

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ESTUDOS MAGNÉTICOS NOS DIQUES DE SÃO SEBASTIÃO
SÃO PAULO (SP)**

Grace Kelly Millanao Malo

Orientadora: Profa. Dra. Maria Irene Bartolomeu Raposo

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2007/16)

TF
M257
GKM.e

SÃO PAULO
2007

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC



30900024090

ESTUDOS MAGNÉTICOS NOS DIQUES DE SÃO SEBASTIÃO
SÃO PAULO (SP)

Grace Kelly Millanao Malo



Orientadora: Profa. Dra. Maria Irene Bartolomeu Raposo

De acordo:

PROFA DRA. MARIA IRENE BARTOLOMEU RAPOSO

GRACE KELLY MILLANAO MALO

Índice de Figuras	1
Índice de Fotos	1
Índice de Tabelas	1
Resumo	1
Abstract	1
Agradecimentos	1
1. Introdução	1
1.1 Objetivos	1
1.2 Descrição da área	1
2. Contexto Geológico	1
2.1 Migração e póss-migração no Ceará – A migração em direção ao Ceará Norte do São Paulo	1
2.2 Características gerais das áreas exploradas, com ênfase na região de estudo	1
2.3 Geologia local – os tipos	1
2.4 Petrografia	1
3. Aspectos Tectônicos	1
3.1 Diques e intrusões mafíicas	1
3.2 Propriedades tectônicas	1
3.3 Anisotropia de susceptibilidade magnética	1
3.4 Anisotropia de susceptibilidade magnética (ASM)	1
3.5 Comparação entre a migração e a anisotropia de susceptibilidade magnética	1
3.6 Migração e Anisotropia	1
3.7 Curva Tensão-Deformação	1
4. Metodologia	1
5. Resultados Preliminares	1
5.1 Resultados de campo	1
5.2 Resultados de laboratório	1
6. Conclusões	1
7. Referências Bibliográficas	1
8. Anexos	1
8.1 Anexo A – Mapa Geológico da Região de Estudo	1
8.2 Anexo B – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.3 Anexo C – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.4 Anexo D – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.5 Anexo E – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.6 Anexo F – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.7 Anexo G – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.8 Anexo H – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.9 Anexo I – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.10 Anexo J – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.11 Anexo K – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.12 Anexo L – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.13 Anexo M – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.14 Anexo N – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.15 Anexo O – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.16 Anexo P – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.17 Anexo Q – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.18 Anexo R – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.19 Anexo S – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.20 Anexo T – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.21 Anexo U – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.22 Anexo V – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.23 Anexo W – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.24 Anexo X – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.25 Anexo Y – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1
8.26 Anexo Z – Mapa Geológico da Região de Estudo – Detalhe	1

Aos meus queridos pais, Domingo e Maria e
aos meus eternos amigos e irmãos
Ricardo, Erika e Karen.

Sumário

Índice de Figuras.....	ii
Índice de Fotos.....	iii
Índice de Tabelas.....	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Agradecimentos.....	vii
1. Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Localização da área.....	2
2. Contexto Geológico.....	3
2.1 Magmatismo pós-paleozóico no Brasil – A reativação mesozóica no litoral norte de São Paulo.....	3
2.2 Características gerais dos diques estudados: composição e geoquímica.....	4
2.3 Geologia Local – os diques.....	5
2.4 Petrografia.....	9
3. Aspectos Teóricos.....	10
3.1 Diques - indicadores tectônicos.....	10
3.2 Propriedades Magnéticas.....	10
3.3 Anisotropia de Suscetibilidade Magnética.....	12
3.4 Anisotropia de Remanência Magnética (ARM).....	13
3.5 Comportamento da Magnetização Remanente Natural (MRN).....	13
3.6 Magnetizações Secundárias.....	14
3.7 Curvas Termomagnéticas.....	15
4. Materiais e Métodos.....	15
5. Atividades Realizadas.....	16
5.1. Trabalhos de campo.....	17
5.2. Trabalhos de laboratório.....	19
6. Resultados.....	20
6.1 Anisotropia de Suscetibilidade Magnética em baixo campo – ASM.....	20
6.2 Magnetismo de Rocha.....	25
6.3 Anisotropia de Remanência Magnética – ARM.....	30
6.4 Direções Paleomagnéticas.....	32
7. Discussão.....	34
8. Conclusões.....	36
9. Referências Bibliográficas.....	37

Índice de Figuras

Fig. 1 Mapa de vias de acesso entre as cidades de São Paulo e São Sebastião	3
Fig. 2 Mapa Geológico da região de estudo.....	5
Fig. 3 Comportamento da magnetização nos materiais sob um campo magnético	11
Fig. 4 Cronograma de atividades.....	16
Fig. 5 Mapa de amostragem e de localização dos diques estudados.	18
Fig. 6 Exemplos representativos das tramas magnéticas determinadas pela ASM para os diques estudados. (A) normal com fluxo horizontal; (B) normal com fluxo vertical; (C) intermediária; (D) inversa..	21
Fig.7 Histograma de frequência do eixo $K_{\max}$ para os diques com trama magnética de fluxo magmático e projeção estereográfica no hemisfério inferior	22
Fig. 8 Dados de anisotropia de suscetibilidade magnética (ASM): (A) histograma dos valores de suscetibilidade magnética média ; (B) histograma dos valores de grau de anisotropia.....	23
Fig.9 Dados escalares de ASM. (A) Gráfico de grau de anisotropia (P) versus suscetibilidade média (Km) (B) Gráfico de grau de anisotropia (P) versus suscetibilidade média (Km).	24
Fig.10 Dados representativos de magnetismo de rocha. (A) Curvas de desmagnetização AF da MRN; (B) Curvas de desmagnetização AF da aquisição da MRA; (C) Curvas de aquisição da PARM; (D) Curvas de aquisição da PARM para grãos coercivos; (E) Curvas de aquisição da IRM; (F) Curvas de desmagnetização AF da IRM saturada (SIRM).	26
Fig. 11 Curvas de histerese representativas dos diques estudados com diferentes tramas ASM. (A) Curvas predominantes para trama ASM; (B) Curvas com contribuição paramagnética	28
Fig. 12 Gráfico M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c (Day, 1977) para os diques estudados	29
Fig. 13 Curvas K-T representativas (suscetibilidade versus baixa e alta temperatura).	30
Fig. 14 Tramas magnéticas determinadas pela ASM e pela anisotropia de remanência magnética (ARM)	31
Fig. 15 Exemplos representativos de projeção estereográfica dos dados de desmagnetização AF (A) e térmica (B) em redes de Wulff ; e curvas de desmagnetização AF (C) e térmica (D) correspondente.	33
Fig. 16 Representação das direções médias de magnetização em rede estereográfica de Wulff ..	34

Índice de Fotos

Foto 1 – Dique com espessura aproximada de 5 cm localizado na Praia Grande, São Sebastião.....	6
Foto 2 – Dique de 15 cm de espessura ramificado (Praia Grande, São Sebastião).....	6
Foto 3 – Dique com enclave da encaixante (Ponta do Araçá).....	7
Foto 4 – Dique com indicador de fluxo (Ponta do Araçá).	7
Foto 5 – Dique com indicador de fluxo (Praia Grande).....	7
Foto 3 – Dique com enclave da encaixante (Ponta do Araçá).....	7
Foto 4 – Dique com indicador de fluxo (Ponta do Araçá).	7
Foto 7 – Diques de composições distintas lado a lado (Ponta do Araçá).....	8
Foto 6 – Dique com aspecto “encaroçado” (Praia do Cabelo Gordo).....	8
Foto 8 – Diques que se encostam (Praia Grande).	8
Foto 9 – Diques que se encostam e que cortam pequenos diques quartzo-feldspáticos.....	9
Foto 10 – Máquina perfuradora utilizada para amostragem	17
Foto 11 – Bússola magnética e solar utilizada para a orientação dos cilindros.....	17
Foto 12 – Cilindros preparados para as medidas magnéticas.....	19

Tabela 1. Dados escalares e direcionais obtidos pela ASM para os diques de São Sebastião	20
Tabela 2. Dados paleomagnéticos dos diques de São Sebastião.....	34

Na faixa litorânea do sudeste do Brasil ocorrem inúmeros enxames de diques de idades e composições distintas. Orientam-se predominantemente a N40-50E, são sub-verticais e cortam rochas polimertamorfizadas do Complexo Costeiro. Em São Sebastião afloram diques de lamprófiros e raros básicos ao longo das praias e dos costões. Os diques são pouco espessos e alguns apresentam indicadores de fluxos.

O principal mineral magnético, presente nos diques é a magnetita com grãos de dimensões predominantes entre 5 e 2-3 μm , e estrutura de domínios magnéticos do tipo PSD-SD. Este mineral é responsável pela magnetização remanescente, suscetibilidade magnética e pela anisotropia de remanência magnética (ARM) dos diques.

Os dados de anisotropia de suscetibilidade magnética (ASM) dos diques estudados forneceram três tipos de tramas magnéticas; *Normal* (plano Kmax-Kint paralelo ao plano do dique enquanto que Kmin é perpendicular a ele); *Intermediária* (plano Kmax-Kmin paralelo ao plano do dique enquanto que Kint é perpendicular a ele); e *Inversa* (plano Kint-Kmin paralelo ao plano do dique enquanto que Kmax é perpendicular a ele).

A trama de ASM *Normal* é a predominante (66% dos diques), com ocorrência secundária das tramas *Intermediária* (18,8%) e *Inversa* (21,8%). A trama de ASM *Normal* é interpretada como sendo de fluxo magmático, o que é coerente com os indicadores de fluxo observados em campo.

A existência de diques lamprofíricos e básicos indica a presença de duas fontes alimentadoras geoquimicamente distintas. A análise da inclinação do eixo de máxima suscetibilidade (Kmax) dos diques que apresentam trama de ASM de fluxo, indica que parte dos diques foi alimentada por fluxos horizontais ou sub-horizontais ($K_{\text{max}} < 30^\circ$), e parte por fluxos inclinados a verticais ($30^\circ < K_{\text{max}} < 60^\circ$, $K_{\text{max}} < 60^\circ$); sugerindo que os diques estavam, respectivamente, afastados e próximos às suas fontes alimentadoras. Os diques básicos foram alimentados por fluxos horizontais, enquanto que metade dos diques lamprófiros foi alimentada por fluxos horizontais e a outra metade por fluxos inclinados a verticais. A diferença da inclinação de Kmax nos diques lamprófiros permite inferir que, pelo menos, duas fontes alimentaram esses diques.

Os dados mostram que não há relação entre tipo de trama magnética e localização geográfica dos diques estudados. As tramas de ARM são coaxiais às tramas de ASM *Intermediária* e *Inversa*, e não-coaxial a trama de ASM *Normal*.

O padrão de fluxo encontrado nos diques é similar ao encontrado nas regiões adjacentes, e no enxame do Arco de Ponta Grossa e de Florianópolis. Os resultados paleomagnéticos, embora preliminares, sugerem que há duas direções de magnetização com polaridade normal levemente distintas, sugerindo certa contemporaneidade dos diques estudados com os diques dos enxames do Arco de Ponta Grossa e de Florianópolis.

In the Brazilian southeastern coastline there are dyke swarms with distinct ages and compositions. The dykes are mainly N40-50E with vertical dip and cut polymetamorphosed rocks of the Costeiro Complex. In São Sebastião city, lamprophyre and rare basic dykes crop out mainly along the beaches. Their thickness varies from cm up to 5 m, and some of them has flow mark.

The main magnetic mineral, in the dykes, is magnetite with grain size between 5 and 2-3 μm with PSD-SD domains. This mineral is responsible for the remanent magnetization, magnetic susceptibility and for the anisotropy of magnetic remanence (AMR) of the dykes.

The data from anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) of the studied dykes provided three magnetic fabric types; *Normal* (plane K_{max} - K_{int} parallel to the dyke plane while K_{min} is perpendicular to it); *Intermediate* (plane K_{max} - K_{min} parallel to the dyke plane while K_{int} is perpendicular to it), and *Inverse* (plane K_{int} - K_{min} parallel to the dyke plane while K_{max} is perpendicular to it). The *Normal* fabric AMS is the most important (66% of the dykes), with secondary occurrence of the *Intermediate* (18,8%) and *Inverse* (21,8%) fabrics. The *Normal* AMS fabric is interpreted as magma flow, which is coherent to flow marks observed in the field.

The existence of lamprophyres and basic dykes indicates the presence of two geochemically source different feeder. The analysis of the maximum susceptibility axis (K_{max}) inclination of dykes with flow AMS fabric, indicates that part of the dykes has been fed by horizontal or sub - horizontal ($K_{\text{max}} < 30^\circ$) flows, and part by inclined to vertical ($30^\circ < K_{\text{max}} < 60^\circ$, $K_{\text{max}} < 60^\circ$) flows; suggesting that the dikes were, respectively, far and near of their feeder sources. The basic dykes were fed by horizontal flows, while half of the lamprophyres were fed by horizontal flows, and the other half by inclined to vertical flows. The difference of K_{max} inclination in lamprophyre dikes allow to infer, at least, two sources fed these dikes.

The data show that there is no relationship between magnetic fabric and geographical localization of the studied dykes. The ARM fabric is coaxial to the *Intermediate* and *Inverse* AMS fabrics, and non-coaxial to the *Normal* AMS fabric.

The flow pattern found in the dykes is similar to the one found in the adjacent regions and in the Arco de Ponta Grossa and Florianópolis swarms. The paleomagnetism results, even preliminary, suggest that there are two directions of magnetization with normal polarity slightly distinct, suggesting a certain contemporaneity of the studied dykes and the Arco de Ponta Grossa and Florianópolis swarms.

Agradecimentos

Gostaria de expressar aqui meus sinceros agradecimentos à todas as pessoas que estiveram presentes em todos os momentos da minha vida.

Aos meus estimados pais, Domingo e Maria, pelo grande esforço empreendido e por ultrapassar as barreiras da distância e do idioma com o único objetivo de proporcionar uma boa educação para os seus filhos. E por sempre estarem ao meu lado concedendo amor incondicional e apoio incansável, vibrando por minhas pequenas conquistas mais do que eu própria. Papi e Mami, a minha vitória é a vitória de vocês!

Aos meus valiosos irmãos Ricardo, Erika e Karen pelo constante apoio, amizade, bom humor, carinho, brigas, discussões em momentos bons e nos difíceis também. Ri, Eri e Kash, muito obrigada pela oportunidade de poder compartilhar minha vida com vocês!

Ao Dr. Daisaku Ikeda, presidente da Soka Gakkai Internacional, pelas suas valiosos direcionamentos para a vida e por me ensinar a desafiar as dificuldades manifestando a força de mil pessoas. Sensei! O meu coração é o seu coração, e o seu coração é o meu coração!

Aos valiosos amigos da Família Soka aos quais tenho grande admiração, em especial, Sra. Mítico Chinen, Sr. Chinen, Cida Zungolo, Margareth, Jurandir, Raquel e Carolina. Muito obrigada pelo constante apoio, consideração, amizade e preocupação!

À professora Maria Irene, exemplo de profissionalismo e de ética, por ter me proporcionado o primeiro contato com ciência, mesmo não tendo base para tal. Irene, muito obrigada pelos ensinamentos, dedicação, rigorosidade, amizade, conselhos e preocupação empregados a todo instante.

Ao professor Coutinho pela ajuda nas lâminas determinantes para a conclusão deste trabalho.

Aos funcionários do IGC: gráfica, xerox, biblioteca, microsonda eletrônica, isótopos, laminação; em especial, ao Henrique (gráfica/xerox), Sandra (biblioteca) e Marcos (microsonda) por sempre serem prestativos e solucionar pequenos problemas.

Às amigas eternas Vanessa, Priscilla, Thaís Trevisani e Nathália pela amizade, convivência, conversas francas e por compartilhar meus problemas e vitórias.

Aos amigos da Geo, alguns mais próximos outros mais distantes: Jorge (Bizarro), Rogério (Lacraia), Roberta (Pisa), Ana (Chupeta), Ana Paula (Treme-Treme), Brenda, Maurício (Borboleta), Daina, Júlia (Dóris), Cyntia (Fun), Thaís (Titcholina), Paulo Miguel (Langão), Bruno (Rapunzel), Ralph (Tanga), Marcus (Xabi), Guilherme (CG), Leonardo (Girafalez), Talita (Xoca), Talita (Pocotó), Tiago (Trena), Michelle (Dana), Máira (Cica), Marília (Gozadinha), Carla (Pistol), André (Codorna), André (Camarão), Marina, Bruno (Xoquito), Daphne, Diego (Pescador), Lucas (Sal Grosso) pelas conversas, confissões, desabafos, companhia, camaradagem e amizade manifestadas durante todos esses anos. Obrigada por tornar os campos, relatórios, provas, trabalhos e as aulas mais divertidas!

