



**CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA E ESTRUTURAL DOS DIQUES COMPOSTOS
DA ENSEADA DOS ZIMBROS, SC**

Porto Alegre, 2014

CAMILA ROCHA TOMÉ

**CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA E ESTRUTURAL DOS DIQUES COMPOSTOS
DA ENSEADA DOS ZIMBROS, SC**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof.(a) Dr.(a) Maria de Fátima Bitencourt

Supervisora: Prof.(a) Dr.(a) Irene Raposo

Porto Alegre, 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Tomé, Camila Rocha

Caracterização magnética e estrutural dos diques compostos da Enseada dos Zimbros, SC . / Camila Rocha Tomé. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2014.
[86 f.] il.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geografia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2014.

Orientador(es): Maria de Fátima Aparecida Saraiva Bitencourt

1. Diques Compostos 2. Suíte Intrusiva Zimbros 3. Anisotropia de Susceptibilidade Magnética 4. Mineralogia Magnética I. Título.

CDU 911

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Sibila Francine T. Binotto

CRB 10/1743

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Campus do Vale Av. Bento Gonçalves, 9500 - Porto Alegre - RS - Brasil

CEP: 91501-970 / Caixa Postal: 15001.

Fone: +55 51 3308-6329 Fax: +55 51 3308-6337

E-mail: bibgeo@ufrgs.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA E ESTRUTURAL DOS DIQUES COMPOSTOS DA ENSEADA DOS ZIMBROS, SC”, elaborado por “CAMILA ROCHA TOMÉ” como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Jairo Francisco Savian

Prof. Dr. André W. de Borba

Prof. Dr. Léo A. Hartmann

“Quando, através do trabalho, o homem exerce ação sobre a natureza, isto é, sobre o meio, ele muda a si mesmo, sua natureza íntima, ao mesmo tempo em que ele modifica a natureza externa”

Irvin Morgenstern

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi construído com a colaboração e participação de diversas pessoas que, direta ou indiretamente, se envolveram, contribuíram para que esta etapa fosse concluída. Dessa forma, tento aqui, manifestar meu sincero agradecimento a todas essas pessoas.

Primeiramente, agradeço a minha mãe por ter me dado a vida e por ter me ensinado a lutar pelos meus sonhos, a ter perseverança, e principalmente, por me fazer acreditar que as coisas são possíveis quando o sentimento é verdadeiro. Também agradeço aos meus tios, irmãos e prima por todo o apoio e, principalmente, por compreenderem a minha ausência muitas vezes.

Agradeço ao professor João Marcelo Ketzer pelas aulas de Estrutura e Dinâmica da Terra, na faculdade de Geografia, que me proporcionou o conhecimento básico sobre, o que era a então, desconhecida Geologia, e principalmente por ter me incentivado tanto à mudar os rumos da minha vida. Obrigada por ter participado da escolha mais importante tão importante.

Agradeço à minha orientadora, que admiro tanto, por ser essa mãezona, que cuida e que protege seu rebanho (o Magmatismo Sintectônico), mas sobretudo, pela cobrança e pela exigência que sem dúvida, é o que nos faz crescer e amadurecer tanto. Obrigada por nos mostrar o quão linda e apaixonante é a Geologia Estrutural, pelos campos, pela parceria em todos os momentos, pelas discussões, pela força e paciência mas, principalmente por acreditar que mim.

Agradeço a Maria Irene Raposo, pela supervisão no meu trabalho, pela ajuda técnica, por ficar até tarde comigo processando os dados, pela confiança em deixar o laboratório Magnetismo de Rochas da Universidade de São Paulo sob minha responsabilidade.

Obrigada à todos os colegas/amigos que fazem parte do Magmatismo Sintectônico, companheiros de todas as horas, Amós, Dani, Dioni, Evelin, Fera (Samuel), Fran, João, Pepe, Steh, Mari, Gregory, pelas conversas geológicas, pelos momentos divertidos e por me ajudarem. Um agradecimento especial para o Samuel, meu supervisor, pela paciência e ajuda em todas as etapas do meu trabalho. Ao Dioni, pelas semanas “intermináveis” e divertidas no laboratório moendo amostras. À Fran, pelas discussões sobre Porto Belo/Bombinhas, pela dedicação quase que exclusiva aos croquis, que ficaram lindos. Às cavalas mais queridas (Steh e Evelin), que estiveram essas últimas semanas intensamente envolvidas, ficando até altas horas no Campus trabalhando comigo.

À Lua, por ter me incentivado tanto a entrar no grupo, por ter me acolhido em São Paulo. Obrigada por ser essa amiga e mãezona que admiro tanto, sou muito grata pela tua ajuda, confiança e carinho.

Não poderia deixar de agradecer um grande amigo e conselheiro Luís Gustavo Ferreira Viegas, pelas conversas, pelas discussões, e principalmente, pela paciência e disponibilidade em me ajudar, esclarecendo todas as minhas dúvidas e angústias que surgiram ao longo deste trabalho, no que se refere à ASM e também às implicações geológicas decorrente desses dados.

Agradeço aos colegas, Pacífico, Txélo e Guto, e as meninas amigas e companheiras de todas as horas Ana, Marina, Melissa, Fabia, Denise, Jade, Cris, pelas risadas, pelos campos (sem vocês não seriam tão divertidos), pelo convívio, pela amizade, pelo carinho, pelo companheirismo, pelos momentos tristes, por todos os momentos partilhados. Também agradeço à todos os amigos, que ao longo de seis anos, a Geologia me proporcionou. Só tenho a agradecer por tudo e por ter vocês do meu lado.

RESUMO

Os Diques Compostos da Enseada dos Zimbros, localizados na região de Bombinhas/SC, representam um enxame de diques que compõe as fácies hipabissais máfica e félsica da Suíte Intrusiva Zimbros (SIZ). A colocação da SIZ é tardi-cinemática em relação à evolução da Zona de Cisalhamento Major Gercino (ZCMG), de direção NE-SW. As intrusões compostas têm direção NE e constituem corpos tabulares, formadas por um centro riolítico, margeado de ambos os lados por bordas máficas de espessura variável. Na porção central ácida, ocorre um enxame de enclaves máficos microgranulares com dimensões e orientações variáveis. Nas rochas félsicas associadas, a foliação é marcada pelo alinhamento de biotita, feldspatos e enclaves máficos, evoluindo para uma estrutura milonítica, com estiramento do quartzo e dos feldspatos, e geração de caudas de recristalização. A lineação de estiramento do é sub-horizontal e evidente apenas na porção félsica. Na porção máfica, a lineação mineral, é menos desenvolvida do que na porção félsica e marcada por cristais de anfibólio. A ausência de trama linear nas porções básicas dos diques dificulta a investigação dos mecanismos de posicionamento com base em dados estruturais convencionais. Dessa forma, o presente trabalho teve por objetivo caracterizar a mineralogia magnética (dados escalares) e a trama magnética (dados direcionais) dos Diques Compostos a partir da análise de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética. Os resultados obtidos de mineralogia magnética demonstram que a susceptibilidade magnética das porções máficas das intrusões compostas e diques básicos isolados é da ordem de 10^{-3} enquanto nas porções ácidas é da ordem de 10^{-4} . Esses dados apontam para uma contribuição dos minerais ferromagnéticos em ambas as porções dessas intrusões, mesmo que pequena nas porções félsicas. As curvas de histerese desses diques são constituídas predominantemente por curvas do tipo *Wasp-Waisted* as quais são caracterizadas por uma mistura de minerais de baixa e de alta coercividade, magnetita e hematita respectivamente. As curvas termomagnéticas, apontam que os portadores magnéticos são a magnetita e a titanomagnetita pobre em Ti, o que é evidenciado pela transição da magnetita em 580°C e pelo pico de *Hopkinson* em torno de 550°C . A trama magnética obtida nas porções básicas, assim como no centro ácido das intrusões compostas e das intrusões isoladas, mais afastadas do enxame principal, são concordantes entre si e com a trama estrutural. Possuem direção NE-SW com alto ângulo de mergulho e lineações de baixo caimento, as

quais indicam o fluxo desses diques. A relação entre as tramas magnéticas e estruturais são concordantes com a Zona de Cisalhamento Major Gercino.

Palavras-Chave: Diques Compostos, Suíte Intrusiva Zimbros, Anisotropia de Susceptibilidade Magnética, Mineralogia Magnética.

ABSTRACT

The compound dikes of Zimbros Inlet, located at the region of Bombinhas – SC, represent a dike swarm that compose the mafic and felsic hypabyssal facies of Zimbros Intrusive Suite (SIZ). The SIZ coloration is late-kinematic in relation to Major Gercino Shear Zone (ZCMG), with NE-SW direction. The compound intrusions have NE direction and constitute tabular bodies, formed by a rhyolitic center, lined along both sides by mafic borders of variable thickness. In the acid central portion occur a mafic microgranular enclave swarm with variables dimensions and orientations. In the associated felsic rocks, the foliation is marked by an alignment of biotite, feldspar and mafic enclaves, evolving to a mylonitic structure, with stretching of quartz and feldspar, and generation of recrystallization tails. The stretching lineation is subhorizontal and only evident at felsic portion. At the mafic portion the mineral lineation is less developed than at the felsic portion and marked by amphibole crystals. The absence of linear fabric in the basic portions of the dikes makes the investigation of positioning mechanisms based on conventional structural data difficult. Thereby, this work aimed to characterize the magnetic mineralogy (scalar data) and the magnetic fabric (directional data) of the compound dikes by analyzing the Magnetic Susceptibility Anisotropy. The results for magnetic mineralogy demonstrate that the magnetic susceptibility of mafic portions at compound intrusions and isolated basic dikes is in the order of 10^{-3} while, at the acid portions, is in the order of 10^{-4} . These data point to a contribution of ferromagnetic minerals in both intrusions, even a small at felsic portions. These dikes hysteresis loop are predominantly constituted by Wasp-Waisted loops, which are characterized respectively by a mixture of minerals with high and low coercivity, magnetite and hematite. The magnetic carriers are magnetite and low Ti titanomagnetite, as pointed by the thermomagnetic curves and their magnetic transition at 580°C and Hopkinson peak around 550°C . The magnetic fabric obtained at the basic portions as well as at the acid centers of compound intrusions and at the isolated intrusions furthest from the main swarm, are each other concordant even as with the structural fabric. The direction is NE-SW with a high dip angle and a low plunge lineation, which indicate the dikes flux. The relation between magnetic and structural fabrics are concordant with the Major Gercino Shear Zone.

Keywords: Compound Dikes, Zimbros Intrusive Suite, Magnetic Susceptibility Anisotropy, Magnetic Mineralogy.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1:** Localização e acesso a área de estudo (modificado de Bitencourt (1996))..... 3
- Figura 2.1:** Principais unidades geotectônicas do Sul do Brasil. a) Contexto geológico e geotectônico da porção sul do Brasil e Uruguai. b) Principais unidades geológicas e traços tectônicos do Escudo Catarinense, detalhe da região de Porto Belo (Bitencourt, 1996). 5
- Figura 2.2:** Mapa geológico da região de Porto Belo (modificado de Bitencourt (1996))..... 7
- Figura 2.3:** a) Distribuição espacial das rochas máficas e félsicas em dique composto da Suíte Intrusiva Zimbros, intrusivo no embasamento, Complexo Porto Belo (extraído de Bitencourt (1996)); b) disposição do dique básico isolado (seta amarela) em contato com o embasamento (seta preta) e centro ácido com enclaves máficos (seta vermelha); c) detalhe da foto anterior mostrando a distribuição do centro ácido com enclaves máficos (seta vermelha). 11
- Figura 2.4:** Feições de mesoescala dos diques compostos: a) enclaves máficos na porção central de dique composto; b) detalhe da foto anterior, mostrando enclaves com formas arredondadas; c) enclaves angulosos próximo à borda da intrusão. ... 12
- Figura 3.1:** Diagrama de lineação magnética (L) versus foliação magnética (F) mostrando a forma do elipsoide que pode ser oblata ($T > 0$), prolata ($T < 0$) ou neutra ($T = 0$) (Modificado de Lanza & Meloni (2006))..... 16
- Figura 3.2:** Propriedades dia- e paramagnéticas sob um campo indutor (H). a) Susceptibilidade diamagnética negativa (k_d) em contraste com susceptibilidade paramagnética (k_p) positiva; b) susceptibilidade paramagnética varia com a temperatura, enquanto que a susceptibilidade diamagnética é constante. M = magnetização; T = temperatura. (Extraído de Archanjo (2003))..... 17
- Figura 3.3:** Direções de susceptibilidade e simetria cristalina em diferentes sistemas cristalinos, ortorrômbico e monoclinico (modificado de Borradaile & Jackson (2010))..... 18
- Figura 3.4:** Momentos magnéticos ferri- e antiferromagnéticos, com características paralelas e antiparalelas. Pequenos desvios dos momentos magnéticos nos arranjos antiferromagnéticos derivam nos clino-antiferromagnéticos (extraído de Archanjo (2003))..... 19
- Figura 3.5:** Representação de um ciclo de histerese. M_s – magnetização de saturação, M_r - magnetização remanente, H_c – coercividade, H_r coercividade remanente e k_f representa a susceptibilidade ferromagnética (modificado de Butler (1992))..... 20
- Figura 4.1:** Mapa geológico da Região de Porto Belo com a localização dos pontos amostrados (modificado de Bitencourt, (1996)). 24
- Figura 4.2:** a) *Perfuratriz portátil STIHL* com broca de 20 cm e 1'' de diâmetro, com extremidade diamantada. Processo de perfuração dos cilindros, com destaque em amarelo para bomba que contém uma mistura de água e óleo solúvel (para

refrigeração da máquina e diminuição do atrito durante a perfuração), e b) que mostra em detalhe a perfuratriz.26

Figura 4.3: a) Marcação feita inicialmente, quando o furo atinge 1 cm; b) Perfuração concluída, espaço onde foi retirado o testemunho cilíndrico.27

Figura 4.4: Orientador dos testemunhos cilíndricos: a) Haste cilíndrica de alumínio com ranhura na base; b) bússola magnética (modelo *Brunton*) acoplada a haste cilíndrica; c) Transferidor de 360° e haste de metal, para fazer a leitura do azimute solar; d) Transferidor de 90° para medir a inclinação do furo. (Extraído de Sbaraini (2012)).28

Figura 4.5: a) Marcação sendo executada de maneira indireta, em caso de quebra do cilindro (modificado de Sbaraini (2012)); b) Ilustração de um cilindro orientado; c) cilindro identificado; d) cilindro fragmentado.29

Figura 4.6: Serra utilizada para o corte dos cilíndricos em espécimes (extraído de Sbaraini (2012)).30

Figura 4.7: Equipamento Kappabridge MFK1 – FA da AGICO utilização para medir as propriedades magnéticas das amostras (extraído de AGICO (2014)).31

Figura 4.8: Modelos de curvas de histerese: a) *Single-Domain*; b) *Potbellied* e c) *Wasp-Waisted* (extraído de Tauxe et. al (1996)).32

Figura 5.1: Diagramas de correlação entre: a) grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (km) e, b) parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia (P).35

Figura 5.2: Diagramas de correlação entre: (a), (c), (e), (g) e (i) grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (km) e, (b), (d), (f), (h) e (j) mostram o parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia (P).37

Figura 5.3: Diagramas de correlação entre: (a), (c), (e), (g) grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (km) e, (b), (d), (f) parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia (P).39

Figura 5.4: Diagramas de correlação entre: (a), (c), (e), grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (km) e, (b), (d), (f) parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia (P).41

Figura 5.5: Diagramas de correlação entre: a) grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (km) e, b) parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia (P).42

Figura 5.6: Diagramas de correlação entre: a) grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (km) e, b) parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia (P).43

Figura 5.7: Curvas de histerese obtidas para as amostras dos diques compostos e diques isolados associados. a) Histerese do tipo *Single-Domain*; b) Histerese do tipo *Wasp-Waisted*; d) Histerese do tipo *Potbellied*.44

Figura 5.8: Curvas termomagnéticas de amostras representativas dos diques compostos, afloramento PB-198 e dique básico isolado, afloramento PB-147. Susceptibilidade total do espécime (kt E-6) versus temperatura (T°C).46

Figura 5.9: a) Croqui do afloramento PB-1ões e lineações magnéticas e estruturais. Elementos magnéticos do sítio (estereograma equiárea hemisfério inferior) CT-15 (b), (c) e (d).....	48
Figura 5.10: a) Croqui do afloramento PB-288 com dados de foliações e lineações magnéticas e estruturais. Elementos magnéticos dos sítios (estereograma equiárea hemisfério inferior): b) CT-5; c) CT-6; d) CT- 7; e) CT-8 e f) CT-9.....	50
Figura 5.11: a) Croqui do afloramento PB-198 com dados de foliações e lineações magnéticas e estruturais. Elementos magnéticos dos sítios (estereograma equiárea hemisfério inferior): b) CT-1; c) CT-2; d) CT- 3; e) CT-4.....	52
Figura 5.12: a) Croqui do afloramento PB-197-1 com dados de foliações e lineações magnéticas e estruturais. Elementos magnéticos dos sítios (estereograma equiárea hemisfério inferior): b) CT-10; c) CT-11 e d) CT- 12.....	54
Figura 5.13: a) Croqui do afloramento PB-56 com dados de foliações e lineações magnéticas e estruturais. Elementos magnéticos do sítio (estereograma equiárea hemisfério inferior) (b) CT-14.....	55
Figura 5.14: a) Croqui do afloramento PB-147 com dados de foliações e lineações magnéticas e estruturais. Elementos magnéticos do sítio (estereograma equiárea hemisfério inferior) (b) CT-13.....	57
Figura 6.1: Grau de anisotropia (P) de todos os sítios de amostragem <i>versus</i> susceptibilidade magnética total (Km).....	59
Figura 6.2: Parâmetro de forma (T) de todos os sítios de amostragem <i>versus</i> grau de anisotropia (P).	60

LISTA DE FIGURAS

Tabela 5.1: Parâmetros de ASM dos Diques Compostos da Enseada dos Zimbros e Diques Básicos Isolados associados às intrusões compostas.	34
--	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ARM	Anisotropia de Remanência Magnética
ASM	Anisotropia de Susceptibilidade Magnética
Km	Susceptibilidade magnética média (SI)
K	Susceptibilidade
P	Grau de Anisotropia
T	Parâmetro de forma
SI	Sistema internacional de unidades
CC	Complexo Camboriú
CGE	Complexo Granítico Estaleiro
CPB	Complexo Porto Belo
EC	Escudo Catarinense
FHF	Fácies Hipabissal Félsica
FHM	Fácies Hipabissal Máfica
GM	Granito Mariscal
GMM	Granito Morro dos Macacos
GQI	Granitoides Quatro Ilhas
GZ	Granito Zimbros
MRI	Magnetização Remanente Isotermal
MRN	Magnetização Remanente Natural
MRS	Magnetização Remanente de Saturação
MS	Magnetização de Saturação
SIZ	Suíte Intrusiva Zimbros
ZCIP	Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó
ZCMG	Zona de Cisalhamento Major Gercino

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Problemas	2
1.2. Premissas	2
1.3. Hipóteses	2
1.4. Objetivos gerais e específicos	3
1.5. Localização da área de estudo	3
2. CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOTECTÔNICO.....	4
2.1. Introdução.....	4
2.2. Geologia da Região de Porto Belo e Bombinhas	5
2.3. Os Diques Compostos da Enseada dos Zimbros.....	10
3. ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA – REVISÃO CONCEITUAL	14
3.1. Conceitos básicos	14
3.2. Estudo da Mineralogia Magnética	17
3.3. Aplicações da ASM.....	21
4. TÉCNICAS E MÉTODOS.....	22
4.1. Técnicas pré-campo	22
4.2. Técnicas de Campo	25
4.2.1. Amostragem.....	25
4.3. Análise de Anisotropias Magnéticas (ASM).....	29

4.3.1. Preparação das amostras	29
4.3.2. Susceptibilidade Magnética e Anisotropia de Susceptibilidade Magnética (ASM)	30
4.3.3. Propriedades Magnéticas das Amostras	31
4.3.4. Curvas de Histerese.....	31
4.3.5. Curvas Termomagnéticas	32
5. RESULTADOS	34
5.1. Anisotropia de Susceptibilidade Magnética	35
5.1.1. Enseada dos Zimbros	35
<i>PB-139</i>	35
<i>PB-288</i>	36
<i>PB-198</i>	38
<i>PB-197-1</i>	40
5.1.2. Praia do Mariscal	41
5.1.3. Praia Retiro dos Padres	42
5.1.4. Curvas de Histerese.....	43
5.1.5. Curvas Termomagnéticas	44
5.2. Trama Magnética – Dados direcionais	47
5.2.1. Enseada dos Zimbros	47
<i>PB-139</i>	47
<i>PB-288</i>	49
<i>PB-198</i>	51
<i>PB-197-1</i>	53
5.2.2. Praia de Mariscal	55
<i>PB-56</i>	55
5.2.3. Praia Retiro dos Padres	56
<i>PB-147</i>	56
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	58
6.1. Mineralogia Magnética – Dados escalares	58
Susceptibilidade Magnética	58
Grau de anisotropia (P).....	58

Parâmetro de forma (T)	59
Curvas de histerese	61
Curvas termomagnéticas	61
6.2. Trama Magnética – Dados direcionais	62
6.2.1. Trama Planar	62
6.2.2. Trama Linear.....	62
7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

Os Diques Compostos da Enseada dos Zimbros (Bitencourt *et al.*, 1989 b), fazem parte de um enxame de diques que compõe as fácies hipabissais máfica e félsica da Suíte Intrusiva Zimbros (SIZ) (Bitencourt & Nardi, 1993), localizados na porção leste do Escudo Catarinense, na região de Bombinhas, SC. Essas intrusões compostas constituem corpos tabulares em que rochas máficas formam faixas de espessura irregular, dispostas nas margens dos diques, além de diques individuais paralelos à intrusão principal. A colocação da SIZ é tardi-cinemática em relação à evolução da Zona de Cisalhamento Major Gercino (ZCMG), de direção NE-SW (Bitencourt *et al.*, 1989 a).

As intrusões compostas têm direção NE, e são constituídas por um centro riolítico, margeado de ambos os lados por bordas máficas de espessura variável. Na porção central ácida, ocorre um enxame de enclaves máficos microgranulares com dimensões e orientações variáveis.

Nas rochas félsicas associadas, a foliação é marcada pelo alinhamento de biotita, feldspatos e enclaves máficos, evoluindo para uma estrutura milonítica, com estiramento do quartzo e dos feldspatos, e geração de caudas de recristalização. A lineação de estiramento do é sub-horizontal e evidente apenas na porção félsica. Na porção máfica, a lineação mineral é marcada por cristais de anfibólio e menos perceptível do que na porção félsica.

A ausência de trama linear nas porções básicas dos Diques Compostos da SIZ dificulta a investigação dos mecanismos de posicionamento com base em dados estruturais convencionais. Dessa forma, o presente trabalho visa caracterizar a trama mineral magnética dos Diques Compostos a partir da análise de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética, permitindo a obtenção de informações acerca do mecanismo de posicionamento desses litotipos.

