



**CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA E ESTRUTURAL DO GRANITO BUTIÁ,
ENCRUZILHADA DO SUL, RS**

Porto Alegre, 2016

DIEGO DA SILVEIRA LYRA

**CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA E ESTRUTURAL DO GRANITO BUTIÁ,
ENCRUZILHADA DO SUL, RS**

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 em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Jairo Francisco Savian

Supervisora: Prof. Dr^a Maria de Fátima Bitencourt

Porto Alegre, 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Jane Tutikian

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Lyra, Diego da Silveira

Caracterização magnética e estrutural do Granito Butiá,
Encruzilhada do Sul, RS . / Diego da Silveira Lyra. - Porto Alegre:
IGEO/UFRGS, 2016.
[82 f.] il.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso).- Universidade
Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de
Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2016.

Orientador(es):Jairo Francisco Savian

Coorientador(es):Maria de Fátima Bitencourt

1. Anisotropia de susceptibilidade magnética 2. Granito Butiá 3.
Leucogranito paramagnético 4. Posicionamento em regime
transcorrente I. Título.

CDU 55

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Sibila F. T. Binotto

CRB 10/1743

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL INSTITUTO DE
GEOCIÊNCIAS DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA CURSO DE GRADUAÇÃO EM
GEOLOGIA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA E ESTRUTURAL DO GRANITO BUTIÁ, ENCRUZILHADA DO SUL, RS”, elaborado por Diego da Silveira Lyra, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Jair Weschenfelder

Prof. Dr.^a Maria Luiza C. da Rosa

Prof. Dr. Léo Afraneo Hartmann

*"Pedras no caminho?
Guardo todas, um dia vou
construir um castelo..."*

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram de alguma forma durante a minha breve caminhada na geologia.

Primeiro, aos meus pais, que sempre batalharam pela minha formação e me proporcionaram as condições necessárias para que eu pudesse estudar.

Aos meus amigos de longa data que ainda se fazem presente, em especial, Bruno, Chico, Jonas (Aum), "gurizada do prédio", também!

Aos colegas e amigos que a geologia me deu, são varios...Barra10 sempre eterna! Nessa reta final, Pedrinho, colega de bolsa, valeu pela parceira nesses últimos meses, aquele Xis merecido depois de virar o dia no Vale não tem preço...

Aos professores, pelo conhecimento passado. Daqueles que ficaram para trás, em especial agradeço a Karin Goldberg, pela troca, pelos campos, pelo tratamento de quase "mãe" que teve comigo, e sei que tem com muitos.

Pessoal do grupo de pesquisa Magmatismo Sintectônico, por todo conhecimento trocado, por todo aprendizado que eu tive com vocês (e ainda terei) e pela parceria em diversos momentos geológicos e não geológicos. Estão no meu coração! Em especial, aos colegas que contribuíram diretamente neste trabalho durante os campos, Camila e Gepeto, muito obrigado! E Pépe, parceria do campo mais cheio de emoções....nunca mais perguntaremos ao destino "E agora, o que mais pode acontecer?!"

Ao pessoal do Laboratório de Paleomagnetismo do IAG/USP e ao prof. Ricardo Trindade, obrigado por me receberem tão bem, pela atenção, e pelo tratamento que tiveram comigo. Agradeço também aos amigos Renato e Pará por me receberem em São Paulo!

Aos meus orientadores Fátima Bitencourt e Jairo Savian, sem vocês esse trabalho não existiria. Obrigado por trabalharem do meu lado, por me orientarem tão bem como fizeram, por terem me ensinado tanta coisa nesses últimos tempos. E além de tudo, pelo tratamento pessoal que têm comigo, grandes pessoas!

À minha namorada, Fran, por andar ao meu lado, pelo apoio (quase incondicional), pela parceria e companheirismo, por tudo que há de bom, sou grato a ti, por fazeres parte da minha vida. E obrigado por entender minha "semi-ausência" nesses últimos dias. E também muito importante, por ter me ajudado nessa finaleira, com a organização do trabalho, algumas figuras, etc..Valeu gatinha!

Ao ensino público, às agências de fomento à pesquisa. Por último, a quem estiver lendo esse trabalho. Espero que ele possa contribuir de alguma forma.

