes harzburgitos serpentinizados do campo Saldanha, nomeadamente os seus teores particularmente elevados em TiO₂ e baixos em Cr₂O₃ (Tabela 1(a)) sugerem que estas ocorrências resultem antes de metassomatismo mantélico.

Geoquímica de rocha total

A composição dos peridotitos subjacentes a este sector da CMA, inferida através dos serpentinitos estudados (Tabela 2), caracteriza-se por teores elevados

TABELA 2

Composição dos peridotitos serpentinizados dos campos hidrotermais Rainbow e Saldanha: os elementos maiores foram recalculados numa base anidra e sem carbonatos. As análises de harzburgitos médios da CMA de MICHAEL & BONATTI (1985)⁽¹⁾ e de JUTEAU *et al.* (1990)⁽²⁾ são apresentadas para comparação.

Whole-rock composition of the Rainbow and Saldanha serpentitized peridotites: major elements recalculated on a carbonate-free, anhydrous basis. Average MAR harzburgite analyses from MICHAEL & BONATTI (1985)⁽¹⁾ e de JUTEAU *et al.* (1990)⁽²⁾ are shown for comparison.

Elementos maiores (%)	Serpentinitos da CMA: composições recalculadas numa base anidra e sem carbonato				Harzburgitos da CMA	
	Rainbow		Saldanha		(1)	(2)
	(20 amostras)	Valor médio	(12 amostras)	Valor médio	M & B (1985)	J <i>et al.</i> (1990)
SiO ₂	42.63 - 44.99	43.97	42.57 - 47.08	44.41	43.64	43.51
TiO ₂	0.00 - 0.03	0.01	0.00 - 0.02	0.00	0.01	
Al ₂ O ₃	0.15 - 0.88	0.58	0.14 - 0.86	0.58	0.65	0.54
Fe ₂ O ₃ (t)	7.63 - 15.28	9.56	5.32 - 10.35	8.14	8.70	9.04
MnO	0.06 - 0.27	0.11	0.05 - 0.22	0.10		
MgO	44.54 - 47.68	45.70	45.95 - 47.60	46.81	46.36	46.21
CaO	0.00 - 0.04	0.00	0.00	0.00	0.5	
Na ₂ O	0.04 - 0.36	0.21	0.05 - 0.20	0.12	0.005	
K ₂ O	0.01 - 0.06	0.03	0.01 - 0.06	0.03		
P ₂ O ₅	0.01 - 0.13	0.03	0.01 - 0.06	0.02		

de Mg e muito baixos de Al, e um empobrecimento geral em todos os metais-traço, com excepção do Ni e do Cr, como é expectável em harzburgitos com espinela. É evidente a semelhança entre as análises das rochas dos campos Rainbow e Saldanha, devidamente corrigidas para uma base anidra e sem fracção carbonatada (Tabela 2), e as composições de outros harzburgitos da CMA (MICHAEL & BONATTI, 1985; JUTEAU *et al.*, 1990).

É também interessante constatar que, na ausência de processos metassomáticos subsequentes, a serpentinação não parece ter afectado significativamente os padrões típicos de terras-raras dos harzburgitos (Fig. 3; RIBEIRO DA COSTA, 2005), que mantêm o perfil tipicamente côncavo destas rochas ultramáficas (FREY, 1984; GRUAU *et al.*, 1998).

DISCUSSÃO

O protólito ultramáfico

As evidências apresentadas na secção anterior indicam que os serpentinitos Rainbow e Saldanha correspon-

dem a harzburgitos mantélicos serpentinizados. O facto de terem sido frequentemente amostrados próximo de gabros, doleritos e basaltos, como no caso das amostras recolhidas no campo Saldanha, sugere que estas rochas pertencem aos níveis peridotíticos mais superiores do manto oceânico (MICHAEL & BONATTI, 1985).