1.1. Problemas

Considerando que o objeto deste trabalho são Diques Compostos, dois problemas principais impulsionaram este estudo:

- i) Ausência de trama linear nas porções básicas dos Diques Compostos;
- ii) Mecanismo de alojamento dessas intrusões.

1.2. Premissas

- i) As rochas magnetizam-se em resposta à aplicação de um campo magnético, no caso das rochas, o campo magnético terrestre;
- ii) Mineraiis magnéticos (óxidos e silicatos ferromagnesianos) podem (re)cristalizar de acordo com a orientação do campo deformacional externo, registrando a cinemática regional;
- iii) Intrusões compostas resultam da coexistência de dois líquidos contrastantes;
- iv) Magmas ácidos e básicos apresentam feições indicativas de contemporaneidade e, desta forma, espera-se que a trama magnética seja a mesma nas duas fácies;
- v) Diques ácidos apresentam lineação bem desenvolvida em contraste as intrusões máficas, que não contem trama linear bem desenvolvida e, por serem ricos em minerais ferromagnéticos respondem melhor à técnica de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética.

1.3. Hipóteses

Como possíveis respostas aos problemas apresentados as seguintes hipóteses são levantadas:

- i) A trama magnética das porções máficas sendo concordante com a trama magnética e estrutural dos diques félsicos evidencia a contemporaneidade dessas intrusões;
- ii) As tramas magnéticas das porções ácidas e básicas são controladas pela cinemática regional.

1.4. Objetivos gerais e específicos

Este trabalho tem como objetivo principal aplicar a técnica de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética nos Diques Compostos da Enseada dos Zimbros e desta maneira:

- Caracterizar a trama magnética planar e linear dos Diques Compostos;
- Correlacionar as tramas estrutural e magnética das porções máfica e félsica desses litotipos;
- Investigar o mecanismo de posicionamento desses diques a partir da trama magnética obtida através da análise de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética.

1.5. Localização da área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Bombinhas, situada no Litoral Norte do estado de Santa Catarina, na península de Porto Belo, a aproximadamente 70 Km a norte da cidade de Florianópolis. O acesso, a partir de Porto Alegre, é feito pela BR-101 (Figura 1.1).

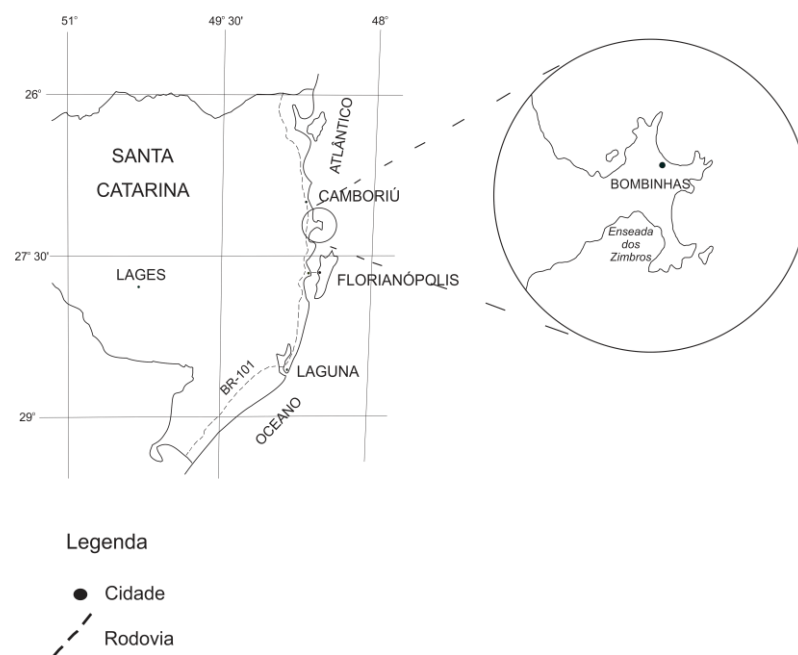


Figura 1.1: Localização e acesso a área de estudo (modificado de Bitencourt (1996)).

2. CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOTECTÔNICO

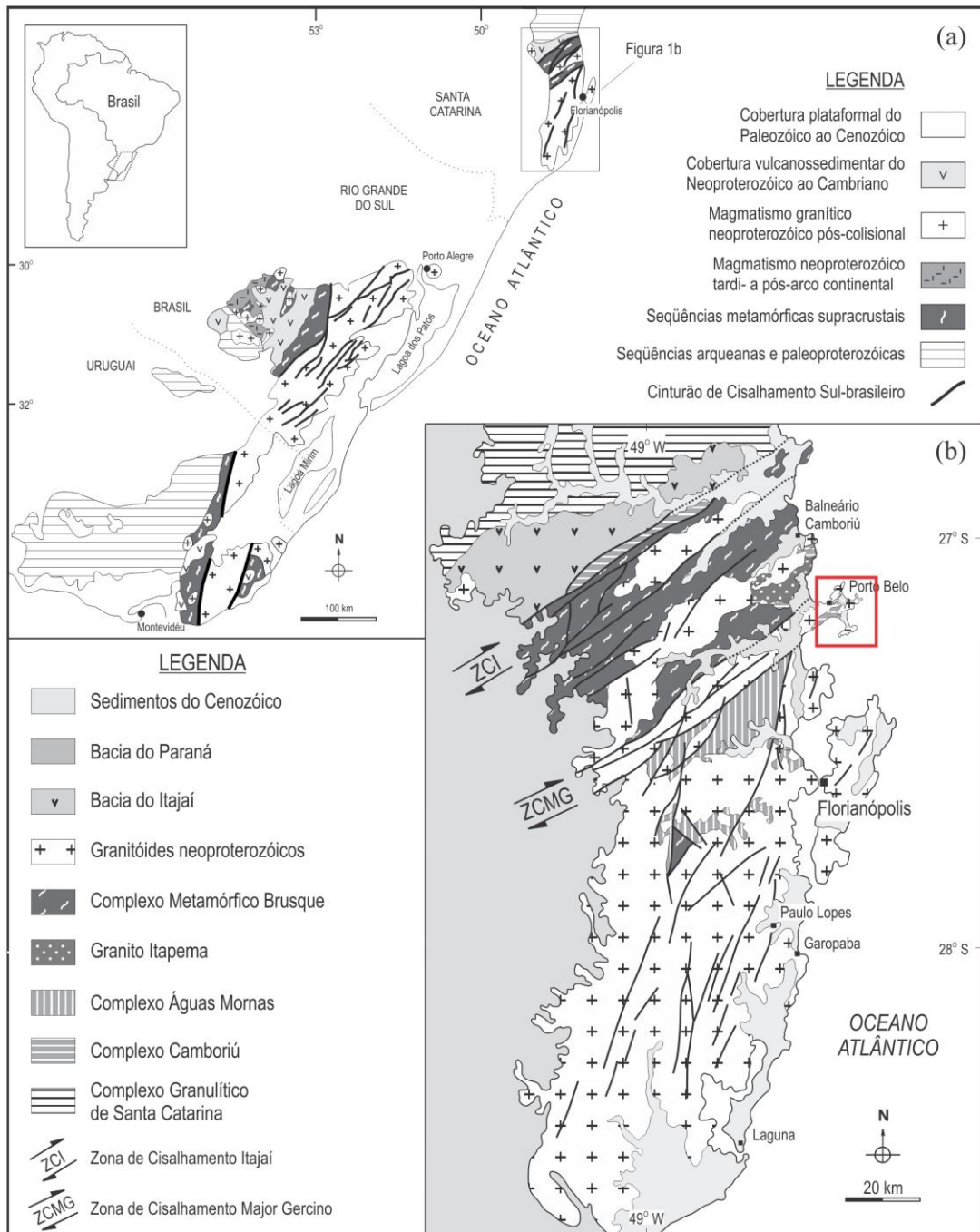
2.1. Introdução

As áreas pré-cambrianas do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina correspondem ao Escudo Sul-rio-grandense e Escudo Catarinense e compõem parte do setor meridional da Província Mantiqueira (Almeida *et al.*, 1977) (Figura 2.1). O Escudo Catarinense (EC) é geralmente dividido em três grandes domínios tectônicos. A divisão utilizada por Florisbal (2011) consiste nos três domínios: Norte, Central e Sul, cujos limites são representados pelas zonas de cisalhamento Itajaí-Perimbó e Major Gercino.

O Domínio Norte, composto pelas unidades paleoproterozoicas do Complexo Granulítico Santa Catarina e neoproterozoicas da Bacia do Itajaí e Campo Alegre é limitado a sul pela Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó (ZCIP).

O Domínio Central compreende a área entre a Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó e a Zona de Cisalhamento Major Gercino (ZCMG). Na porção centro-norte, é composto pelas rochas metassedimentares do Complexo Metamórfico Brusque, Complexo Camboriú, Suíte Intrusiva Valsungana, além dos granitos Itapema, Corremar, Rio Pequeno e Serra dos Macacos. Na porção centro-sul ocorrem as rochas do Complexo Porto Belo e as unidades nele intrusivas, Granitoides de Quatro Ilhas, Granito Mariscal, Complexo Granítico Estaleiro e Suíte Intrusiva Zimbros.

O Domínio Sul, situado a sul da ZCMG, abrange as rochas graníticas de idade neoproterozoica do Batólito Florianópolis e fragmentos do embasamento de idade paleoproterozoica representados pelo Complexo Águas Mornas (Florisbal, 2011).



2.2. Geologia da Região de Porto Belo e Bombinhas

A região de Porto Belo e Bombinhas é quase inteiramente contida no extremo nordeste da Zona de Cisalhamento Major Gercino (Figura 2.2),

excetuando-se o extremo sudeste da área, onde as estruturas relacionadas a esta zona são muito localizadas. A região é formada por granitoides sintectônicos de idade neoproterozoica estudados por Bitencourt (1996), e têm seu embasamento composto por uma associação de ortognaisses quartzo-feldspáticos.

O Complexo Porto Belo (CPB) compõe o embasamento dos granitoides, e recentemente foi definido por Florisbal (2011) em substituição ao termo Complexo Camboriú de Chemale *et al.* (1995) que, a partir de semelhanças geológicas, deduziu que todas as rochas do embasamento, constituído por gnaisses e migmatitos, pertenciam ao Complexo Camboriú (CC). Bitencourt (1996) adotou a mesma denominação de Complexo Camboriú para as encaixantes dos granitoides da região.

Os Granitoides de Quatro Ilhas (GQI) e o Granito Mariscal (GM) correspondem às primeiras manifestações deste conjunto de granitos neoproterozoicos, definidos por Bitencourt (1996). Posteriormente o GQI foi datado por Florisbal *et al.* (2012b) em 625 ± 7 Ma e 614 ± 4 Ma (U-Pb LA-MC-ICP-MS em zircão), e por (Chemale *et al.*, 2012) em 623 ± 6 Ma e 619 ± 22 Ma (U-Pb LA-MC-ICP-MS em zircão). O Granito Mariscal foi datado por Florisbal *et al.* (2012a) em 609 ± 8.3 Ma (U-Pb LA-MC-ICP-MS em zircão). Este conjunto de granitos encontra-se exposto principalmente na porção nordeste da região de Porto Belo (Figura 2.2) e constitui a fase precoce do magmatismo neoproterozoico, cujos primeiros pulsos foram controlados pela tectônica tangencial progredindo para uma transcorrência (Florisbal *et al.*, 2012 b). Intrusivos neste conjunto, e tendo seu posicionamento controlado pelo regime de transcorrência, encontram-se o Complexo Granítico Estaleiro (CGE) cuja idade U-Pb LA-MC-ICP-MS em zircão é de 602 ± 4 (Chemale *et al.*, 2012), e a Suíte Intrusiva Zimbros (SIZ), que compreende duas subunidades plutônicas, e uma subunidade hipabissal (Bitencourt, 1996).

As litologias mais jovens são representadas por raros diques de olivina diabásio, de direção NS a NW, correlacionáveis ao magmatismo básico da Província Magmática do Paraná, e por coberturas sedimentares cenozoicas (Bitencourt, 1996).

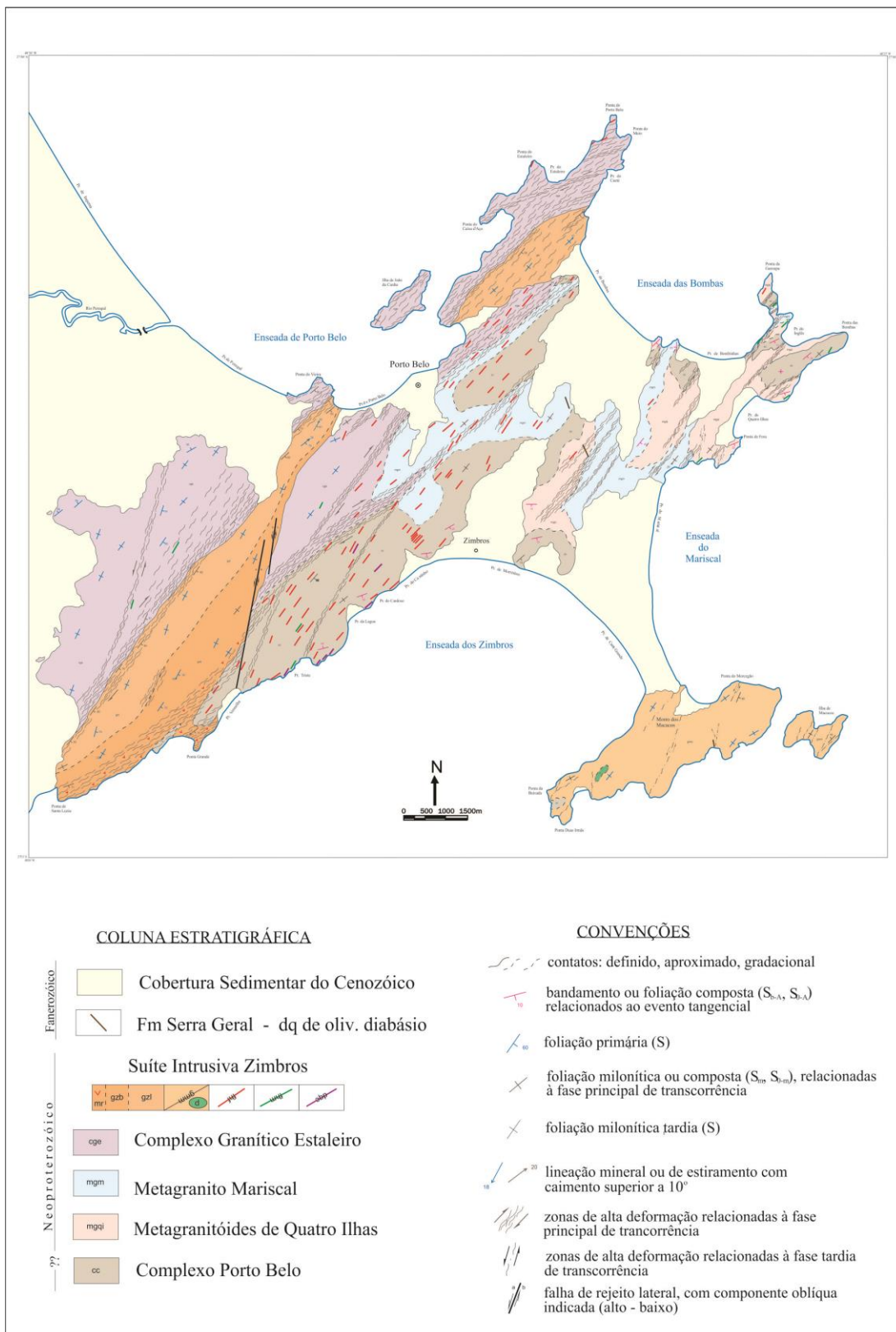


Figura 2.2: Mapa geológico da região de Porto Belo (modificado de Bitencourt (1996)).

A **Suíte Intrusiva Zimbros (SIZ)**, definida por Bitencourt & Nardi (1993), compreende duas subunidades plutônicas denominadas de Granito Zimbros (GZ), com idade de 587 ± 7.5 em U-Pb LA-MC-ICP-MS em zircão, e Granito Morro dos Macacos (GMM), datado em 588 ± 3.3 em U-Pb via TIMS, e uma subunidade hipabissal composta por duas fácies de composição distintas, denominadas Fácies Hipabissal Félsica (FHF) cuja idade U-Pb SHRIMP é 587 ± 8.7 (Chemale *et al.*, 2012), e Fácies Hipabissal Máfica (FHM). Associados a essa subunidade hipabissal encontram-se os Diques Compostos da Enseada dos Zimbros (Bitencourt *et al.*, 1989 b), os quais constituem intrusões resultantes da coexistência de dois líquidos de composição contrastante (Figura 2.2).

O **Granito Zimbros (GZ)** constitui um corpo alongado na direção NE-SW, totalmente contido na ZCMG, intrusivo no Complexo Porto Belo e Complexo Granítico Estaleiro. É composto por biotita sienogranitos a monzogranitos foliados, com textura heterogranular grossa a porfirítica. As estruturas planares desse granito são subverticais e bem desenvolvidas (Figura 2.2). A lineação contida nesses planos é marcada pelo alinhamento de feldspatos, lamelas de biotita e enclaves microgranulares máficos alongados, e tem caimento variável de 0° a 25° para NE ou SW. Zonas de alta deformação transcorrente, onde a estrutura principal é uma foliação composta, são frequentes próximas aos contatos da intrusão (Bitencourt, 1996).

O **Granito Morro dos Macacos (GMM)** não apresenta relações de contato com as demais unidades, exceto com uma pequena área de rochas do Complexo Porto Belo na sua porção sudoeste (Figura 2.2), a qual representa um megaxenólito. Nesta subunidade predominam biotita sienogranitos a monzogranitos de granulação média a grossa, ricos em quartzo e relativamente pobres em minerais máficos. De modo geral, essas rochas não apresentam foliação ou lineação bem desenvolvida. Um fraco alinhamento dimensional de feldspatos e agregados de biotita ocorre de forma localizada, com zonas de alta deformação muito estreitas e esparsas, onde a componente rúptil é significativa (Bitencourt, 1996).

As **rochas hipabissais da SIZ** constituem um enxame de diques, os quais intrudem o Complexo Porto Belo, os Granitoides de Quatro Ilhas, Granito Mariscal e o Complexo Granítico Estaleiro, ao longo de uma faixa de cerca de 1 Km de largura, com orientação 045° , situada a sudeste do GZ (Bitencourt, 1996). Fora da

faixa principal são observadas raras intrusões, na porção nordeste dos GQI e nos extremos nordeste e sudoeste do CGE (Figura 2.2).

Foram mapeados por Bitencourt (1996) cerca de 120 diques, dos quais 85% são ácidos e compõe a Fácies Hipabissal Félsica, 10% são básicos e pertencem a FHM, e 5% correspondem aos Diques Compostos. Nas regiões mais afastadas da faixa principal, as intrusões básicas são predominantes.

As intrusões são controladas pela geometria das zonas de transcorrência e, geralmente, encontram-se paralelas à foliação milonítica ou em ângulo de até 15°, no sentido anti-horário da mesma. Sua faixa de maior ocorrência coincide com uma zona de baixa deformação milonítica sobre as rochas do Complexo Porto Belo, onde as intrusões cortam o embasamento e raramente desenvolvem estruturas de arrasto no contato. São observados xenólitos, de até 60 cm de comprimento, das rochas encaixantes principalmente nas intrusões ácidas (Bitencourt, 1996).

A **Fácies Hipabissal Félsica** compreende diques de composição riolítica a dacítica com textura porfírica marcada por fenocristais de K-feldspato, plagioclásio e quartzo em matriz fina. Enclaves microgranulares máficos, de composição básica a intermediária, são abundantes nos diques riolíticos, possuem formas geralmente alongadas segundo a direção de fluxo e dimensões muito variáveis, desde 1 – 2 cm até 1,60 m de comprimento.

A foliação dessas rochas é vertical, bem desenvolvida e paralela às bordas da intrusão, contendo uma lineação mineral com caimento de 0 a 32° para SW, marcada pelo alinhamento de fenocristais de feldspatos e lamelas de biotita. As feições de deformação dúctil são superpostas em grau variável e são melhores desenvolvidas nos fenocristais de quartzo.

Nos corpos mais espessos, a foliação apresenta uma geometria em forma de “S”. No centro da intrusão, a foliação magmática predomina e tem direção NNE. Em direção às bordas, adquire progressivamente uma componente de deformação de estado sólido significativa, infletindo de ambos os lados para a direção NE, paralela aos contatos.

Nas porções milonitizadas o alongamento dos enclaves é maior, e sua foliação interna é paralela à encaixante, assim como seu alongamento. A textura da rocha torna-se então porfiroclástica, com pórfiros estirados de K-feldspatos e de quartzo azul fitado. A lineação de estiramento do quartzo e dos feldspatos torna-se

bem desenvolvida principalmente nas bordas da intrusão, mantendo-se paralela à lineação de fluxo. No centro de algumas intrusões observam-se zonas estreitas e discretas onde a intensa milonitização reduz muito o tamanho do grão, distinguindo-se apenas longas fitas de quartzo azulado numa matriz ultramilonítica (Bitencourt, 1996).

A **Fácies Hipabissal Máfica** é constituída principalmente por diabásios, que formam diques individuais ou, por vezes, integram intrusões compostas. Os diques básicos são encontrados nas imediações dos compostos ou afastados do enxame principal. Na maior parte dos casos, as rochas máficas exibem as mesmas características composicionais, texturais e estruturais observadas no enxame principal. Nestas rochas a foliação é menos perceptível, é marcada pelo alinhamento de anfibólios e ocorre paralela aos limites da intrusão (Bitencourt, 1996).

2.3. Os Diques Compostos da Enseada dos Zimbros

Os Diques Compostos da Enseada dos Zimbros (Bitencourt *et al.*, 1989 b; Bitencourt & Nardi, 1993) são definidos como intrusões tabulares constituídas por uma associação de termos hipabissais máficos e félsicos, os quais correspondem às fácies FHF e FHM. Essas intrusões têm espessura em torno de 3 a 6 m, com extensão aflorante de até 200 m e condicionamento estrutural similar ao dos diques riolíticos da unidade.

São constituídos por bordas de composição básica que formam faixas de espessura irregular, dispostas em uma ou ambas as margens do dique. Além disso, observa-se a ocorrência de diques individuais paralelos à intrusão principal (Figura 2.3).