1. Introdução

O sudeste do Brasil, em especial a região costeira, foi afetado pelos intensos processos tectono-magmáticos decorrentes da Ativação Mesozóica relacionados a duas fases distintas de magmatismo básico e alcalino (Garda, 1995). A primeira fase caracterizou-se por um magmatismo de caráter básico e intermediário representado por diques e *sills* contemporâneos aos derrames da Bacia do Paraná e da Bacia de Santos. Na fase seguinte, houve o predomínio do magmatismo que originou *stocks* ou chaminés e diques de rochas alcalinas que constituem as intrusões magmáticas mesozóicas de São Sebastião, litoral norte do Estado de São Paulo.

Entre as cidades de Santos e Rio de Janeiro existe um importante enxame de diques básicos a intermediários, que abrange desde a faixa litorânea até o Vale do Paraíba. São diques verticais com orientação preferencial N40-50E com espessuras que variam de poucos centímetros até centenas de metros (Almeida, 1986). Entretanto, na cidade de São Sebastião aflora inúmeros e pequenos enxames de diques isolados ao longo principalmente de costões e praias, representados por lamprófiros alcalinos pouco espessos, atingindo algumas dezenas de centímetros, intercalados a raros diques básicos.

Do ponto de vista tectônico, é comumente aceito que os enxames de diques podem representar rifteamento inicial ou manifestação de distensão crustal. Nesse contexto, o conhecimento sobre o modo de preenchimento de fraturas fornece subsídios para a compreensão dos processos atuantes durante a formação desses enxames. Um modo de se estudar o posicionamento relativo entre fonte(s) e fraturas e investigar o fluxo magmático no preenchimento das fraturas, consiste em empregar as técnicas de anisotropias magnéticas (Tarling & Hrouda, 1993).

Os diques da região de São Sebastião já foram estudados do ponto de vista geoquímico (Garda, 1995). Porém estes diques ainda necessitam de estudos magnéticos de detalhe, tendo em vista que, os únicos trabalhos sobre o assunto (Raposo & Ernesto, 1999; Raposo & Malo, 2006) referem-se somente a anisotropia de suscetibilidade magnética e apresentam dados preliminares. Nesse sentido, um estudo mais amplo e detalhado das propriedades magnéticas dos diques tornou-se necessário e foi realizado neste trabalho de formatura. Os dados magnéticos serão associados aos dados geoquímicos existentes, e contribuirão para um maior e melhor conhecimento dos processos tectônicos e magmáticos atuantes durante a abertura do Atlântico Sul.

A relevância do estudo encontra-se na importância de se investigar o modo de preenchimento de fraturas que deram origem aos diques, fornecendo subsídios para a compreensão dos processos atuantes durante a formação desses enxames. Para tanto, as técnicas de anisotropias magnéticas foram utilizadas neste trabalho. Também foi estudado o comportamento da magnetização remanente natural das amostras, com vistas na identificação de diferenças na magnetização característica remanente, que representa a

direção do campo geomagnético na época de resfriamento da rocha. Estes dados foram comparados com os dados dos enxames de Florianópolis e do Arco de Ponta Grossa.

Para a confiabilidade dos resultados obtidos, foi realizado um amplo e detalhado estudo de magnetismo de rocha, para caracterizar os minerais magnéticos responsáveis pelas anisotropias e magnetizações remanentes.

Os estudos magnéticos associados a outros dados têm encontrado sucesso na investigação da tectônica Mesozóica (Raposo & Ernesto, 1995a; Raposo & Ernesto, 1995b; Raposo, 1997; Raposo & Ernesto, 1999), no sudeste do Brasil.

1.1 Objetivos

A presente pesquisa teve como principal objetivo investigar o modo de colocação dos diques aflorantes nas praias da Ponta do Araçá e Cabelo Gordo, no município de São Sebastião. Para tanto, determinou-se as anisotropias magnéticas, efetuou-se um estudo detalhado das propriedades magnéticas dos diques e também foi determinada a magnetização remanescente característica (primária) de alguns diques.

1.2 Localização da área

A área de estudo situa-se no município de São Sebastião, litoral norte do Estado de São Paulo, entre as latitudes 23°48' e 23°50' e longitudes de 45°30' e 45°26'.

O acesso à área pode ser feito pelas rodovias BR116 Presidente Dutra (até Jacareí) e SP99 Rodovia dos Tamoios, até o município de São Sebastião; ou pelo Sistema Anchieta (SP150) - Imigrantes (SP160) e, estradas secundárias (Fig. 1).

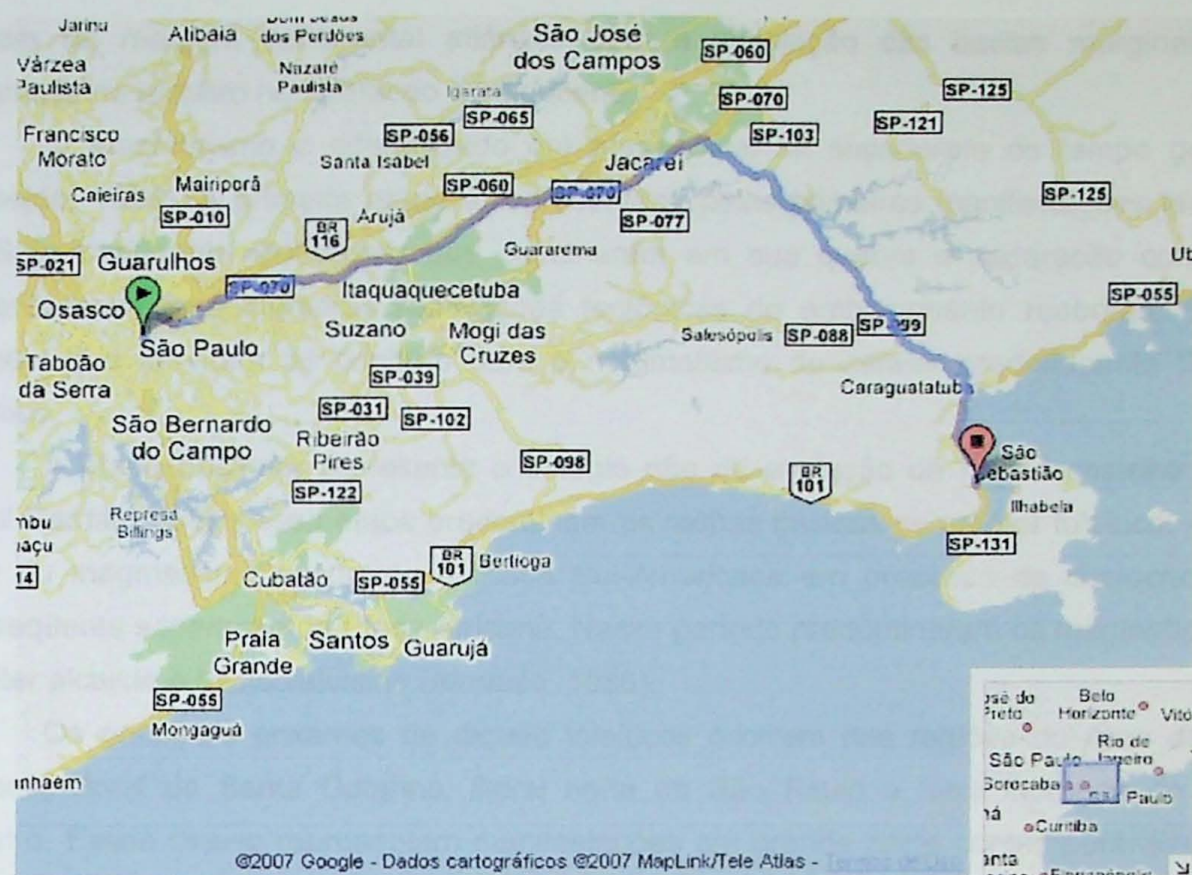


Fig. 1 Mapa de vias de acesso entre as cidades de São Paulo e São Sebastião extraído e modificado do site do Google Maps <www.maps.google.com>.

2. Contexto Geológico

2.1 Magmatismo pós-paleozóico no Brasil – A reativação mesozóica no litoral norte de São Paulo

O fenômeno de “Reativação Wealdeniana” (Almeida, 1967), posteriormente denominada Ativação Mesozóica da Plataforma Sul-Americana resultou em intensa movimentação crustal, que teve início no final do Permiano, máxima atividade durante o Jurássico e Cretáceo, e menor atividade no Paleógeno. Os efeitos da reativação podem ser observados em quase todas as regiões do território brasileiro e, em parte dos países vizinhos.

A Ativação Mesozóica caracterizou-se pela reativação de antigos falhamentos do embasamento cristalino e surgimento de blocos de falha, soerguimento de arcos, abatimentos de bacias costeiras e acentuada subsidência da Bacia do Paraná. Seus efeitos manifestaram-se através de intenso e variado magmatismo, que inclui desde basaltos toleíticos, complexos alcalinos até a origem de diques isolados ou em enxames (Almeida, 1983, 1986). Esta tectônica é responsável pela formação da Serra do Mar e do relevo da costa norte paulista.

Esses processos – intensos na região meridional do Brasil – estiveram relacionados aos processos de separação da América do Sul e África. Conseqüentemente, estão ligados à

origem da margem continental atlântica com a instalação das bacias marginais e ao magmatismo alcalino neocretáceo e paleoceno.

O magmatismo é diferenciado em etapas que se sucederam no tempo geológico (Almeida, 1986). A primeira etapa é representada pelas primeiras manifestações tectônicas do Supercontinente Gondwana que culminaram em sua quebra e separação continental. Durante essa fase inúmeras reativações tectônicas do embasamento reabriram falhas e fraturas que serviram de conduto para o magmatismo de caráter predominante básico e toleítico.

A etapa posterior representa o estágio rifte da evolução da região costeira (Asmus *apud* Garda, 1995), nessa etapa predominam as rochas básicas de caráter toleítico. A última fase do magmatismo encontrou a Placa Sul-Americana em processo de deslocamento e conseqüente separação da Placa Africana. Nesse período predominaram os magmatismos de caráter alcalino e básico/alcalino (Almeida, 1986).

Os principais enxames de diques toleíticos ocorrem nas regiões do Arco de Ponta Grossa, litoral de Santa Catarina, litoral norte de São Paulo e faixa litorânea do Rio de Janeiro. Esses diques representam manifestações em grande parte contemporâneas à fase principal do magmatismo da Bacia do Paraná. Entretanto, na região estudada, há o predomínio de diques alcalinos.

Guedes *et al.* (2005), indicam idades K-Ar e $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ entre 192.9 ± 2.2 e 160.9 ± 1.9 Ma; e 148.3 ± 3 e 133.9 ± 0.5 Ma para diques toleíticos localizados, respectivamente, a norte e a sul-leste da Bacia de Resende, localizada no Rio de Janeiro. Por sua vez, o magmatismo alcalino da mesma região possui três idades distintas: 82 Ma para os diques lamprofíricos, cerca de 70 Ma para os *plugs* sieníticos e, entre 64 e 59 Ma para os diques félsicos. Segundo os mesmos autores, estes dados apontam para diferentes pulsos magmáticos, ocorridos entre o Jurássico e o Terciário, relacionados à abertura do Oceano Atlântico.

2.2 Características gerais dos diques estudados: composição e geoquímica

Segundo Almeida (1986) os diques da região costeira estão relacionados às falhas do embasamento reativadas por esforços tracionais durante o antigo Arqueamento da Serra do Mar. Os diques de orientação preferencial N40-50E seguem a estruturação geral do embasamento de direção geral ENE-NE e cortam rochas predominantemente gnáissicas-migmatíticas polimetamorfizadas do Complexo Costeiro, de idade arqueana e proterozóica (Fig. 2).

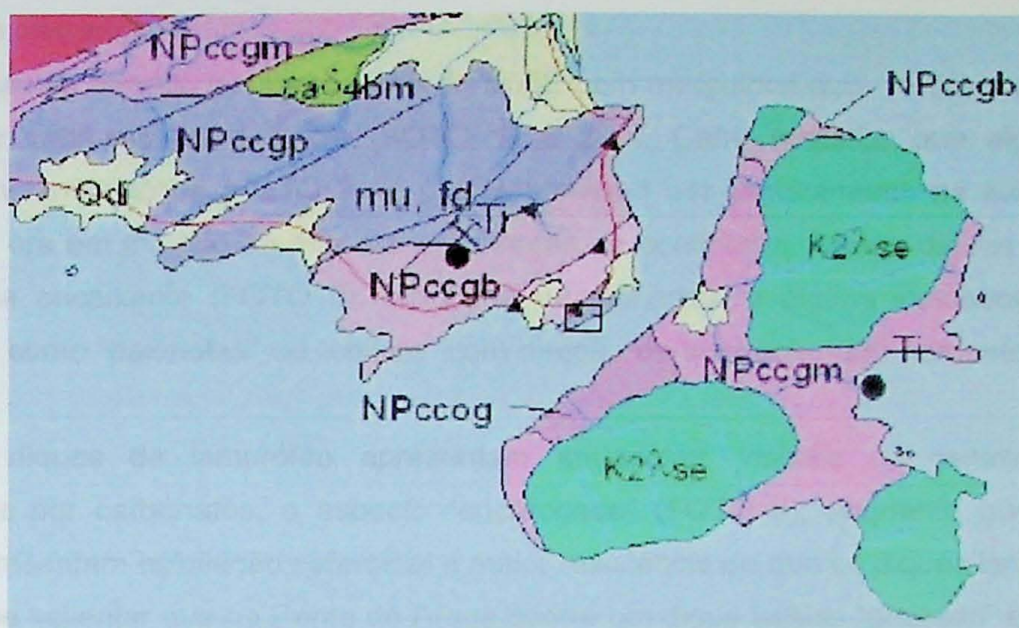


Fig. 2 Mapa Geológico da região de estudo. Modificado de Mapa Geológico do Estado de São Paulo na escala 1:750.000, CPRM (2006). Qdi– coberturas detríticas indiferenciadas, k2λse– complexos plutônicos alcalinos; unidades do Complexo Costeiro: NPccq– quartzitos, NPccog– ortognaisses, NPccgp– gnaiss kinzigítico, NPccgm– hornblenda-biotita gnaiss, NPccgb– gnaiss migmatito. O quadrado indica a localização dos diques estudados.

Os diques da região de São Sebastião abrangem desde composições de basaltos toleíticos a composições alcalinas, sendo estas predominantes na área estudada (Coutinho & Ens, 1992; Garda, 1995). Os diques básicos são caracterizados por uma baixa concentração de Mg (cerca de 30) e alto conteúdo de SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O e K_2O , além de baixo conteúdo de FeO, MgO e CaO quando comparados aos lamprófiros. Estes, por sua vez, possuem concentração de Mg entre 57-71, $\text{SiO}_2 < 47\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 12\%$ e $\text{MgO} < 10\%$ e, baixa concentração de elementos incompatíveis (Garda, 1995).

Segundo Garda (1995) os dados geoquímicos indicam distintas contribuições do manto na geração de diques de composição básica e lamprofírica. Os diques básicos a intermediários apresentam características semelhantes às dos basaltos da Bacia do Paraná (130 Ma). No entanto, os lamprófiros com idade sugerida de 116 Ma (isócronas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), evoluíram de magmas com afinidade alcalina, sendo mais novos que os basaltos da Bacia do Paraná, porém mais velhos que o complexo sienítico de Ilhabela, ocorrido há cerca de 80 Ma.

2.3 Geologia Local – os diques

Os diques cortam retilinearmente as rochas do Complexo Costeiro, constituídas por granitos, gnaisses e migmatitos. Estes diques ocorrem ao longo de costões, e aparecem

formando pequenos enxames de seis ou mais diques ou diques isolados; sendo que alguns deles estão alterados.

Possuem direção geral em torno de N55E com mergulhos sub- verticais a verticais, e espessuras variáveis entre 5 cm (FOTO 1) e 2 m. Cabe ressaltar que alguns diques apresentam ramificações (FOTO 2) e, outros mostram um estreitamento na sua espessura que ocorre ora em direção ao mar ora em direção ao continente. Alguns diques apresentam enclaves da encaixante (FOTO 3), em parte rotacionadas, e alguns indicadores de fluxo magmático como “baionetas” ou “chifres” com direção de sudoeste para nordeste (FOTO 4 e FOTO 5).

Os diques de lamprófiro apresentam amígdalas, visíveis no centro do corpo, preenchidas por carbonatos, e aspecto “encaroçado” (FOTO 6); enquanto que os diques básicos apresentam esfoliação esferoidal e maior resistência do que os diques lamprofíricos.

Cabe salientar que na Ponta do Araçá ocorre um dique básico “grudado” em um dique de lamprófiro (FOTO 7); e na Praia Grande, dois diques lamprofíricos se encostam (FOTO 8) e cortam um dique de composição quartzo-feldspática (FOTO 9).