Este protólito harzburgítico residual, pontualmente associado a rochas duníticas, tem paralelo noutras ocorrências de manto superior oceânico serpentizado e exumado em cristas oceânicas (*e.g.*, MICHAEL & BONATTI, 1985; MÉVEL *et al.*, 1991) e nas evidências observadas em ofiolitos (*e.g.*, SPRAY, 1991; COULTON *et al.*, 1995; BOUDIER & NICOLAS, 1995). São particularmente relevantes as semelhanças geoquímicas e mineralógicas entre o protólito ultramáfico nas zonas Rainbow e Saldanha e o harzburgito espinelífero inferido como protólito dos serpentinitos de zonas de fractura no sector 34°-45°N da CMA e caracterizado por elevadas razões modais olivina/ortopiroxena, silicatos-reliquia muito magnesianos, altos teores de Cr e baixos teores de Al na espinela e na ortopiroxena, ausência de clinopiroxena, e uma depleção generalizada de elementos-traço (MICHAEL & BONATTI, 1985; BONATTI & MICHAEL, 1989; JUTEAU *et al.*, 1990).

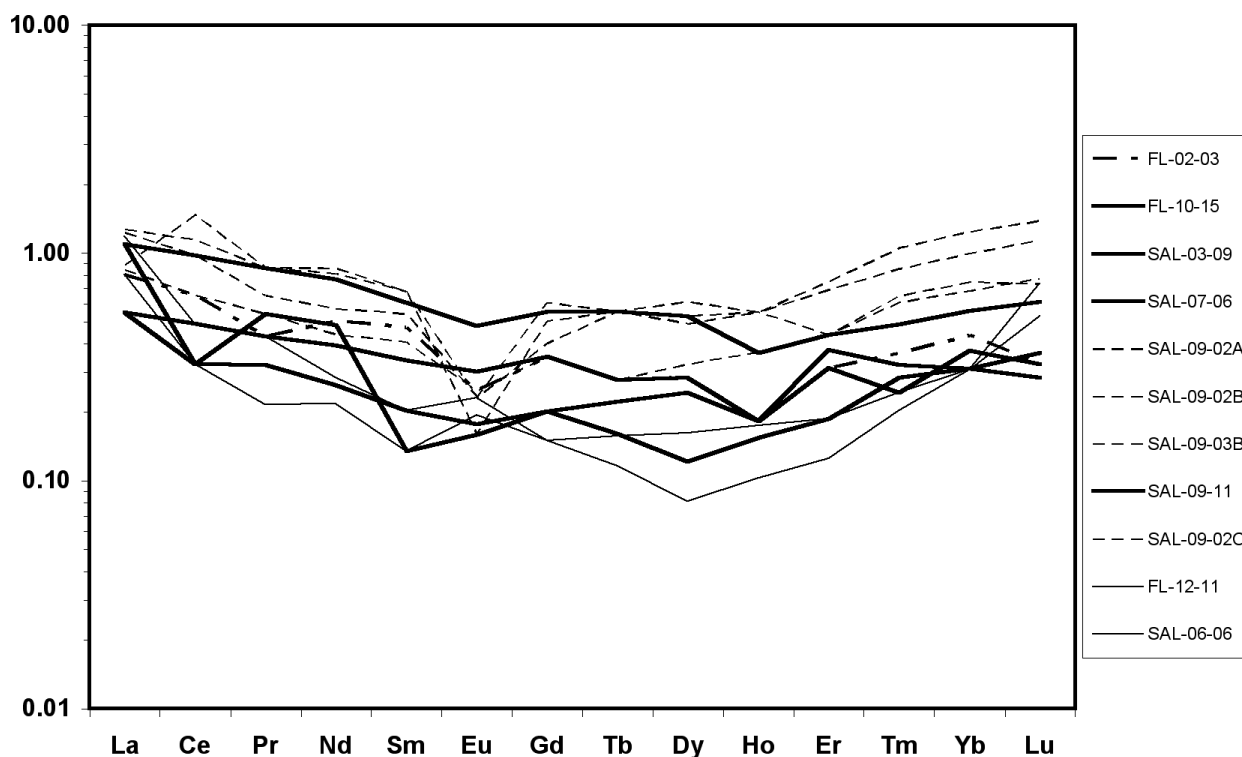


Fig. 3 – Padrões de elementos das terras-raras, com normalização condritica para alguns serpentinitos dos campos Rainbow e Saldanha que não sofreram processos hidrotermais subsequentes à serpentinização (dados de RIBEIRO DA COSTA, 2005).