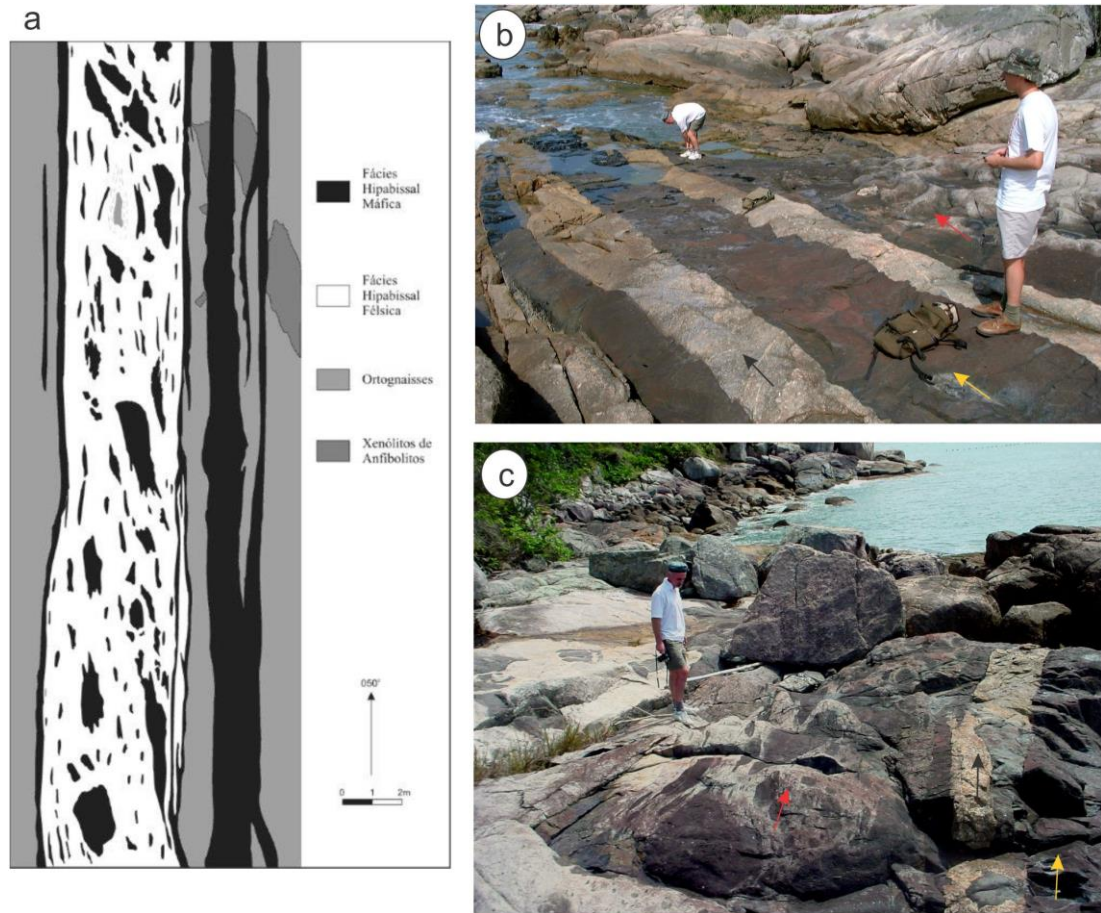


Figura 2.3: a) Distribuição espacial das rochas máficas e félsicas em dique composto da Suíte Intrusiva Zimbros, intrusivo no embasamento, Complexo Porto Belo (extraído de Bitencourt (1996)); b) disposição do dique básico isolado (seta amarela) em contato com o embasamento (seta preta) e centro ácido com enclaves máficos (seta vermelha); c) detalhe da foto anterior mostrando a distribuição do centro ácido com enclaves máficos (seta vermelha).

Alguns dos diques compostos apresentam borda máfica com textura afírica, limitadas em ambos os lados por faixas de textura porfírica, em que fenocristais ripiformes de plagioclásio alinhados paralelamente no contato definem uma estrutura pilotaxítica. A porção central dessas intrusões é composta por riolitos e dacitos, de características similares às descritas para a FHF, contendo proporções variáveis de enclaves microgranulares máficos. Os enclaves máficos são comuns na porção central, possuem formas angulosas ou arredondadas e contatos geralmente crenulados com a encaixante félsica (Figura 2.4). Suas composições variam de basáltica a diorítica, principalmente próximo aos contatos.

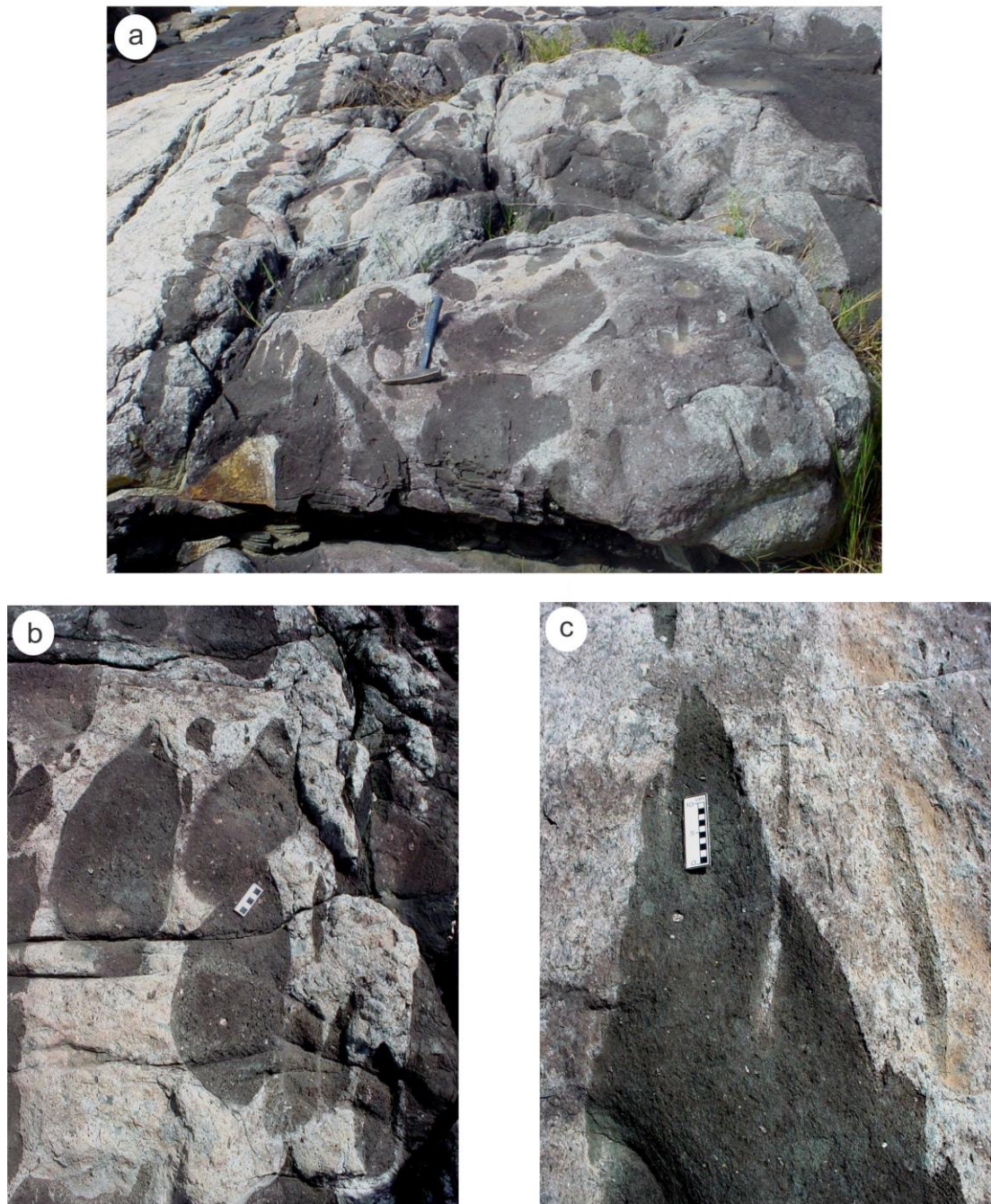


Figura 2.4: Feições de mesoescala dos diques compostos: a) enclaves máficos na porção central de dique composto; b) detalhe da foto anterior, mostrando enclaves com formas arredondadas; c) enclaves angulosos próximo à borda da intrusão.

Na porção félsica, observam-se também xenólitos do embasamento com formas angulosas e limites bem marcados, que tendem a se alinhar paralelamente à foliação composta (Bitencourt *et al.*, 1995). A foliação composta tem geometria

sigmoidal e é ressaltada pela orientação dos enclaves máficos. Próximos às bordas dos diques, a foliação tem uma componente milonítica mais acentuada e é paralela aos limites da intrusão, infletindo no sentido anti-horário em direção à parte central.

Nas rochas félsicas associadas, a foliação é marcada pelo alinhamento de biotita, feldspatos e enclaves máficos, evoluindo para uma estrutura milonítica, com estiramento do quartzo e dos feldspatos e geração de caudas de recristalização (Bitencourt *et al.*, 1989b).

3. ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA – REVISÃO CONCEITUAL

3.1. Conceitos básicos

A anisotropia de susceptibilidade magnética (ASM) é uma propriedade física intrínseca nas rochas e sua origem é dada pela interação entre diferentes momentos magnéticos no interior da estrutura cristalina de minerais portadores de íons de Fe (Tarling & Hrouda, 1993).

Um determinado material, ao sofrer influência de um campo magnético indutor (H), adquire uma magnetização induzida (M) que pode ser descrita através da equação:

$$M = kH$$

onde M e H representam unidades medidas em A/m, e k , denominado de *susceptibilidade magnética*, um parâmetro adimensional. Em materiais isotrópicos, a magnetização induzida (M) e o campo magnético indutor (H) constituem uma relação de linearidade. Até mesmo os minerais isotrópicos apresentam pequenas variações em sua composição química, defeitos na rede cristalina ou inclusões, que levam a algum tipo de anisotropia, mesmo que de fraca intensidade (Archanjo, 2003). Entretanto, a maioria dos minerais formadores de rocha apresentam características anisotrópicas, o que significa que suas propriedades físicas variam de acordo com a direção do campo indutor (H). Logo, a variação da *susceptibilidade magnética* k com a orientação do campo aplicado pode ser expressa pela seguinte equação:

$$M_i = k_{ij}H_j \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

$$\lambda \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}, \quad \text{onde} \quad \begin{cases} k_{11} = k_1 \\ k_{22} = k_2 \\ k_{33} = k_3 \end{cases}$$

onde M_i é a magnetização na direção i e H_j é o campo indutor na direção j . k_{ij} representa uma matriz simétrica de segunda ordem, dito como tensor de susceptibilidade (Nye, 1957), em que os três eixos ortogonais correspondem aos eixos principais do tensor k_{11} , k_{22} e k_{33} e definem a magnitude das direções principais de susceptibilidade magnética refletindo em um elipsoide triaxial ($k_1 > k_2 > k_3$). Esse elipsoide, por sua vez, pode ser definido através do parâmetro grau de anisotropia (P), dado pela relação ($P = k_1/k_2$). O parâmetro de forma (T) reflete na simetria do elipsoide, a qual é determinada por:

$$T = \left[\frac{2(\ln k_2 - \ln k_3)}{\ln k_1 - \ln k_3} \right] - 1$$

sua forma pode variar desde oblato, quando $k_1 = k_2 \gg k_3$, prolato quando $k_1 \gg k_2 = k_3$ até triaxial ou neutro quando $k_1 > k_2 > k_3$ (Figura 3.1). A variação de T entre 0 e 1 define elipsoides neutros a oblatos, e de 0 a -1 os elipsoides neutros ou prolatos (Tarling & Hrouda, 1993).

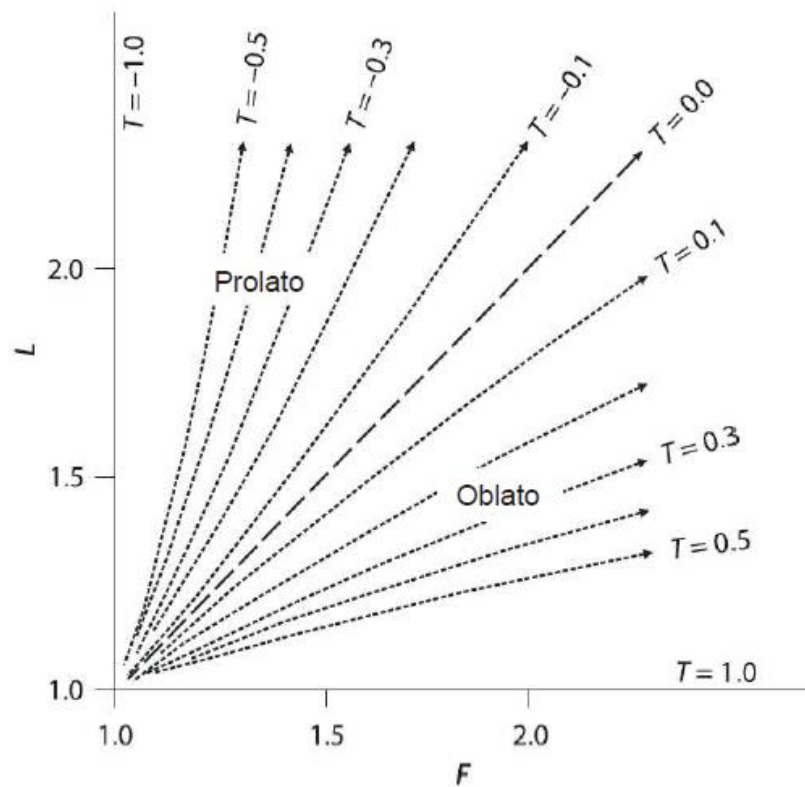


Figura 3.1: Diagrama de lineação magnética (L) versus foliação magnética (F) mostrando a forma do elipsoide que pode ser oblata ($T > 0$), prolata ($T < 0$) ou neutra ($T = 0$) (Modificado de Lanza & Meloni (2006)).

A magnetização remanente natural (MRN) é uma propriedade magnética observada, exclusivamente, nos minerais ferromagnéticos (Jackson, 1991), podendo ser intrínseca ao material analisado (magnetização remanente natural, MRN) ou induzida em laboratório, como a magnetização isotermal (MRI) e a magnetização remanente anisterética (MRA). O tensor da anisotropia de remanência magnética (ARM) é calculado de maneira similar à ASM, cuja representação é dada por:

$$M_{ri} = k_{rij} H_j$$

onde k_{rij} representa a susceptibilidade remanente. A ARM é representada espacialmente por um elipsoide, assim como a ASM. No entanto, diferente da ASM, que aponta as contribuições magnéticas de todos os minerais presentes na rocha, a

ARM fornece apenas a contribuição dos minerais portadores de remanência (Jackson, 1991).

3.2. Estudo da Mineralogia Magnética

Os minerais constituintes das rochas, adquirem magnetização em resposta a um campo magnético aplicado (H). A ASM de uma rocha, por sua vez, depende de duas propriedades: (i) das anisotropias individuais dos grãos; e (ii) do grau de alinhamento destes grãos anisotrópicos, particularidades estas que compõem a susceptibilidade total de uma rocha (Borradaile & Jackson, 2010). Deste modo, podem ser identificados três tipos principais de comportamento magnético nos minerais: diamagnetismo, paramagnetismo e ferromagnetismo

O *diamagnetismo* (K_d) é o comportamento presente em todos os minerais naturais (neutros). Esses minerais são também chamados de materiais magneticamente desordenados por apresentarem magnetização induzida (M_i) linear, ou seja, proporcional ao campo aplicado (H), e reversível, indicando que não há magnetização remanente quando este campo é retirado. Logo, sua origem, está relacionada ao movimento orbital dos elétrons sob a ação de um campo magnético indutor. A susceptibilidade diamagnética é de intensidade muito baixa, constante e negativa, com valores, em geral muito baixos, da ordem de $-2,78$ a -17×10^{-6} SI e independe da temperatura. Minerais como quartzo, feldspato e calcita, são alguns exemplos de minerais com características diamagnéticas (Figura 3.2).

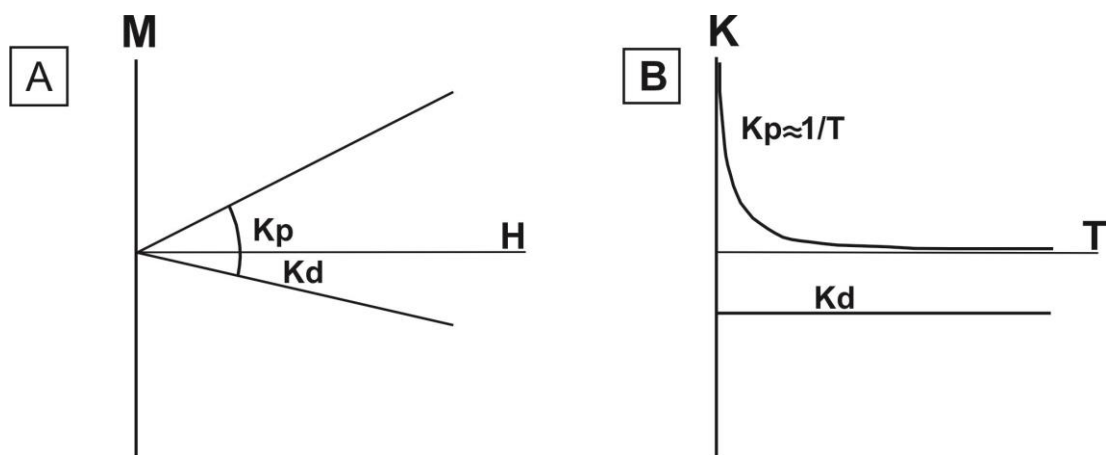


Figura 3.2: Propriedades dia- e paramagnéticas sob um campo indutor (H). a) Susceptibilidade diamagnética negativa (k_d) em contraste com susceptibilidade paramagnética (k_p) positiva; b) susceptibilidade paramagnética varia com a temperatura,

enquanto que a susceptibilidade diamagnética é constante. M = magnetização; T = temperatura. (Extraído de Archanjo (2003)).

O *paramagnetismo* ($K\mu$) ocorre nos minerais que apresentam momentos magnéticos inerentes devido à momentos de *spin* e momentos orbitais descompensados (camadas atômicas incompletas), sendo sua anisotropia controlada pela rede cristalina do mineral. A susceptibilidade paramagnética é positiva, independe do campo magnético indutor e decresce com o aumento da temperatura (Figura 3.2). A diminuição de $K\mu$ com o aumento da temperatura obedece à Lei de Curie (Archanjo, 2003):

$$K = (T - \theta)^{-1}$$

onde (T) é a temperatura absoluta e θ a constante de Curie. Os valores de susceptibilidade paramagnética são da ordem de 10^{-5} a 10^{-4} . Minerais do sistema ortorrômbico (ortopiroxênio), cujos eixos cristalográficos a, b e c coincidem com as direções principais da anisotropia de susceptibilidade (k_1, k_2, k_3), bem como os minerais do sistema monoclinico (anfíbólio), os quais tem apenas o eixo c (001) paralelo a uma das direções principais de susceptibilidade, são característicos desse comportamento magnético (Borradaile & Jackson, 2010) (Figura 3.3).

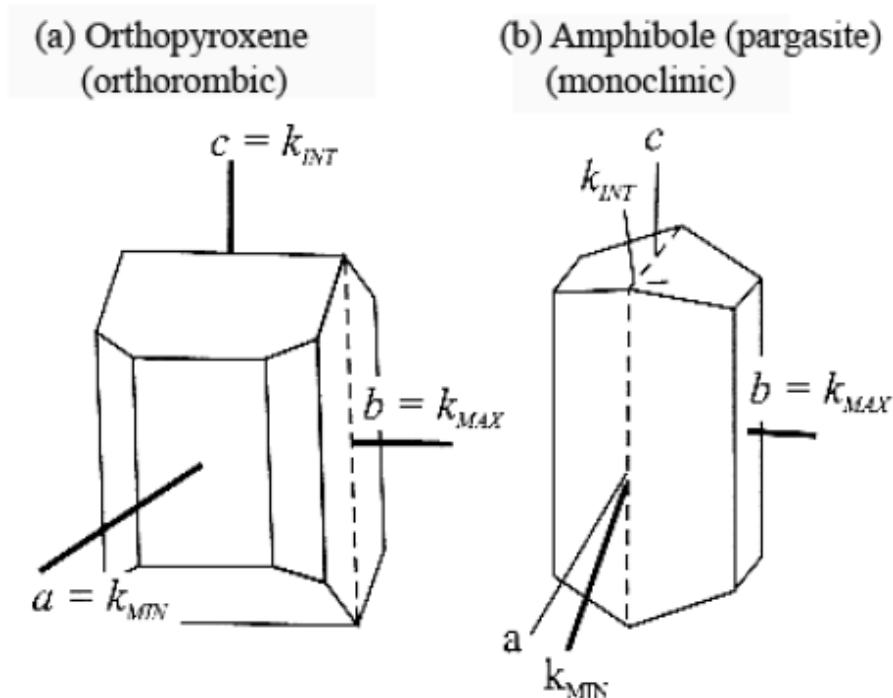


Figura 3.3: Direções de susceptibilidade e simetria cristalina em diferentes sistemas cristalinos, ortorrômbico e monoclinico (modificado de Borradaile & Jackson (2010)).

O ferromagnetismo é caracterizado pelo comportamento dos minerais ricos em íons Fe, Mn, Cr e Co que interagem fortemente entre si, gerando uma magnetização natural espontânea mesmo na ausência de um campo indutor. Magnetita, Hematita, Titanomagnetita e Titanohematita, são alguns exemplos desses minerais ferromagnéticos. Arranjos paralelos e antiparalelos dos momentos magnéticos (*spins*) também determinam as propriedades magnéticas dos minerais. Nos ferromagnéticos, os momentos magnéticos são paralelos e alinhados uniformemente em uma mesma direção. Entretanto, nos minerais ferrimagnéticos, os momentos magnéticos são antiparalelos, porém, com intensidade distinta, gerando uma resultante espontânea pequena. Por fim, nos minerais antiferromagnéticos, os momentos são antiparalelos de mesma intensidade, resultando em uma magnetização nula (Figura 3.4). Acima de um determinado valor crítico de temperatura, chamada de Temperatura de Curie (T_c), as interações (forças de troca) quebram e os momentos magnéticos tornam-se aleatórios, resultando em um decréscimo de susceptibilidade e gradual diminuição do sinal magnético. Nos minerais antiferromagnéticos, essa temperatura é conhecida como Temperatura de Néel (T_n). Acima dessa temperatura, o comportamento dos minerais ferromagnéticos torna-se igual ao dos minerais paramagnéticos e a susceptibilidade obedece a Lei de Curie-Weiss.

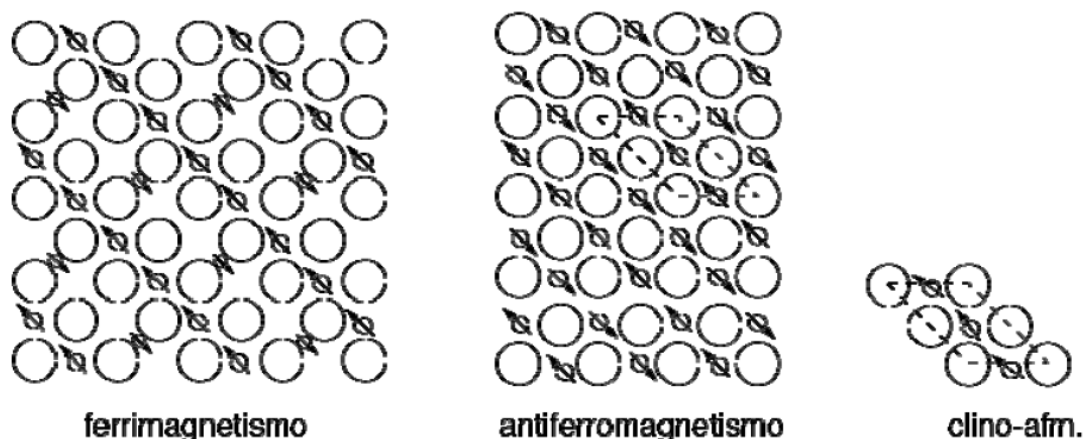


Figura 3.4: Momentos magnéticos ferri- e antiferromagnéticos, com características paralelas e antiparalelas. Pequenos desvios dos momentos magnéticos nos arranjos antiferromagnéticos derivam nos clino-antiferromagnéticos (extraído de Archanjo (2003)).