Foto 1 – Dique com espessura aproximada de 5 cm localizado na Praia Grande, São Sebastião.



Foto 2 – Dique de 15 cm de espessura ramificado (Praia Grande, São Sebastião).



Foto 3 – Dique com enclave da encaixante (Ponta do Araçá).



Foto 4 – Dique com indicador de fluxo (Ponta do Araçá).



Foto 5 – Dique com indicador de fluxo (Praia Grande).



Foto 6 – Dique com aspecto “encarçado” (Praia do Cabelo Gordo).



Foto 7 – Diques de composições distintas lado a lado, ambos possuem espessura inferior a 1 m (Ponta do Araçá).



Foto 8 – Diques que se encostam (Praia Grande).



Foto 9 – Diques que se encostam e que cortam pequenos diques quartzo-feldspáticos e localização dos furos.

2.4 Petrografia

Foram feitas seis lâminas delgadas com a finalidade de caracterizar alguns diques que macroscopicamente são indistinguíveis e, nos quais não se encontrou correspondência com os diques estudados por Garda (1995). Os estudos petrográficos mostram que das seis lâminas, 5 correspondem a lamprófiros (DQ-3, DQ-5, DQ-30, DQ-31, DQ-32) e 1 lâmina corresponde a um diabásio (DQ-14).

Os lamprófiros são maciços e de granulação fina, apresentam índice de cor 60-70%; a matriz é afanítica a fanerítica muito fina, sendo composta por uma ampla quantidade de titanaugita idiomórfica a subdiomórfica, e em menor quantidade por plagioclásio, hornblenda e magnetita. Os fenocristais são submilimétricos e compostos principalmente por diopsídio com feições de corrosão nas bordas; augita e raras olivinas opacificadas nas bordas ou quase totalmente carbonatizadas. Secundariamente, ocorre calcita em aglomerados e de forma esparsa preenchendo vesículas e *ocelli*, em alguns casos, estas microfeições podem ser vistas em amostras de mão.

O diabásio, por sua vez, apresenta-se maciço e com granulação fina. Sua textura é fanerítica fina com arranjo entre os plagioclásios tipicamente ripiforme; a matriz é composta por plagioclásio, magnetita e augita.

3. Aspectos Teóricos

3.1 Diques - indicadores tectônicos

Diques são corpos tabulares geralmente constituídos de rochas ígneas, posicionados discordantemente às estruturas das rochas encaixantes. Segundo Anderson (1951 *apud* Pollard, 1987), os diques são considerados bons indicadores tectônicos, pois se posicionam perpendicularmente ao eixo de tensão de menor esforço, preenchendo espaços criados por distensão.

Segundo Pollard (1987) entre outros, existem três modos de colocação de um dique, de acordo com modelos de laboratório, em pequena escala, extrapolados para a escala de campo. O modo I relaciona a colocação de um dique a processos de distensão, enquanto que os modos II e III relacionam a colocação de um dique a processos de cisalhamento.

Com relação à morfologia, os diques podem conter em suas extremidades, irregularidades menores que podem indicar a direção do fluxo magmático no preenchimento das fraturas. Estas irregularidades podem ser baionetas, chifres, segmentos entre outros (Pollard, 1987; Rickwood, 1990). Porém estas feições não são comuns em diques, sendo necessário, muitas vezes, optar por métodos alternativos capazes de indicar a direção do fluxo magmático na ocasião da formação do dique, como por exemplo, a aplicação de métodos magnéticos, tais como as anisotropias de suscetibilidade magnética.

3.2 Propriedades Magnéticas

As rochas são capazes de registrar a direção do campo magnético na época de sua formação, através dos minerais de comportamento ferromagnético presentes em sua constituição. Estes minerais são em geral óxidos do sistema ternário $\text{FeO-TiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ que representam a fase acessória das rochas (Butler, 1992), como por exemplo, a magnetita ou titanomagnetita. Existem outros minerais que fornecem uma contribuição menor ao magnetismo de rocha, como por exemplo, os sulfetos cujo principal mineral é a pirrotita (FeS_{1+x}) (Tarling & Hrouda, 1993).

A rocha também pode conter minerais com comportamento magnético do tipo diamagnético e paramagnético. Os comportamentos magnéticos dos minerais e de outros materiais é determinado pelo comportamento da suscetibilidade magnética (Fig.3), ou a facilidade com que o material adquire magnetização, frente a um campo magnético (Halliday & Resnick, 1984).

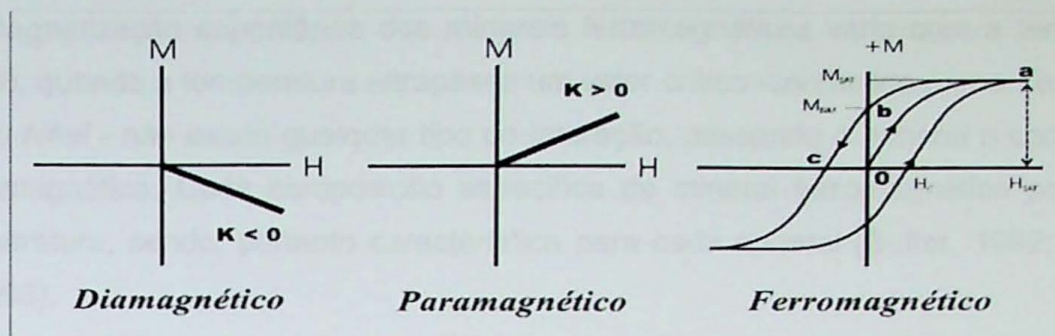


Fig. 3 Comportamento da magnetização nos materiais sob um campo magnético (modificado de Tarling & Hrouda (1993)).

A suscetibilidade magnética é expressa pela Lei de Curie na qual a magnetização M é diretamente proporcional ao campo magnético H aplicado:

Onde:

M = magnetização, mT;

K = suscetibilidade magnética;

H = campo magnético, mT

De acordo com a relação exposta, a suscetibilidade magnética de um material pode ser negativa se a direção da magnetização se posicionar em sentido contrário ao do campo magnético indutor ($K < 0$) ou, pode ser positiva se a direção da magnetização for paralela ao campo magnético aplicado ($K > 0$) (Tarling & Hrouda, 1993), caracterizando, respectivamente, o comportamento diamagnético e paramagnético (Fig. 3), em ambos os casos a magnetização é reduzida a zero na ausência de um campo magnético. Entretanto se existe remanência magnética, ou seja, apresenta histerese o comportamento será do tipo ferromagnético (Fig. 3). O fenômeno de histerese resulta da permanência de alguns momentos magnéticos orientados mesmo quando o campo magnético externo é reduzido a zero (Halliday & Resnick, 1984).

O comportamento ferromagnético é resultado do acoplamento de troca entre *spin*-órbita dos elétrons desemparelhados, que se alinham em pequenas regiões chamadas domínios magnéticos; estas regiões apresentam magnetização uniforme em direção preferencial aleatória que podem configurar um paralelismo ou antiparalelismo rígido. As estruturas de domínios magnéticos são dependentes do tamanho do grão magnético, e podem ser classificadas como estruturas de *domínio simples* (SD), *pseudo-domínio simples* (PSD) e *multidomínios* (MD). Devido à baixa energia dispensada pelos domínios, estes podem ter seus momentos magnéticos desalinhados através de desmagnetizações (Butler, 1992).

A magnetização espontânea dos minerais ferromagnéticos varia com a temperatura, desse modo, quando a temperatura ultrapassa um valor crítico -conhecido como *Temperatura de Curie ou Néel* - não existe qualquer tipo de interação, passando o mineral a comportar-se como paramagnético. Cada composição específica de mineral ferromagnético possui uma única temperatura, sendo, portanto característica para cada mineral (Butler, 1992; Tarling & Hrouda, 1993).

3.3 Anisotropia de Suscetibilidade Magnética

A anisotropia de suscetibilidade magnética (ASM) expressa a variação da suscetibilidade magnética com a direção do campo magnético aplicado em uma rocha. Em materiais isotrópicos a suscetibilidade é um escalar, no entanto, para materiais anisotrópicos a suscetibilidade varia com a direção do campo magnético aplicado nos materiais (Butler, 1992; Tauxe, 1998).

A ASM é representada por um tensor simétrico de segunda ordem, k_{ij} , o qual reflete uma combinação de todos os minerais (diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos) dentro de um espécime de rocha. Os três componentes principais do tensor (autovetores) são os eixos K_{max} , K_{int} e K_{min} que representam, respectivamente, a direção de suscetibilidade máxima, intermediária e mínima, definindo aproximadamente um elipsóide de revolução (Tarling & Hrouda, 1993). Estes autovetores são fornecidos em termos de declinação e inclinação corrigidos para os dados de campo.

A orientação dos eixos K_{max} , K_{int} e K_{min} fornece a trama magnética das rochas cuja interpretação é feita de modo similar aos métodos tradicionais, tais como, medidas efetuadas em campo ou platina universal. O eixo K_{max} representa a lineação magnética, enquanto que o plano formado por K_{max} e K_{int} representa a foliação magnética cujo pólo é o eixo K_{min} .

A orientação dos eixos principais da ASM (K_{max} , K_{int} e K_{min}) em relação aos planos dos diques, determina três tipos de tramas magnéticas: *Normal*, *Inversa* e *Intermediária* (Rochette, 1992).

A trama *Normal* é caracterizada pelo paralelismo entre a foliação magnética e o plano do dique; sendo o pólo da foliação magnética perpendicular a esse plano. Esta trama é comumente interpretada como sendo devido ao fluxo de magma no preenchimento das fraturas (Knight & Walker, 1988). Nesse caso, a análise da inclinação do eixo K_{max} permite inferir se os diques foram alimentados por fluxos horizontais ou subhorizontais (inclinação de $K_{max} < 30^\circ$), inclinados ($30^\circ < K_{max} < 60^\circ$) ou verticais ($K_{max} > 60^\circ$).

A trama *Inversa*, por sua vez, corresponde ao plano definido pelos eixos K_{int} e K_{min} paralelo ao plano do dique e o eixo K_{max} posicionado perpendicularmente a parede do dique.

Já a trama *Intermediária* é representada pelo plano formado pelos eixos K_{max} e K_{min} , que se posiciona paralelamente ao plano do dique enquanto que K_{int} é perpendicular a ele. As tramas *Inversa* e *Intermediária* são consideradas anômalas e podem estar ou não relacionadas a processos tectônicos.

3.4 Anisotropia de Remanência Magnética (ARM)

A Anisotropia de Remanência Magnética (ARM) têm sido empregada, nos últimos anos, como complemento na determinação de petrotramas (Jackson, 1991).

O tensor da ARM, também de segunda ordem, é resultado somente da mineralogia ferromagnética presente na rocha, pois estes minerais são os únicos que guardam a magnetização remanente. Desse modo, a ASM é devida a todos os minerais presentes na rocha enquanto que a ARM é resultado somente dos minerais magnéticos. Os minerais paramagnéticos e diamagnéticos podem ter orientações diferentes dos minerais ferromagnéticos. O estudo da ASM e da ARM permite investigar se houve sobreposição de eventos tectônicos.

3.5 Comportamento da Magnetização Remanente Natural (MRN)

A rocha ao se formar adquire uma magnetização com espectros de coercividade (H_c) e temperaturas de bloqueio (T_B), característicos de seus minerais magnéticos. Entretanto, magnetizações posteriores podem surgir e, superpor-se a inicial, afetando os espectros originais, de forma parcial ou total. Esse conjunto de magnetizações constitui a magnetização remanescente natural (MRN) (Butler, 1992; Tauxe, 1998).

A desmagnetização por campos magnéticos alternados e a desmagnetização térmica são os processos normalmente utilizados para estudar a estabilidade térmica e, identificar as componentes de magnetização presentes no espécime de rocha. Conseqüentemente, esses experimentos permitem determinar a magnetização característica do espécime que é a que mais se aproxima da magnetização primária (Tauxe, 1998).

O processo de desmagnetização por campos magnéticos alternados (AF) testa a estabilidade magnética das amostras sob a aplicação de campo magnético alternado que diminui a partir de um dado valor de pico H até zero. Durante este procedimento, os momentos magnéticos dos grãos com forças coercivas menores que H mudam sua direção para o eixo de maior facilidade de magnetização de acordo com a orientação do campo magnético aplicado. Com a redução do campo, o eixo de maior facilidade de magnetização dos grãos orienta-se ao acaso. Dessa forma, os momentos magnéticos são mutuamente

cancelados e todos os grãos com coercividade menor que H são efetivamente desmagnetizados. Os grãos magnéticos com maior coercividade permanecem inalterados conservando a magnetização remanescente que é medida após cada etapa de desmagnetização. Estas medidas permitem analisar o espectro de coercividade da amostra em estudo até o limite máximo do equipamento utilizado.

Já a desmagnetização térmica da MRN consiste em aquecer o espécime em uma temperatura determinada, resfriá-lo em campo nulo e, posteriormente, medir a magnetização remanescente. Com o aumento da temperatura, o tempo de relaxação de todas as partículas magnéticas presentes no espécime diminui exponencialmente. Desse modo, pode-se separar grãos magnéticos que possuem tempo de relaxação menor, os quais apresentarão comportamento do tipo superparamagnético, ou seja, só adquirem magnetização na presença de um campo magnético; enquanto que os grãos com tempo de relaxação mais longo não são afetados, conseguindo manter a magnetização original (Tauxe, 1998).

O espectro de temperaturas de bloqueio do espécime pode ser determinado submetendo-o a sucessivos ciclos de aquecimento e resfriamento, medindo-se a magnetização remanescente a cada intervalo de temperatura, sendo que a temperatura inicial (T_0) é aumentada sucessivamente.

As magnetizações remanescentes obtidas por ambos os processos, nos diferentes passos de desmagnetização, são fornecidos em termos de declinação e inclinação magnética cuja representação é feita em projeção estereográfica, o que possibilita estudar a estabilidade magnética dos espécimes em questão.

3.6 Magnetizações Secundárias

3.6.1 Magnetização Anisterética

Por meio dessa magnetização pode-se estudar os minerais magnéticos e seus espectros de coercividade remanente e, conseqüentemente, o tamanho do grão magnético.

O método consiste em induzir uma magnetização artificial no espécime, aplicando um campo magnético fraco paralelamente a um campo magnético alternado. A indução da magnetização anisterética pode ser total (MRA) ou parcial (PARM).

3.6.2 Magnetização Remanescente Isotermal (IRM)

A IRM é uma magnetização adquirida por um espécime de rocha em um curto intervalo de tempo. A finalidade de aquisição da IRM consiste no estudo dos domínios

magnéticos e, em verificar em que campo ocorre a saturação da amostra, auxiliando na identificação dos grãos magnéticos. Pois os grãos magnéticos apresentam uma força coerciva (H_c), que depende do mineral magnético, da forma e do tamanho dos grãos e, portanto, dos domínios magnéticos.

3.7 Curvas Termomagnéticas

A identificação dos minerais magnéticos pode ser feita pela temperatura de Curie determinada por curvas termomagnéticas, que podem ser obtidas tanto pela medida da suscetibilidade em função da temperatura como pela medida da magnetização em função da temperatura. No laboratório LAMS-USP são obtidas curvas termomagnéticas por medida da suscetibilidade em função de baixa (nitrogênio líquido) e alta temperatura.

O procedimento consiste em monitorar a suscetibilidade magnética - obtida através de um campo magnético baixo - de uma pequena quantidade de rocha pulverizada, durante um ciclo de resfriamento e aquecimento. No experimento a baixa temperatura a amostra é colocada a uma temperatura de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ e aquecida até a temperatura ambiente. No experimento a alta temperatura a amostra é aquecida até a temperatura de $700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Quando a temperatura de Néel do mineral é atingida, durante o experimento de baixa temperatura, observa-se um grande ganho na suscetibilidade magnética, ao passo que durante o experimento de alta temperatura ocorre o oposto, ou seja, quando a temperatura de Curie do mineral é atingida há uma queda grande na suscetibilidade da rocha. Desse modo, a inflexão da curva termomagnética ($K \times T$), durante o aquecimento, pode detectar mais de um mineral magnético através da presença de mais de uma inflexão.

4. Materiais e Métodos

Nesta pesquisa foram estudados as propriedades magnéticas de 20 diques. Para tanto, os seguintes métodos de estudo foram empregados:

- medidas de suscetibilidade e de anisotropia de suscetibilidade magnética;
- determinação das temperaturas de Curie dos minerais magnéticos através de medidas termomagnéticas (susceptibilidade magnética em função da temperatura) em altas e baixas temperaturas;
- obtenção de curvas de histerese e de aquisição da magnetização remanente isothermal visando o estudo dos domínios magnéticos e verificar a contribuição dos minerais paramagnéticos para a anisotropia de suscetibilidade magnética;

- desmagnetização térmica de alguns espécimes e desmagnetização por campos magnéticos alternados, visando determinar os espectros de temperatura de bloqueio dos espécimes e o comportamento da MRN;

- obtenção de curvas de indução magnética através da aplicação de magnetização anisterética total (MRA) e parcial (PARM), com o objetivo de estudar não só os minerais magnéticos, mas também seus espectros de coercividade;

- obtenção de curvas de indução magnética através de um magnetômetro tipo *pulse*, visando o conhecimento dos minerais magnéticos;

- determinação da anisotropia de remanescência magnética;

- análise de seções delgadas.