RESUMO

O Granito Butiá (GB) é um sillimanita-biotita leucogranito peraluminoso situado na porção centro-norte do Escudo Sul-rio-grandense. É um corpo alongado na direção NNW-SSE, encaixado em orto- e paragneisses de fácies granulito e em sienitos sintectônicos do Complexo Várzea do Capivarita. É intrudido pelas rochas do Maciço Sienítico Piquiri. Possui foliação magmática com mergulhos de alto ângulo para WSW ou ENE, concordante com a de suas encaixantes. Localmente, apresenta foliação milonítica e foliação S-C de cinemática dextral. Nas bordas, apresenta textura equigranular fina e foliação bem desenvolvida, marcada principalmente por biotita e sillimanita. Em direção ao centro do corpo, a granulação varia de média a grossa e a foliação é menos desenvolvida. Raramente se observa lineação mineral. Este trabalho utiliza a anisotropia de susceptibilidade magnética (ASM) como ferramenta para caracterização da trama, principalmente linear, possibilitando um melhor entendimento do posicionamento dessa intrusão. A aquisição dos dados de ASM envolveu a escolha de 14 sítios de amostragem, abrangendo borda e centro do corpo, e resultou em 466 amostras, preparadas utilizando os cilindros coletados em campo. A mineralogia magnética foi investigada pela aquisição de curvas termomagnéticas, histereses, curvas de aquisição da magnetização remanente isotérmica (MRI) e microscopia eletrônica de varredura (MEV-EDS). Os resultados mostram que a mineralogia é quase exclusivamente paramagnética, sendo o principal portador magnético a biotita. Desta forma, a trama magnética é resultado da anisotropia magnetocristalina da biotita e pelo alinhamento de seus cristais na rocha. A deformação no estado sólido de alta temperatura indica que a trama magnética teve origem durante a cristalização do magma e, portanto, os dados direcionais obtidos por ASM são decorrentes do campo tensional durante o posicionamento do GB. Os resultados obtidos mostram que a foliação magnética tem direção NNW-SSE com altos ângulos de mergulho para SW-WSW e a lineação tem caimentos com baixo a moderado ângulo paralela a direção da foliação. O grau de anisotropia (P) mostra que a deformação é maior nas bordas e diminuí em direção ao centro. Esses dados são consistentes com um posicionamento sincrônico à movimentação de uma zona de cisalhamento transcorrente dextral.

Palavras-Chave: Granito Butiá. Anisotropia de Susceptibilidade Magnética. Granito Paramagnético. Posicionamento em regime transcorrente.

ABSTRACT

The Butia Granite (BG) is an elongated NNW-SSE intrusion of foliated sillimanite-muscovite-biotite leucogranite from the north-central Sul-rio-grandense shield, in Southernmost Brazil. The host rocks are ortho and paragneisses (granulite facies) and sintectonic syenites of the Várzea do Capivarita Complex which is intruded by later granitoids of the Piquiri Syenitic Massif. GB magmatic foliation is marked mainly by alignment of biotite with muscovite and sillimanite associated and trends WSW-ENE dipping steeply towards WSW or ENE. On the borders, BG is fine to medium equigranular, magmatic foliation is well developed and locally mylonitic; however, towards the central part of the pluton it comes coarse grained and foliation is less developed. Despite the well-marked foliation, linear fabrics are rarely recognized. A magnetic fabric study was conducted using low-field anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) aiming to characterize GB fabrics (mainly linear fabric). In this study, a total of 466 samples prepared from cylindrical cores drilled at 14 sites throughout the pluton, including center and border. The magnetic mineralogy was analyzed using techniques as thermomagnetic curves, hysteresis loops, isothermal remanent magnetization curves (IRM) and electron microscope microprobe (EMM-EDS). The results show almost exclusively paramagnetic minerals, mainly biotite. The results indicate that magnetic susceptibility is carried almost exclusively by paramagnetic minerals (mainly biotite). Hence, AMS fabric results from the alignment of biotite crystals and its magnetocrystalline anisotropy. Observed high temperature deformation features indicate that magnetic fabric results from magma emplacement, and therefore records its tensional field during crystallization. The results demonstrate triaxial to oblate magnetic ellipsoids which display a reliable magnetic planar and linear fabric. Magnetic foliation trends NE-SW dipping steeply towards SW-WSW and magnetic lineation plunges to NW or SE (parallel to foliation) with shallow to moderate inclination. Anisotropy degree (P) shows that deformation increases from the center towards the borders. These results are consistent with the emplacement of BG during dextral strike-slip regime.