– Chondrite-normalized REE patterns for a few serpentinites from the Rainbow and Saldanha fields which have not gone through subsequent hydrothermal processes (data from RIBEIRO DA COSTA, 2005).

O manto subjacente às áreas Rainbow e Saldanha: seu comportamento e posição

Os aspectos descritos são típicos de peridotitos oceânicos residuais, altamente refractários, que foram submetidos a graus de fusão parcial consideráveis e temperaturas mantélicas elevadas (MICHAEL & BONATTI, 1985; BONATTI & MICHAEL, 1989; JOHNSON *et al.*, 1990). Na realidade, vários estudos (*e.g.*, JAQUES & GREEN, 1980; MICHAEL & BONATTI, 1985; BONATTI & MICHAEL, 1989; HELLEBRAND *et al.*, 2001) mostraram que os peridotitos mantélicos subjacentes à região 34°-45°N são mais refractários do que os peridotitos de outras zonas da CMA, provavelmente devido a um maior grau de fusão parcial (envolvendo taxas de fusão parcial 10 a 15% mais elevadas do que para peridotitos menos refractários), relacionado com a proximidade da anomalia térmica e química responsável pelo *hotspot* dos Açores (MICHAEL & BONATTI, 1985; JOHNSON *et al.*, 1990). De facto, os

números de Cr elevados da espinela (#Cr = 45-65) e da ortopiroxena (#Cr = 17-19) dos harzburgitos serpentinizados provenientes dos campos Rainbow e Saldanha sugerem graus de fusão parcial de acima de 20-25%, de acordo com as calibrações apresentadas por BONATTI *et al.* (2003).

A ocorrência de peridotitos harzburgíticos nestas zonas de expansão oceânica é favorecida pela posição da astenosfera em níveis relativamente próximos da superfície (SPRAY, 1991), onde a crosta oceânica se encontra distendida e adelgada graças a tectónica intensa e à baixa produção magmática (*e.g.*, TUCHOLKE & LIN, 1994; DETRICK *et al.*, 1995; CANNAT *et al.*, 1999).

Mais recentemente, as paragêneses-reliquia dos serpentinitos dos campos Rainbow e Saldanha foram usadas para estimar alguns parâmetros petrológicos, nomeadamente temperaturas de equilíbrio e fugacidades de oxigénio do manto superior a essas temperaturas (RIBEIRO DA COSTA *et al.*, 2006): recorrendo à composi-

ção de um basalto (de tipo N-MORB) desta região da CMA, foram estimadas temperaturas de saturação da olivina da ordem de 1200-1300°C; os cálculos geobarométricos baseados nestas temperaturas indicam pressões de 12-14 kbar, correspondentes a profundidades de aprox. 39-45 km, para estes harzburgitos mantélicos. Estes valores estão em boa concordância com a ocorrência, em zonas de expansão oceânica, de fusão parcial em níveis relativamente pouco profundos do manto, a pressões entre 10 e 15 kbar (MCKENZIE & BICKLE, 1988).

Os cálculos de fugacidade de oxigénio levados a cabo no mesmo trabalho (RIBEIRO DA COSTA *et al.*, 2006), para as temperaturas e pressões estimadas, revelaram condições redutoras a moderadamente redutoras ($\Delta QFM = -4.13$ to -1.65) para o manto harzburgítico subjacente aos campos Rainbow e Saldanha, como é típico do manto superior oceânico (*e.g.*, DICK & BULLEN, 1984).