Após a execução dos métodos citados acima, os dados adquiridos foram incorporados aos dados obtidos durante a iniciação científica, totalizando 32 diques estudados.

5. Atividades Realizadas

As atividades realizadas programadas para a execução deste estudo seguiram o Cronograma de Atividades (Fig. 4) exposto abaixo. Com relação às dificuldades encontradas, não houveram complicações para a realização dos métodos propostos.

Atividades desenvolvidas	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Levantamento bibliográfico											
Trabalho de Campo											
Elaboração do Projeto Inicial											
Preparação das amostras: lavagem, corte, marcação, pó											
Experimentos de laboratório											
Interpretação dos resultados											
Elaboração do Relatório de Progresso											
Elaboração da Monografia											

Fig. 4 Cronograma de atividades.

5.1. Trabalhos de campo

Para esta pesquisa foi realizada uma viagem de campo com duração de oito dias. Nesta ocasião, utilizou-se o mapa topográfico na escala 1:50.000 (Carta do Brasil; IBGE, 1975; folha SF-23-Y-D-VI-3 de São Sebastião). Foram amostrados diques localizados na Ponta do Araçá e nas praias do Cabelo Gordo, Pitangueiras, Segredo e Praia Grande cujo mapa de pontos encontra-se na Fig. 5.

Foram coletadas amostras orientadas com a utilização de uma máquina perfuradora, refrigerada a água, que possui broca não-magnética (FOTO 10). Após a perfuração da rocha, os cilindros foram orientados *in situ* utilizando-se bússolas magnética e solar (quando possível) e, depois foram extraídos (FOTO 11). Para cada dique foram extraídos, no mínimo, 12 cilindros considerando o centro e as bordas do corpo, com o intuito de se verificar possíveis diferenças tanto nas propriedades magnéticas ao longo do dique, quanto para constatar a existência ou não de imbricação nas bordas.

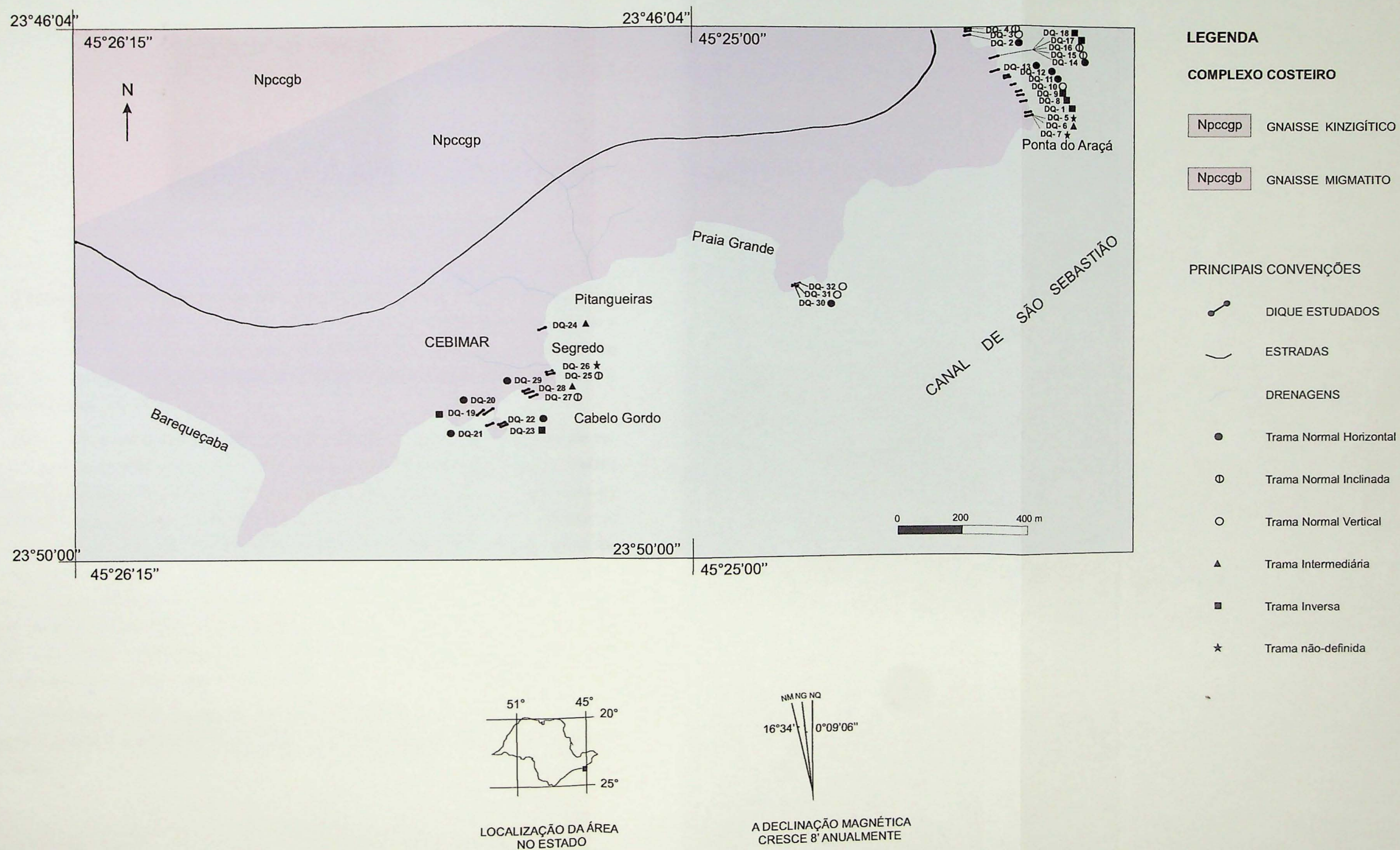


Foto 10 – Máquina perfuradora utilizada para amostragem



Foto 11 – Bússola magnética e solar utilizada para a orientação dos cilindros e o cilindro já orientado.

Fig. 5 Mapa de Amostragem e de localização dos diques estudados - São Sebastião (SP)



5.2. Trabalhos de laboratório

Os cilindros coletados durante os trabalhos de campo foram cortados em espécimes de 2,2 cm de altura, utilizando para isso, uma serra portadora de dois discos de material não magnético. Foram obtidos, no mínimo, 3 espécimes de cada cilindro (FOTO 12).



Foto 12 – Cilindros adequadamente preparados para as medidas magnéticas.

Posteriormente, a marcação feita em campo foi transferida para os espécimes. Para efetuar as medidas magnéticas, os espécimes foram embalados em papel filme para manter a limpeza dos aparelhos e evitar contaminação das amostras. Em seguida, efetuaram-se as medidas de anisotropia de suscetibilidade magnética de baixo campo (ASM) utilizando o equipamento *Kappabridge* (KLY-3S).

Para o estudo de magnetismo de rocha foram obtidas curvas de desmagnetização por campos magnéticos alternados (AF) da magnetização remanescente natural (MRN); desmagnetização por AF da magnetização anisterética total (MRA); curvas de aquisição da magnetização remanescente anisterética parcial (PARM); curvas de aquisição e desmagnetização por AF da magnetização remanescente isothermal (IRM), curvas de histerese e termomagnéticas. As desmagnetizações AF foram feitas no desmagnetizador Molspin; e para a aquisição da MRA utilizou-se o desmagnetizador e uma fonte de corrente contínua acoplada ao desmagnetizador. Este campo contínuo é coaxial e paralelo ao campo AF. Para a aquisição da IRM, utilizou-se o magnetômetro Pulse, as medidas de magnetização remanescente foram feitas no magnetômetro JR5A.

Durante esse período, foram realizados também o contínuo levantamento de trabalhos anteriores existentes sobre a região de estudo e o estudo teórico sobre as propriedades magnéticas.

6. Resultados

6.1 Anisotropia de Suscetibilidade Magnética em baixo campo – ASM

Os parâmetros médios escalares e direcionais obtidos pela ASM dos diques estudados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Dados escalares e direcionais obtidos pela ASM para os diques de São Sebastião

Sítio	Coordenadas		Loc.	Lit.	Dir.	Esp. m	N	Parâmetros Escalares			Parâmetros Direcionais (autovetores)			Trama
	Lon. °W	Lat. °S						Km (10-3)	P	T	Kmáx Dec./ Inc.	K int Dec./ Inc.	K mín Dec./ Inc.	
DQ-1	45,404	23,819	PA	U	N55E	0,6	28	21,349	1,024	0,088	278/14	34/60	181/26	INV
DQ-2	45,407	23,816	PA	L	N70E	0,7	14	14,856	1,069	0,622	223/19	34/70	132/3	NOR
DQ-3	45,407	23,816	PA	L	N60E	0,8	14	22,717	1,029	0,662	121/78	228/4	319/12	NOR
DQ-4	45,407	23,816	PA	L	N72E	1,0	25	25,300	1,018	-0,038	272/45	86/45	179/3	NOR
DQ-5	45,404	23,819	PA	U	N50E	0,4	25	27,705	1,022	0,046	sem resultado			
DQ-6	45,404	23,819	PA	U	N43E	0,4	19	30,820	1,024	0,342	354/40	91/8	190/49	INT
DQ-7	45,404	23,819	PA	L	N25E	0,8	14	57,696	1,027	-0,024	sem resultado			
DQ-8	45,405	23,819	PA	L	N70E	0,9	30	30,055	1,023	-0,304	113/12	263/76	21/7	INV
DQ-9	45,405	23,819	PA	D	N64E	1,3	22	69,037	1,031	-0,574	320/9	63/55	224/33	INV
DQ-10	45,405	23,819	PA	L	N72E	0,8	22	12,341	1,039	0,523	16/69	230/17	137/11	NOR
DQ-11	45,405	23,819	PA	L	N60E	0,6	14	29,467	1,063	0,680	38/17	282/55	138/30	NOR
DQ-12	45,405	23,819	PA	L	N52E	0,1	6	13,132	1,039	0,556	41/19	272/61	138/21	NOR
DQ-13	45,405	23,819	PA	L	N60E	0,7	25	24,551	1,094	0,755	38/23	252/63	134/14	NOR
DQ-14	45,405	23,819	PA	D	N60E	0,9	21	23,644	1,057	0,017	38/10	275/71	131/15	NOR
DQ-15	45,405	23,819	PA	L	N75E	0,3	14	11,281	1,084	0,771	46/32	235/58	138/4	NOR
DQ-16	45,405	23,819	PA	L	N45E	0,4	12	5,967	1,027	0,378	54/36	238/53	146/2	NOR
DQ-17	45,405	23,818	PA	L	N75E	0,7	26	90,305	1,030	-0,100	325/5	55/6	197/83	INV
DQ-18	45,405	23,818	PA	L	N78E	0,6	15	83,049	1,022	-0,294	296/15	30/15	163/68	INV
DQ-19	45,423	23,828	CG	D	N75E	1,5	7	1,912	1,099	-0,086	309/13	45/24	193/63	INV
DQ-20	45,423	23,829	CG	L	N64E	1,6	32	58,631	1,082	0,677	33/3	299/52	125/38	NOR
DQ-21	45,423	23,829	CG	L	N80E	1,5	57	41,292	1,051	0,506	43/8	289/70	135/18	NOR
DQ-22	45,423	23,828	CG	L	N65E	1,5	35	47,132	1,063	0,746	29/23	256/58	128/21	NOR
DQ-23	45,423	23,829	CG	L	N65E	0,8	24	49,549	1,039	0,383	203/19	329/60	104/22	INV
DQ-24	45,423	23,821	PP	D	N60E	2,0	32	70,413	1,024	-0,028	353/32	87/7	188/57	INT
DQ-25	45,423	23,822	PS	L	N82E	1,0	20	21,735	1,021	0,208	27/33	209/57	118/1	NOR
DQ-26	45,423	23,822	PS	L	N78E	0,3	3	4,083	1,039	0,832	sem resultado			
DQ-27	45,423	23,823	CG	L	N50E	2,0	8	14,974	1,039	0,466	222/31	26/58	128/7	NOR
DQ-28	45,419	23,817	CG	D	N60E	0,3	15	21,050	1,051	0,349	13/13	109/23	255/63	INT
DQ-29	45,423	23,823	CG	L	N65E	1,0	6	15,406	1,048	0,215	234/8	350/72	142/16	NOR
DQ-30	45,407	23,817	PG	L	N65E	0,4	24	23,776	1,054	0,766	223/10	356/75	131/11	NOR
DQ-31	45,407	23,817	PG	L	N60E	0,5	26	22,036	1,064	0,780	292/75	47/6	138/13	NOR
DQ-32	45,407	23,817	PG	L	N60E	1,0	21	36,378	1,096	0,792	344/66	214/16	119/18	NOR
Médias							656	31,926	1,047	0,335				

Kmax, Kint e Kmin referem-se aos valores médios dos autovetores que representam, respectivamente, as intensidades máxima, intermediária e mínima da suscetibilidade da ASM. Lon e Lat são respectivamente longitude (graus) e latitude (graus); Loc é a localização dos diques estudados: PA- Ponta do Araçá, CG- Cabelo Gordo, PP- Praia das Pitangueiras, PS- Praia do Segredo, CG- Cabelo Gordo, PG- Praia Grande. Lit refere-se ao litotipo estudado: U- ultrabásica, L- lamprófito, D- Diabásio. Dir é a direção média do dique; Esp é a espessura do dique em metros; N é o número de espécimes medidos; Km= (Kmax+Kint+Kmin)/3 é a suscetibilidade magnética média (unidade SI); P é o grau de anisotropia (Kmax/Kmin); T= [2ln(Kint/Kmin)/ln(Kmax/Kmin)]-1 é o parâmetro de Jelinek (1981); Dec, declinação em graus; Inc, inclinação em graus. Tipos de tramas magnéticas: NOR- normal; INT- intermediária; INV- inversa.

Os autovetores obtidos para os sítios apresentam-se bem agrupados, com exceção de 3 diques (DQ-5, DQ-7 e DQ-26), os quais não apresentam nenhum resultado (Tabela 1). Os dados da ASM resultaram em três tipos de tramas magnéticas (Fig. 6) de acordo com a orientação dos autovetores em relação à orientação do dique. As tramas magnéticas dos diques são predominantemente do tipo *Normal* (59,3% dos diques) (Fig. 6A e 6B). Subordinadamente a trama *Normal*, ocorrem as tramas *Intermediária* (Fig. 6C) e *Inversa* (Fig. 6D) que foram encontradas, respectivamente em 18,8% e 21,8% dos diques.