Keywords: Anisotropy magnetic susceptibility (AMS). Paramagnetic leucogranite. Butiá Granite. Strike-slip emplacement.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Mapa de localização geográfica com as rodovias de acesso à área de estudos.20
- Figura 2.** (a) Principais domínios geotectônicos do segmento meridional da Província Mantiqueira (modificado de Nardi & Bitencourt, 2007). (b) Mapa geológico regional com a localização da área de estudos. (modificado de De Toni, 2015).....22
- Figura 3.** (a) Relação intrusiva do GB nos Sienitos Arroio das Palmas do (CVC); (b) Foliação bem desenvolvida e localmente milonítica - borda; (c) Foliação magmática menos desenvolvida – centro; (d) Par de foliação S-C, mostrando cinética dextral.(Fotos do autor).....26
- Figura 4.** Evidências da deformação em alta temperatura encontradas no GB: quartzo com padrão em tabuleiro de xadrez (a), agregados orientados em fita de quartzo e feldspato envoltos por biotita e muscovita (b), mirmequitização (c) e agregado de biotita-muscovita e silimanita deformado em *kink band*.27
- Figura 5.** (a) Imagem de satélite com a localização dos possíveis pontos de amostragem reunidos em plataforma de SIG (ArcGis 10) classificados quanto ao grau de interesse. (b) Mapa de amostragem final, com os 14 sítios de amostragem ao longo do Granito Butiá. Base de dados modificado de UFRGS (2008).31
- Figura 6.** Procedimento de amostragem: (a) perfuração realizada com perfuratriz manual com broca diamantada e sistema de arrefecimento/ lubrificação acoplado; (b) Furos realizados no sitio DL-10, note que cada furo tem uma marcação rente a ele, que serve como referencial; (c) marca de referência (i), orientador com clinômetro e bússola (ii) acoplado e processo de marcação com arame de cobre (iii); (d) orientação de furo cujo cilindro quebrou durante a perfuração; (e) transferindo o referencial geográfico para o cilindro após sua orientação.33
- Figura 7.** Relação entre os eixos de susceptibilidade magnética e o sistema cristalino dos minerais: ortopiroxênio (a), anfibólio (b) e biotita (c). Modificado de Borradaile & Jackson (2004).34
- Figura 8.** (a) Susceptibilímetro MLY-4S (branco) acoplado ao sistema de aquecimento (esq.) e as amostras pulverizadas dentro dos porta-amostras (dir.) ; (b) colocação da amostra dentro do cabeçote para iniciar o ciclo de alta temperatura.36
- Figura 9.** Magnetômetro MicroMag 3900 utilizado para a aquisição de curvas de MRI e histerese. Em detalhe, o sistema do *vibrating sample magnetometer* (VSM). Extraído e modificado do site da empresa *Lake Shore cryotonics*.37
- Figura 10.** Microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo JEOL JSM-6610LV acoplado ao sistema EDS, do Laboratório de Geologia isotópica - UFRGS.38
- Figura 11.** Representação tridimensional do elispoide magnético (a) e seus respectivos eixos de susceptibilidade magnética plotados em estereograma (b). Modificado de Hrouda (2014) *in*: Physical principles of magnetic anisotropy course.40
- Figura 12.** Representação tridimensional de elipsoides com diferentes parâmetros de forma (T), da esquerda para a direita: prolato, triaxial e oblato. Seus eixos de susceptibilidade magnética estão plotados nos respectivos estereogramas. Extraído de Nédélec e Bouchez (2015).41