Por outro lado, as fugacidades de oxigénio do manto obtidas para as amostras de peridotito com anfíbola do campo Saldanha ($\Delta QFM = +1.13$; RIBEIRO DA COSTA *et al.*, 2006) sugerem que esses peridotitos equilibraram sob condições mais oxidantes, provavelmente associadas a metassomatismo mantélico (BALHAUS *et al.*, 1991), como referido atrás. Tal é confirmado pelos teores ligeiramente mais baixos de Mg na olivina e na ortopiroxena e pela presença de anfíbola rica em Ti, nestas rochas (Tabela 1(a)).

As fugacidades de oxigénio obtidas por RIBEIRO DA COSTA *et al.* (2006) são corroboradas pela composição da espinela, confirmando que as razões $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ e $Cr/\Sigma R^{3+}$ das espinelas mantélicas são bons indicadores da fugacidade de oxigénio do manto (HILL & ROEDER, 1974): os teores elevados de Cr ($Cr\# = 45-65$) e as razões $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ muito baixas ($Fe^{3+} < 0.04$ átomos por unidade de fórmula, para 4 átomos de oxigénio; (Tabela 1(b)) que caracterizam as espinelas cromíferas primárias destes serpentinitos da CMA sugerem baixas fugacidades de oxigénio na secção do manto superior onde se formaram.

CONCLUSÕES

Apesar de algumas heterogeneidades regionais na composição do peridotito mantélico da Crista Média Atlântica, os nossos dados e conclusões relativos à natureza refractária do harzburgito do manto oceânico subjacente aos campos hidrotermais Rainbow e Saldanha confirma estudos prévios sobre os peridotitos subjacentes à Crista Média Atlântica, em particular os do sector

34°-45°N, afectado pelo *hotspot* dos Açores (*e.g.*, MICHAEL & BONATTI, 1985; MÉVEL *et al.*, 1991; CANNAT *et al.*, 1992; GRÁCIA *et al.*, 1997).

As características refractárias das rochas ultramáficas estudadas (olivina e ortopiroxena com altos teores em Mg, e espinela cromífera) e o metassomatismo anfibolítico são consistentes, respectivamente, com fusão parcial significativa do manto superior e actividade metassomática nas proximidades do *hotspot* dos Açores, como sugerem também estudos prévios nesta área.

Cálculos termobarométricos baseados na mineralogia-reliquia dos serpentinitos estudados (RIBEIRO DA COSTA *et al.*, 2006) permitiram inferir que os harzburgitos desta zona da Crista Média Atlântica deveriam situar-se a profundidade aproximada de 39-45 km no Manto Superior oceânico (12-14 kb), sob condições moderadamente redutoras, embora localmente pudessem estar sujeitos a processos de metassomatismo mantélico e a condições mais oxidantes.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi co-financiado pelo projecto SEAHMA (PDCTM-POCTI/MAR-15281-1999), do Programa PDCTM (FCT) e pelo CREMINER: POCT-ISFL-5-518/FEDER.

Merecem especial reconhecimento as equipas científicas das missões FLORES, SALDANHA e IRIS, responsáveis pela recolha das amostras usadas neste estudo e pela sua identificação preliminar, e os colegas Octávio Chaveiro (Centro de Geologia, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa), João Farinha Ramos, Jorge Ferreira e Fernando Santos (Laboratório Nacional de Energia e Geologia, S. Mamede de Infesta, Porto), pela assistência na obtenção de análises e de mapas de raios-X por micro-sonda electrónica.

Os autores agradecem também a João Mata, Pedro Madureira e Filipa Marques a revisão cuidadosa do manuscrito e as sugestões apresentadas para o melhorar.

REFERÊNCIAS

- BALHAUS, C., BERRY, R.F. & GREEN, D.H. (1991) – High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implications for the oxidation state of the upper mantle. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **107**: 27-40.