Uma característica importante do ferromagnetismo é sua capacidade de produzir histerese, ou seja, o comportamento magnético de um mineral ferromagnético pode ser definido no ciclo de histerese (Figura 3.5). A

susceptibilidade magnética é determinada através da primeira curva de magnetização, próxima ao ponto de repouso, considerada linear e reversível. Quando o campo indutor (H) é aplicado de maneira crescente, a magnetização (M_s) atinge o ponto de saturação. A partir deste ponto, a magnetização passa a ser constante e máxima, e ao retirar-se o campo indutor o mineral passa a adquirir uma magnetização remanente (H_r). Ao aplicar um campo magnético na direção oposta, a magnetização volta a ser nula (M_r), e o campo magnético produzido na direção inversa é denominado coercividade (H_c).

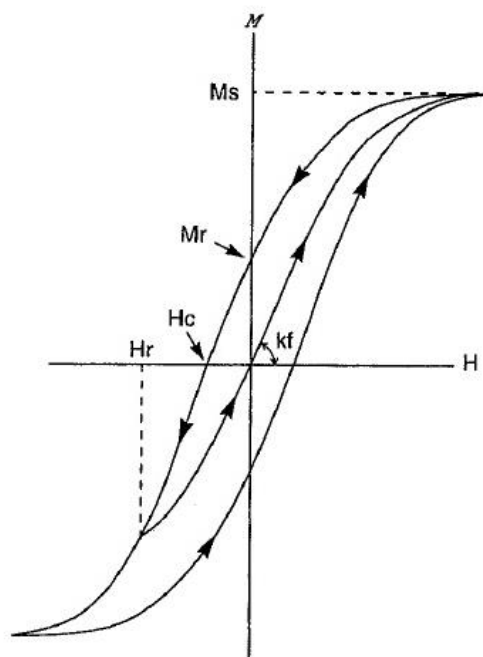


Figura 3.5: Representação de um ciclo de histerese. M_s – magnetização de saturação, M_r – magnetização remanente, H_c – coercividade, H_r coercividade remanente e k_f representa a susceptibilidade ferromagnética (modificado de Butler (1992)).

Uma particularidade no ferromagnetismo é a mudança na direção de magnetização, cuja importância se deve ao fato de que a variação das propriedades magnéticas com o tamanho de grão está intimamente ligada à presença de domínios magnéticos no interior do cristal. Estes domínios presentes nos minerais ferromagnéticos podem ser subdivididos em *multidomain* (MD), onde a magnetização é paralela ao eixo maior do grão, ou *single-domain* (SD), cuja magnetização é perpendicular ao eixo maior do grão. Deste modo, a ocorrência de SD corresponde a um padrão de “ASM inversa”, onde o eixo K_{min} do elipsoide de anisotropia é paralelo ao eixo maior do grão (Borradaile & Jackson, 2010).

3.3. Aplicações da ASM

Graham (1954) foi o pioneiro na aplicação da anisotropia de susceptibilidade magnética (ASM) para resolver problemas estruturais e de petrotrama. Ele observou que a ASM resultava do alinhamento preferencial de partículas ferromagnéticas e que poderia ser representada pelos três eixos de um elipsoide, onde o eixo mais longo seria paralelo à orientação preferencial dos eixos maiores dos grãos ferromagnéticos. Hoje em dia, sabe-se que os mecanismos principais que determinam a trama de uma rocha são a anisotropia magnetocristalina e a de forma (Tarling & Hrouda, 1993; Borradaile & Henry, 1997). A ASM pode ser originada a partir da interação da rede cristalina com a orientação dos *spins* dos elétrons, levando-as a uma orientação preferencial em determinadas direções denominadas de “eixos fáceis” de magnetização (anisotropia magnetocristalina). A anisotropia pode também derivar da orientação preferencial de forma dos grãos (anisotropia de forma). Desse modo, a técnica de ASM tem sido amplamente utilizada em estudos de petrotrama e estruturais, devido a correlação existente entre a trama mineral da rocha e o elipsoide de susceptibilidade magnética (Tarling & Hrouda, 1993; Borradaile & Henry, 1997; Borradaile & Jackson, 2010; Ferré *et al.*, 2014).

Em diques, a aplicação da técnica de ASM foi utilizada primeiramente por Knight & Walker (1988). Estes autores definiram, através de diversos estudos, que o eixo κ_{\max} é paralelo à direção do fluxo magmático e consideraram o efeito SD (domínio invertido do elipsoide) e a ocorrência de deformações posteriores como possíveis explicações para as eventuais ocorrências de variações nos eixos κ_{\max} e κ_{\min} . Estudos de geologia estrutural demonstram que o plano de fluxo verdadeiro está relacionado ao transporte do magma, e que o plano de fluxo aparente corresponde ao registrado pelos minerais (Tarling & Hrouda, 1993; Ferré *et al.*, 2014).

4. TÉCNICAS E MÉTODOS

O presente trabalho consiste no uso da técnica de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética aplicada aos Diques Compostos da Enseada do Zimbros/ SC, a fim de compreender os mecanismos de alojamento desses corpos. A obtenção dos dados de ASM envolveu diversas etapas: a etapa pré-campo (revisão bibliográfica, integração de imagens de satélite, mapa geológico e mapa topográfico); etapa de campo (coleta dos cilindros orientados, descrição dos afloramentos, etc.); etapa pós-campo (análise das anisotropias magnéticas, interpretação dos dados de campo, organização dos dados). Neste capítulo será descrita detalhadamente toda a metodologia utilizada nesse trabalho.

4.1. Técnicas pré-campo

Esta etapa correspondeu à compilação de dados já existentes referentes às características geológicas e estruturais da área de estudo dos Diques Compostos da Enseada dos Zimbros/SC, incluindo a leitura de artigos, teses de doutorado e publicações relacionadas à técnica de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética.

A reunião dos dados existentes, nesta fase, foi de extrema importância para organizar a logística da etapa seguinte levando-se em conta a utilização de uma perfuratriz pesada específica para a coleta de amostras, de difícil transporte em campo. A fim de sistematizar as etapas subsequentes, alguns procedimentos foram desenvolvidos com o intuito de identificar os afloramentos mais representativos da região, bem como estruturas e principais vias de acessos (trilhas). A integração das fotografias aéreas, ortofotos com alto grau de detalhe (escala 1:5000), imagens de satélite (*Google Earth*), cartas topográficas, mapas geológicos e mapas de pontos foi feita através do Sistema de Informação Geográfica (*software ArcGIS 10®*).

A partir da integração feita com os dados pré-existentes, foram selecionados seis afloramentos representativos da área para executar a amostragem. Os afloramentos amostrados correspondem aos seguintes pontos: PB-139, PB-197-1, PB-198, PB-288 localizados da Enseada dos Zimbros, PB-56 situados na praia do Mariscal e PB-147, na praia Retiro dos Padres (Figura 4.1).

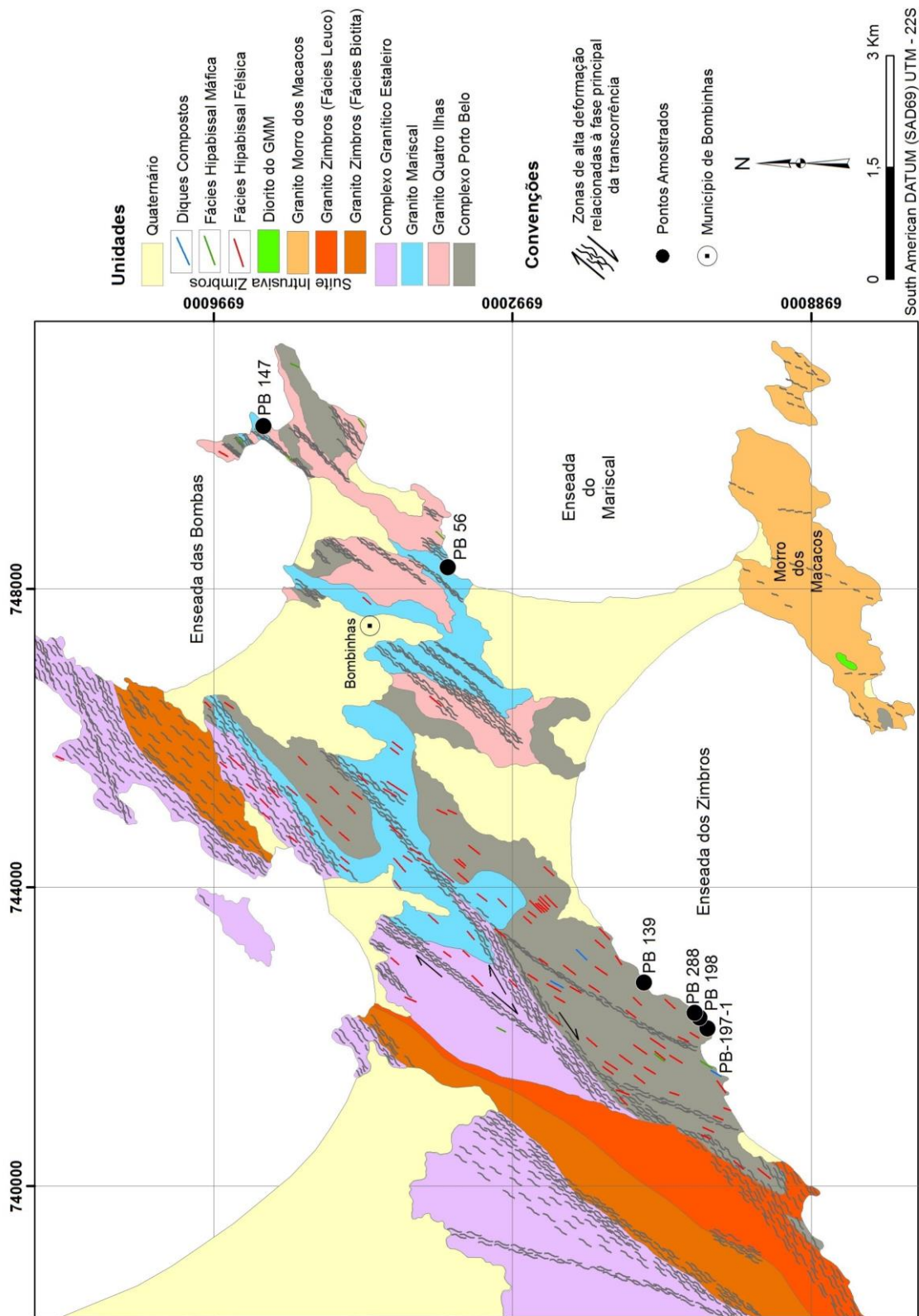


Figura 4.1: Mapa geológico da Região de Porto Belo com a localização dos pontos amostrados (modificado de Bitencourt, (1996)).

4.2. Técnicas de Campo

O objetivo principal da etapa de campo consistiu na coleta de testemunhos de furos cilíndricos regularmente espaçados, em locais pré-estabelecidos, ao longo dos diques compostos, seguindo uma malha regular de pontos nas porções de centro e borda desses litotipos, além da descrição textural e coleta de dados estruturais em cada sítio de amostragem.

A etapa de campo foi realizada entre os dias 14 a 19 de maio de 2014 na região de Bombinhas, SC.

4.2.1. Amostragem

Foram amostrados 15 sítios, sendo retirados em torno de 10 cilindros (cada cilindro contém 1” de diâmetro e de 3 a 15 cm de comprimento) por sítio, totalizando 185 cilindros coletados.

A amostragem foi realizada com o auxílio de uma perfuratriz portátil da marca *STIHL*, composta por um motor dois tempos movido a gasolina que utiliza uma broca cilíndrica oca, de 1” de diâmetro por 20 cm de comprimento, cuja extremidade é diamantada (Figura 4.2). Um tubo contendo mistura de água e óleo solúvel biodegradável sob pressão é acoplado ao sistema, sendo esta mistura liberada na base da broca para que refrigere e diminua seu atrito com a rocha.

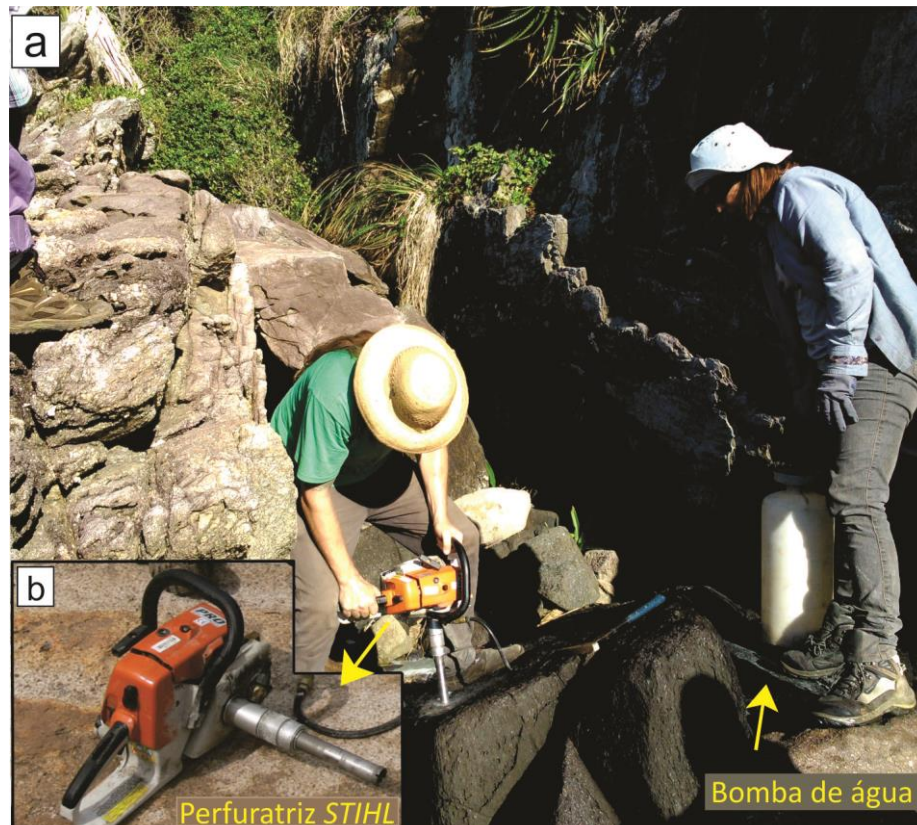


Figura 4.2: a) Perfuratriz portátil STIHL com broca de 20 cm e 1'' de diâmetro, com extremidade diamantada. Processo de perfuração dos cilindros, com destaque em amarelo para bomba que contém uma mistura de água e óleo solúvel (para refrigeração da máquina e diminuição do atrito durante a perfuração), e b) que mostra em detalhe a perfuratriz.

É de suma importância que a rocha a ser amostrada esteja *in situ* pois, caso não esteja, a análise dos dados direcionais será inválida (nula). A rocha amostrada deve apresentar grau de alteração nulo ou mínimo e conter o mínimo de fraturas, sob o risco de fragmentar-se ou desintegrar-se pelo atrito produzido pela broca fazendo, muitas vezes, com que o cilindro emperre dentro desta.

Antes da perfuração ser iniciada, é feita uma marcação de 1 cm de profundidade rente ao local a ser amostrado a fim de registrar a posição dos testemunhos, caso haja a quebra e conseqüente desorientação. Feita a marcação inicial, sobreposto, parcialmente a ela é realizada a perfuração de fato. Concluída esta etapa, duas marcações ficam registradas nos cilindros, uma inicial, marcada parcialmente, e outra final (Figura 4.3).



Figura 4.3: a) Marcação feita inicialmente, quando o furo atinge 1 cm; b) Perfuração concluída, espaço onde foi retirado o testemunho cilíndrico.

A posição espacial de cada amostra é registrada por um orientador o qual consiste de, uma haste cilíndrica oca, com o mesmo diâmetro do furo. Na extremidade são acopladas uma bússola magnética (modelo *Brunton*) e uma bússola solar, proporcionando a leitura até mesmo nos casos em que há alta intensidade de magnetização nas rochas, bem como um transferidor para medir o ângulo de inclinação do furo (Figura 4.4). O orientador é colocado nos furos e ajustado de maneira que o clinômetro da bússola fique nivelado na posição central, indicando que esta se encontra na posição horizontal. Após esse procedimento, são registradas as leituras de medidas magnéticas e solar (incluindo a leitura do horário) e da inclinação em que o cilindro foi retirado.



Figura 4.4: Orientador dos testemunhos cilíndricos: a) Haste cilíndrica de alumínio com ranhura na base; b) bússola magnética (modelo *Brunton*) acoplada a haste cilíndrica; c) Transferidor de 360° e haste de metal, para fazer a leitura do azimute solar; d) Transferidor de 90° para medir a inclinação do furo. (Extraído de Sbaraini (2012)).

Nos testemunhos que não quebram no instante da perfuração, o orientador é colocado sem a retirada do testemunho. A marcação é feita diretamente no cilindro utilizando-se um arame, e somente então a amostra é identificada. Nos testemunhos que quebram, a marcação é feita com marcador permanente na rocha do lado externo do furo, remarcando-se no cilindro quando este é colocado na posição original (Figura 4.5).

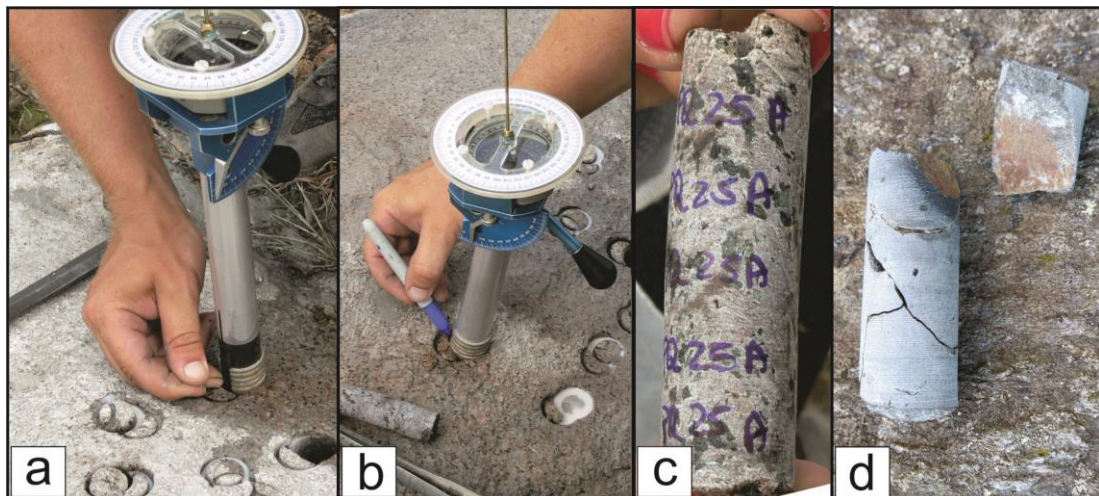


Figura 4.5: a) Marcação sendo executada de maneira indireta, em caso de quebra do cilindro (modificado de Sbaraini (2012)); b) Ilustração de um cilindro orientado; c) cilindro identificado; d) cilindro fragmentado.

4.3. Análise de Anisotropias Magnéticas (ASM)

Os cilindros amostrados foram preparados no Laboratório de Tratamento de Amostras no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (LTA-IGc USP).

4.3.1. Preparação das amostras

Na etapa de preparação, os cilindros foram serrados em espécimes de até 22 mm (Figura 4.6). Depois de serrados, os espécimes foram renomeados e marcados, de maneira a facilitar o posicionamento dos mesmos na hora da aquisição das medidas magnéticas. Após esses procedimentos, os espécimes foram embalados em filme de PVC, para prevenir qualquer tipo de contaminação nos equipamentos.

Para a obtenção das curvas de histerese e das curvas termomagnéticas, foi necessário moer alguns espécimes representativos. Neste caso, as amostras foram desagregadas (quebradas) em uma prensa, com os devidos cuidados para evitar a contaminação das mesmas. Posteriormente, os fragmentos gerados na prensa foram reduzidos em um moinho de ágata a uma fração bem fina.

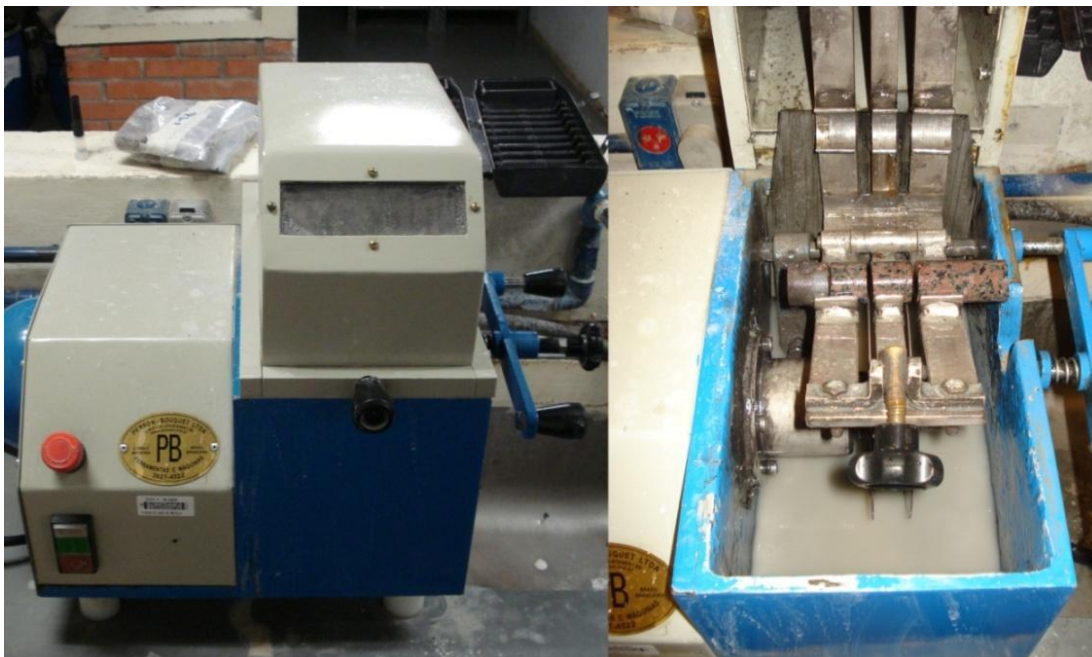


Figura 4.6: Serra utilizada para o corte dos cilíndricos em espécimes (extraído de Sbaraini (2012)).

4.3.2. Susceptibilidade Magnética e Anisotropia de Susceptibilidade Magnética (ASM)

As medidas foram realizadas no Laboratório de Anisotropias Magnéticas e de Magnetismo de Rochas da Universidade de São Paulo (LAM – IGc USP), a partir de um Susceptibilímetro KAPPABRIDGE MFK1 – FA da AGICO. Os dados foram processados usando-se o *software ANISOFT 4.2*, o qual utiliza a estatística de Jelinek (1977).