- Figura 13.** Representação dos elipsoides plotados no diagrama *Jelinek Plot* descreve a forma do elipsoide em função da sua anisotropia. Modificado de Hrouda (2014) *in*: Physical principles of magnetic anisotropy course.....42
- Figura 14.** Preparação de amostras para ASM: corte dos cilindros em espécimes de 22 mm (a e b); marcação dos eixos que serão medidos no equipamento (c); processo de embalagem em filme de PVC para prevenção de contaminação dos espécimes (d). 43
- Figura 15.** Susceptibilímetro Kappabridge MFK1-FA utilizado para a aquisição dos dados de ASM (a) e em detalhe o espécime posicionado no cabeçote do equipamento (b).43
- Figura 16.** Curvas termomagnéticas representativas dos sítios DL-13 (A), DL-08 (B), DL-13 (C) e DL-14 (D). Estão representados os ciclos de aquecimento (vermelho) e resfriamento (azul).45
- Figura 17.** Curvas de aquisição de magnetização remanente isotérmica (MRI) representativas dos sítios DL 11 (A), DL 14 (B), DL 08 e 05 (C), e DL 13 (D). Os formatos das curvas e a não saturação com a aplicação de campo magnético artificial sugerem a presença de minerais paramagnéticos.46
- Figura 18.** Curvas de histereses representativas dos sítios DL 08 (A), DL 11(B), DL 14 (C), e DL 05 (D). O formato das curvas de histerese sugere a presença de um mineral paramagnético, como a biotita, indicado pelo formato linear dos ciclos de histerese (traço em vermelho).47
- Figura 19.** Fotos da lâmina do sítio DL-08: agregado de biotita, muscovita e silimanita marcando o plano da foliação, oblíquo na foto (do topo esquerdo ao canto direito) (a) e detalhe da foto anterior, com cristais de ilmenita alongado segundo o plano da foliação (b) e (c). Legenda: biotita (Bt), silimanita (Sil), muscovita (Ms) ilmenita (Ilm) e feldspato potássico (Kfs).49
- Figura 20.** (A) DL-11: Rutilo cristalizado paralelo à clivagem da biotita, (B) DL-11: Óxido de manganês cristalizado em meio a biotita cloritizada e plagioclásio, (C) DL-14: Pirita preenchendo fraturas que cortam cristais de feldspato potássico e quartzo, e (D) DL-05: óxido de ferro alotriomórfico incluído em plagioclásio e feldspato alcalino. Legenda: biotita (Bt), rutilo (Rt), clorita (Chl), pirita (Py), feldspato potássico (Kfs), quartzo (Qz), plagioclásio (Pl), óxidos de ferro (FeO) e óxidos de manganês (MnO).49
- Figura 21.** Mapa geológico com os sítios amostrados. Base do mapa modificado de UFRGS (2008).50
- Figura 22.** Dados obtidos para o sítio DL-01: (a) grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), (b) parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; (c) eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiárea de Schmidt, hemisfério inferior).....52
- Figura 23.** Dobra em escala de afloramento no sítio DL-02, onde foram amostrados os cilindros D, E e F com a respectiva atitude de foliação medida em campo. Vista em planta.53
- Figura 24.** Dados referentes aos cilindros D, E e F amostrados na dobra do sítio DL-02. (a) Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), (b) Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; (c) Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).54

Figura 25. Espécimes dos cilindros A, B, C, J, K e L do sítio DL-02, onde (a) Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), (b) Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; (c) Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).	55
Figura 26. Dados obtidos para o sítio DL-03: (a) Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), (b) Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; (c) Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).....	56
Figura 27. Dados obtidos para o sítio DL-04: (a) Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), (b) Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; (c) Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).....	57
Figura 28. Dados obtidos para o sítio DL-05: (a) Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), (b) Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; (c) Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).....	58
Figura 29. Dados obtidos para o sítio DL-06: (a) Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), (b) Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; (c) Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).....	59
Figura 30. Dados obtidos para o sítio DL-07: (a) Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), (b) Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; (c) Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).....	60
Figura 31. Dados obtidos para o sítio DL-08: (a) Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), (b) Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; (c) Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).....	61
Figura 32. Dados obtidos para o sítio DL-09: (a) Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), (b) Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; (c) Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).....	62
Figura 33. Dados obtidos para o sítio DL-10: (a) Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), (b) Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; (c) Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).....	63
Figura 34. Dados obtidos para o sítio DL-11: (a) Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), (b) Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; (c) Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).....	64
Figura 35. Dados obtidos para o sítio DL-12: (a) Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), (b) Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; (c) Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).....	65
Figura 36. Dados obtidos para o sítio DL-13: (a) Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), (b) Parâmetro de forma (T) versus grau de	

anisotropia; (c) Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).....66

Figura 37. Dados obtidos para o sítio DL-14: (a) Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), (b) Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; (c) Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).....67

Figura 38. Susceptibilidade magnética total de todos os espécimes medidos ($n=432$).68

Figura 39. Relação os eixos de anisotropia magnética em um cristal de biotita. Modificado de Nédélec & Bouchez (2015).....70

Figura 40. Mapa geológico integrado com os dados de foliação e lineação magnéticas (vermelho), estruturais medidos em campo (preto) e alguns estereogramas mais representativos com os valores médios dos eixos magnéticos, onde K_3 representa o pólo da foliação magnética e K_1 a lineação magnética. Mapa geológico base modificado de UFRGS (2008).71

