



## Propriedades magnéticas dos peridotitos do arquipélago São Pedro e São Paulo: uma janela para o manto oceânico

Wilbor Poletti, Ricardo Trindade, Elder Yokoyama (IAG-USP)

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

The contribution of the different layers of the oceanic lithosphere to the seafloor magnetic anomaly pattern is still a matter of debate, in part due to the scarce knowledge on the magnetism of its deepest sectors: the mantle peridotites. Here we present magnetic results on the serpentinized peridotites that crop out in the San Peter-San Paul archipelago. Sampling was performed in four islands and comprises 274 specimens distributed along 19 sites for standard scalar parameters: magnetic susceptibility ( $k$ ) and natural remanence (NRM). Our results show  $k$  values range from  $1.53e-6$  to  $2.54e-2$  and NRM values range from  $3.88e-4$  to  $1.16$  A/m, the highest values being found in the Challenger island. Remanence in these rocks is carried by pure magnetite in the pseudo-single domain range, probably formed during serpentinization of the original peridotites. Koenigsberger ratios (for a local field of  $22 \mu\text{T}$ ) vary between .036 and 6.54, suggesting that the deepest layer of the oceanic lithosphere must contribute to some extent to the anomalies observed on the sea floor.

### Introdução

O padrão zebado da magnetização do assoalho oceânico ao longo das dorsais meso-oceânicas é uma das maiores provas da teoria da Tectônica de Placas. Isso porque, em cada lado das dorsais, a nova litosfera oceânica formada guarda um registro especular das variações de polaridade no Campo Magnético Terrestre (CMT). Isto permitiu, por um lado, determinar a velocidade de formação de nova litosfera e de seu espalhamento lateral, bem como, por outro lado, fornecer um registro contínuo da história de reversões do CMT. Assim que o modelo foi proposto por Vine e Matthews (1964), admitia-se que a magnetização em todas as camadas da litosfera oceânica era constante com a profundidade, independentemente de sua litologia.

Atualmente sabe-se que as diferentes camadas da litosfera oceânica apresentam propriedades magnéticas

distintas, com variações de várias ordens de grandeza em sua magnetização e susceptibilidade magnética. Além disso, as diferentes camadas da litosfera oceânica, principalmente os basaltos, gabros e peridotitos, podem apresentar geometrias complexas que interferem nos modelos magnéticos de diferentes formas. Sendo assim, é fundamental obter-se informação sobre o magnetismo de cada camada.

Há diversas compilações de dados magnéticos em basaltos oceânicos (lavas e diques) e nos gabros subjacentes, obtidos em inúmeros cruzeiros científicos para perfuração dos oceanos (e.g., Gee e Kent, 2007). No entanto, a camada inferior de peridotitos apresenta um número muito mais reduzido de dados, limitado a apenas dois estudos (Oufi et al., 2002, Kelemen et al., 2004). A maior parte dos dados nesse tipo de rocha provém das camadas basais de seqüências ofiolíticas e em xenólitos e portanto encontra-se fora de seu contexto original (e.g., Ferre, 2004).

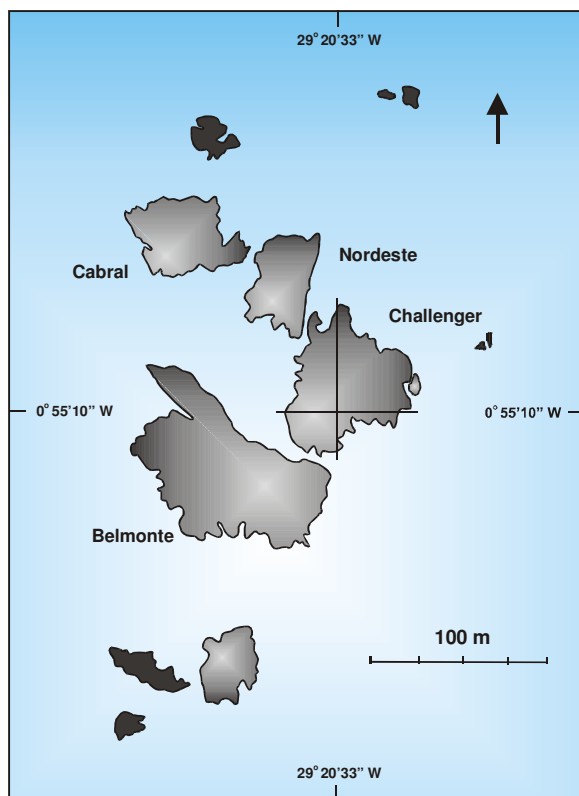
O Arquipélago São Pedro e São Paulo corresponde a um raro caso em que peridotitos oceânicos afloram acima da superfície dos oceanos, constituindo-se portanto num laboratório natural para o estudo desse tipo de litologia in-situ. Assim, um conjunto de amostras desse arquipélago foi coletado para a caracterização de sua mineralogia magnética e das variações nas diferentes propriedades magnéticas, incluindo susceptibilidade, magnetização remanente e índice de Koenigsberger.