A aquisição das medidas de cada espécime se baseia na leitura de três eixos, x, y e z, ortogonais entre si (em três posições diferentes do cilindro), e na leitura do valor de anisotropia total. Durante a rotação de cada eixo, são feitas 64 medidas de diferentes susceptibilidades magnéticas (Figura 4.8).

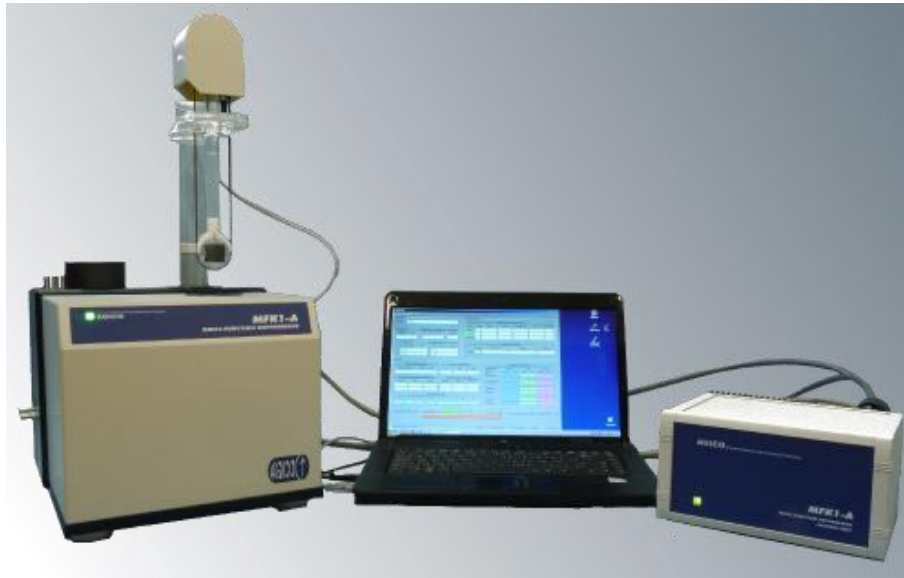


Figura 4.7: Equipamento Kappabridge MFK1 – FA da AGICO utilização para medir as propriedades magnéticas das amostras (extraído de AGICO (2014)).

Por meio destas medidas são obtidos os primeiros resultados de susceptibilidade e anisotropia magnética, que são expressos em termos de declinação e inclinação dos eixos do elipsoide de ASM. O próprio *software* realiza as correções para a posição original da amostra em relação ao norte geográfico.

4.3.3. Propriedades Magnéticas das Amostras

Os estudos de magnetismo de rocha abrangem distintos experimentos que permitem obter informações sobre as diferentes fases minerais presentes nas rochas. As curvas de histerese, assim como as curvas termomagnéticas, são técnicas usadas para caracterizar a mineralogia magnética.

4.3.4. Curvas de Histerese

A análise das curvas de histerese é feita por um magnetômetro VSM (*vibrating sample magnetometer*). A obtenção dos dados de histerese permite verificar parâmetros importantes sobre os minerais ferromagnéticos presentes na rocha, destacando-se a magnetização remanente (MR), o campo coercivo (HC) e a coercividade de remanência (HCR). Os resultados desse experimento são também importantes para o estudo dos domínios magnéticos, assim como, permite verificar

a contribuição das diferentes fases minerais (dia, para e ferromagnéticas) presentes nas rochas.

A aquisição dos dados consiste, primeiramente, em comprimir ao máximo o material previamente pulverizado em uma seringa, afim de eliminar qualquer porosidade. A seringa é colocada no magnetômetro onde as amostras são submetidas a campos magnéticos crescentes até atingir a saturação, chamada de Magnetização de Saturação (MS). Ao retirar o campo magnético da amostra e, permanecido nela uma magnetização, esta é denominada Magnetização Remanente de Saturação (MRS), indicativa de que há minerais magnéticos presentes na rocha (Figura 4.8). Como resultado, são geradas curvas de histerese de diferentes modelos, produzidas a partir do grau de coercividade que em algumas amostras podem ser muito baixo, caracterizado por uma curva simétrica com cintura estreita (*Single-Domain*) próxima a origem (Figura 4.8 a), por uma curva do tipo *Potbellied* (Figura 4.8 b) até valores de baixa e alta coercividade juntos, caracterizando uma curva do tipo *Wasp-Waisted* (Figura 4.8 c).

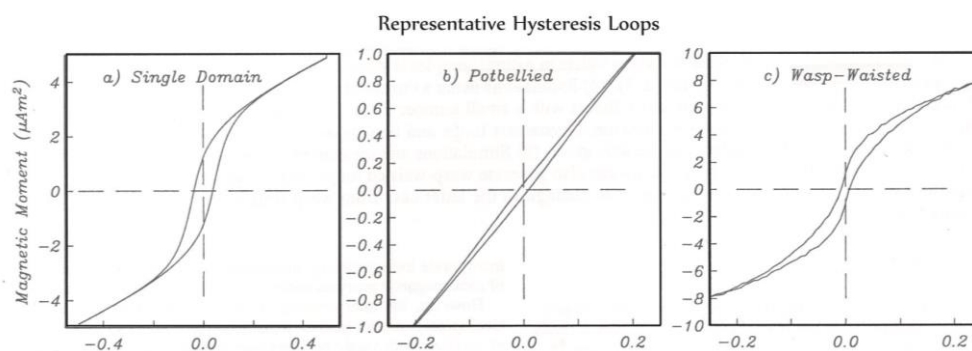


Figura 4.8: Modelos de curvas de histerese: a) *Single-Domain*; b) *Potbellied* e c) *Wasp-Waisted* (extraído de Tauxe et. al (1996)).

4.3.5. Curvas Termomagnéticas

As curvas termomagnéticas são obtidas com o auxílio dos aparatos CS-3 e CS-3L acoplados ao instrumento Kappabridge 4S fabricado pela AGICO.

A obtenção destas curvas visa determinar a susceptibilidade magnética da amostra em função da temperatura. As amostras são submetidas a ciclos de aquecimento e resfriamento, sendo a susceptibilidade magnética medida a cada temperatura. As curvas de baixa temperatura são obtidas com do uso de nitrogênio

líquido, quando as amostras são resfriadas até -196°C e aquecidas até a temperatura ambiente. No experimento de alta temperatura, as amostras são aquecidas até 700°C em atmosfera de argônio para evitar a oxidação dos minerais durante o aquecimento. Os sítios correspondentes ao afloramento PB-198 foram os selecionados para a execução desta técnica.

5. RESULTADOS

Os dados de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética (ASM) apresentados são equivalentes a 15 sítios amostrados, resultando em 522 espécimes correspondentes aos diques compostos e aos diques isolados que fazem parte da SIZ, e estão apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parâmetros de ASM dos Diques Compostos da Enseada dos Zimbros e Diques Básicos Isolados associados às intrusões compostas.

Ponto	Direção do dique	Sítio	n	Parâmetros escalares			Parâmetros direcionais								
				Km (mSI)	P	T	K1			K2			K3		
							Dec	Inc	$\alpha 1$	Dec	Inc	$\alpha 2$	Dec	Inc	$\alpha 3$
PB-198	N50E	CT-01	46	5,99	1,087	0,485	230	6	13,0	8	81	11,2	139	5	13,3
	N50E	CT-02	26	0,999	1,023	0,106	222	1	12,1	319	80	8,7	132	9	11,8
	N40E	CT-03	32	0,37	1,073	-0,105	225	1	11,6	346	87	14,1	135	1	12,6
		CT-04	29	0,606	1,038	0,246	218	0	7,1	12	89	7,1	128	0	3,9
PB-288	N77E	CT-05	16	0,837	1,035	-0,355	222	2	6,3	92	87	5,2	312	1	6,0
	N60E	CT-06	28	0,84	1,008	-0,024	209	5	23,2	97	77	29,0	300	11	29,9
	N70E	CT-07	52	5,04	1,073	0,444	48	1	18,7	295	86	18,7	138	2	12,3
	N62E	CT-08	28	0,427	1,106	0,113	220	7	11,9	39	83	18,0	130	0	18,2
	N80E	CT-09	37	0,935	1,086	-0,254	217	16	7,7	354	68	7,1	123	14	7,1
PB-197-1	N80E	CT-10	29	9,97	1,136	0,358	244	1	8,9	349	85	8,7	154	4	7,3
	N75E	CT-11	28	18,7	1,188	0,313	52	7	10,5	213	82	10,3	322	2	11,4
	N80E	CT-12	28	3,63	1,042	0,400	228	4	46,9	108	81	46,9	318	7	15,3
PB-147	N72E	CT-13	42	1,6	1,047	-0,705	221	16	4,8	311	0	36,2	43	74	36,2
PB-56	N55E	CT-14	46	2,1	1,036	-0,531	216	2	11,5	316	77	16,8	125	12	17,2
PB-139	N70E	CT-15	55	0,711	1,038	-0,694	221	2	12,1	127	64	43,8	312	25	43,8

5.1. Anisotropia de Susceptibilidade Magnética

5.1.1. Enseada dos Zimbros

Os afloramentos situados na Enseada dos Zimbros são os PB-139, PB-197-1, PB-198 e PB-288 (Figura 4.1) e correspondem aos sítios indicados na Tabela 5.1.

PB-139

Neste afloramento, foi amostrado apenas um sítio (CT-15) ao longo das bordas e porção central do dique. A susceptibilidade magnética média (K_m) para este ponto é relativamente baixa, com um valor de $7,11 \times 10^{-4}$ SI. A anisotropia magnética ($P = k_1/k_3$) tem um valor médio de 1,04 e, quando comparada aos valores de susceptibilidade média (K_m), não tem seu grau aumentando com o aumento da susceptibilidade. Para valores de K é possível observar dois agrupamentos principais: um concentrado na ordem de 10^{-4} e, um pequeno agrupamento chegando a valores de K_m em torno de $1,00 \times 10^{-3}$ (Figura 5.1 a).

A relação entre o parâmetro de forma (T) e o grau de anisotropia (P) evidencia que as amostras estão agrupadas e tem valor médio de -0,694, indicando que os elipsoides são prolatos. Poucos pontos têm valores de $T > 0$ e estão, portanto, plotados no campo do elipsoide oblato (Figura 5.1 b).

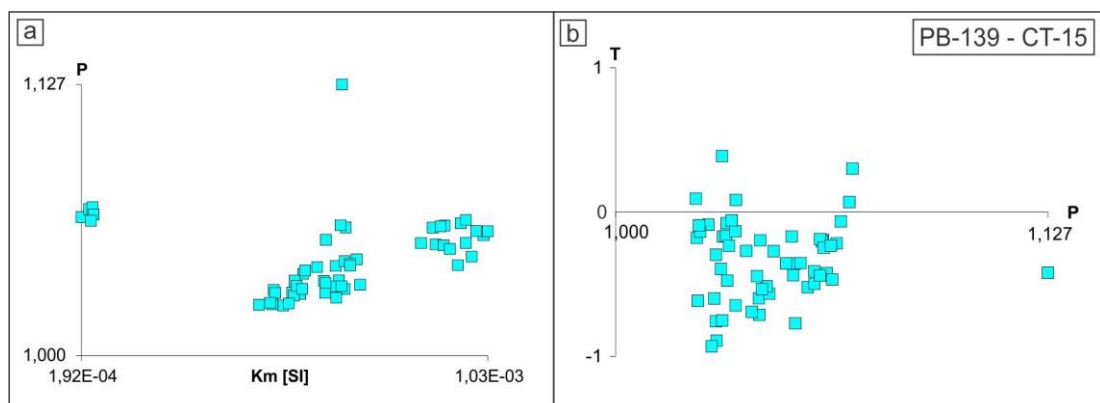


Figura 5.1: Diagramas de correlação entre: a) grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (k_m) e, b) parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia (P).

PB-288

Neste afloramento foram amostrados cinco sítios representados na Tabela 5.2, correspondentes às bordas máficas, centro ácido e ao dique básico isolado associado ao corpo principal.

A susceptibilidade magnética média (K_m) obtida para cada sítio varia entre 9.35×10^{-4} e 5.04×10^{-3} SI, indicando que há contribuição ferromagnética. O grau de anisotropia ($P=k_1/k_3$) tem média aritmética em torno de 1,064. A anisotropia magnética (P) quando comparada à susceptibilidade média (K_m), mostra que P está bem agrupado quando os valores de K_m são baixos, para os quais o grau de anisotropia é em torno de 1,100. Em contrapartida, observa-se uma variação de P para valores médios e altos de susceptibilidade (Figura 5.2 a, c, e, g, i).

A relação entre o parâmetro de forma (T) com o grau de anisotropia (P) evidencia que as amostras apresentam elipsoides tanto oblatos quanto prolatos, porém, com uma densidade maior de pontos com $T > 0$, o que indica que esse elipsoide é, predominantemente, oblato (Figura 5.2 b, d, f, h, j).

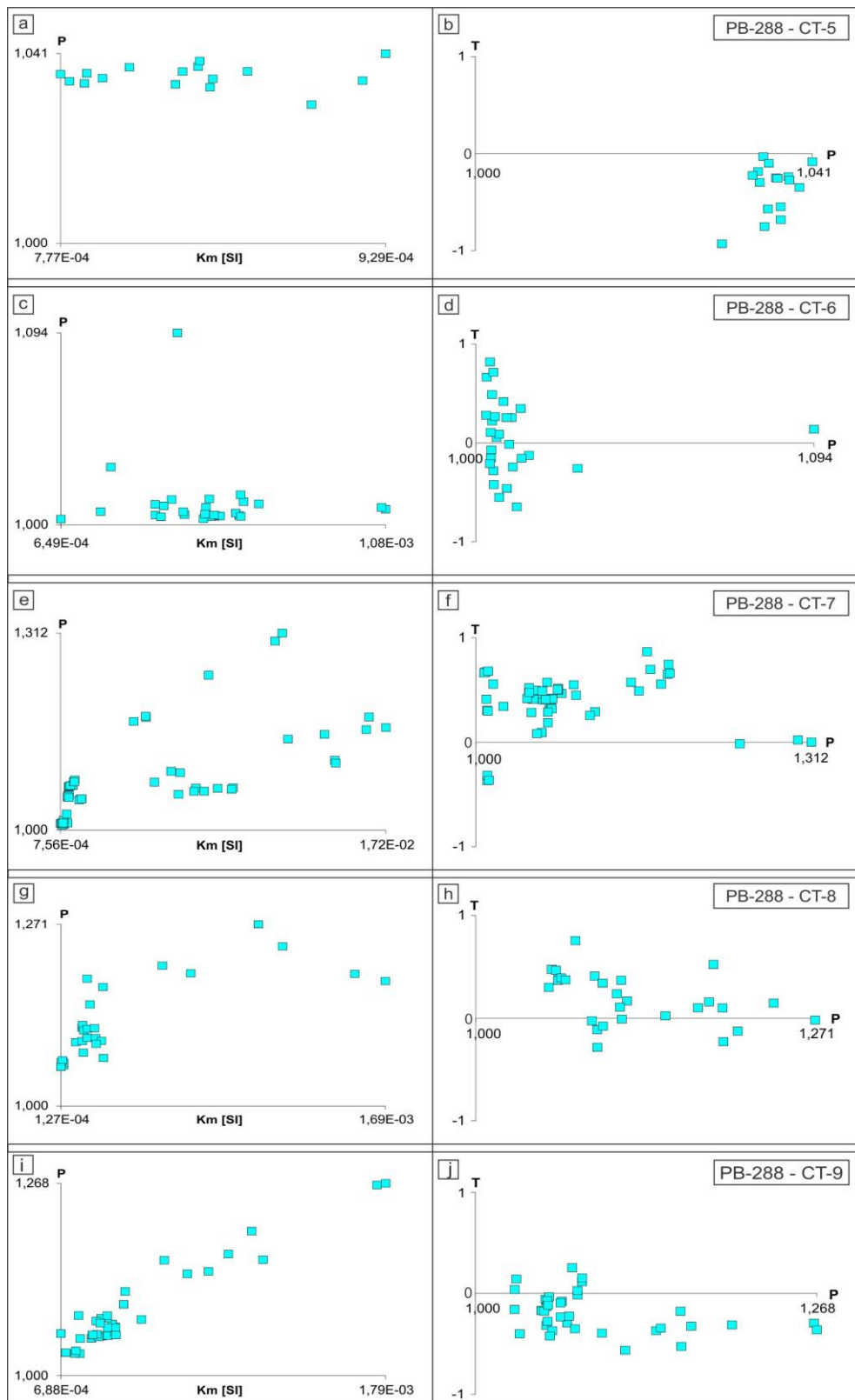


Figura 5.2: Diagramas de correlação entre: (a), (c), (e), (g) e (i) grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (km) e, (b), (d), (f), (h) e (j) mostram o parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia (P).

PB-198

Incluem-se neste afloramento os sítios CT-1, correspondente ao dique máfico isolado associado à intrusão principal, CT-2 equivalente à borda máfica do corpo principal, CT-3, que compõe o centro ácido e o sítio CT-4, no qual estão os enclaves máficos.

A susceptibilidade magnética média (K_m) obtida para cada sítio de amostragem varia entre $9,99 \times 10^{-4}$ e $5,99 \times 10^{-3}$ SI. O dique máfico isolado (CT-1) tem uma susceptibilidade média (K_m) relativamente elevada, da ordem de 10^{-3} , quando comparado aos demais sítios (borda básica, centro ácido e enclaves máficos), que tem uma baixa contribuição dos minerais ferromagnéticos, com valores da ordem de 10^{-4} . O grau de anisotropia ($P=k_1/k_3$) tem uma média aritmética com valor de 1,055. Comparando-se os valores de anisotropia magnética (P) com os valores de susceptibilidade média (K_m), tem-se valores de P bem agrupados para valores de K_m baixos, para os quais o grau de anisotropia (P) é em torno de 1,60. Nos sítios CT-2 e CT-3 ocorre uma variação de P para valores médios e altos de susceptibilidade. Já no sítio CT-4, o grau de anisotropia não aumenta com o aumento da susceptibilidade (K), sendo P constante, com valor médio em torno de 1,038 (Figura 5.3 a, c, e, g).

A relação entre o parâmetro de forma (T) com o grau de anisotropia (P), evidencia que as amostras apresentam tanto elipsoides oblatos quanto prolatos, porém, com uma densidade maior de pontos com $T > 0$, indicando que esse elipsoide é, predominantemente, oblato (Figura 5.3 b, d, f, h).

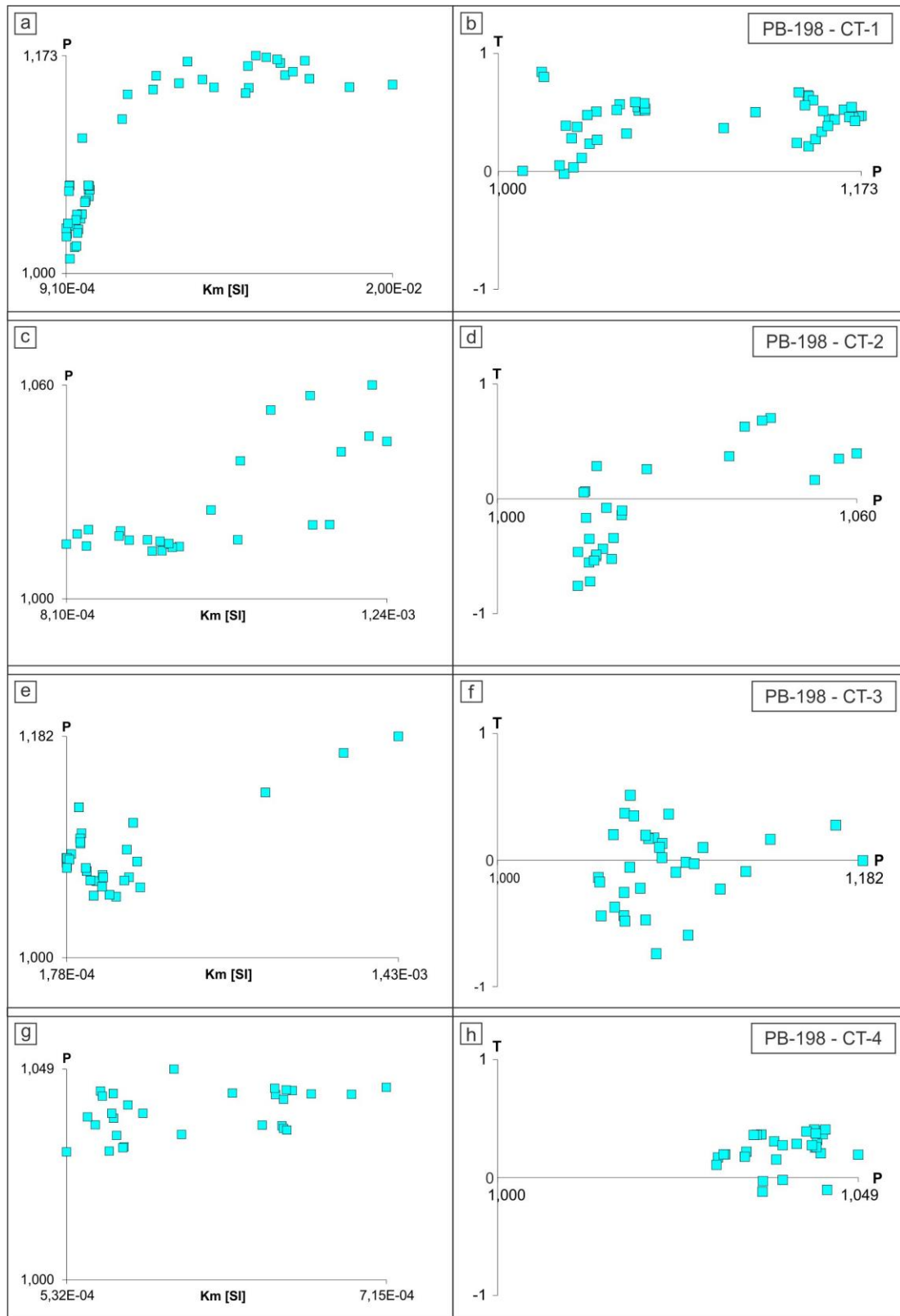


Figura 5.3: Diagramas de correlação entre: (a), (c), (e), (g) grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (km) e, (b), (d), (f) parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia (P).

PB-197-1

Este afloramento é composto por três diques máficos isolados indicados na tabela (Tabela 5.1). A susceptibilidade magnética média (K_m) obtida para cada sítio deste ponto de amostragem varia entre $9,97 \times 10^{-3}$ e $1,87 \times 10^{-2}$ SI, indicando que há uma elevada contribuição dos minerais ferromagnéticos para esses diques.

O grau de anisotropia ($P=k_1/k_3$) tem média aritmética com valor de 1,122. Quando comparadas a anisotropia magnética (P) à susceptibilidade média (K_m), de modo geral, tem-se um aumento nos valores de P com o aumento da susceptibilidade média (K_m), o que é evidenciado nos sítios CT-10 e CT-12. No sítio CT-12 tem-se um pequeno agrupamento dos espécimes com valores de P em torno de 1,122 e, no sítio CT-11 a anisotropia é praticamente constante, mesmo com o aumento da susceptibilidade (Figura 5.4 a, c, e).