Figura 41. Mapa da distribuição dos valores do grau de anisotropia (P) e do parâmetro de forma (T) dos elipsoides magnéticos no Granito Butiá, com os respectivos dados direcionais divididos pelo grau de anisotropia (P).....74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros escalares e direcionais dos 14 sítios amostrados ao longo do Granito Butiá.....	51
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GB – Granito Butiá

CVC – Complexo Várzea do Capivarita

SAP – Sienito Arroio das Palmas

MSP – Maciço Sienítico Piquiri

CAR – Complexo Arroio dos Ratos

GE – Granito Encruzilhada

CDF – Cinturão Dom Feliciano

ESRG – Escudo-sul-riograndense

CCSb – Cinturão de Cisalhamento Sul-brasileiro

PM – Província Mantiqueira

ASM – Anisotropia de Susceptibilidade Magnética

MRI – Magnetização remanente isotérmica

H – Campo magnético

H_c - Coercividade

H_{cr} – Coercividade de remanência

H_i – Campo magnético induzido

K – Susceptibilidade magnética

K_1 – Eixo de susceptibilidade magnética máximo

K_2 – Eixo de susceptibilidade magnética intermediário

K_3 – Eixo de susceptibilidade magnética mínimo

K_{ij} – Tensor de susceptibilidade magnética

K_m – Susceptibilidade magnética média

M – Magnetização

M_i – Magnetização induzida

M_s – Magnetização de saturação

M_{rs} – Magnetização remanente de saturação

P – Grau de anisotropia
T – Parâmetro de forma
T_c – Temperatura de Curie

Bt – Biotita
Chl – Clorita
Ilm – Ilmenita
FeO – Óxido de ferro
Kfs – K-Feldspato
MnO - Óxido de manganês
Ms – Muscovita
Pl – Plagioclásio
Py – Pirita
Qtz – Quartzo
Rt – Rutilo
Sil – Silimanita

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Caracterização do problema.....	18
1.2. Premissas	18
1.3. Hipóteses	19
1.4. Objetivos.....	19
1.5. Localização da área de estudos	20
2. CONTEXTO GEOLÓGICO	21
2.1. Geologia Regional.....	21
2.2. Geologia Local	23
2.2.1. Complexo Várzea do Capivarita	23
2.2.2. Granito Butiá.....	24
2.2.3. Maciço Sienítico Piquiri.....	27
2.2.4. Granito Encruzilhada.....	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1. Etapa pré-campo	29
3.2. Etapa de Campo.....	30
3.2.1 - Amostragem	32
3.3. ESTUDO DA MINERALOGIA MAGNÉTICA.....	34
3.3.1 - Curvas Termomagnéticas.....	35
3.3.2 - Curvas de aquisição de magnetização remanente isotérmica (MRI).....	36
3.3.3 - Curvas de histerese.....	37
3.3.4 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	38
3.4. ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (ASM).....	39
4. RESULTADOS	44
4.1. MINERALOGIA MAGNÉTICA	44
4.1.1 - Curvas termomagnéticas	44
4.1.2 - Curvas de aquisição de magnetização remanente isotérmica (MRI).....	45
4.1.3 - Curvas de histerese.....	47
4.1.4 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	48
4.2. TRAMA MAGNÉTICA	50
5. DISCUSSÃO	68
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	75
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
APÊNDICES	80

1. INTRODUÇÃO

O Granito Butiá (GB) é um silimanita-biotita leucogranito situado no noroeste do Batólito Pelotas, porção centro-norte do Escudo Sul-rio-grandense (ESRG). Ele é um corpo alongado norte-sul, com idade ígnea 629 Ma (Bitencourt *et al.*, 2015) encaixado em orto- e paragneisses (pico do metamorfismo a 650 Ma) e sienitos sintectônicos (640 Ma) do Complexo Várzea do Capivarita (CVC). Trabalhos anteriores (*e.g.* Niessing, 2008) sugerem que o posicionamento do Granito Butiá se deu sob o mesmo ambiente tectônico dessas rochas, uma vez que, as direções de foliação são concordantes. Sendo assim, seu posicionamento poderia estar associado à tectônica transpressiva registrada durante o período Criogeniano, descrito por Martil (2016)

O GB possui foliação magmática com mergulhos de alto ângulo para SW ou NE. Localmente, a foliação principal (S) é truncada por uma foliação de cisalhamento (C) e forma com ela um par S-C, de cinemática dextral. Nas bordas, apresenta textura equigranular fina e foliação bem desenvolvida, marcada principalmente por biotita e silimanita (Niessing, 2008). Em direção ao centro do corpo, a granulação varia de média a grossa e a foliação é menos desenvolvida. Ao contrário da foliação, a lineação mineral é raramente observada.