### Descrição da Geologia Local

O arquipélago de São Pedro e São Paulo está localizado em  $29^{\circ}37'30''\text{W}$  de longitude e  $0^{\circ}50'51''\text{N}$  de latitude, a 1010 km de distância da Natal (RN), que é a região continental mais próxima. Ele é composto por quatro ilhas principais (Belmonte, Challenger, Nordeste e Cabral) e outras ilhas menores, ocupando uma área de aproximadamente  $13.000 \text{ m}^2$  e uma altitude máxima de aproximadamente 15 m (Figura 1).

Os registros geológicos mais antigos do ASPSP são as publicações de Sachs (1963) e de Bowen et al. (1966). Melson e colaboradores (1972) efetuaram a caracterização geoquímica, datação Rb-Sr e K-Ar, bem como discutiram as suas implicações para a expansão do assoalho oceânico.

Mais recentemente, relatórios internos da CPRM detalham a geologia das ilhas (Moraes, 1996a,b e 1999), enfatizando aspectos petrográficos e geoquímicos (elementos maiores). Nestes trabalhos foram definidos, do ponto de vista geoquímico, três tipos de rocha:



**Fig 1:** Mapa do arquipélago de São Pedro e São Paulo

- **Peridotitos Milonitizados:** estas rochas são caracterizadas por altos teores de MgO e teores muito baixos de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, TiO<sub>2</sub> e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, indicando a sua natureza refratária. Diagramas de variação correlacionando a sílica com elementos traços Cu, Zn, Ba, Sr, Co e V mostram que o peridotitos milonitizados são relativamente enriquecidos em Co e Zn, e empobrecidos nos demais elementos.
- **Peridotitos com feldspatóide normativo (MFN):** estas rochas são encontradas apenas na ilhota Challenger e são caracterizadas pelos baixos teores de sílica e altos teores de álcalis, titânio e fósforo. Ao contrário dos peridotitos milonitizados, os MFN apresentam elevados teores de Ba, Sr, Cu e V, e baixas concentrações de Co e Zn.
- **Brechas:** a composição química das brechas é muito variável, refletindo a predominância de fragmentos miloníticos na rocha ou da matriz-cimento carbonático.

No final da década de 90 uma série de novos estudos utilizando submersíveis foi realizada nas ilhas e seu entorno, dentro de um programa de cooperação Brasil/França. Dados observacionais foram publicados por Hekinian *et al.* (2000). Do ponto de vista estrutural, o arquipélago apresenta-se fortemente deformado com o desenvolvimento de foliação ultramilonítica, miloníticas e zonas de cisalhamento de alta temperatura. Tais feições estruturais foram descritas por Girardeau *et al.* (2000).