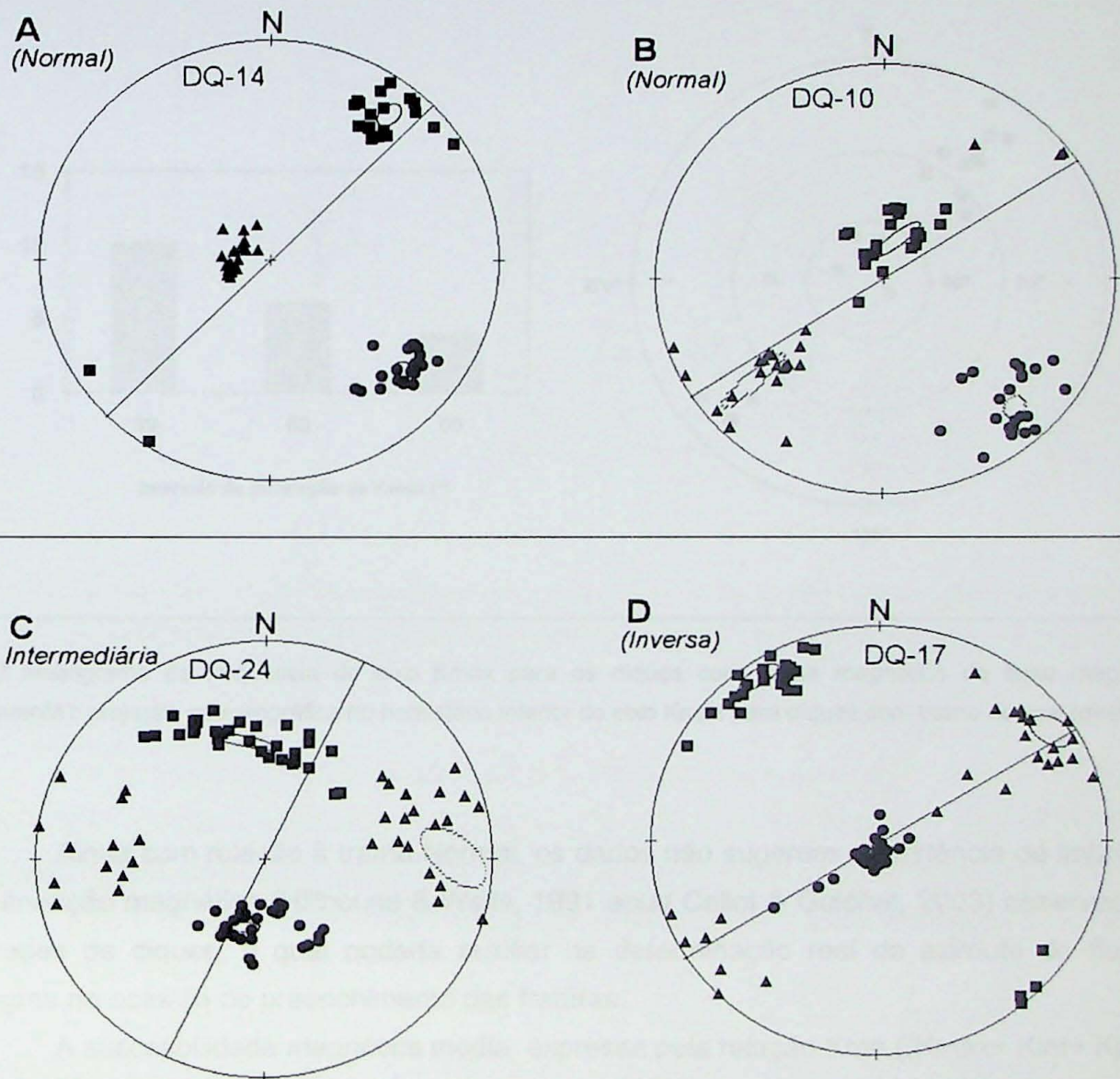


Fig. 6 Exemplos representativos das tramas magnéticas determinadas pela ASM para os diques estudados. (A) normal com fluxo horizontal; (B) normal com fluxo vertical; (C) intermediária; (D) inversa. Os quadrados representam a suscetibilidade máxima ($K_{\text{máx}}$); os triângulos representam a suscetibilidade intermediária (K_{int}); e os círculos cheios representam a suscetibilidade mínima (K_{min}). As elipses de 95% de confiança são também representados. O traço cheio representa a direção do dique medida em campo. Os dados foram projetados em diagramas de Wulff no hemisfério inferior.

A trama *Normal* é interpretada como sendo devido ao fluxo de magma, no preenchimento das fraturas e o eixo Kmax é usado para inferir a posição relativa entre fonte(s) e fratura(s). Esta interpretação é coerente com os indicadores de fluxo encontrado nos diques. Nos diques que apresentaram trama magnética *Normal* há predomínio da inclinação de $K_{max} < 30^\circ$, conforme histograma de frequência e projeção estereográfica do eixo Kmax (Fig.7), indicando que a maioria dos diques foi preenchida por fluxos magmáticos horizontais. No entanto, notou-se a ocorrência subordinada de diques com $30^\circ < K_{max} < 60^\circ$ e, também com $K_{max} > 60^\circ$.

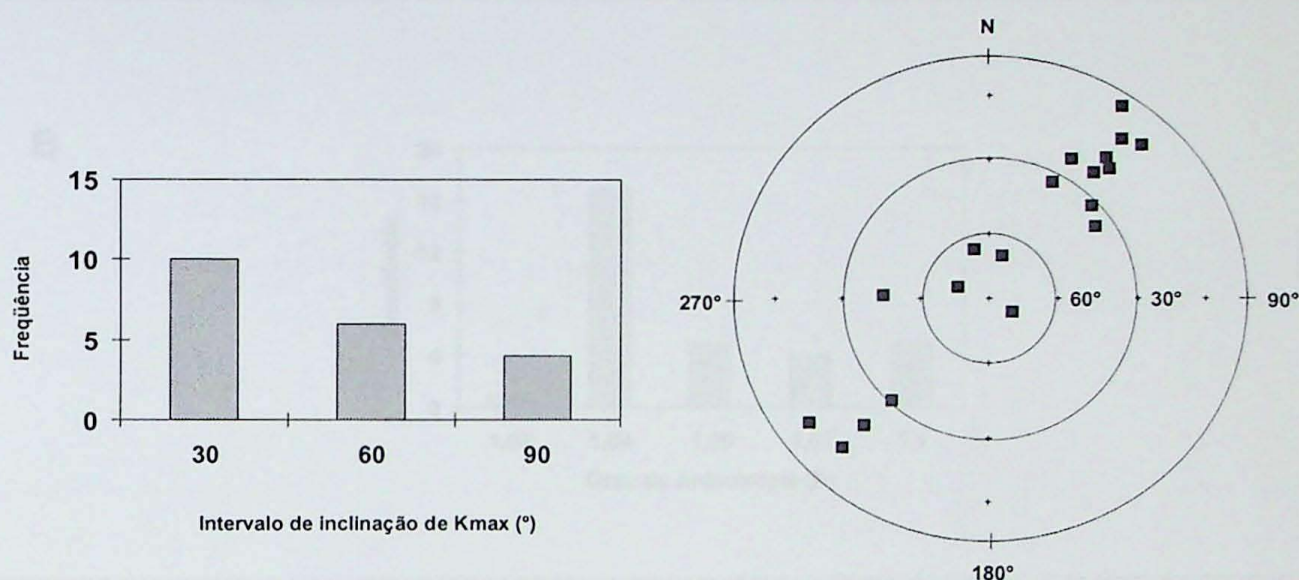


Fig.7 Histograma de frequência do eixo K_{máx} para os diques com trama magnética de fluxo magmático (esquerda); projeção estereográfica no hemisfério inferior do eixo K_{máx} para diques com trama normal (direita).

Ainda com relação à trama Normal, os dados não sugerem a existência de imbricação da lineação magnética (Hillhouse & Wells, 1991 *apud* Callot & Guichet, 2003) observada nas paredes de diques, o qual poderia auxiliar na determinação real do azimuth do fluxo de magma na ocasião do preenchimento das fraturas.

A suscetibilidade magnética média, expressa pela relação $K_m = ((K_{max} + K_{int} + K_{int}) / 3)$ em unidade SI, apresenta maior concentração nos intervalos de 0 a 20×10^{-3} e de 20 a 40×10^{-3} (Fig.8A), sendo o valor médio de 32×10^{-3} SI (Tabela 1). Observa-se que a magnitude da suscetibilidade não possui relação aparente com os litotipos estudados, pois diques do mesmo litotipo, sejam lamprófiros ou básicos, apresentam suscetibilidades variadas (Tabela 1).

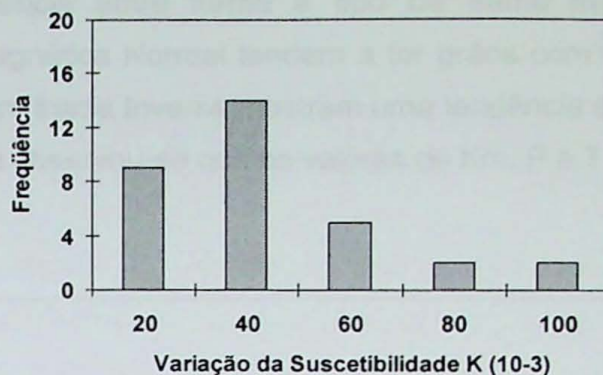
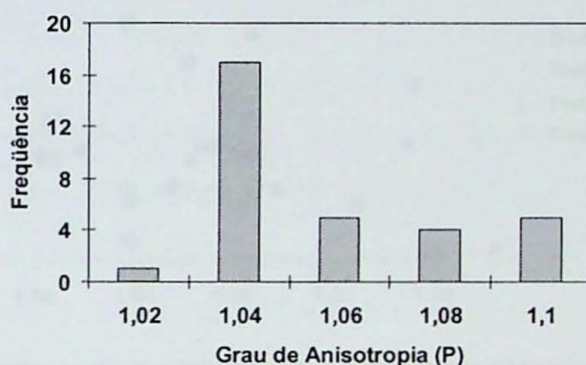
A**B**

Fig. 8 Dados de anisotropia de suscetibilidade magnética (ASM): (A) histograma de frequência dos valores de suscetibilidade magnética média (unidade SI); (B) histograma de frequência dos valores de grau de anisotropia.

Por sua vez, o grau de anisotropia (P), dado por $P = K_{\max}/K_{\min}$, varia de 1,02 a 1,09 (2% a 9%), sendo o intervalo de 1,02-1,04 (Fig. 8B) predominante e média de 1,05 (5%) (Tabela 1). Em geral, não existe uma relação aparente entre os parâmetros suscetibilidade média (K_m) e grau de anisotropia (P) para os diques de diferentes litotipos e de diferentes tramas magnéticas (Fig. 9A).

A Fig. 9B mostra a relação entre grau de anisotropia (P) e parâmetro de forma do elipsóide (T) (Jelinek, 1981), expresso por: $T = [2 \ln(K_{\text{int}}/K_{\min}) / \ln(K_{\max}/K_{\min})] - 1$, que permite classificar a forma predominante dos grãos, que podem ter forma oblata, neutra ou prolata. Formas oblatas se caracterizam por possuir valores positivos de T, enquanto formas prolatas possuem valores negativos de T. Já as formas neutras ou triaxiais possuem valores de T concentrados ao redor do valor 0,0.

Com relação aos diques deste estudo, verificou-se que a maioria deles possui grãos oblatos e, secundariamente apresentam grãos com forma neutra e prolata. Os dados

sugerem uma dependência entre forma e tipo de trama magnética. Pois diques que apresentaram trama magnética Normal tendem a ter grãos com forma oblata, enquanto que diques que apresentaram trama Inversa mostram uma tendência a grãos prolatos. Em relação à localização geográfica observou-se que os valores de Km, P e T variam aleatoriamente.

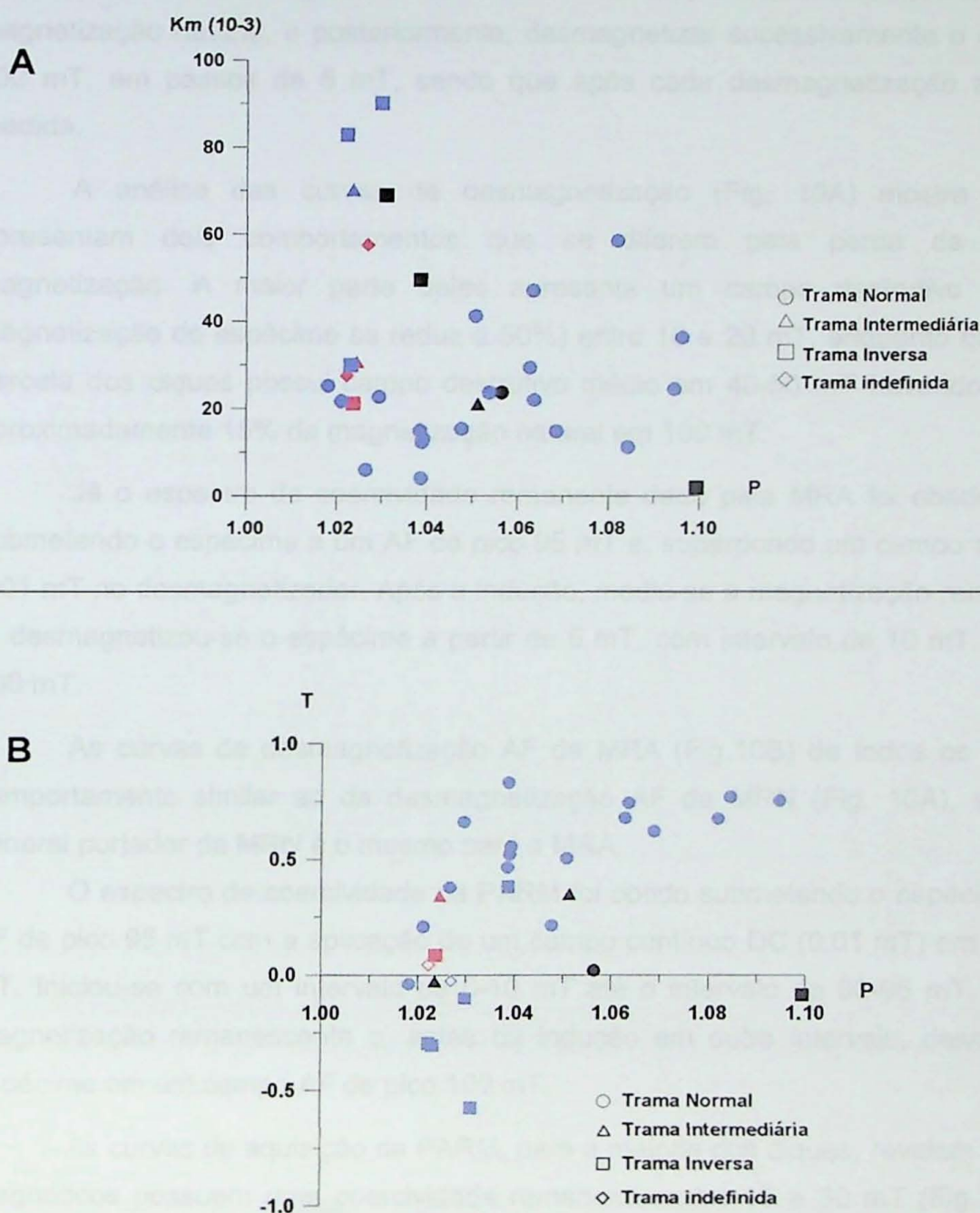


Fig.9 Dados escalares de ASM. (A) Gráfico de grau de anisotropia (P) versus suscetibilidade média (Km) (B) Gráfico de grau de anisotropia (P) versus suscetibilidade média (Km). Os diques foram discriminados segundo sua trama magnética (normal, intermediária e inversa). Os símbolos em azul, vermelho e preto representam, respectivamente, lamprófiros, ultrabásicos e basaltos/diabásios. (P).

6.2 Magnetismo de Rocha

Os experimentos de Magnetismo de Rocha permitem identificar e caracterizar os minerais magnéticos responsáveis pela magnetização remanescente e pela anisotropia magnética.

A desmagnetização por AF da MRN foi feita em um espécime piloto de cada dique, o que corresponde a 32 espécimes estudados. Essa etapa consistiu em, primeiramente medir a magnetização natural, e posteriormente, desmagnetizar sucessivamente o espécime de 5 a 100 mT, em passos de 5 mT, sendo que após cada desmagnetização a remanência foi medida.

A análise das curvas de desmagnetização (Fig. 10A) mostra que os diques apresentam dois comportamentos que se diferem pela perda da intensidade de magnetização. A maior parte deles apresenta um campo destrutivo médio (onde a magnetização do espécime se reduz a 50%) entre 10 e 20 mT, enquanto que uma pequena parcela dos diques possui campo destrutivo médio em 40-50 mT havendo preservação de aproximadamente 15% da magnetização natural em 100 mT.

Já o espectro de coercividade remanente dado pela MRA foi obtido, primeiramente submetendo o espécime a um AF de pico 95 mT e, superpondo um campo contínuo (DC) de 0,01 mT no desmagnetizador. Após a indução, mediu-se a magnetização remanente induzida e, desmagnetizou-se o espécime a partir de 5 mT, com intervalo de 10 mT, até o campo de 100 mT.

As curvas de desmagnetização AF da MRA (Fig.10B) de todos os diques mostram comportamento similar ao da desmagnetização AF da MRN (Fig. 10A), sugerindo que o mineral portador da MRN é o mesmo para a MRA.

O espectro de coercividade da PARM foi obtido submetendo o espécime a um campo AF de pico 95 mT com a aplicação de um campo contínuo DC (0,01 mT) em intervalos de 10 mT. Iniciou-se com um intervalo de 0-10 mT até o intervalo de 90-95 mT. Após medida a magnetização remanescente e, antes da indução em outro intervalo, desmagnetizou-se o espécime em um campo AF de pico 100 mT.

As curvas de aquisição da PARM, para a maioria dos diques, revelam que os minerais magnéticos possuem uma coercividade remanente entre 15 e 30 mT (Fig.10C), sugerindo tamanhos de grãos magnéticos entre 5 e 2-3 μm (Jackson *et al.*, 1988). No entanto, alguns diques apresentam mistura de grãos magnéticos da ordem de: 2-3 μm e 0,75 μm (Fig. 10D). Nesses diques, existe a possibilidade de se ter grãos magnéticos menores que 0,75 μm com coercividade remanente maior que 100 mT, conforme sugerem as curvas de aquisição da PARM (Fig. 10D).