- BARRIGA, F.J.A.S., COSTA, I.M.A., RELVAS, J.M.R.S., RIBEIRO, A., FOUQUET, Y., ONDRÉAS, H., PARSON, L. & THE FLORES SCIENTIFIC PARTY (1997) – The Rainbow serpentinites and serpentinite-sulphide stockwork (Mid-Atlantic Ridge, AMAR segment): a preliminary report of the FLORES results. *Eos Trans. AGU*, **78**: F832-F833.
- BARRIGA, F.J.A.S., FOUQUET, Y., ALMEIDA, A., BISCOITO, M., CHARLOU, J.L. COSTA, R.L.P., DIAS, A., MARQUES, A., MIRANDA, J.M., OLU, K., PORTEIRO, F. & QUEIROZ, M.G. (1999) – Preliminary results of the Saldanha mission (FAMOUS segment of the MAR 36°30'N). *Geophys. Res. Abstr.*, **1**. Eur. Geophys. Soc., Den Haag.
- BEESON, M.H. & JACKSON, E.D. (1969) – Chemical composition of altered chromites from the Stillwater Complex, Montana. *Amer. Min.*, **54**: 1084-1100.
- BONATTI, E., LIGI, M., BRUNELLI, D., CIPRIANI, A., FABRETTI, P., FERRANTE, V., GASPERINI, L. & OTTOLINI, L. (2003) – Mantle thermal pulses below the Mid-Atlantic Ridge and temporal variations in the formation of oceanic lithosphere. *Nature*, **423**: 499-505.
- BONATTI, E. & MICHAEL, P.J. (1989) – Mantle peridotites from continental rifts to ocean basins to subduction zones. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **91**: 297-311.
- BOUDIER, F. & NICOLAS, A. (1995) – Nature of the Moho Transition Zone in the Oman ophiolite. *J. Petrol.*, **36**: 777-796.
- CANNAT, M. (1993) – Emplacement of mantle rocks in the seafloor at mid-ocean ridges. *J. Geophys. Res.*, **98**: 4163-4172.
- CANNAT, M. & SEYLER, M. (1995) – Transform tectonics, metamorphic plagioclase and amphibolitization in ultramafic rocks of the Vema transform fault (Atlantic Ocean). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **133**: 283-298.
- CANNAT, M., BIDEAU, D. & BOUGAULT, H. (1992) – Serpentinized peridotites and gabbros in the Mid-Atlantic Ridge axial valley at 15°37' and 16°52'N. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **109**: 87-106.
- CANNAT, M., BRIAIS, A., DEPLUS, C., ESCARTÍN, J., GEORGEN, J., LIN, J., MERCOURIEV, S., MEYZEN, C., MULLER, M., POULIQUEN, G., RABAIN, A. & SILVA, P. (1999) – Mid-Atlantic Ridge – Azores hotspot interactions: along-axis migration of a hotspot-derived event of enhanced magmatism 10 to 4 Ma ago. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **173**: 257-269.
- COSTA, R.L.P. (2001) – *Estudo mineralógico e geoquímico da alteração hidrotermal das rochas vulcânicas e ultramáficas serpentinizadas do Monte Saldanha (RMA, segmento FAMOUS/AMAR)*. Dissert. Mestrado, Universidade de Lisboa p..
- COULTON, A.J., HARPER, G.D. & O'HANLEY, D.S. (1995) – Oceanic versus emplacement age serpentinization in the Josephine ophiolite: implications for the nature of the Moho at intermediate and slow spreading ridges. *J. Geophys. Res.*, **100**: 22245-22260.
- DETRICK, R.S., NEEDHAM, H.D. & RENARD, V. (1995) – Gravity anomalies and crustal thickness variations along the Mid-Atlantic Ridge between 33°N and 40°N. *J. Geophys. Res.*, **100** (B3): 3767-3787.