## Materiais e Métodos

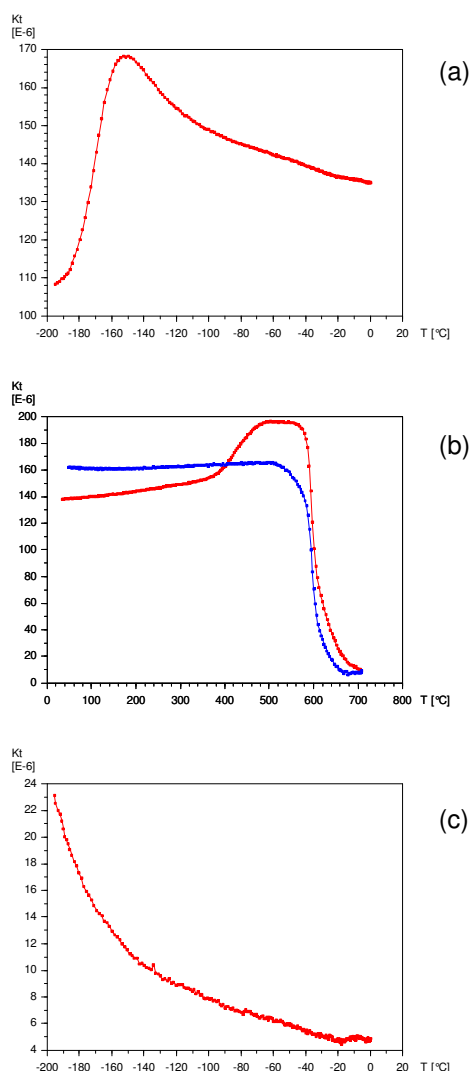
As amostras para análises magnéticas foram coletadas nas quatro principais ilhas que constituem o arquipélago. Essas amostras foram obtidas na forma de blocos, sendo todos orientados segundo o campo magnético atual. No laboratório os blocos foram perfurados numa perfuratriz de bancada adaptada, que possui uma broca de ponta diamantada não magnética, que permite a retirada de testemunhos cilíndricos de 2,5 cm de diâmetro. Posteriormente esses cilindros foram divididos em espécimes de 2,2 cm de altura, resultando em 274 espécimes para as medidas de dados escalares (susceptibilidade e magnetização). Fragmentos de amostras do mesmo sítio em que foram retirados os cilindros foram pulverizados, resultando em 19 amostras desse tipo. Ao todo temos: ilha Belmonte (94 espécimes distribuídos em 9 sítios – IBE6, IBE7, IBE8, IBE9, IBE10, IBE11, IBE12, IBE17 e IBE32), ilha Nordeste (74 espécimes em 2 sítios – INE44 e INE46), ilha Challenger (54 espécimes em 4 sítios – ICH34, ICH36, ICH37 e ICH41) e ilha Cabral (52 espécimes em 4 sítios – ICA49, ICA50, ICA51 e ICA54).

Os espécimes foram então submetidos a uma série de medidas magnéticas. A magnetização remanente natural (MRN) foi medida com um magnetômetro JR-6A (Agico Ltd.) e os dados foram tratados através do programa Remasoft30 (Agico Ltd). Medidas de susceptibilidade magnética (k) e de sua anisotropia (ASM) foram efetuadas em um susceptômetro do tipo Kappabridge (modelo KLY4S, Agico Ltd.) e tratados através do programa Anisoft 4.2 (Agico Ltd). Curvas de aquisição de magnetização remanente isotérmica (MRI) foram obtidas utilizando um indutor magnético do tipo Pulse Magnetizer (Magnetic Measurements Inc.) e um magnetômetro JR-6A (Agico Ltd.). Os dados foram tratados com o programa IRM-CLG, desenvolvido por Kruiver *et al* 2001. Curvas termomagnéticas de alta e baixa temperatura foram obtidas com um susceptômetro Kappabridge KLY4 acoplado a um sistema de aquecimento e resfriamento CS3-CLS, ambos da Agico Ltd. As análises de alta temperatura foram efetuadas em atmosfera de argônio de modo a minimizar alterações mineralógicas durante o aquecimento. Já para as de baixas temperaturas foi utilizado nitrogênio líquido para o resfriamento da amostra. Para o tratamento dos dados, foi utilizado o programa Cureval8 (Agico Ltd). Por fim, foram efetuadas curvas de histerese em um magnetômetro de amostra vibrante (VSM) MicroMagTM (Princeton Measurements Corporation modelo 3900).