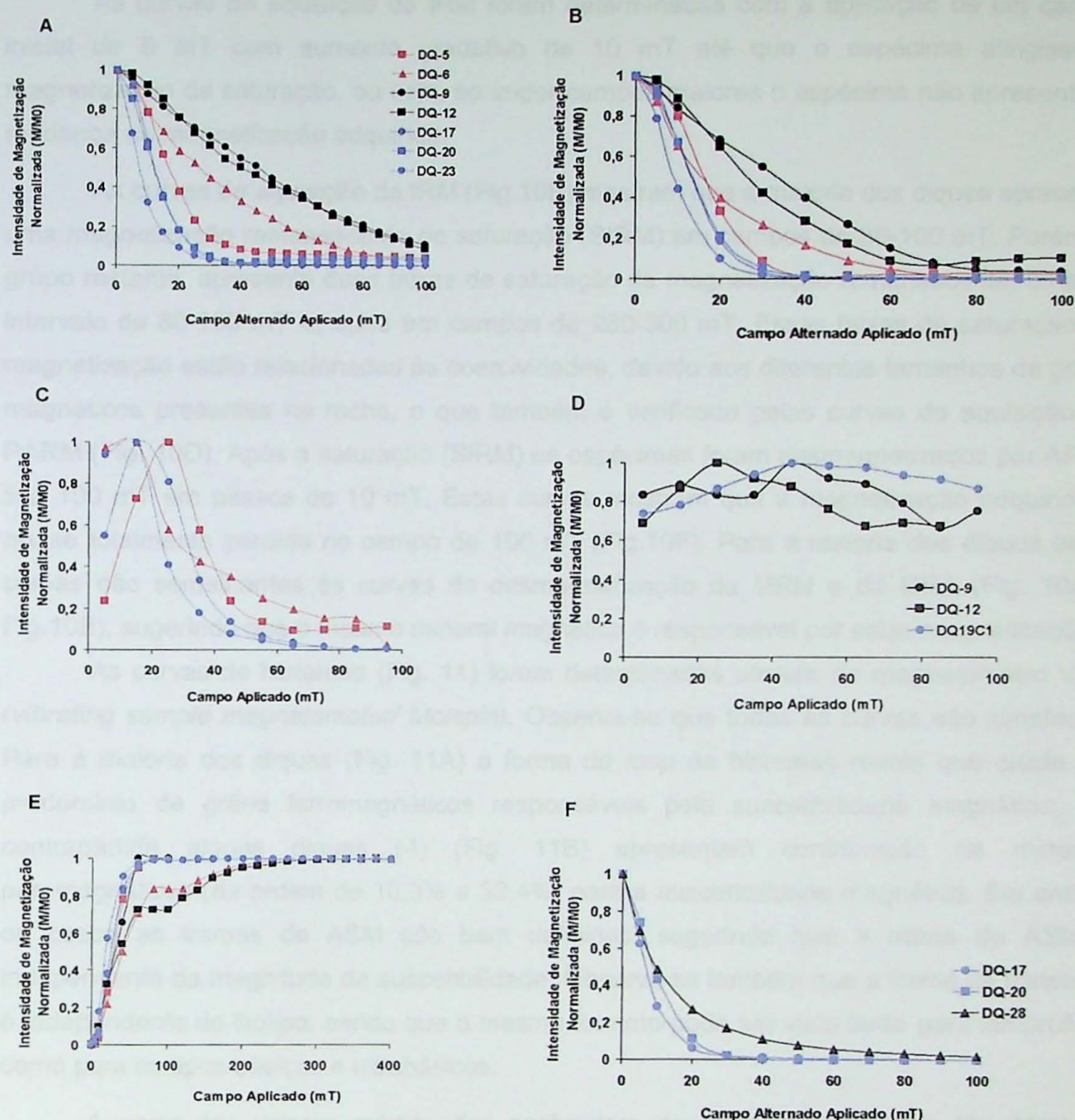


Fig.10 Dados representativos de magnetismo de rocha obtidos para os diques com diferentes tramas magnéticas. (A) Curvas de desmagnetização AF da MRN; (B) Curvas de desmagnetização AF da aquisição da MRA; (C) Curvas de aquisição da PARM; (D) Curvas de aquisição da PARM para grãos coercivos; (E) Curvas de aquisição da IRM; (F) Curvas de desmagnetização AF da IRM saturada (SIRM). Os diques foram discriminados de acordo com o seu litotipo e trama ASM apresentada. Desse modo, círculo, triângulo e quadrado representam respectivamente, trama normal, intermediária e inversa; e as cores azul, vermelho e preto representam, respectivamente, lamprófiros, ultrabásicos e basaltos/diabásios.

As curvas de aquisição da IRM foram determinadas com a aplicação de um campo inicial de 5 mT com aumento gradativo de 10 mT até que o espécime atingisse a magnetização de saturação, ou seja, ao impor campos maiores o espécime não apresentava mudança na magnetização adquirida.

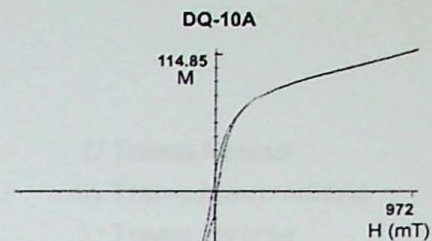
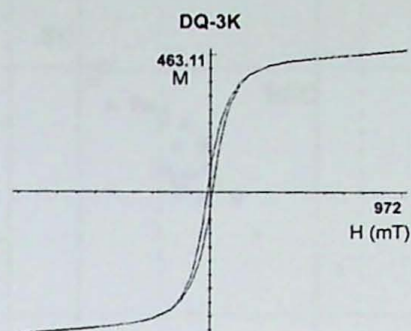
As curvas de aquisição da IRM (Fig.10E) mostram que a maioria dos diques apresenta uma magnetização remanescente de saturação (SIRM) em campos de 80-100 mT. Porém, o grupo restante, apresenta duas faixas de saturação da magnetização remanescente, uma no intervalo de 80-100 mT e, outra em campos de 280-300 mT. Essas faixas de saturação da magnetização estão relacionadas às coercividades, devido aos diferentes tamanhos de grãos magnéticos presentes na rocha, o que também é verificado pelas curvas de aquisição da PARM (Fig. 10D). Após a saturação (SIRM) os espécimes foram desmagnetizados por AF de 5 a 100 mT em passos de 10 mT. Estas curvas mostram que a magnetização adquirida é quase totalmente perdida no campo de 100 mT (Fig.10F). Para a maioria dos diques estas curvas são semelhantes às curvas de desmagnetização da MRN e da MRA (Fig. 10A e Fig.10B), sugerindo que o mesmo mineral magnético é responsável por estas magnetizações.

As curvas de histerese (Fig. 11) foram determinadas através do magnetômetro VSM (*vibrating sample magnetometer/ Molspin*). Observa-se que todas as curvas são simétricas. Para a maioria dos diques (Fig. 11A) a forma do *loop* de histerese revela que existe um predomínio de grãos ferromagnéticos responsáveis pela suscetibilidade magnética; em contrapartida alguns diques (4) (Fig. 11B) apresentam contribuição de minerais paramagnéticos (da ordem de 10,3% a 32,4%) para a suscetibilidade magnética. Em ambos os casos as tramas de ASM são bem definidas, sugerindo que a trama de ASM é independente da magnitude da suscetibilidade. Observa-se também que a forma da histerese é independente do litotipo, sendo que o mesmo formato pode ser visto tanto para lamprófiros como para os tipos básicos e ultrabásicos.

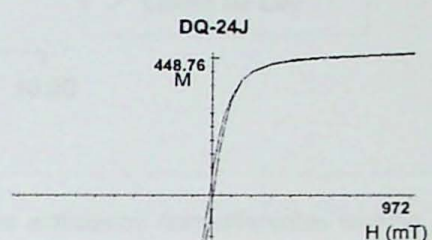
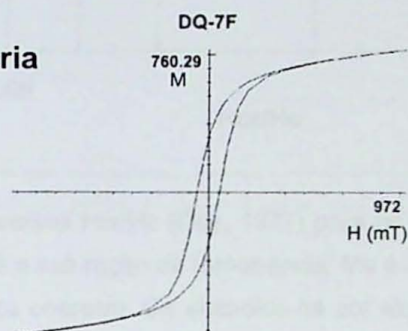
A partir dos valores médios dos parâmetros de histerese (H_c , H_{cr} , M_s , M_{rs}) foi construído o gráfico proposto primeiramente por Day *et al.* (1977) e, posteriormente modificado por Dunlop (2002) (Fig. 12). Por este gráfico, verificou-se que a maioria dos grãos magnéticos apresenta estrutura de domínios no intervalo que corresponde ao domínio PSD com tendência a domínio do tipo SD. No gráfico com os limites revisados por Dunlop (2002), parte dos diques estudados mostra uma tendência para misturas de grãos do tipo SD e PSD independente do tipo de trama de ASM e do litotipo estudado.

A

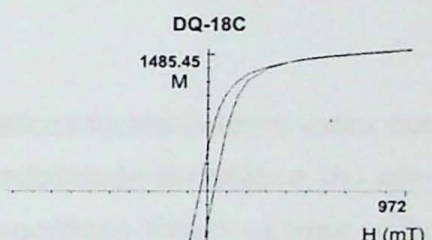
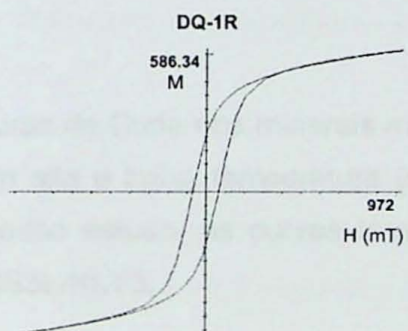
Normal



Intermediária



Inversa



B

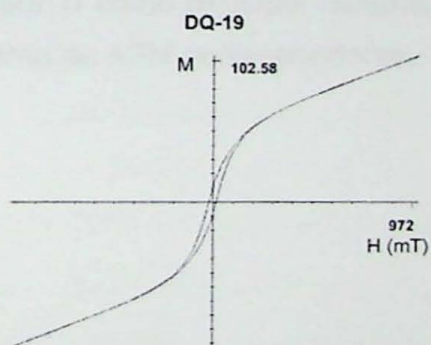
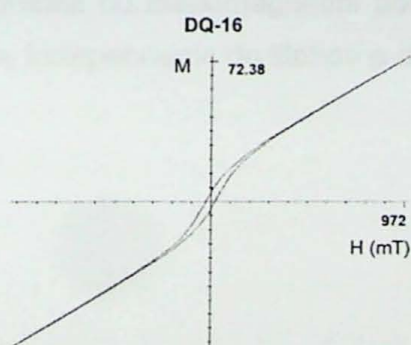


Fig. 11 Curvas de histerese representativas dos diques estudados com diferentes tramas ASM (Normal, Intermediária e Inversa). (A) Curvas predominantes para cada tipo de trama ASM; (B) Curvas com contribuição paramagnética visível. M corresponde a magnetização em $\mu\text{A m}^2$ e H é o campo magnético aplicado.

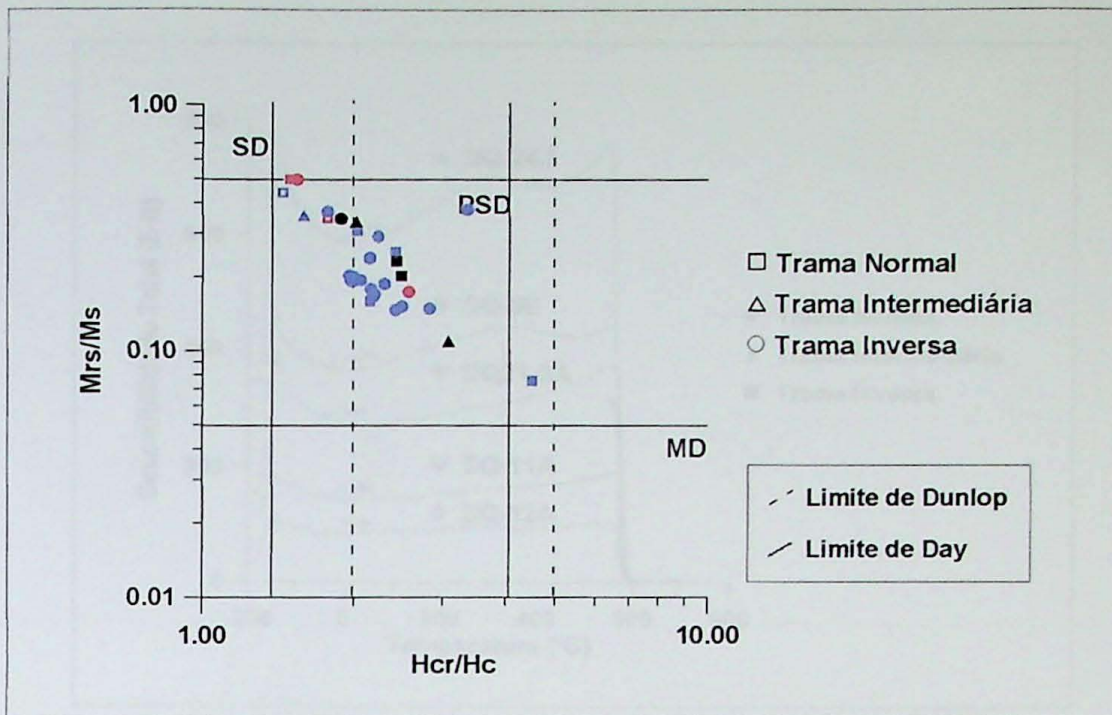


Fig. 12 Gráfico Mrs/Ms versus Hcr/Hc (Day, 1977) para os diques estudados com diferentes tramas ASM e de diferentes litotipos. Mrs é a saturação de remanência; Ms é a magnetização de saturação; Hcr é a força coerciva remanente e Hc é a força coerciva. Os símbolos na cor azul, vermelho e preto representam, respectivamente, lamprófiros, ultrabásicos e basaltos.

3.3 Anisotropia da Remanência Magnética - ARM

As temperaturas de Curie dos minerais magnéticos foram determinadas com medidas termomagnéticas em alta e baixa temperatura (suscetibilidade magnética (K) em função da temperatura (T)). Nesse estudo, as curvas termomagnéticas foram obtidas utilizando-se o equipamento CS3-CS3L-KLY3.

As curvas termomagnéticas, por sua vez, apresentam temperaturas de Curie de aproximadamente 580°C e um aumento na suscetibilidade à baixa temperatura em torno de -140 a -150°C (temperatura de transição de Verwey) (Fig. 13). Essas duas evidências sugerem a presença de magnetita ou titanomagnetita pobre em Ti como principal mineral magnético presente nos diques, independente do litotipo e da trama de ASM correspondente.

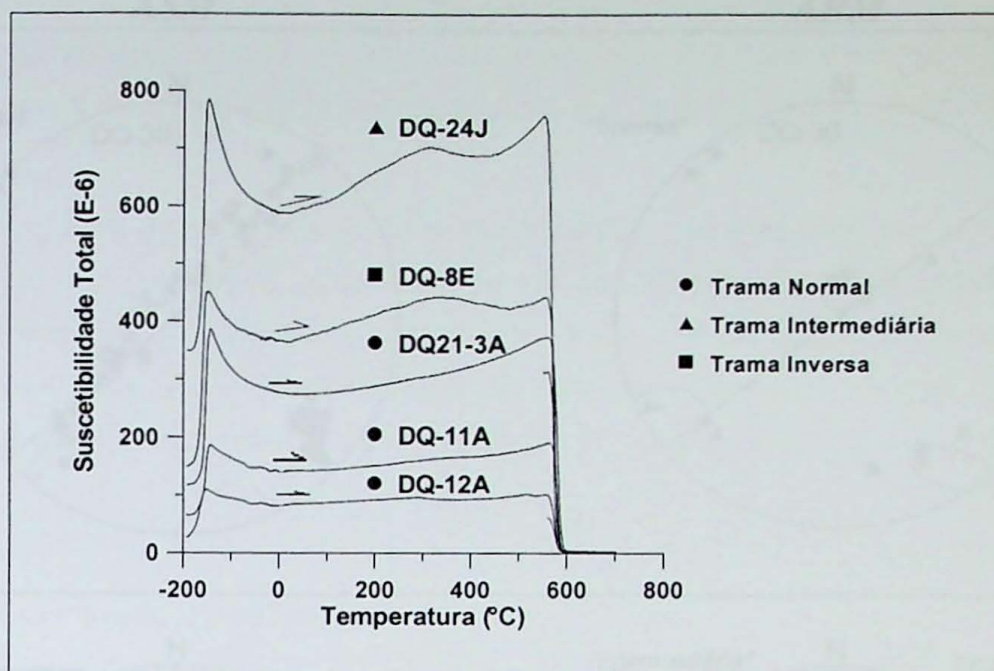


Fig. 13 Curvas K-T representativas (suscetibilidade versus baixa e alta temperatura) para diques com diferentes tramas ASM.