A relação entre o parâmetro de forma (T) e o grau de anisotropia (P) aponta que as amostras estão, em modo geral, bem agrupadas e que os elipsoides são predominantemente oblatos, embora alguns pontos estejam pouco agrupados (sítio CT-12) e com valores de $T < 0$, indicando elipsoides prolatos (Figura 5.4 b, d, f).

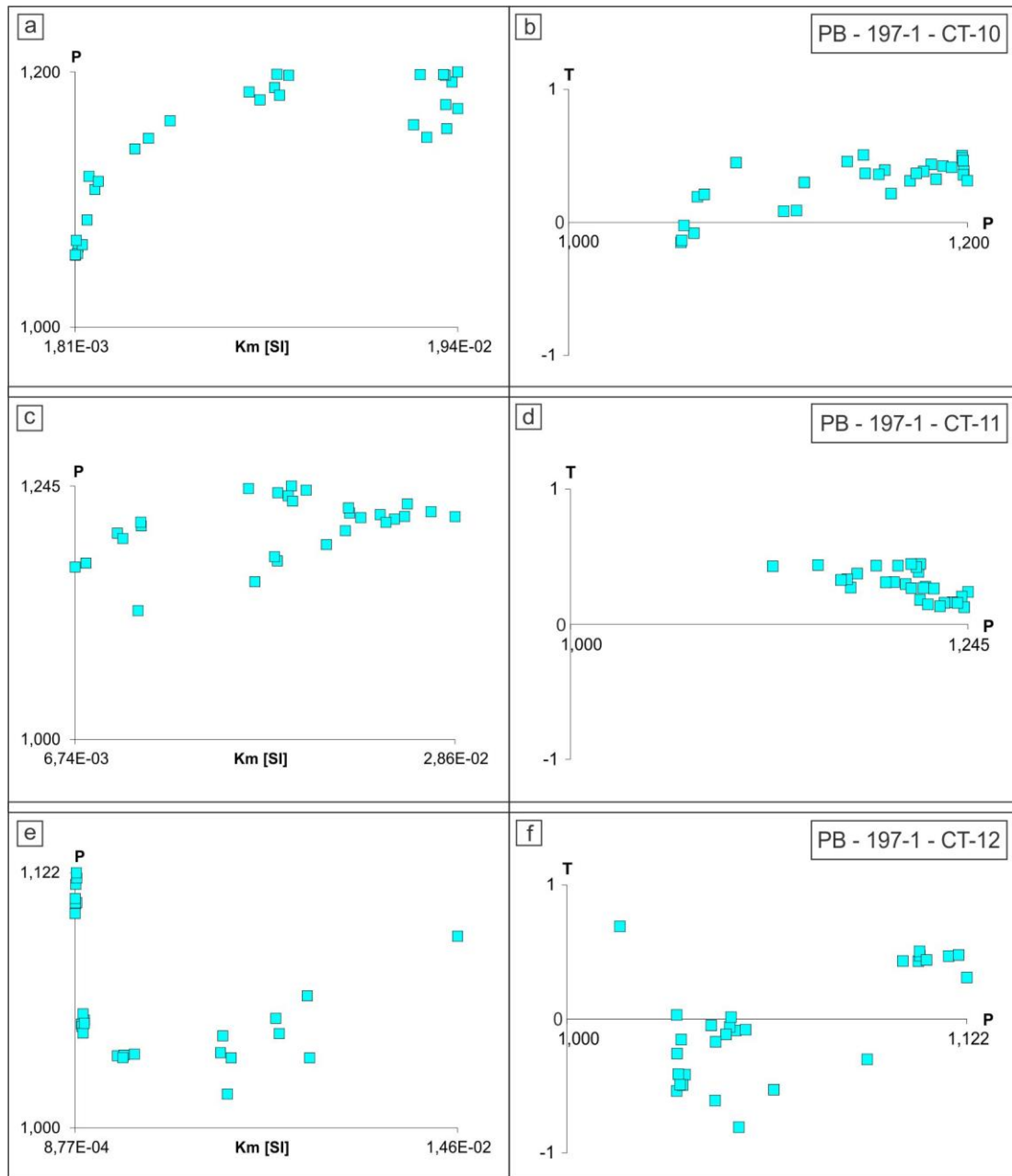


Figura 5.4: Diagramas de correlação entre: (a), (c), (e), grau de anisotropia (P) *versus* susceptibilidade magnética média (km) e, (b), (d), (f) parâmetro de forma (T) *versus* grau de anisotropia (P).

5.1.2. Praia do Mariscal

O Afloramento amostrado na praia de Mariscal, PB-56, é constituído por um dique básico cujo sítio correspondente está indicado na Tabela 5.1.

A susceptibilidade magnética média (k_m) para este ponto é relativamente elevada, com um valor de $2,10 \times 10^{-3}$ SI. A anisotropia magnética ($P=k_1/k_3$) tem um valor médio de 1,036. Quando comparada aos valores de susceptibilidade média (K_m), os valores de anisotropia magnética (P) evidenciam dois agrupamentos bem definidos, em que o primeiro tem um valor de P aproximadamente de 1,030 e k_m em torno de $1,60 \times 10^{-3}$ SI, o segundo em que o grau de anisotropia (P) tem valor médio de 1,041 para susceptibilidades com valores em torno de $2,30 \times 10^{-3}$ SI. Com isso, é possível inferir que o grau de anisotropia aumenta de forma discreta enquanto há aumento da susceptibilidade (Figura 5.5 a).

A relação entre o parâmetro de forma (T) e o grau de anisotropia (P) mostra que neste sítio os espécimes estão pouco agrupados, com valores de $T < 0$ demonstrando que os elipsoides são prolatos (Figura 5.5 b).

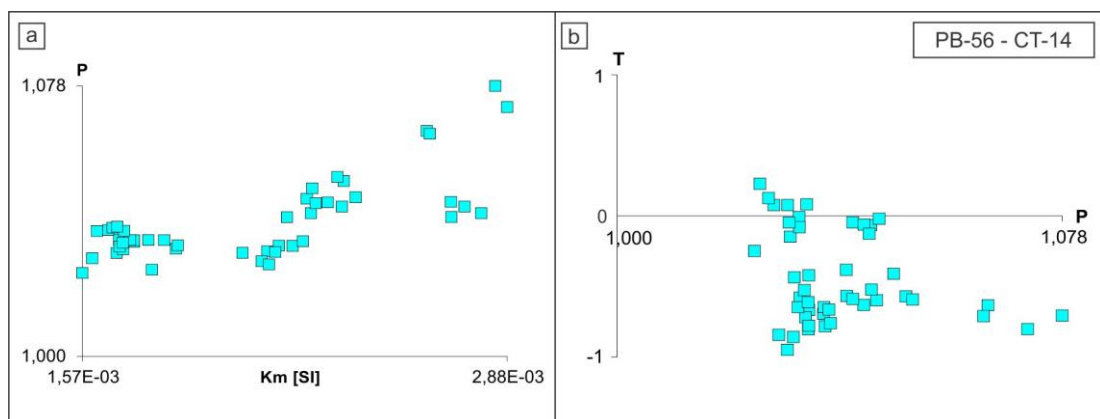


Figura 5.5: Diagramas de correlação entre: a) grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (k_m) e, b) parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia (P).

5.1.3. Praia Retiro dos Padres

O afloramento PB-147, amostrado nesta praia, corresponde a um dique máfico cujo sítio equivalente está representado na Tabela 5.1.

A susceptibilidade magnética média (K_m) para este ponto é relativamente elevada, com um valor de $1,60 \times 10^{-3}$ SI. A anisotropia magnética ($P=k_1/k_3$) tem um valor médio de 1,047 e, quando comparada aos valores de susceptibilidade média (K_m), registra um aumento progressivo com o aumento dos valores de K , indicando uma relação de linearidade entre esses parâmetros (Figura 5.6 a).

A relação entre o parâmetro de forma (T) e o grau de anisotropia (P) mostra que neste sítio os espécimes estão agrupados em pequenas populações que apontam para um elipsoide com valores de $T < 0$, indicando a presença de elipsoides prolatos (Figura 5.6 b).

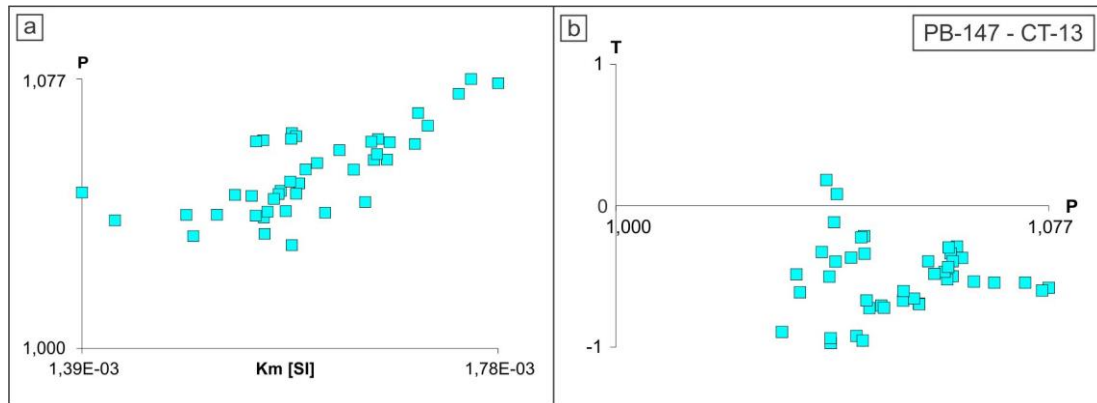


Figura 5.6: Diagramas de correlação entre: a) grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (Km) e, b) parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia (P).

5.1.4. Curvas de Histerese

A Figura 5.7 constitui exemplos característicos de curvas de histerese obtidas para as amostras dos Diques Compostos e intrusões básicas associadas. Essas amostras apresentam três tipos de histerese, *Single-Domain*, *Potbellied* e *Wasp-Waisted*. As histereses *Single-Domain* são bastante simétricas, com cintura estreita (CT-1U, CT-3B, CT-7H, CT-8I, CT-10J, CT-11A e CT-12A), o que indica a presença de apenas uma fase mineral ferromagnética, de baixa coercividade, e uma pequena contribuição paramagnética. Apenas uma amostra constitui histerese do tipo *Potbellied* (essa curva tem uma pequena inflexão, sendo quase uma reta), na qual a cintura é muito fina, indicando o predomínio de uma contribuição paramagnética forte (CT-4B). Para esta mesma amostra, a coercividade é predominantemente baixa, embora tenha uma combinação dessas coercividades (baixa e alta). As histereses do tipo *Wasp-Waisted* (CT-5E, CT-9C, CT-14E, CT-15D, CT-13F, CT-6A e CT-2A) apresentam um afinamento sutil na parte central da curva, indicando a presença de mais de uma fase mineral nesta amostra, ou seja, uma mistura entre uma fase de baixa e alta coercividade.

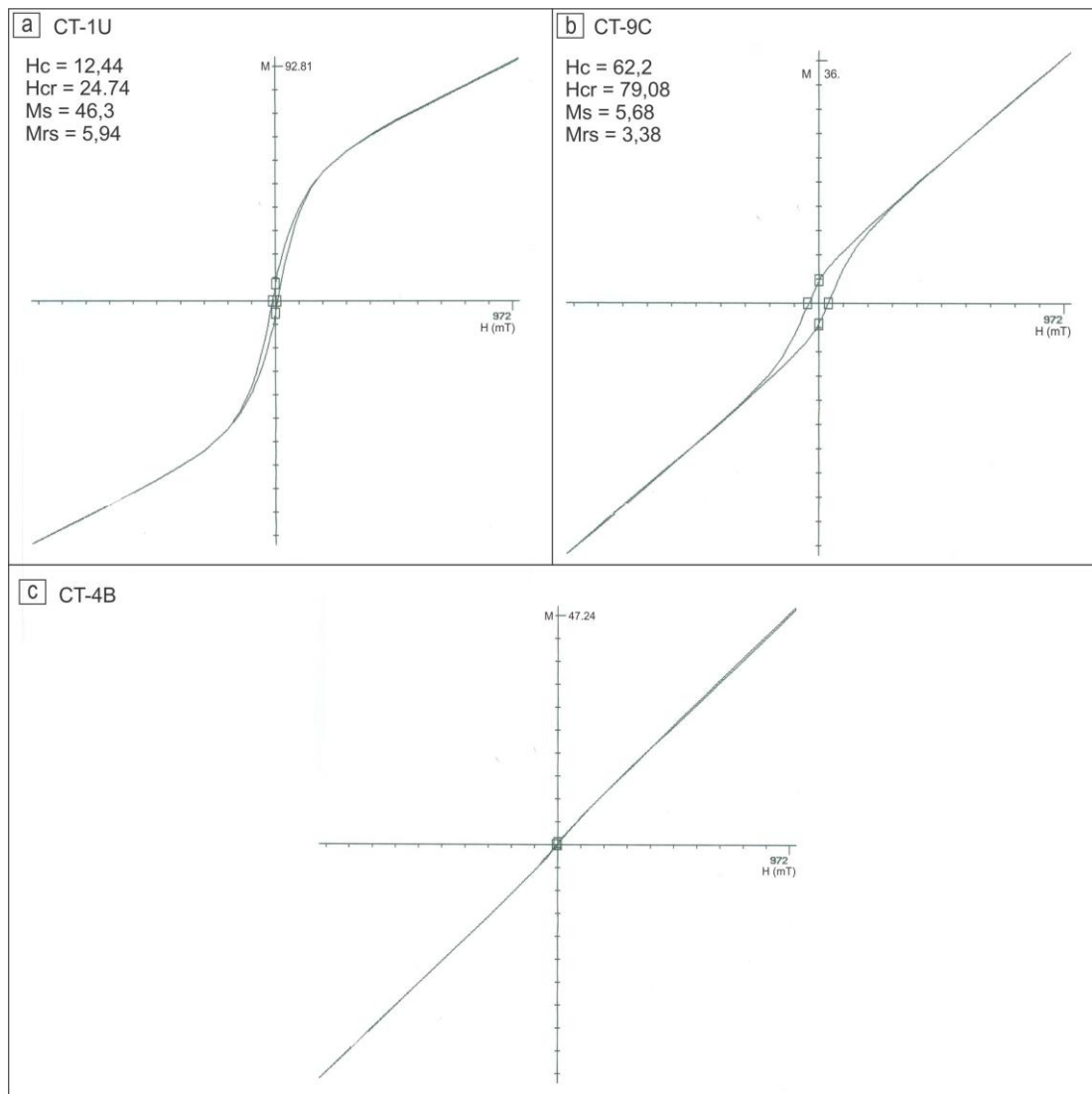


Figura 5.7: Curvas de histerese obtidas para as amostras dos diques compostos e diques isolados associados. a) Histerese do tipo *Single-Domain*; b) Histerese do tipo *Wasp-Waisted*; d) Histerese do tipo *Potbellied*.

5.1.5. Curvas Termomagnéticas

A fim de compreender os portadores magnéticos responsáveis pela susceptibilidade foi estudada a variação de k com a temperatura. Para tanto foram selecionadas algumas amostras do afloramento mais representativo, PB-198, cujos sítios escolhidos foram CT-1, CT-2, CT-3 e CT-4 e do afloramento PB-147, sítio CT-13.

As curvas termomagnéticas apresentadas na Figura 5.8 evidenciam dois comportamentos dominantes que incluem curvas termomagnéticas reversíveis

(Figura 5.8 a) e irreversíveis (Figura 5.8 b - e). Em alguns casos é possível observar que a susceptibilidade aumenta com o aumento da temperatura. As curvas obtidas em altas temperaturas mostram a presença do pico de *Hopkinson* e quedas de susceptibilidade em torno de 580°C. A transição da fase magnética em 580°C é característica da magnetita (Figura 5.8 a, c). A presença do pico de *Hopkinson* em torno de 550°C indica a presença de titanomagnetita pobre em Ti (Figura 5.8 b, d, e). As amostras são caracterizadas por curvas irreversíveis, em que ocorre variação da susceptibilidade durante os processos de aquecimento e resfriamento. Para as curvas de baixa temperatura, as amostras CT-1U, CT-3B e CT-13F (Figura 5.8 a, c, e) apresentam um pico de susceptibilidade em aproximadamente -150°C, conhecido como transição de Verwey (Verwey, 1939). No entanto, as amostras CT-2A e CT-4B (Figura 5.8 b, d) não apresentam o mesmo comportamento.

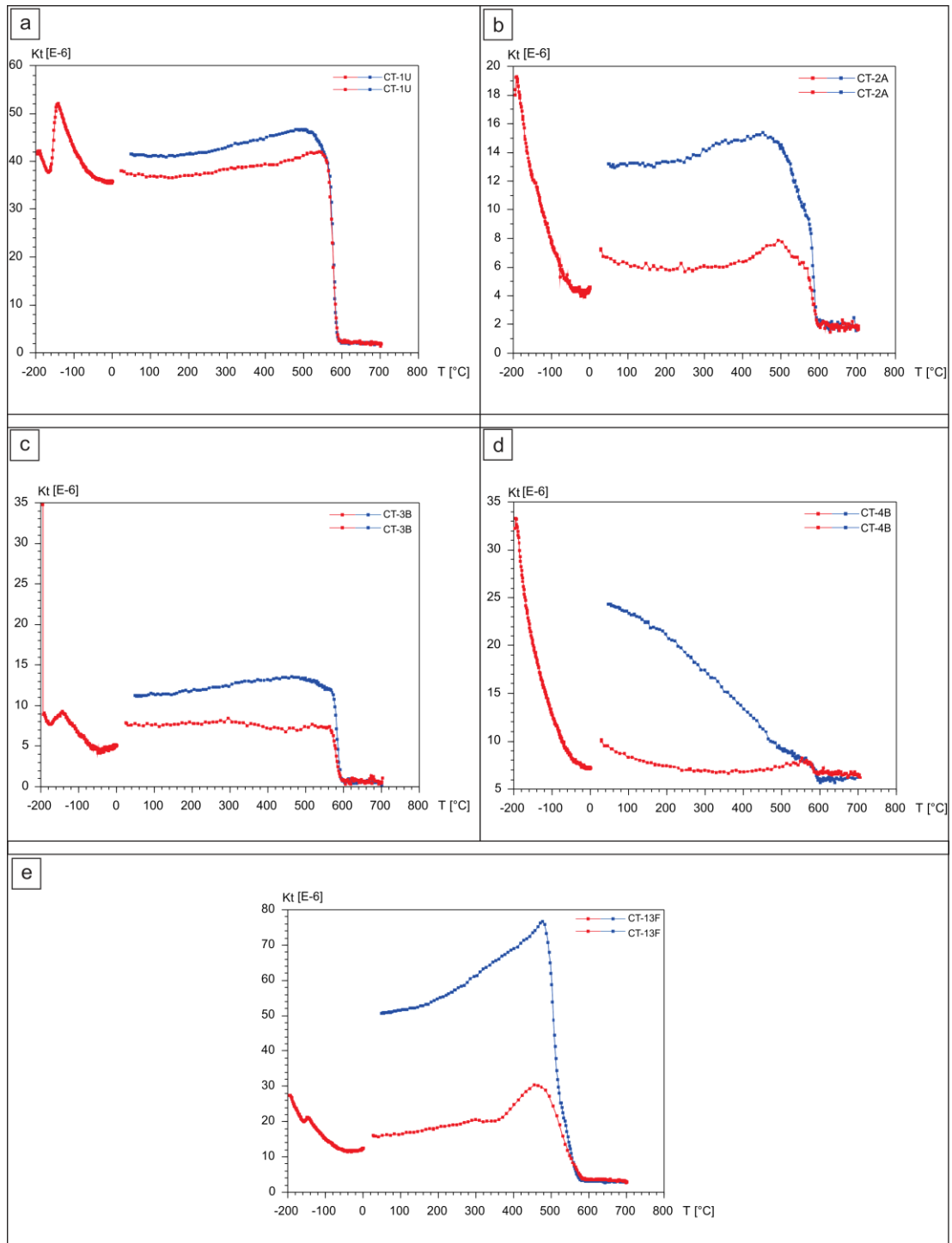


Figura 5.8: Curvas termomagnéticas de amostras representativas dos diques compostos, afloramento PB-198 e dique básico isolado, afloramento PB-147. Susceptibilidade total do espécime (kt E-6) versus temperatura (T°C).

5.2. Trama Magnética – Dados direcionais

5.2.1. Enseada dos Zimbros

PB-139

Neste afloramento (CT-15) o eixo magnético k_1 está bem agrupado quando comparado aos eixos magnéticos k_2 e k_3 , os quais encontram-se dispersos. O eixo k_1 tem baixo caimento e o eixo k_2 , apesar de disperso, apresenta um pequeno agrupamento bem próximo ao centro do estereograma, assim é possível observar que há uma relação entre k_1 e k_2 , que demonstra que o plano da foliação neste dique tem direção NE-SW e um alto ângulo de mergulho. O eixo magnético k_3 constitui um pequeno agrupamento na borda NW do estereograma (Figura 5.9).

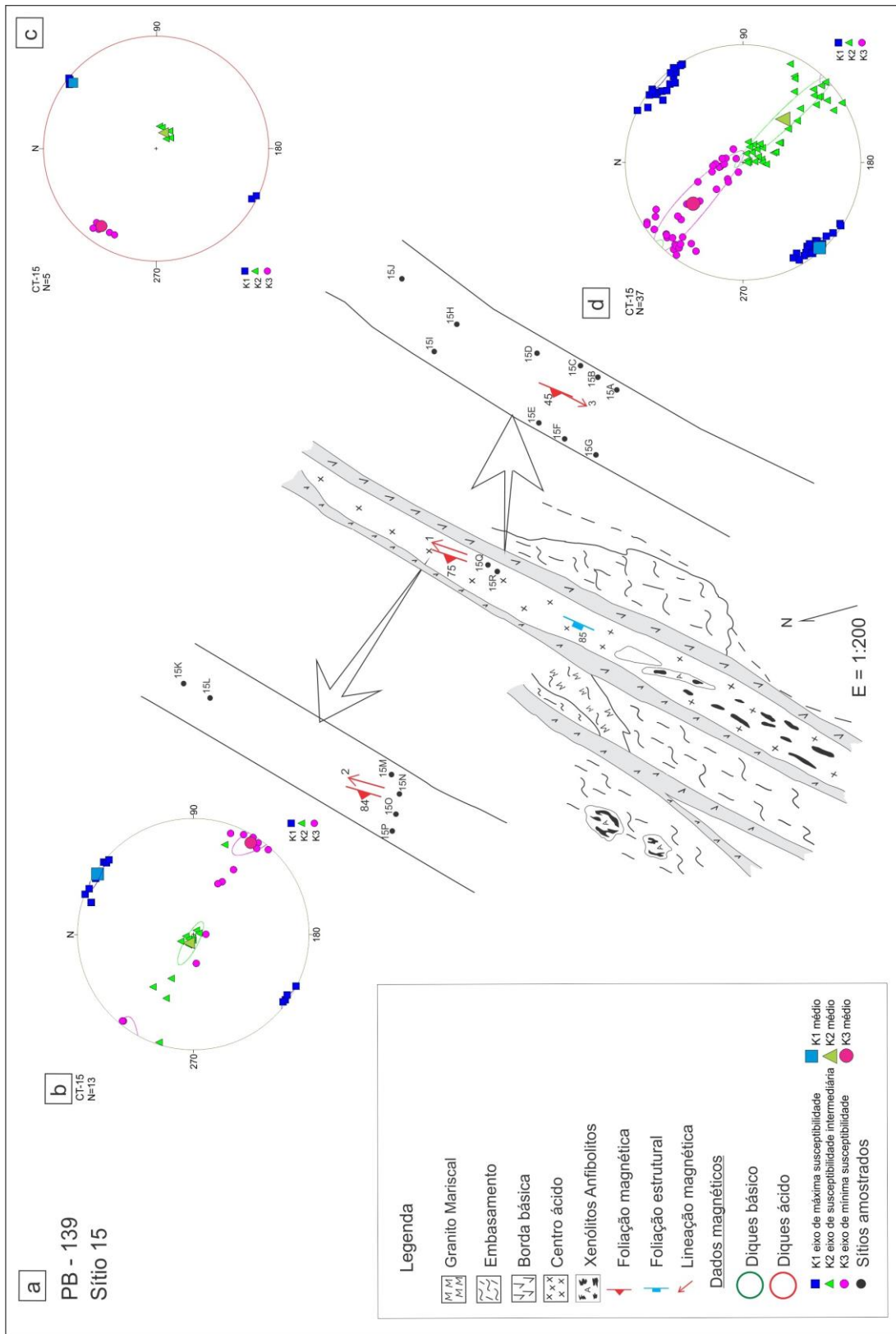


Figura 5.9: a) Croqui do afloramento PB-139 com dados de foliações e lineações magnéticas e estruturais. Elementos magnéticos do sítio (estereograma equiárea hemisfério inferior) CT-15 (b), (c) e (d).