As medidas de ASM, MRI, MRN e as curvas termomagnéticas foram realizadas no Laboratório de Paleomagnetismo do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) na Universidade de São Paulo (USP), Brasil. As curvas de histerese foram realizadas no Laboratório de Paleomagnetismo do National Oceanography Centre (NOC), Universidade de Southampton, Inglaterra.

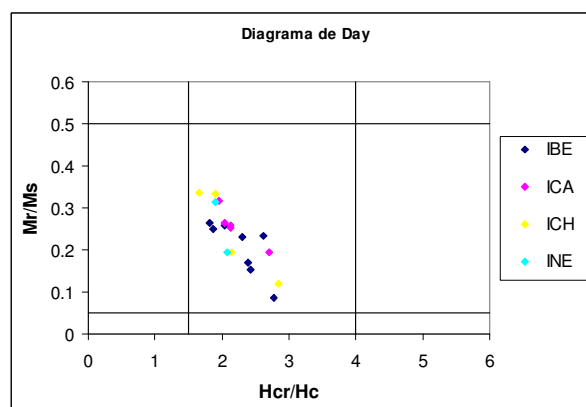
## Resultados e Conclusões

As amostras apresentam comportamento magnético condicionado basicamente pela proporção relativa de minerais paramagnéticos (olivina e anfibólios) e óxidos de Fe. As curvas termomagnéticas efetuadas nas ilhas apresentam dois comportamentos distintos. A grande maioria das amostras da ilha ICH apresentaram curvas termomagnéticas reversíveis, com um aumento na susceptibilidade a  $\sim -150^\circ\text{C}$  (transição de Verwey) e queda característica da susceptibilidade a  $\sim 590^\circ\text{C}$  (ponto de Curie), ambas transições diagnósticas da magnetita pura (Figura 2a e 2b respectivamente). Esse comportamento se repete somente em dois sítios da ilha IBE (IBE7 e IBE32). A maior parte das amostras das ilhas IBE, INE e ICA apresentam comportamento tipicamente paramagnético nas curvas termomagnéticas, sendo caracterizadas pela queda hiperbólica da susceptibilidade seguindo a lei de Curie-Weiss (Figura 2c).

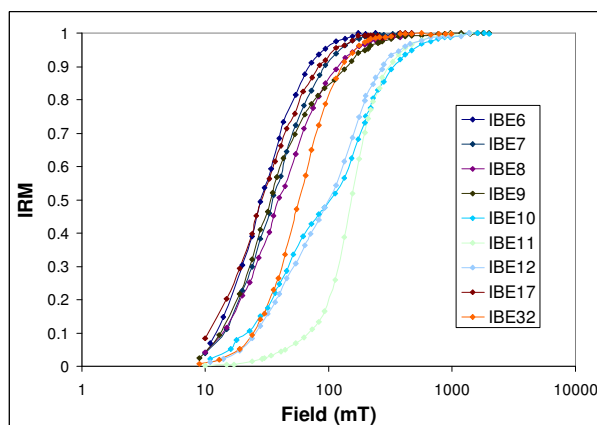


**Fig 2:** As figuras a e b representam as curvas termomagnéticas para a amostra ICH37 e a figura c representa a curva termomagnética para a amostra IBE8

Apesar do sinal predominantemente paramagnético da maior parte das amostras, os dados de histerese e as curvas de aquisição de MRI indicam que elas sempre possuem uma fração de grãos ferromagnéticos (Figuras 3 e 4). Os parâmetros de histerese  $M_r/M_s$  (magnetização remanente de saturação / magnetização remanente) e  $H_{cr}/H_c$  (coercividade remanente / coercividade) foram representados no diagrama de Day *et al.* (1977) e indicam um forte homogeneidade no tamanho dos grãos magnéticos em todo o conjunto de amostras, que ocupam sempre o campo das magnetitas com estrutura de domínio pseudo-domínio simples (Figura 3). Essa homogeneidade é evidente também nos parâmetros magnéticos extraídos da análise das curvas de IRM. Todas as amostras, com exceção de cinco amostras da ilha IBE apresentam valores bastante semelhantes de  $B_{1/2}$  em torno de 40 mT e IRM de saturação variando conforme a concentração de grãos magnéticos nas amostras (Figura 4), sendo em média mais elevados nas amostras da ilha ICH (24-766 A/m) do que no restante das ilhas (0,11 a 53 A/m), com exceção do sítio IBE32 que apresenta valores de SIRM de 787 A/m.