- DICK, H.B. & BULLEN, T. (1984) – Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **86**: 54-76.
- DUNGAN, M.A. (1979) – Bastite pseudomorphs after orthopyroxene, clinopyroxene and tremolite. *Can. Min.*, **17**: 729-740.
- ESCARTÍN, J. & CANNAT, M. (1999) – Ultramafic exposures and the gravity signature of the lithosphere near the Fifteen-Twenty fracture Zone (Mid-Atlantic Ridge, 14°-16,5°N). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **171**: 411-424.
- FOUQUET, Y. & SCIENTIFIC PARTY (1997) – Cruise report, FLORES cruise, AMORES project of the European MAST III programme Plouzané, IFREMER, DRO/GM.
- FOUQUET, Y., CHARLOU, J.L., ONDRÉAS, H., RADFORD-KNOERY, J., DONVAL, J.P., DOUVILLE, E., APPRIOU, R., CAMBON, P., PELLÉ, H., LANDURÉ, J.Y., NORMAND, A., PONSEVERA, E., GERMAN, C., PARSON, L., BARRIGA, F., COSTA, I., RELVAS, J. & RIBEIRO, A. (1997) – Discovery and first submersible investigations on the Rainbow hydrothermal field on the MAR (36°14'N). *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, **78**: F832 (abstr.).
- FRANCIS, T.J.G. (1981) – Serpentinization faults and their role in the tectonics of slow-spreading ridges. *J. Geophys. Res.*, **86**(B12): 11616-11622.
- FREY, F.A. (1984) – Rare earth element abundances in upper mantle rocks. In: Henderson, P. (ed.), *Rare Earth Element Geochemistry*. Developments in Geochemistry, vol. 2 (ch. 5): 153-203. Elsevier.
- GEORGEN, J.E. & LIN, J. (2002) – Three-dimensional passive flow and temperature structure beneath oceanic ridge-ridge-ridge triple junctions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **204**: 115-132.
- GERMAN C.R., PARSON, L.M. & THE HEAT SCIENTIFIC TEAM (1996) – Hydrothermal exploration at the Azores Triple Junction: Tectonic control of venting at slow spreading ridges? *Earth. Planet. Sci. Lett.* **138**: 93-104
- GRÁCIA, E., BIDEAU, D., HEKINIAN, R., LAGABRIELLE, Y. & PARSON, L.M. (1997) – Along-axis magmatic oscillations and exposure of ultramafic rocks in a second-order segment of the Mid-Atlantic Ridge (33°43'N to 34°07'N). *Geology*, **25**: 1059-1062.
- GRÁCIA, E., CHARLOU, J.L., RADFORD-KNOERY, J. & PARSON, L.M. (2000) – Non-transform offsets along the Mid-Atlantic Ridge south of the Azores (38°N-34°N): ultramafic exposures and hosting of hydrothermal vents. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **177**: 89-103.
- GRUAU, G., BERNARD-GRIFFITHS, J. & LÉCUYER, C. (1998) – The origin of U-shaped rare earth patterns in ophiolite peridotites: assessing the role of secondary alteration and melt/rock reaction. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **62**: 3545-3560.
- HELLEBRAND, E., SNOW, J.E., DICK, H.J.B. & HOFMANN, A.W. (2001) – Coupled major and trace elements as indicators of the extent of melting in mid-ocean ridge peridotites. *Nature*, **410**: 677-681.
- HILL, R. & ROEDER, P. (1974) – The crystallization of spinel from basaltic liquid as a function of oxygen fugacity. *J. Geol.*, **82**: 709-729.