6.3 Anisotropia de Remanência Magnética – ARM

No presente trabalho a ARM foi determinada através da indução da magnetização remanente anisterética. O procedimento consiste em ciclos de indução e medidas em diferentes posições dos espécimes. Após medida a magnetização remanente anisterética e antes da indução em outra posição, o espécime deve ser desmagnetizado por AF.

Para a determinação da ARM o espécime foi submetido a um campo AF de pico 60 mT, definido pela análise das curvas de desmagnetização AF da MRN (Fig. 10A), com a aplicação de um campo contínuo DC de 0,01 mT. Após medida a magnetização remanescente e, antes da próxima indução, desmagnetizou-se o espécime em um campo AF de pico 70 mT. Cada passo de indução é feito ao longo de um determinado eixo definido, conforme o esquema de indução adotado. Para tanto, primeiramente foi aplicado um esquema de indução em 24 posições em um grupo de 4 espécimes-piloto de um sítio, com o intuito de se verificar o melhor esquema de indução para obter o melhor tensor ARM.

Os resultados obtidos, nesse teste mostram que os tensores são bem definidos independente do esquema de indução adotado. Nesse sentido, para economizar tempo de experimento foi escolhido um esquema de indução com 7 posições. A ARM foi determinada em quatro sítios, sendo 2 com trama de ASM *Normal*, 1 com trama de ASM *Intermediária* e 1 com trama de ASM *Inversa* (Fig. 14).

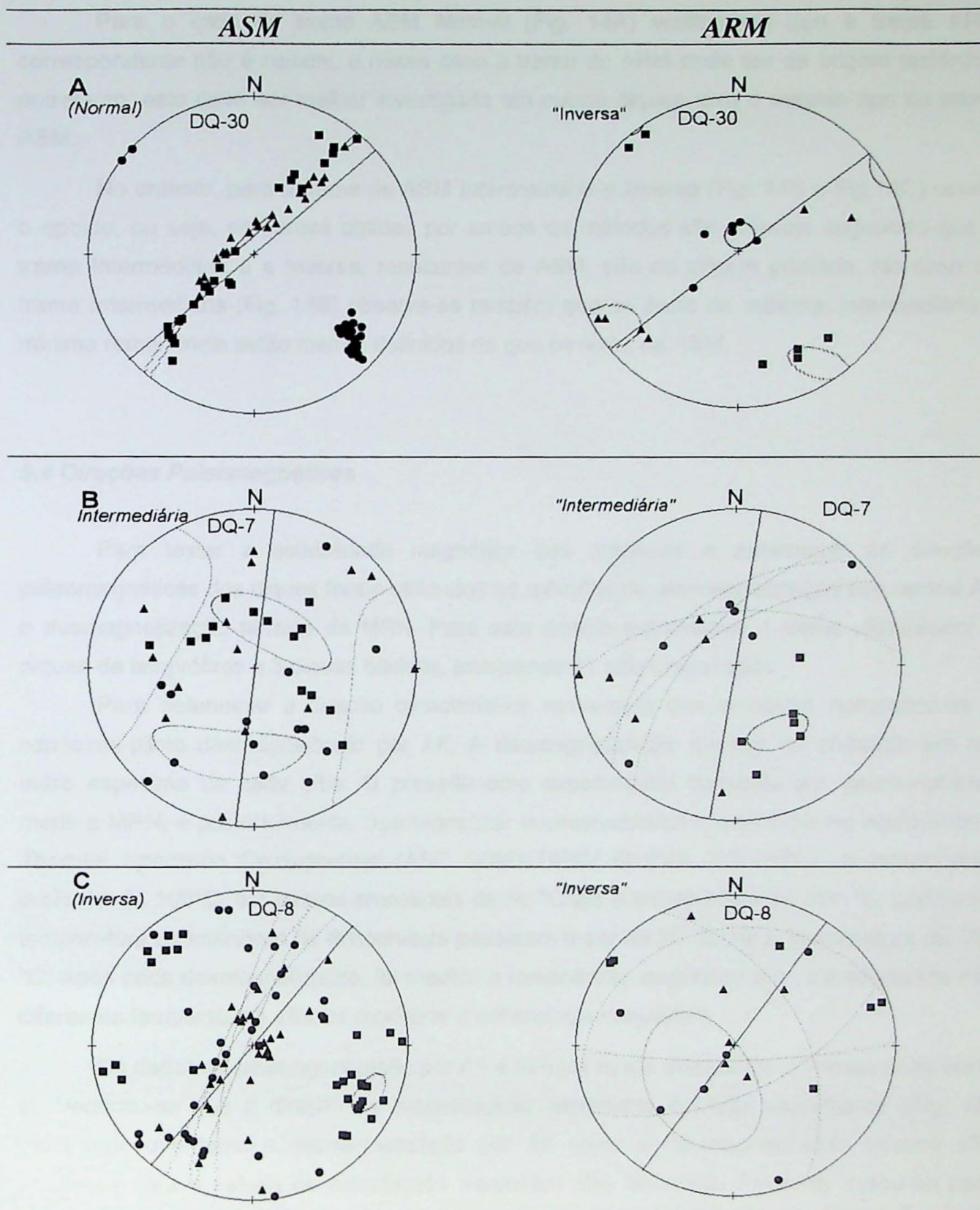


Fig. 14 Tramas magnéticas determinadas pela ASM e pela anisotropia de remanência magnética (ARM) dos diques DQ-30, DQ-7 e DQ-8. Os quadrados indicam o eixo de suscetibilidade máxima ($K_{\text{máx}}$) e máxima remanência; os triângulos indicam o eixo de suscetibilidade intermediária (K_{int}) e de remanência intermediária; e os círculos cheios indicam o eixo de suscetibilidade mínima (K_{min}) e de remanência mínima. As elipses de 95% de confiança são também representadas. O traço cheio representa o plano do dique com mergulho vertical. Os dados foram plotados em estereogramas de igual área no hemisfério inferior.

Para o caso da trama ASM *Normal* (Fig. 14A) verificou-se que a trama ARM correspondente não é coaxial, e nesse caso a trama de ARM pode ser de origem tectônica, entretanto, esta deve ser melhor investigada em outros diques com o mesmo tipo de trama ASM.

No entanto, para a trama de ASM *Intermediária* e *Inversa* (Fig. 14B e Fig.14C) ocorre o oposto, ou seja, as tramas obtidas por ambos os métodos são coaxiais sugerindo que a trama Intermediária e a Inversa, resultantes da ASM, são de origem primária. No caso da trama Intermediária (Fig. 14B) observa-se também que os eixos de máxima, intermediária e mínima remanência estão melhor definidos do que os eixos de ASM.

6.4 Direções Paleomagnéticas

Para testar a estabilidade magnética das amostras e determinar as direções paleomagnéticas dos diques foram utilizados os métodos de desmagnetização por campo AF e desmagnetização térmica da MRN. Para este estudo escolheu-se 1 dique ultrabásico; 7 diques de lamprófiros e 3 diques básicos, totalizando 11 sítios estudados.

Para determinar a direção característica remanente das amostras aproveitou-se o espécime-piloto desmagnetizado por AF. A desmagnetização térmica foi efetuada em um outro espécime de cada sítio. O procedimento experimental consistiu em, primeiramente medir a MRN, e posteriormente, desmagnetizar sucessivamente o espécime no equipamento *Thermal Specimen Demagnetizer* (ASC SCIENTIFIC/ MODEL TD-48SC). A temperatura inicial foi de 100°C, em passos crescentes de 50 °C até a temperatura de 500 °C; após esta temperatura os intervalos de temperatura passaram a ser de 30 °C até a temperatura de 700 °C. Após cada desmagnetização, foi medida a remanência magnética e a suscetibilidade nas diferentes temperaturas afim de monitorar a mineralogia magnética.

Os dados de desmagnetização por AF e térmica foram analisados e comparados entre si. Verificou-se que a direção da magnetização remanente é muito semelhante (Fig. 15) mostrando que tanto a desmagnetização por AF como a desmagnetização térmica são eficientes para o estudo da estabilidade magnética das amostras. Portanto, optou-se pela desmagnetização por AF para tratar mais 4 espécimes de cada sítio escolhido, totalizando 6 espécimes desmagnetizados.

Os dados mostram que os diques analisados possuem excelente estabilidade magnética (Fig. 15). As curvas de desmagnetização térmica mostram temperaturas de bloqueio em torno de 580- 600°C, resultado que é compatível com as curvas termomagnéticas (Fig. 13), indicando que a magnetita ou a titanomagnetita pobre em Ti, é o principal mineral portador da magnetização remanescente.

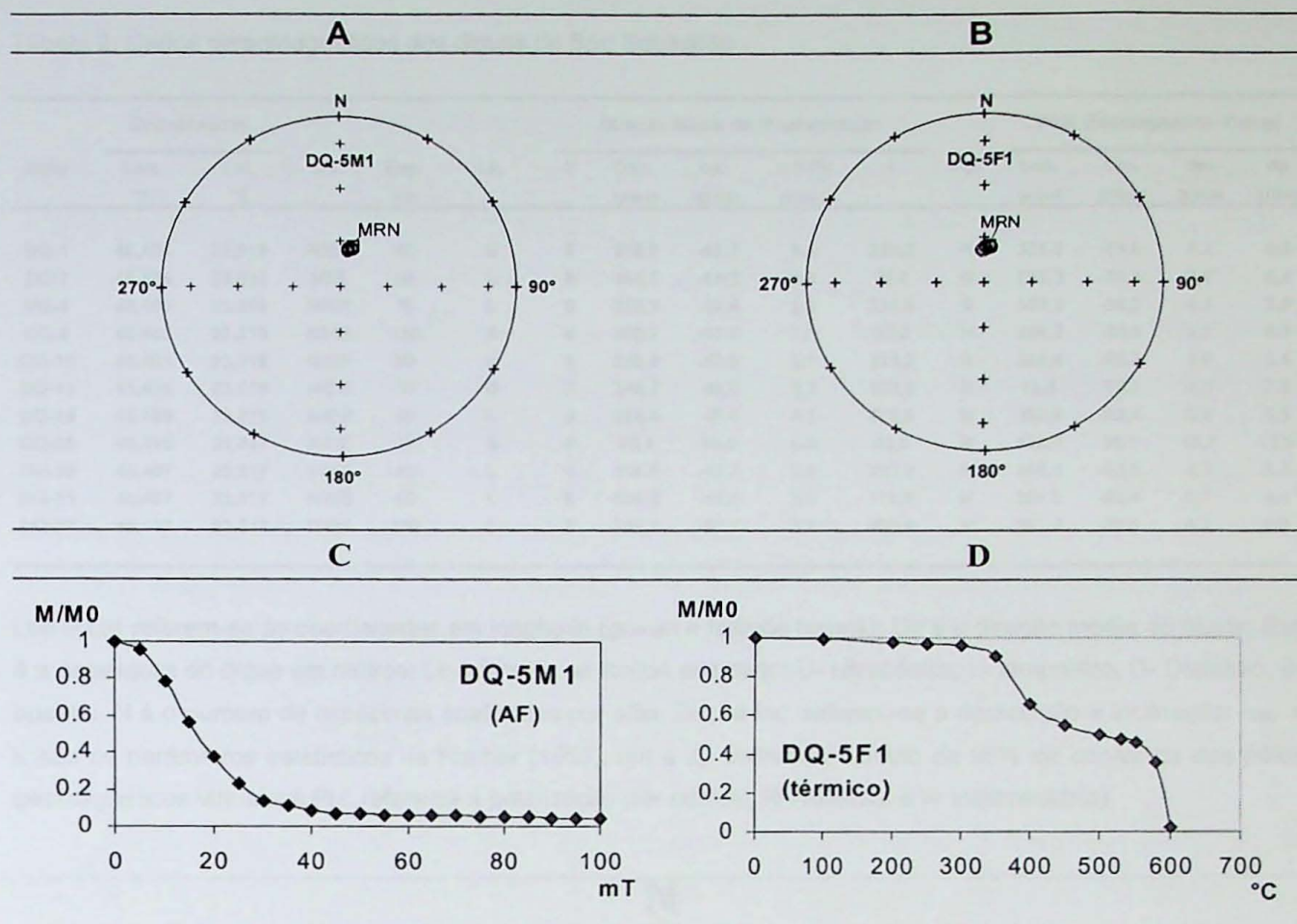


Fig. 15 Exemplos representativos de projeção estereográfica dos dados de desmagnetização AF (A) e térmica (B) em redes de Wulff ; e curvas de desmagnetização AF (C) e térmica (D) correspondente.

As direções características dos sítios foram determinadas pela análise da componente principal (Kirschvink, 1980) e pela seleção visual dos segmentos lineares do gráfico de Zijdeveld (1967). A direção média de magnetização para cada dique (Tabela 2) foi obtida pela média da direção de magnetização de cada espécime do sítio correspondente (Fig. 15); os respectivos parâmetros estatísticos foram calculados pelo método de Fisher (1953).

Os dados mostram que a maioria dos diques (10) apresentou direção média de magnetização com polaridade normal (Tabela 2; Fig. 16). Embora tenha sido feito a desmagnetização de 2 espécimes pilotos, um por AF e outro por processos térmicos, dos sítios restantes, a análise dos demais espécimes dos sítios está além daquilo que foi proposto neste trabalho. Neste sentido não foi calculado um pólo paleomagnético para os diques estudados, devido à insuficiência de dados analisados (apenas 11 diques).

Mesmo com um número limitado de diques é possível verificar que existe 2 grupos levemente distintos (Fig. 16). Um deles, que abrange a maioria, apresenta declinação NW e inclinação paleomagnética menor que 50° e o outro grupo com declinação N-S e inclinação paleomagnética maior que 50°. Isto será melhor verificado quando os demais diques forem analisados.

Tabela 2. Dados paleomagnéticos dos diques de São Sebastião

Sítio	Coordenadas		Dir.	Esp. cm	Lit.	Direção Média de Magnetização					Pol.	Pólo Geomagnético Virtual			
	Lon. °W	Lat. °S				N	Dec. graus	Inc. graus	α_{95} graus	k		Lon. graus	Lat. graus	dm graus	dp graus
DQ-1	45,404	23,819	N35E	60	U	6	356,8	-62,7	4,0	285,2	N	321,5	-69,6	6,2	4,9
DQ-7	45,404	23,819	N5E	80	L	8	355,7	-51,2	5,8	91,0	N	339,3	-81,1	7,9	5,4
DQ-8	45,405	23,819	N50E	70	L	8	356,5	-52,6	3,1	330,6	N	332,3	-80,2	4,2	2,9
DQ-9	45,405	23,819	N44E	130	B	6	356,7	-47,5	7,1	90,2	N	346,3	-84,4	9,2	6,0
DQ-10	45,405	23,819	N52E	80	L	8	356,9	-57,8	3,1	319,2	N	324,6	-75,2	4,6	3,4
DQ-13	45,405	23,819	N40E	70	D	5	346,7	-48,9	3,3	550,8	N	15,3	-76,7	4,3	2,8
DQ-14	45,405	23,819	N40E	90	L	6	354,4	-48,6	4,1	272,5	N	354,6	-82,4	5,4	3,5
DQ-28	45,419	23,817	N40E	30	B	6	25,4	64,6	8,5	63,0	R	332,5	16,1	13,7	11,0
DQ-30	45,407	23,817	N45E	40	L	9	356,0	-48,7	3,2	253,2	N	345,9	-83,2	4,3	2,8
DQ-31	45,407	23,817	N40E	50	L	6	359,3	-49,6	5,0	179,2	N	320,0	-83,4	6,7	4,4
DQ-32	45,407	23,817	N40E	100	L	6	353,7	-50,3	3,1	466,6	N	351,4	-80,8	4,2	2,8

Lon e Lat referem-se às coordenadas em longitude (graus) e latitude (graus); Dir é a direção média do dique; Esp é a espessura do dique em metros; Lit refere-se ao litotipo estudado: U- ultrabásica, L- lamprófiro, D- Diabásio, B- basalto. N é o número de espécimes analisados por sítio; Dec. e Inc. referem-se à declinação e inclinação; α_{95} e k são os parâmetros estatísticos de Fischer (1953); dm e dp definem o círculo de 95% de confiança dos pólos geomagnéticos virtuais; e Pol. refere-se a polarização (N= normal, R= reverso, e I= intermediário).