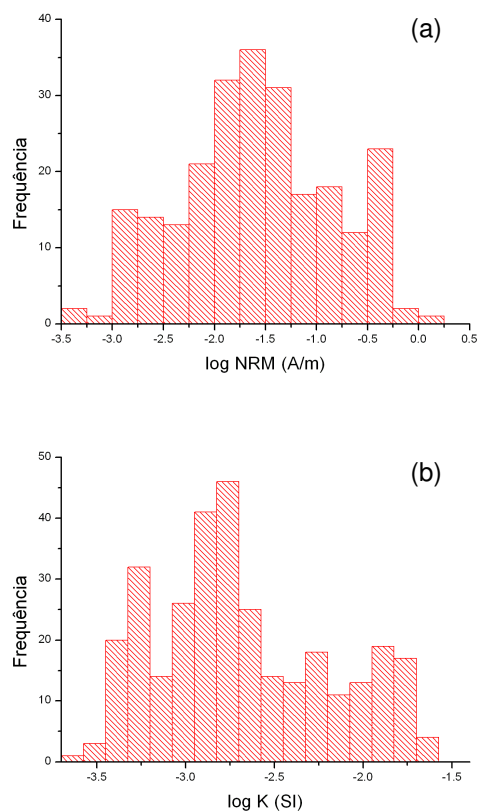
**Fig 3:** Diagrama de Day *et al.* (1977) para todos os sítios



**Fig 4:** Curvas de aquisição de MRI para a ilha IBE

O comportamento magnético apresentado nas medidas de histerese, MRI e nas curvas termomagnéticas reflete-se claramente nas variações dos parâmetros escalares. A MRN varia de  $3.88 \times 10^{-4}$  a  $1.16 \text{ A/m}$  (Figura 5a), sendo mais elevada na ilha ICH, com um valor médio de  $3.02 \times 10^{-2} \text{ A/m}$  e menor na ilha IBE, com média de  $1.39 \times 10^{-2} \text{ A/m}$ . A

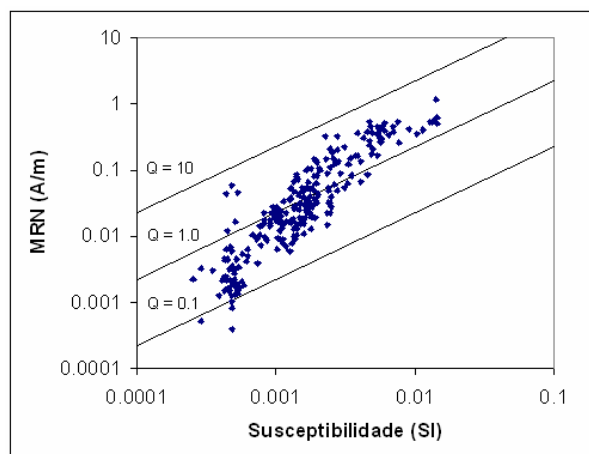
susceptibilidade magnética varia de  $1.53\text{e-}6$  a  $2.54\text{e-}2$  (SI) (Figura 5b), sendo novamente mais elevada na ilha ICH, com valor médio de  $8.51\text{e-}3$  (SI), e menor na ilha INE, com valor médio de  $1.38\text{e-}3$  (SI).



**Fig 5:** O histograma a representa os valores de MRN e o histograma b representa os valores de susceptibilidade

Utilizando os valores de magnetização remanescente, susceptibilidade e o valor do campo magnético ambiente ( $H = 22 \mu\text{T}$ ) pode-se calcular o índice de Koenigsberger ( $Q = \text{MRN}/H \cdot k$ ). O valor de  $Q$  varia de  $3.58\text{e-}2$  a  $6.54$  (u.a.) (Figura 6) sendo mais elevado na ilha ICH, com  $2.46$  (u.a.), refletindo a maior quantidade de material ferromagnético nas amostras dessa ilha, e menor na ilha ICA, com  $5.46\text{e-}1$  (u.a.) (valor médio).