PB-288

Nos sítios CT-5, CT-7, CT- 8 e CT-9 os eixos magnéticos k_1 estão bem agrupados e tem um baixo caimento. A foliação magnética, dada pelo alinhamento de k_1 e k_2 , tem direção NE-SW. Os eixos magnéticos k_2 desses sítios encontram-se bem agrupados no centro ou bem próximo ao centro do estereograma, assim como os eixos k_3 , que estão todos agrupados. No entanto, no sitio CT-6 os eixos encontram-se todos dispersos ao longo do estereograma, com destaque para um pequeno agrupamento de k_1 , onde é possível observar um baixo caimento (Figura 5.10).

Embora os eixos k_2 e k_3 estejam muito dispersos, pode-se inferir que há um agrupamento discreto desses eixos e, assim como nos outros sítios desse afloramento, afirmar que a direção dada por k_1 e k_2 tem orientação NE-SW.

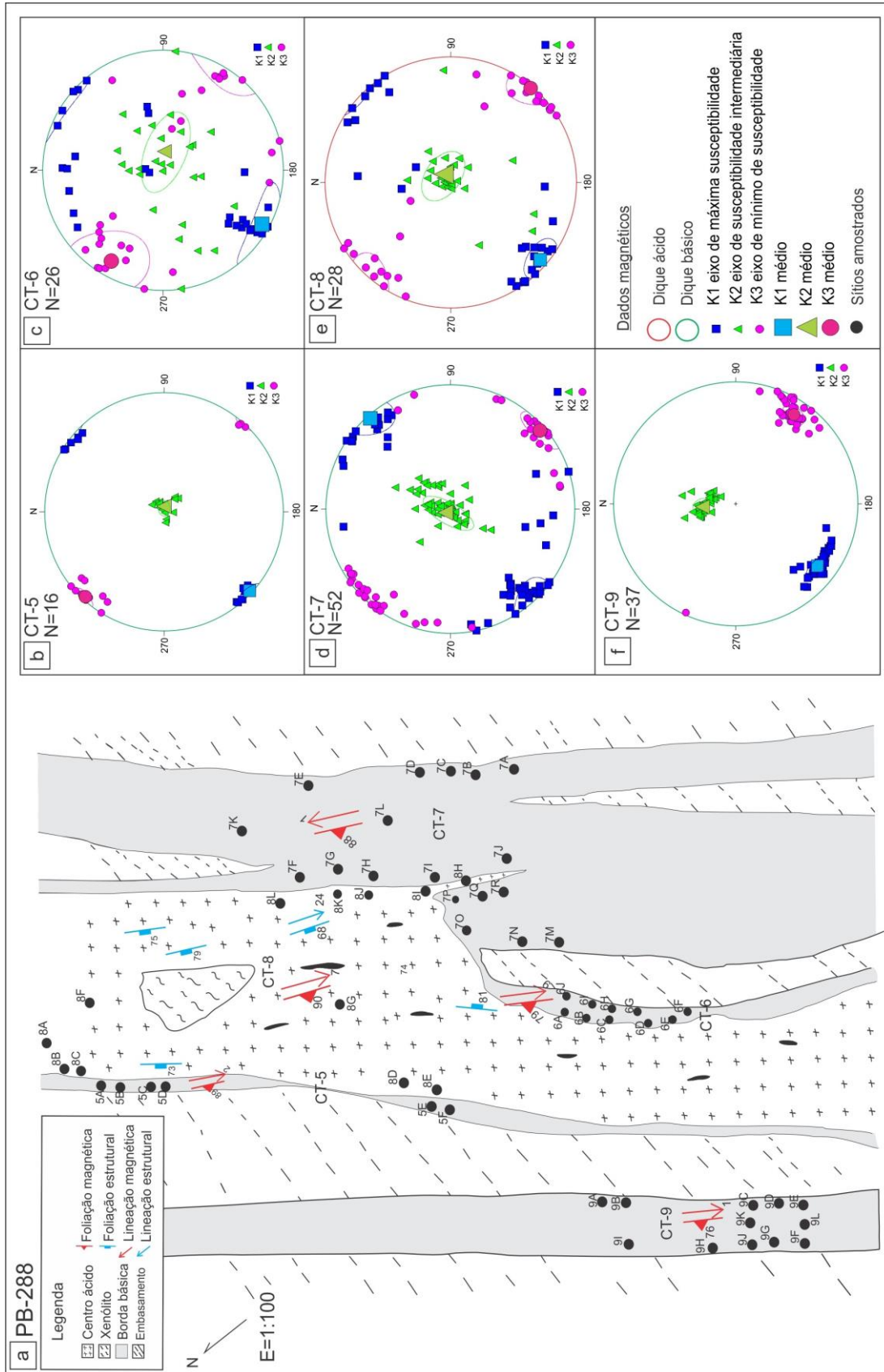


Figura 5.10: a) Croqui do afloramento PB-288 com dados de foliações e lineações magnéticas e estruturais. Elementos magnéticos dos sítios (estereograma equiárea hemisfério inferior): b) CT-5; c) CT-6; d) CT-7; e) CT-8 e f) CT-9.

PB-198

Todos os sítios neste ponto apresentam, de um modo geral, o mesmo padrão. O eixo k_1 está bem agrupado na direção NE-SW e com baixo caimento. O eixo k_2 está agrupado na região central do estereograma e o plano formado por k_1 e k_2 tem direção NE-SW e alto ângulo de mergulho. O eixo k_3 tem certo agrupamento na região periférica e tem direção NW-SE (Figura 5.11). Nos sítios CT-1 e CT-3 pode ser observada uma pequena dispersão dos pontos.

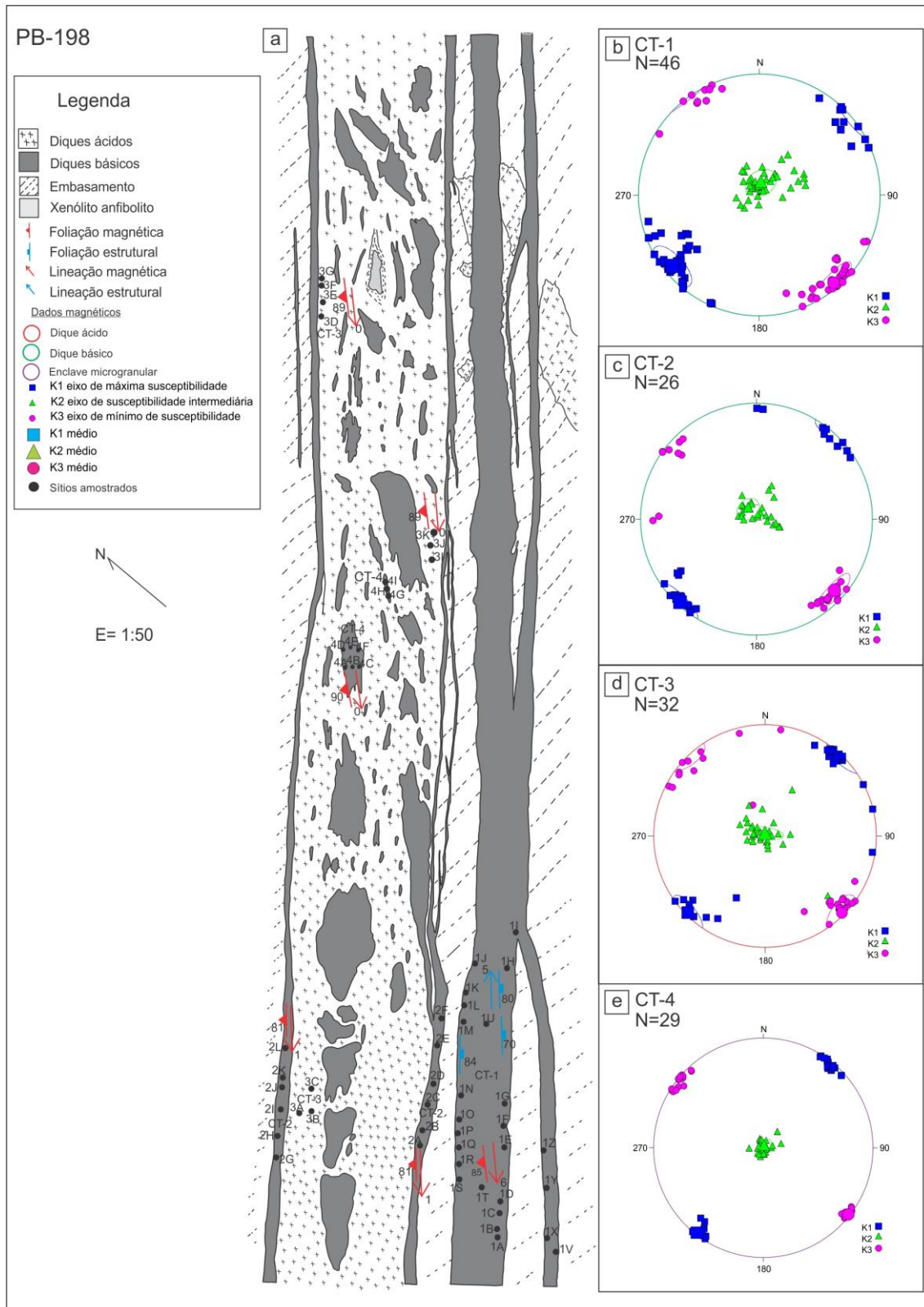


Figura 5.11: a) Croqui do afloramento PB-198 com dados de foliações e lineações magnéticas e estruturais. Elementos magnéticos dos sítios (estereograma equiárea hemisfério inferior): b) CT-1; c) CT-2; d) CT- 3; e) CT-4.

PB-197-1

Nos sítios CT-10 e CT-11 os eixos magnéticos k_1 , k_2 e k_3 estão bem agrupados. O eixo k_1 possui baixo caimento e seu alinhamento com k_2 , cujo agrupamento encontra-se no centro do estereograma, mostra que a direção para estes diques é concordante em NE-SW, com mergulho de alto ângulo. Em contrapartida, o sítio CT-12 não possui padrão bem definido dos eixos magnéticos agrupamento encontra-se no centro do estereograma, mostra que a direção para estes diques é concordante em NE-SW, com mergulho de alto ângulo. Em contrapartida, o sítio CT-12 não possui padrão bem definido dos eixos magnéticos que estão, em geral, dispersos ao longo da rede estereográfica. Neste sítio é possível observar um discreto agrupamento de k_1 , k_2 e k_3 , e, como nos demais sítios, este tem direção NE-SW, com mergulho de alto ângulo e com um baixo caimento de k_1 (Figura 5.12).

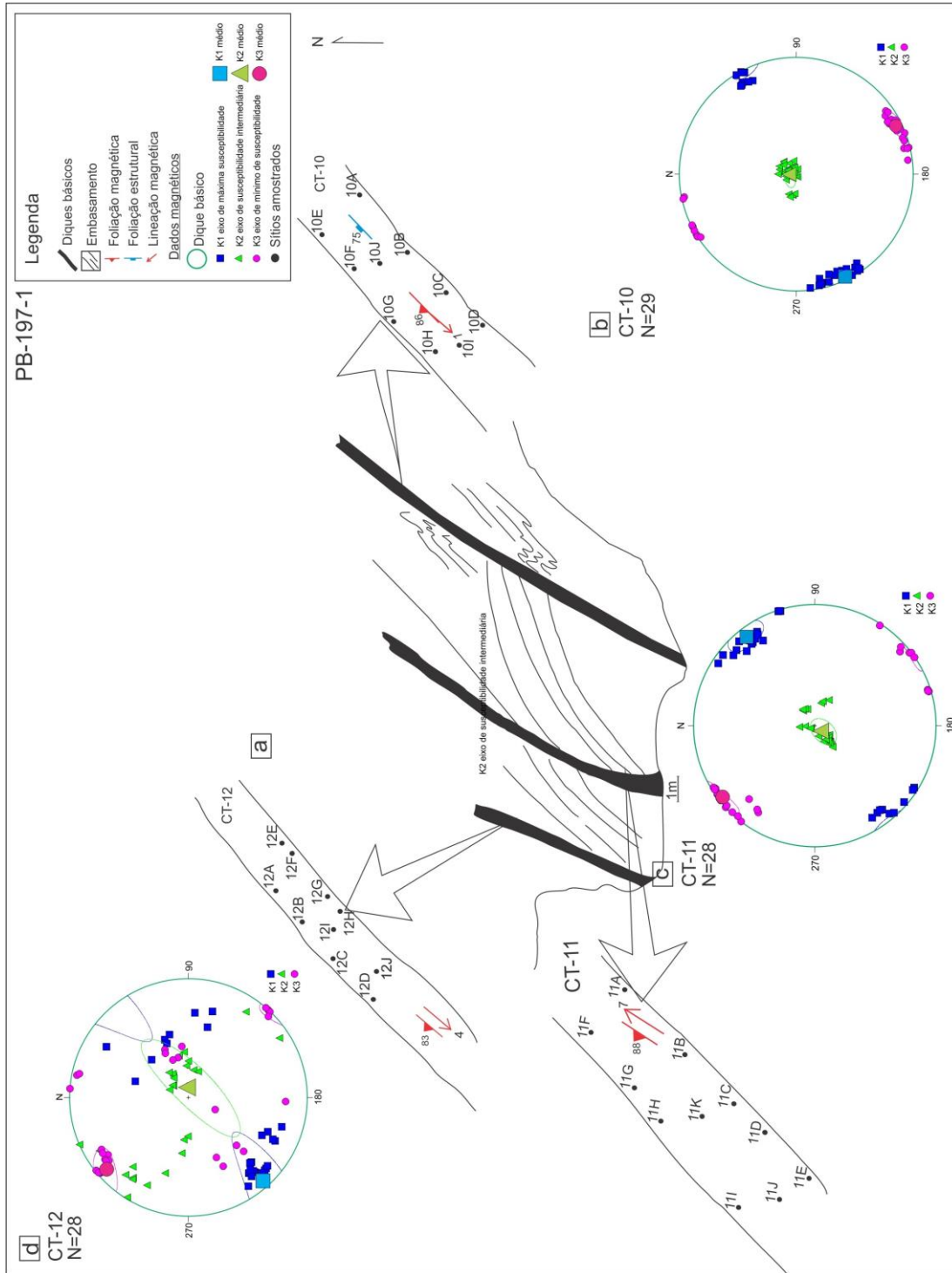


Figura 5.12: a) Croqui do afloramento PB-197-1 com dados de foliações e lineações magnéticas e estruturais. Elementos magnéticos dos sítios (estereograma equiárea hemisfério inferior): b) CT-10; c) CT-11 e d) CT- 12.

5.2.2. Praia de Mariscal

PB-56

Neste sítio o eixo magnético k_1 é, de maneira geral, bem agrupado, à exceção de alguns pontos que estão dispersos em torno do agrupamento principal, e tem direção NE-SW com baixo ângulo de caimento, k_2 tem um agrupamento discreto de pontos na região central, enquanto o eixo k_3 forma um pequeno agrupamento na região periférica SE-NW do estereograma (Figura 5.13).

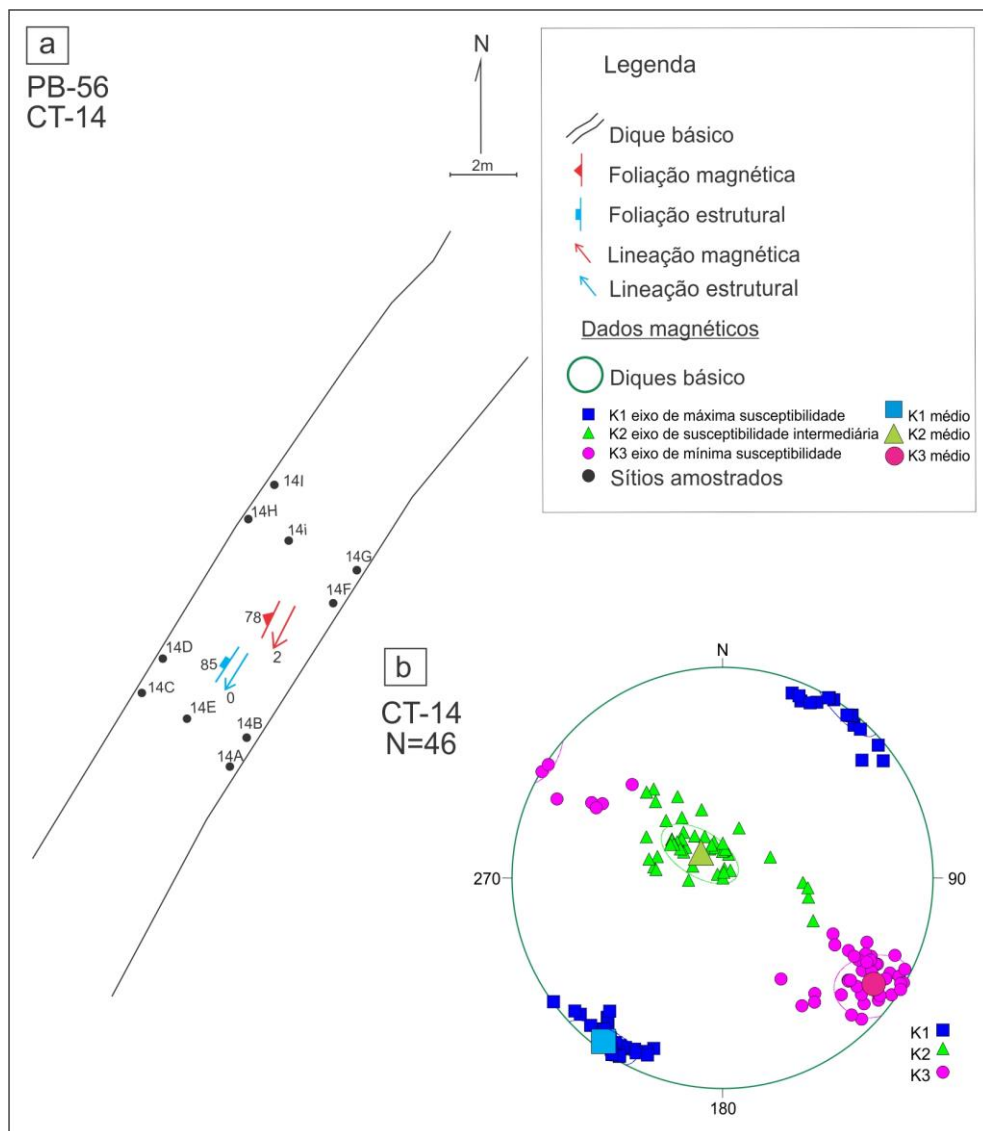


Figura 5.13: a) Croqui do afloramento PB-56 com dados de foliações e lineações magnéticas e estruturais. Elementos magnéticos do sítio (estereograma equiárea hemisfério inferior) (b) CT-14.

5.2.3. Praia Retiro dos Padres

PB-147

O eixo magnético k_1 é bem definido, com um forte agrupamento no quadrante SW. O eixo k_2 é pouco agrupado e está distribuído nas bordas NW-SE do estereograma, enquanto k_3 está distribuído na porção central, também com um agrupamento muito discreto dos pontos. É possível observar que k_2 e k_3 se interpolam, constituindo uma guirlanda (Figura 5.14).

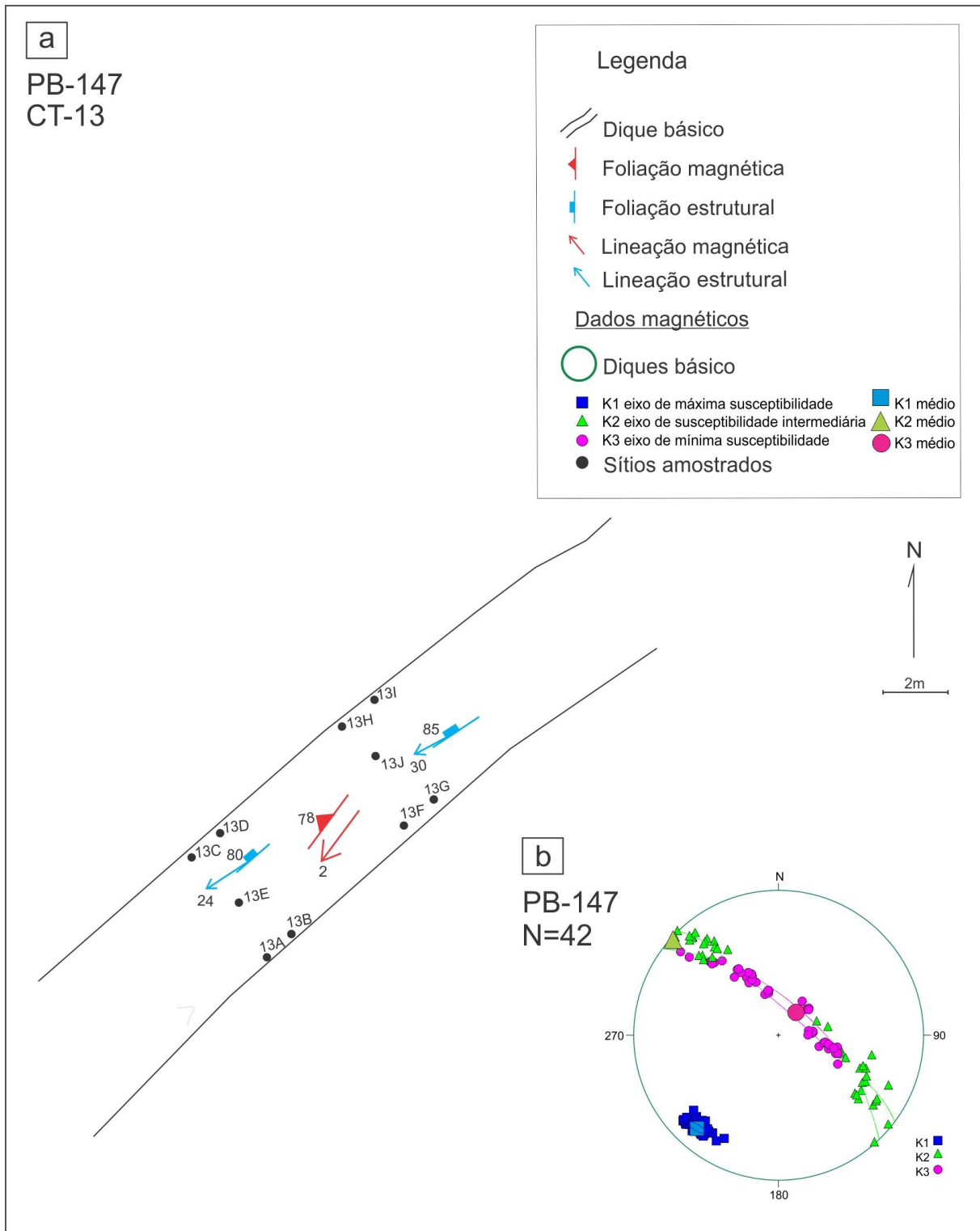


Figura 5.14: a) Croqui do afloramento PB-147 com dados de foliações e lineações magnéticas e estruturais. Elementos magnéticos do sítio (estereograma equiárea hemisfério inferior) (b) CT-13.