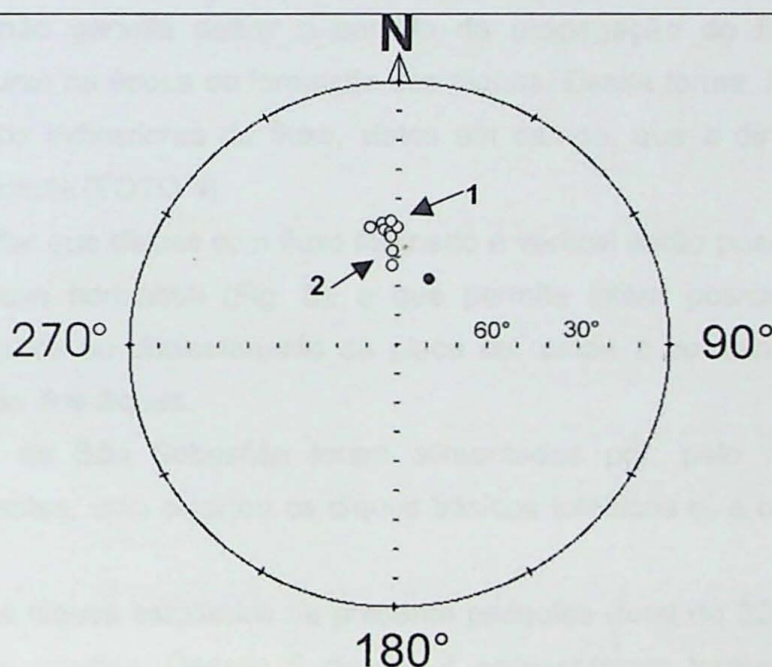


Fig. 16 Representação das direções médias de magnetização em rede estereográfica de Wulff (hemisfério inferior) para os diques de São Sebastião. Os símbolos vazios e cheios correspondem, respectivamente, a inclinações negativas (polaridade normal) e positivas (polaridade reversa). A flecha número 1 indica o grupo com inclinação menor que 50°, enquanto que a flecha número 2 indica o grupo com inclinação maior que 50°.

Os dados dos experimentos de Magnetismo de Rocha sugerem que o principal mineral magnético é a magnetita (Fig.13 e 15D) com grãos magnéticos de dimensões predominantes entre 5 e 2-3 μm (Fig. 10C) e apenas em 3 diques este mineral tem dimensões ao redor de 0.75 μm (Fig. 10D), ou ainda menor. A estrutura dos domínios magnéticos é preferencialmente do tipo PSD-SD (Fig. 12). Ou seja, a magnetita é o único mineral magnético responsável tanto pela magnetização remanescente quanto pela suscetibilidade magnética e anisotropia de remanência magnética.

As tramas magnéticas dos diques (Fig. 6), obtidas a partir do estudo de ASM, são predominantemente do tipo *Normal* (66% dos diques). Esta trama é interpretada como sendo de fluxo magmático, o que é coerente com os indicadores de fluxo observado em campo (FOTO 4). Nestas tramas a inclinação do eixo K_{max} menor que 30° é predominante, o que sugere que os diques foram alimentados por fluxos horizontais ou sub-horizontais indicando que esses diques estavam afastados das câmaras magmáticas. Entretanto, fluxos inclinados ($30^\circ < K_{\text{max}} < 60^\circ$) e verticais ($K_{\text{max}} > 60^\circ$) também estão presentes.

Os dados de ASM não mostram a existência de imbricação magnética em tramas *Normais*, o que não permite definir o sentido da propagação do fluxo magmático que preencheu as fraturas na época de formação dos diques. Dessa forma, infere-se por meio da presença de alguns indicadores de fluxo, vistos em campo, que a direção do fluxo foi de sudoeste para nordeste (FOTO 4).

Vale ressaltar que diques com fluxo inclinado e vertical estão posicionados lado a lado com diques de fluxo horizontal (Fig. 5), o que permite inferir posicionamento de fontes magmáticas diferentes ou deslocamento da placa ou, ainda a combinação desses fatores durante a colocação dos diques.

Os diques de São Sebastião foram alimentados por, pelo menos, duas fontes geoquímicas diferentes, uma originou os diques básicos toleíticos e, a outra deu origem aos diques alcalinos.

De todos os diques estudados na presente pesquisa (total de 32), somente 5 são de composição básica toleítica. Desses 5 diques, 4 apresentaram trama de ASM anômalas (*Inversa* e *Intermediária*) e somente um (DQ-14) apresentou trama de fluxo, cuja inclinação de K_{max} é 10° (Tabela 1), sugerindo que este dique estava afastado da sua fonte alimentadora. Dos 3 diques ultrabásicos estudados, um não apresentou resultado e os outros 2 apresentaram tramas de ASM anômalas.

Por outro lado, a maioria dos diques analisados são lamprófiros (total de 24). Desses 24 diques, 18 apresentaram trama de ASM de fluxo, 2 não apresentaram resultados, e 4 apresentaram trama de ASM *Inversa*. Dos diques com trama de ASM de fluxo, 9 apresentam inclinação de K_{max} maior que 30° (fluxo inclinado a vertical) e, os outros 9 apresentam

inclinação de K_{max} menor que 30° (fluxo horizontal a subhorizontal), sugerindo, respectivamente, que a metade dos diques estava próxima e os outros estavam afastados da fonte alimentadora. Isto permite inferir o posicionamento relativo, de pelo menos, duas fontes alimentadoras para os diques de lamprófiros. Uma delas poderia estar localizada próxima a região da Praia Grande (Fig. 5), uma vez que 2 diques apresentam fluxo vertical. Entretanto, essa fonte é apenas inferida, tendo em vista, que afloram mais diques na região de São Sebastião que não foram analisados nesta pesquisa.

Subordinadamente a trama *Normal*, ocorrem as tramas *Intermediária* (Fig. 6C) e *Inversa* (Fig. 6 D) que podem estar ou não relacionadas a processos tectônicos. Além disso, os dados mostram que não há relação entre tipo de trama magnética e localização geográfica dos diques estudados (Fig. 5), pois diques de diferentes tramas magnéticas estão posicionados lado a lado.

As tramas preliminares de ARM (Fig. 14) são coaxiais com as respectivas tramas de ASM para os diques de tramas anômalas (Fig. 14). Nesses casos, as tramas ARM confirmam que as tramas *Intermediária* e *Inversa* são de origem primária, para os 2 diques analisados. A trama *Intermediária* nos diques é comumente interpretada como sendo devido a pressão do magma na abertura da fratura. Para os diques com trama de ASM de fluxo a trama de ARM, surpreendentemente, não é coaxial, sugerindo que esta trama é de origem tectônica.

O padrão de fluxo encontrado para os diques de São Sebastião é similar ao encontrado em estudos anteriores de ASM em região contígua (Raposo & Ernesto, 1999; Raposo & Malo, 2006), ao enxame do Arco de Ponta Grossa (Raposo & Ernesto, 1995b) e ao enxame de Florianópolis (Raposo, 1997).

As tramas magnéticas encontradas para os diques estudados são independentes da magnitude da suscetibilidade magnética. Esta suscetibilidade é da ordem de 30×10^{-3} SI e é semelhante a suscetibilidade dos diques básicos dos enxames do Arco de Ponta Grossa e de Florianópolis. O grau de anisotropia é relativamente baixo (cerca de 4% a 9%) quando comparado aos outros enxames Mesozóicos.

Quanto à forma dos grãos, há predomínio de grãos oblatos, principalmente nos diques com trama de ASM do tipo *Normal*. Enquanto que os diques com trama de ASM do tipo *Inversa* mostram tendência a grãos prolatos.

Os diques analisados possuem excelente estabilidade magnética. A maioria deles apresentou direção de magnetização com polaridade normal (Tabela 2). As direções de magnetização apresentam uma leve diferença que, grosso modo, permite separá-las em dois grupos; um deles apresenta direção NW e inclinação menor que 50° enquanto que o outro apresenta direção N-S e inclinação maior que 50° (Fig. 16). Tentativamente podemos associar o primeiro grupo às direções paleomagnéticas dos diques do Arco de Ponta Grossa (Raposo & Ernesto, 1995 a, b) e o segundo grupo às direções paleomagnéticas dos diques de Florianópolis (Raposo *et. al.*, 1998).

8. Conclusões

Os diques estudados mostraram que a magnetita é o mineral responsável tanto pela suscetibilidade magnética quanto pela anisotropia de remanência magnética e pela magnetização característica remanescente. Do ponto de vista das propriedades magnéticas, os diques ultrabásicos, lamprofíricos e básicos não apresentaram diferenças significativas que possibilitassem a distinção desses diferentes litotipos aflorantes na área.

A suscetibilidade magnética dos diques é alta ($>30 \times 10^{-3}$ SI) e o grau de anisotropia é relativamente baixo ($\sim 5\%$).

Os dados de ASM dos diques estudados mostraram três tipos de tramas magnéticas; *Normal*, *Intermediária* e *Inversa*. Estas tramas são comumente encontradas em enxames de diques.

A trama de ASM *Normal* é a principal trama encontrada nos diques. Esta trama é interpretada como sendo devido ao fluxo de magma no preenchimento das fraturas. A análise da inclinação do eixo de máxima suscetibilidade mostra que metade dos diques foi alimentada por fluxos horizontais ($K_{\max} < 30^\circ$) sugerindo que estes diques estavam afastados da fonte alimentadora. Enquanto que a outra metade foi alimentada por fluxos inclinados a verticais ($30^\circ < K_{\max} < 60^\circ$, $K_{\max} > 60^\circ$) sugerindo que estes diques estavam próximos da fonte geradora. Os fluxos, horizontal a vertical, encontrados para os diques estudados permitem inferir a presença, de pelo menos, duas fontes (câmaras magmáticas) alimentadoras dos diques lamprofíricos da região de São Sebastião. Uma dessas fontes poderia estar posicionada próxima à região da Praia Grande onde os diques apresentam fluxos verticais.

Os dados de ASM associados aos dados de ARM sugerem uma origem primária para as tramas *Intermediária* e *Inversa*. Enquanto que para os diques com trama *Normal* a trama dada pela ARM parece ser tectônica.

As tramas de ASM dos diques não estão relacionadas a composição química. O padrão de fluxo encontrado para os diques de São Sebastião é similar ao encontrado nas regiões adjacentes, no enxame do Arco de Ponta Grossa e no enxame de Florianópolis.

Os resultados paleomagnéticos, embora preliminares, são semelhantes ao encontrado para os enxames do Arco de Ponta Grossa e de Florianópolis. A maioria dos diques apresentou direção de magnetização com polaridade normal; parte deles apresentam inclinações inferiores a 50° e direção nordeste e, parte restante apresenta inclinações maiores que 50° e direção norte-sul.

9. Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, F.F.M., 1967. Origem e evolução da Plataforma Brasileira. DNPM/DGM. 36p. (Boletim 241).
- ALMEIDA, F.F.M., 1976. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. *In*: International Symposium on continental margins of Atlantic type, São Paulo, 1975. Anais da Academia Brasileira de Ciências 48:15-26 (Suplemento)
- ALMEIDA, F.F.M., 1983. Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas na região meridional da Plataforma Sul-Americana. *Rev. Bras. Geoc.* 13:139-158.
- ALMEIDA, F.F.M., 1986. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(4): 325-349.
- ANDERSON, E.M., 1951. The dynamics of faulting and dyke formation with application to Britain: Edinburgh. Oliver and Boyd Ltd., 206 p.
- BUTLER, R.F., 1992. Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes. Boston: Blackwell Scientific Publications.
- CALLOT, J.P. & GUICHET, X. 2003. Rock texture and magnetic lineation in dykes: a simple analytical model. *Tectonophysics*, 366: 207-222.
- COUTINHO, J.M.V & ENS, H.H. 1992. Diques lamprofíricos e diferenciados carbonatíticos da região de São Sebastião e Itanhaem-SP (resultados preliminares). *In* Congresso Brasileiro de Geologia, 37. São Paulo, 1992. Boletim de Resumos Expandidos. SBG/NSP. p.512-513.
- DAY, R., FULLER, M., SCHMIDT, V.A. 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 13:260-267.
- DUNLOP, D.J. 2002. Theory and application of the Day plot (M_{RS}/M_S versus H_{CR}/H_C). *Journal of the Geophysical Research*, v. 107, B3: 4-22p.
- FISHER, R.A., 1953. Dispersion on a sphere. *Proc. R. Soc. London, Ser. A.* 217, 295-305.
- GARDA, G.M., 1995. Os diques básicos e ultrabásicos da região costeira entre as cidades de São Sebastião e Ubatuba, Estado de São Paulo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 156p.
- GUEDES, E.; HEILBRON, M.; VASCONCELOS, P.M.; VALERIANO, C.de M.; ALMEIDA, J.C.H; TEIXEIRA, W.; FILHO, A.T. 2005. K-AR and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of dikes emplaced in the onshore basement of the Santos Basin, Resende área, SE Brazil: implications for the south Atlantic opening and Tertiary reactivation. *Journal of South American Earth Sciences*. 18:371-382.
- HALLIDAY, D., RESNICK, R. 1984. Física Vol.3 4ª Edição. Ed. Livros Técnicos e Científicos.

- JACKSON, M., GRUBER, W., MARVIN, J., BANERJEE, S.K., 1988. Partial anhysteretic remanence and its anisotropy: applications and grain-size-dependence. *Geophys. Res. Lett.* 15, 440-443.
- JACKSON, M., 1991. Anisotropy of magnetic remanence: a brief review of mineralogical sources, physical origins and geological applications, and comparison with susceptibility anisotropy. *Pure Appl. Geophys.* 136, 1-28.
- JELINEK, V., 1981. Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, 79, T63-T67.
- KNIGHT, M.D. & WALKER, G.P. 1988. Magma flow directions in dikes of the Koolau complex, Oahu, determined from magnetic fabric studies. *J. Geophys. Res.*, 93, 4301-4319.
- KIRSCHVINK, J., 1980. The least-squares line and plane analysis of paleomagnetic data. *Geophys. J.R. Astr. Soc.* 62, 699-718.
- PERROTA, M.M., SALVADOR, E.D. coords. 2005. Mapa geológico do Estado de São Paulo - integração na escala 1:750.000. Brasília: CPRM. (2 folhas).
- POLLARD, D.D. 1987. Elementary fracture mechanics applied to the structural interpretation of dykes. In *Mafic dikes swarms* (eds. H.C. Halls & W.H. Fahrig) pp.5-24. *Geol. Soc. Canada special paper* 34.
- RAPOSO, M.I.B. & ERNESTO, M. 1995a. An early Cretaceous paleomagnetic pole from the Ponta Grossa dikes (Brazil): implications for the South America Mesozoic APWP. *Journal Geophysical Research*, 100 (B10): 20, 095-20.
- RAPOSO, M.I.B. & ERNESTO, M. 1995b. Anisotropy of magnetic susceptibility in the Ponta Grossa dyke swarm (Brazil) and its relationship with magma flow direction. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 87: 183-196.
- RAPOSO, M.I.B. & ERNESTO, M. 1995c. Fluxo magmático do enxame de diques máficos de Florianópolis (Ilha de Santa Catarina), determinado através de anisotropia de suscetibilidade magnética. In *V Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*. Gramado – RS. 1995. Boletim de resumos expandidos. p. 254.
- RAPOSO, M.I.B. 1997. Magnetic fabric and its significance in the Florianópolis dyke swarm, southern Brazil. *Geophys. J. Int.*, 131: 159-170.
- RAPOSO, M.I.B., ERNESTO, M., RENNE, P.R., 1998. Paleomagnetism and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the early Cretaceous Florianópolis dike swarm (Santa Catarina Island), Southern Brazil. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. Reprinted 108:275-290.
- RAPOSO, M.I.B. & ERNESTO, M., 1999. Fluxo de magma no enxame de diques Santos- Rio de Janeiro: Resultados preliminares de ASM. Boletim do 5º Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil, p. 39-44.

- RAPOSO, M.I.B. & MALO, G.K.M., 2006. Trama Magnética dos diques máficos da região de São Sebastião (SP): Resultados Preliminares. *In* Anais do XLIII Congresso Brasileiro de Geologia. Aracajú: 299 p.
- RICKWOOD, P.C. 1990. The anatomy of a dyke and the determination of propagation and magma flow directions. In *Mafic dykes and emplacement mechanisms* (eds. Parker, Rickwood & Tucker). pp.81-100. Balkema, Rotterdam.
- ROCHETTE, P., JACKSON, M., AUBORG, C., 1992. Rock magnetism and the interpretation of anisotropy magnetic susceptibility. *Rev. Geophys.* 30, 209-226.
- TARLING, D.H. & HROUDA, F. 1993. *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Ed. Chapman & Hall.
- TAUXE, L. 1998. *Paleomagnetic Principles and Practice. Modern Approaches Geophysics*. Kluwer Academic Publishers
- ZILJDERVELD, J.D.A, 1967. A.C. demagnetization of rocks: analysis of results, in: Collinson, D.W., Creer, K.M., Runcorn, S.K. (Eds), *Methods in Paleomagnetism*, pp. 254-286, Elsevier, Amsterdam.

DOAÇÃO

IGC-USP

Data: *07/05/08*