Os dados obtidos no arquipélago São Pedro e São Paulo podem ser comparados com aqueles obtidos em outros peridotitos. Em geral, as amostras das ilhas IBE, ICA e INE são bem inferiores àqueles observados em outros estudos, refletindo a forte componente paramagnética identificada nessas ilhas. A ilha ICH, que apresenta valores de MRN e  $k$  mais elevados tem distribuição mais próxima daquela encontrada por Oufuji et al. (2002) para os testemunhos ODP920, 895, 670 e DSDP395, 556, 558, 560. Eles mostram, portanto, que os peridotitos serpentinizados contribuem em pequena proporção com a magnetização remanente da litosfera oceânica.



**Fig 6:** Gráfico de MRN em função da susceptibilidade. As linhas representam um valor constante para o índice de Königsberger ( $Q$ )

### Agradecimentos

Petrobrás (Rede Geotectônica), pela bolsa de IC e ao grupo de Paleomagnetismo da Universidade de São Paulo.

### Referências

- Bowen, V.T.; Masch, D.; Melson, W.G. 1966. St. Paul's on the subway. Life on the rocks. Geologic significance of St. Paul's rocks. *Oceannus*. v.XII.num. 4: 1-16.
- Day, R., Fuller, M. and Schmidt, V.A. (1977). Hysteresis Properties of Titanomagnetites: Grain-Size and Compositional Dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 13, 260-267
- Ferré, E. C. (2004). High-field AMS of mantle peridotites. *IRM Quarterly*, 13, 4, 2.
- Gee, J.S. and D.V. Kent, (2007). Source of oceanic magnetic anomalies and the geomagnetic polarity timescale, in *Treatise on Geophysics*, v. 5, Geomagnetism, M. Kono, (ed.), Elsevier, Amsterdam, 455-507.
- Girardeau, J.; Juteau, T. Launeau, P.; Burg, J-P; Hekinian, R. 2000. Étude de la déformation des péridotites des rochers émergés des Saint-Paul et Sainte-Pierre de la fracture transformante de Saint Paul.
- Hekinian, R.; Juteau, T.; Gracia, E.; Sichel, B; Sichel, S.; Udintsev, G; Apprioual, R.; Ligi, M. 2000. Submersível observations of Equatorial Atlantic mantle; the St. Paul fracture zone region. *Marine Geophys. Res.* 21(6):529-560.
- Kelemen, P.B., Kikawa, E. and Miller, D.J. (2004). Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports 209: (College Station, TX, Ocean Drilling Program).
- Kruiver, P.P., Dekkers, M.J. and Heslop, D. (2001). Quantification of magnetic coercivity components by the

analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetization. *EPSL* 189 (2001) 269-276.

Melson, W.G.; Hart, S.R.; Thompson, G. 1972. St. Paul's Rocks, Equatorial Atlantic: Petrogenesis, radiometric ages and implications on sea-floor spreading. *Mem. Geol. Soc. Am.* 132:241-272.

Moraes, J.F.S.1996a. Expedição precursora aos penedos de São Pedro e São Paulo:Geologia e geotecnia. CPRM. 35p.

Moraes, J.F.S.1996b.Caracterização petrográfica e química das rochas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo. CPRM. 35p.

Moraes, J.F.S.1999. Síntese dos trabalhos geocientíficos efetuados no fundo submarino adjacente ao Arquipélago de São Pedro e São Paulo. CPRM. 23p.

Oufi, O., Cannat, M. and Horen, H., (2002). Magnetic properties of variably serpentinized abyssal peridotites. *Journal Geophysical Research* 107(B5).

Sachs, P.L.1963. A visit to St. Peter and St. Paul Rocks. *Oceannus*. v.IXI.num. 4: 2-5.

Vine, F. J.; Matthews, D H (1963). Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature* 199: 947-949.