6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1. Mineralogia Magnética – Dados escalares

Susceptibilidade Magnética

A susceptibilidade Magnética média nos diques compostos, assim como nos diques básicos próximos à intrusão composta e mesmo nos diques básicos isolados, pode ser dividida em duas populações (Tabela 5.1). A primeira população tem valores de k_m da ordem de 10^{-3} (SI) indicativa de uma forte contribuição dos minerais ferromagnéticos nos diques básicos isolados, assim como nas bordas básicas dos Diques Compostos (Archanjo & Bouchez, 1994; Cañón-Tapia, 2004). A segunda população é registrada, principalmente, nas porções félsicas dos Diques Compostos, onde os valores de k_m são da ordem de 10^{-4} (SI), indicando que há uma contribuição paramagnética (Archanjo, 2003). A contribuição de minerais ferromagnéticos nas porções máficas, embora forte, foi menor do que a esperada. Algumas intrusões máficas registram valores da ordem de 10^{-4} (SI), demonstrando que em alguns corpos a susceptibilidade tem contribuição paramagnética.

Grau de anisotropia (P)

O grau de anisotropia (P) das amostras estudadas tem um valor médio de 1,062, similar aos valores reportados para diques básicos (Raposo & D'Agrella-Filho, 2000). A anisotropia e a susceptibilidade tendem a ser maiores onde os máficos são mais abundantes. Quando comparados os valores de anisotropia e susceptibilidade magnética média (k_m) é possível observar que, em quase todos os casos, o grau de anisotropia aumenta com o aumento progressivo da susceptibilidade (Figura 6.1). Essa correlação entre o grau de anisotropia e

magnitude da susceptibilidade é comumente observada em rochas plutônicas ricas em minerais ferromagnéticos (Ferré *et al.*, 1997; Bouchez, 2000).

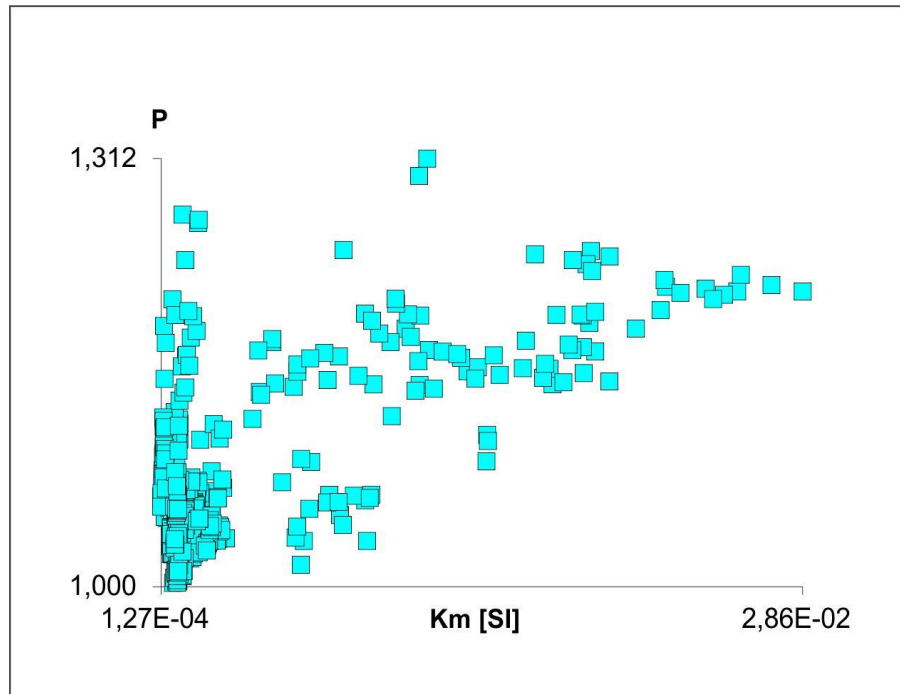


Figura 6.1: Grau de anisotropia (P) de todos os sítios de amostragem *versus* susceptibilidade magnética total (Km).

Parâmetro de forma (T)

A relação entre o parâmetro de forma (T) e o grau de anisotropia (P) mostra que os sítios equivalentes aos Diques compostos da Enseada dos Zimbros e aos Diques Básicos Isolados apresentam elipsoides oblatos e prolatos (Figura 6.2) mas de maneira global, há uma maior ocorrência dos elipsoides oblatos.

Ao analisar individualmente os diques compostos com seus respectivos sítios, foi possível individualizar a distribuição dos elipsoides ao longo dessas intrusões compostas. O afloramento PB-198 (Figura 5.11) mostra um predomínio de elipsoides oblatos ao longo do corpo. A borda básica SE é constituída por um elipsoide oblato, caracterizando um achatamento, enquanto que a borda básica NW é constituída por um elipsoide prolato, em ambas, a espessura dos diques é pequena. O dique básico isolado associado ao corpo principal é constituído por um elipsoide oblato, e o centro ácido têm elipsoides tanto oblatos quanto prolatos, com uma sutil predominância de elipsoides oblatos (Figura 5.3). No afloramento PB-288

(Figura 5.10), a borda básica SE do corpo principal é constituída por um elipsoide oblato ao passo que a borda NW constitui-se por um elipsoide prolato. Na porção central ácida o elipsoide é triaxial à oblato, e o dique básico isolado associado a intrusão principal é constituído por um elipsoide prolato (Figura 5.2).

Alguns autores (Knight & Walker, 1988; Féménias *et al.*, 2004) relatam que elipsoides prolatos são teoricamente, representativos das bordas (paredes) de uma intrusão e que constituem uma imbricação, a qual pode estar associada à velocidade de fluxo, que é maior nas bordas. Em contraponto, elipsoides oblatos seriam representativos do centro de um dique, onde a velocidade do fluxo é menor. Conforme (Féménias *et al.*, 2004) valores mais altos do grau de anisotropia (P) são esperados nas paredes das intrusões o que estaria correlacionado com a ocorrência de alipsoides prolatos, enquanto que valores mais baixos de P , comumente esperados para os centros dos corpos, estariam relacionados à elipsoides oblatos.

A partir dessas observações é possível afirmar que, diferente do que é citado na literatura para diques teóricos, nos Diques Compostos da Enseada dos Zimbros, essa suposição não se aplica tendo em vista que a distribuição global dos elipsoides oblata (achatada), indicativa de que estes corpos se alojam de forma tabular.

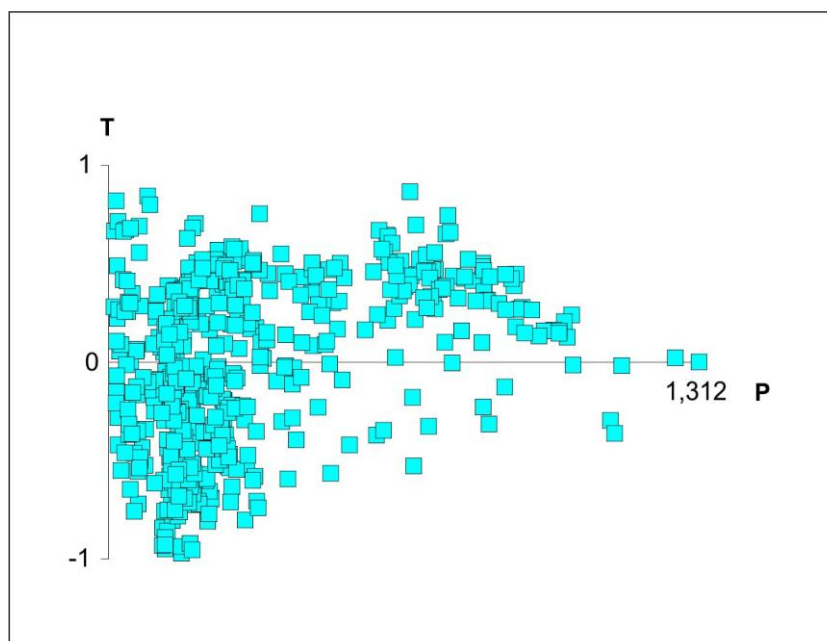


Figura 6.2: Parâmetro de forma (T) de todos os sítios de amostragem *versus* grau de anisotropia (P).

Curvas de histerese

As curvas de histerese obtidas para os diques são representada na (Figura 5.7) e podem ser, claramente, divididas em dois grupos. O primeiro grupo, caracterizado por uma cintura estreita próximo a origem, registra um comportamento conhecido como *Wasp-Waisted*. Esse parâmetro de histerese permite inferir que há uma coexistência de baixa (e.g., magnetita) e alta coercividade (e.g., hematita) (Roberts *et al.*, 1995; Tauxe *et al.*, 1996). O segundo grupo é caracterizado por curvas de histerese com cinturas muito estreitas próximo a origem, classificado como *Single-Domain*, representa uma baixa coercividade, o que permite inferir que o mineral magnético relacionado é a magnetita (Tauxe *et al.*, 1996).

Curvas termomagnéticas

As curvas termomagnéticas apresentadas na Figura 5.8 mostram dois comportamentos dominantes, que incluem curvas termomagnéticas reversíveis e curvas irreversíveis. As curvas obtidas em altas temperaturas mostram a presença do pico de *Hopkinson* e quedas de susceptibilidade em torno de 580°C. A transição da fase magnética em 580°C é característica da magnetita (Butler, 1992; Dunlop & Ozdemir, 1997). A presença do pico de *Hopkinson* em torno de 550°C indica a presença de titanomagnetita pobre em Ti. Para as curvas de baixa temperatura, as amostras registram um pico de susceptibilidade em aproximadamente -150°C, conhecido como transição de Verwey (Verwey, 1939), registrando a presença de titanomagnetita pobre em Ti.

Os resultados obtidos na análise das curvas de histerese e nas curvas termomagnéticas para os diques compostos e diques básicos isolados, permitem afirmar que os portadores magnéticos de anisotropia nessas intrusões são a magnetita e a titanomagnetita pobre em Ti.

6.2. Trama Magnética – Dados direcionais

6.2.1. Trama Planar

Comparando-se as foliações magnéticas de todos os sítios, é possível observar que em todas as amostras a direção preferencial é NE-SW, com alguns sítios variando para NNE-SSW, com alto ângulo de mergulho. As foliações magnéticas, quando comparadas às foliações estruturais, mostram-se, de maneira geral, concordantes, porém, com pequenas variações (Figuras 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14).

6.2.2. Trama Linear

As lineações magnéticas de todos os sítios quando comparadas entre si, registram, de modo geral, baixo caimento, geralmente menores que 07° , para SW, à exceção dos sítios CT-7 e CT-11, com baixo caimento para NE. As lineações medidas em campo quando comparadas às lineações magnéticas mostram-se, em geral, concordantes em SW, com algumas lineações apontando para NE (Figuras 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14). Essa variação de caimento é comum, tendo em vista que essas linhas são praticamente horizontais. Os dados de trama linear magnética indicam que o fluxo magmático durante o posicionamento foi horizontal, segundo a direção NE-SW.

7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados de mineralogia magnética e trama magnética obtidos neste trabalho possibilitaram caracterizar a susceptibilidade magnética, o grau de anisotropia, o parâmetro de forma e os portadores magnéticos, além da geometria da foliação e lineação magnéticas.

A mineralogia magnética demonstra que a susceptibilidade magnética das porções máficas das intrusões compostas e diques básicos isolados são da ordem de 10^{-3} SI, enquanto que nas porções ácidas é da ordem de 10^{-4} . Essa ordem de valores aponta para uma contribuição dos minerais ferromagnéticos, sobretudo nas porções máficas.

As curvas de histerese são do tipo *Wasp-Waisted* e *Single-Domain* (Roberts *et al.*, 1995; Tauxe *et al.*, 1996) caracterizadas, respectivamente, por uma mistura de minerais de baixa (magnetita) e alta coercividade (hematita), e por uma cintura fina próxima a origem (magnetita). As curvas termomagnéticas indicam que os portadores magnéticos são a magnetita, apontada pela transição da fase magnética em 580°C (Figura 5.8 a, c) (Butler, 1992; Dunlop & Ozdemir, 1997), e a titanomagnetita pobre em Ti, evidenciada pelo pico de *Hopkinson* em torno de 550°C a altas temperaturas, e em baixas temperaturas, por picos de susceptibilidade em torno de -150°C (transição de *Verwey*).

Os resultados de ASM dos dados de parâmetro de forma (T), apontam para elipsoides tanto oblatos quanto prolatos. No entanto, embora sua distribuição não apresente diferenças significativas, os elipsoides oblatos são sutilmente predominantes, atestando que essas intrusões são caracterizadas por uma trama preferencialmente planar. Nos diques da Enseada dos Zimbros, os dados apontam uma componente coaxial em enclaves e em alguns diques isolados. Esta

componente, não identificada nas demais localidades estudadas, é indicada pela perpendicularidade entre os eixos de ASM (Borradaile & Henry, 1997).

A trama magnética obtida nas porções básicas e ácidas das intrusões compostas, bem como dos diques básicos isolados próximos aos compostos e dos diques básicos mais afastados do enxame principal, é concordante. Possui direção NE-SW com alto ângulo de mergulho e lineações de baixo caimento, as quais indicam que o fluxo desses diques tem a mesma direção.

Analisando os dados de ASM e os dados estruturais dos diques compostos e isolados da Enseada dos Zimbros, é possível estabelecer uma relação entre as tramas magnéticas e estruturais e a cinemática regional. Os dados das foliações, tanto estruturais quanto magnética, têm direção NE-SW, e ambos contêm lineações de baixo caimento, indicando que o posicionamento dos magmas foi controlado pela cinemática transcorrente regional da Zona de Cisalhamento Major Gercino.

Trabalhos futuros visando o refinamento dos dados de ASM, como por exemplo estudos de Magnetização Remanente Isotermal (MRI), Anisotropia de Remanência Magnética (ARM) e estudos de Magnetização Remanente Natural (MRN), permitirão um detalhamento da colocação dos Diques Compostos da Enseada dos Zimbros e demais diques da região de Porto Belo-Bombinhas/SC em relação à Zona de Cisalhamento Major Gercino. Além disso, o estudo poderá fornecer dados que permitam determinar o polo paleomagnético da época do posicionamento dessas intrusões.

REFERÊNCIAS

- AGICO. 2014. *Manual AGICO. Company, Advanced Geoscience Instruments*. Advanced Geoscience Instruments Company, Disponível em: <http://www.agico.com>, Acesso em: 20 nov. 2014.
- Almeida, F. F. M., Hasui, Y., Brito Neves, B. B., & Fuck, R. . A. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, Campina Grande.
- Archanjo, C. J. 2003. *Anisotropia de suscetibilidade magnética aplicada às rochas ígneas máficas intrusivas*. 79 p. Tese de Tese de livre docência. IGc – Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Archanjo, C. J., & Bouchez, J. L. 1994. The Pombal granite pluton: magnetic fabric, emplacement and relationships with the Brasiliano strike-slip setting of NE Brazil (Paraíba State). *Journal of Structural Geology*, 16(3).
- Bitencourt, M. F. 1996. *Granitóides sintectônicos da região de Porto Belo, SC: uma abordagem petrológica e estrutural do magmatismo em zonas de cisalhamento*. 310 p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Bitencourt, M. F., Hackspacher, P. C., & Nardi, L. V. S. 1989. A Zona de Cisalhamento Major Gersino - SC. *Atas II, Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, 214–216.
- Bitencourt, M. F., Hackspacher, P. C., & Nardi, L. V. S. 1995. Análise cinemática dos Diques Compostos da Enseada dos Zimbros (SC) com base na

- deformação de enclaves máficos. *V Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, 178–181.
- Bitencourt, M. F., & Nardi, L. V. S. 1993. Late- to Post- collisional Brasiliano Magmatism in Southernmost Brazil. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 65 (1), 3–16.
- Bitencourt, M. F., Nardi, L. V. S., & Hackspacher, P. C. 1989. Diques Compostos da Enseada dos Zimbros, Região de Porto Belo, SC. *CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, Rio de Janeiro, 177–181.
- Borradaile, G. J., & Henry, B. 1997. Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy. *Earth-Science Reviews*, 42(1-2): 49–93.
- Borradaile, G. J., & Jackson, M. 2010. Structural geology, petrofabrics and magnetic fabrics (AMS, AARM, AIRM). *Journal of Structural Geology*, 32(10): 1519–1551.
- Bouchez, J. L. 2000. Anisotropie de susceptibilité magnétique et fabrique des granites. *Comptes Rendus de L'académie Des Sciences de Paris*, 330: 1–14.
- Butler, R. F. 1992. *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Blackwell Scientific Publications.
- Cañón-Tapia, E. 2004. ASM of lava flows and dykes a historial account. *Geological Society, London, Special Publications*, 238; 205–225.
- Chemale, F., Hartmann, L. A., & Silva, L. C. 1995. Stratigraphy and tectonism of the Precambrian and Early Paleozoic units in southern Brazil and Uruguay. *Excursion Guidebook. Acta Geol. Leop.*, 42: 5–117.
- Chemale, F., Mallmann, G., Bitencourt, M. D. F., & Kawashita, K. 2012. Time constraints on magmatism along the Major Gercino Shear Zone, southern Brazil: Implications for West Gondwana reconstruction. *Gondwana Research*, 22(1): 184–199.

- Dunlop, D. J., & Ozdemir, O. 1997. *Rock Magnetism: Fundamental and frontiers* (p.573p). Cambridge University Press.
- Féménias, O., Diot, H., Berza, T., Gauffriau, A., & Demaiffe, D. 2004. Asymmetrical to symmetrical magnetic fabric of dikes: Paleo-flow orientations and Paleo-stresses recorded on feeder-bodies from the Motru Dike Swarm (Romania). *Journal of Structural Geology*, 26(8): 1401–1418.
- Ferré, E. C., Gébelin, A., Till, J. L., Sassier, C., & Burmeister, K. C. 2014. Deformation and magnetic fabrics in ductile shear zones: A review. *Tectonophysics*, 629: 179–188.
- Ferré, E. C., Gleizes, G., Djouadi, M. T., & Bouchez, J. L. 1997. Drainage and emplacement of magmas along an inclined transcurrent shear zone: petrophysical evidence from a granite–charnockite pluton (Rahama, Nigeria). In J. L. Bouchez, W. E. S. Stephens, & D. H. W. Hutton (Eds.), *Granites: From Magma Segregation to Emplacement Fabrics*. Kluwer Academic Publishers, p. 253–273.
- Florisbal, L. M. 2011. *Petrogênese de Granitos Sintectônicos em Ambiente Pós-colisional do Escudo Catarinense: Estudo Integrado de Geologia Estrutural, Geoquímica Elemental e Isotópica Sr-Nd-Pb e Geocronologia U-Pb em Zircão*. Porto Alegre, 285p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Florisbal, L. M., Bitencourt, M. D. F., Janasi, V. D. A., Nardi, L. V. S., & Heaman, L. M. 2012 b. Petrogenesis of syntectonic granites emplaced at the transition from thrusting to transcurrent tectonics in post-collisional setting: Whole-rock and Sr–Nd–Pb isotope geochemistry in the Neoproterozoic Quatro Ilhas and Mariscal Granites, Southern Brazil. *Lithos*, 153: 53–71.
- Florisbal, L. M., de Assis Janasi, V., de Fátima Bitencourt, M., & Heaman, L. M. 2012 a. Space–time relation of post-collisional granitic magmatism in Santa Catarina, southern Brazil: U–Pb LA-MC-ICP-MS zircon geochronology of

- coeval mafic–felsic magmatism related to the Major Gercino Shear Zone. *Precambrian Research*, 216-219: 132–151.
- Graham, J. W. 1954. Magnetic susceptibility anisotropy, an unexploited petrofabric element. *Geological Society of America Bulletin*, 75: 1257–1258.
- Jackson, M. 1991. Anisotropy of magnetic remanence: a brief review of mineralogical sources, physical origins and geological applications. *Pure and Applied Geophysics*, 136, 1–28.
- Jelinek, V. 1977. *The Statistical Theory fo Measuring Anisotripy of Magnetic Susceptibility of Rocks and its application*. Geofyzika Brno.
- Knight, M. D., & Walker, G. P. L. 1988. Magma flow directions in dikes of the Koolau Complex, Oahu, determined from magnetic fabric studies. *Journal of Geophysical Research*, 93: 4301–4319.
- Lanza, R., & Melani, A. 2006. *The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists*. Berlin, Springer-Verlag, 278 p.
- Nye, F. J. 1957. *Physical properties of crystals*. New York, Oxford University Press.
- Raposo, M. I. B., & D'Agrella-Filho, M. S. 2000. Magnetic fabrics of dyke swarms from SE Bahia State, Brazil: their significance and implications for Mesoproterozoic basic magmatism in the São Francisco Craton. *Precambrian Research*, 99: 309–325.
- Roberts, A. P., Cui, Y., & Varosub, K. L. 1995. Wasp-waisted hysteresis loops: Mineral magnetic characteristics and discrimination of components in mixed magnetic systems. *Journal Geophysics Research*, 100: 17,909–17,924.
- Sbaraini, S. 2012. *Dados de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética na Modelagem Trimensional do Maciço Sienítico Piquiri*. Porto Alegre, 65p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

-
- Tarling, D. H., & Hrouda, F. 1993. *The magnetic anisotropy of rocks*. London, Chapman & Hall.
- Tauxe, L., Mullender, T. A. T., & Pick, T. 1996. Potbellies, wasp-waists and superparamagnetism in magnetic hysteresis. *Journal Geophysics Research*, 101: 571–583.
- Verwey, E. J. W. 1939. Electronic conduction of magnetite (Fe₃O₄) and its transition point at low temperatures. *Nature*, 144: 327–328.