- JAQUES, A.L. & GREEN, D.H. (1980) – Anhydrous melting of peridotite at 0-15 Kb pressure and the genesis of tholeiitic basalts. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **73**: 287-310.
- JOHNSON, K.T.M., DICK, H.J.B. & SHIMIZU, N. (1990) – Melting in the oceanic upper mantle: an ion microprobe study of diopsides in abyssal peridotites. *J. Geophys. Res.*, **95**: 2661-2678.
- JUTEAU, T. *et al.* (1990) – Serpentinized, residual mantle peridotites from the MAR Median Valley, ODP Hole 670A (21°02'W, Leg 109): primary mineralogy and geothermometry. *In: Proc. ODP: Initial Reports*, **106/109**: 27-45.
- KIMBALL, K.L. (1990) – Effects of hydrothermal alteration on the compositions of chromian spinels. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **105**: 337-346.
- MCKENZIE, D. & BICKLE, M.J. (1988) – The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere. *J. Petrol.*, **29**: 625-679.
- MENZIES, M. (1991) – Oceanic peridotites. *In: Floyd, P.A. (ed.), Oceanic Basalts* (Ch. 15). Blackie & Son Ltd., Glasgow.
- MÉVEL, C., CANNAT, M., GENTE, P., MARION, E., AUZENDE, J.M. & KARSON, J.A. (1991) – Emplacement of deep crustal and mantle rocks on the west median valley wall of the MARK area (MAR, 23°N). *Tectonophysics*, **190**: 31-53.
- MICHAEL, P.J. & BONATTI, E. (1985) – Peridotite composition from the North Atlantic: regional and tectonic variations and implications for partial melting. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **73**: 91-104.
- MIRANDA, J.M., SILVA, P.F., LOURENÇO, N., HENRY, B., COSTA, R. & SALDANHA TEAM (2003) – Study of the Saldanha Massif (MAR, 36°34'N): constraints from rock magnetic and geophysical data. *Mar. Geophys. Res.*, **23**: 299-318.
- MOREIRA, M. & ALLÈGRE, C.J. (2002) – Rare gas systematics on Mid Atlantic Ridge (37-40°N). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **198**: 401-416.
- NEEDHAM, H.D., DAUTEUIL, O., DETRICK, R. & LANGMUIR, C. (1992) – Structural and volcanic features of the Mid-Atlantic Ridge rift zone between 40°N and 33°N. *EOS, Trans. Amer. Geophys. Union*, **43**: 552.
- ONYEAGOGCHA, A.C. (1974) – Alteration of chromite from the Twin Sisters dunite, Washington. *Amer. Min.*, **59**: 608-612.
- PARSON, L., GRÁCIA, E., COLLIER, D., GERMAN, C. & NEEDHAM, D. (2000) – Second-order segmentation; the relationship between volcanism and tectonism at the MAR, 38°N – 35°40'N. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **178**: 231-251.
- RIBEIRO DA COSTA, I. (2005) – Serpentinization on the Mid-Atlantic Ridge: the Rainbow, Saldanha and Menez Hom sites. Tese de Doutoramento, Universidade de Lisboa, 444 p.
- RIBEIRO DA COSTA, I., JESUS, A.P., MUNHÁ, J.M. & BARRIGA, F.J.A.S. (2006) – Oxygen-barometry of the upper mantle beneath the Azores sector of the Mid-Atlantic Ridge. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70 (18S)**: A124.
- SPRAY, J. (1991) – Structure of the oceanic crust as deduced from ophiolites. *In: Floyd, P.A. (ed.), Oceanic Basalts* (Ch. 4). Blackie & Son Ltd., Glasgow.
- TESALINA, S.G., NIMIS, P., AUGÉ, T. & ZAYKOV, V.V. (2003) – Origin of chromite in mafic-ultramafic-hosted hydrothermal massive sulphides from the Main Uralian Fault, South Urals, Russia. *Lithos*, **70**: 39-59.
- TUCHOLKE, B.E. & LIN, J. (1994) – A geological model for the structure of ridge segments in slow-spreading ocean crust. *J. Geophys. Res.*, **99-B**: 11937-11958.
- WAERENBORGH, J.C., FIGUEIRAS, J., MATEUS, A. & GONÇALVES, M. (2002) – ⁵⁷Fe Mössbauer spectroscopy study of the correlation between the Fe³⁺ content and the magnetic properties of natural Cr-spinels. *Eur. J. Mineral.*, **14**: 437-446.