A análise da trama de rochas graníticas por meio da técnica de anisotropia de susceptibilidade magnética (ASM) aplicada à geologia estrutural foi notoriamente destacada por Graham (1954), que verificou que o alinhamento preferencial de partículas ferromagnéticas (trama magnética) poderia ser representado por três eixos de um elipsoide. O uso dessa técnica vem se intensificando nos últimos anos, mostrando ser uma poderosa ferramenta no mapeamento de maciços graníticos. Nesse âmbito, pode ser utilizada no mapeamento de fácies (Gleizes *et al.*, 1993), de padrões deformacionais e magmáticos em rochas com tramas de difícil caracterização (Bouchez *et al.*, 1997; Nédélec & Bouchez, 2015). Sendo assim, possibilita obter dados estruturais que permitem um melhor entendimento sobre o posicionamento de corpos graníticos e também sobre o campo tensional vigente durante a intrusão (*e.g.* Trindade *et al.*, 1999; Salazar *et al.*, 2008; Archanjo *et al.*, 2012).

1.1. Caracterização do problema

Ao contrário da trama planar, a trama linear raramente é observada no Granito Butiá, limitando o pleno entendimento a respeito das condições de seu posicionamento. Visto a utilização da ASM voltada à geologia estrutural de corpos graníticos, o presente trabalho visa caracterizar por meio desse método a trama magnética e estrutural do GB.

Os dados obtidos nessa pesquisa contribuirão à geologia estrutural da área e assim, pode ou não reforçar o caráter sintectônico do GB que estaria controlado por uma zona de cisalhamento transcorrente dextral, como descrito na literatura (Martil, 2016).

Sendo assim, os principais questionamentos que conduzem este estudo são:

- (i) Como é caracterizada a trama magnética (foliação e lineação) e qual sua relação com a trama estrutural do GB?
- (ii) Com base na ASM, sob qual regime tensional deu-se o posicionamento do GB?

1.2. Premissas

- i) A orientação de minerais magnéticos (óxidos e silicatos ferromagnesianos) registrada pela ASM em granitóides sintectônicos, marca o campo tensional durante sua cristalização;
- ii) Segundo Bouchez (1997), em corpos graníticos cujo mineral ferromagnésiano mais abundante é a biotita, na ausência de minerais ferromagnéticos (e.g. magnetita), a orientação da trama magnética dessa população de biotitas reflete fielmente a petrotrama da rocha;

1.3. Hipóteses

- i) A trama magnética será concordante com a trama estrutural. Portanto, a orientação dos eixos magnéticos terá origem durante a cristalização do magma. Sendo assim, eles registrariam o campo tensional durante a cristalização do granito;
- ii) A trama magnética não será concordante com trama estrutural. Indicando que a orientação dos eixos magnéticos tem origem secundária, decorrente de algum evento superimposto ao de cristalização do magma. Portanto não registrando as condições de deformação durante seu posicionamento.

1.4. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral:

- i) Caracterizar a trama magnética do GB e compreender sua relação com a trama estrutural, possibilitando um melhor entendimento sobre o posicionamento do GB em seu contexto tectônico;

E como objetivos específicos:

- i) Caracterizar a mineralogia magnética, a fim de compreender quais minerais são responsáveis pela anisotropia de susceptibilidade magnética;
- ii) Obter a orientação e intensidade dos eixos de susceptibilidade magnética a fim de caracterizar os elipsoides magnéticos.

1.5. Localização da área de estudos

A área de estudos localiza-se na porção central Rio Grande do Sul, na região do município de Encruzilhada do Sul, que partindo de Porto Alegre pela BR-290 até o município de Pantano Grande e de lá pela RS-471, dista cerca de 190 km (Fig. 1). O acesso à área se dá por estradas secundárias, principalmente pela estrada do Chanã, que partindo do norte do município de Encruzilhada do Sul, leva até o sul do corpo do Granito Butiá, à oeste do Cerro Partido, na folha do exército Passo das Canas (SH.22-Y-A-III-4).

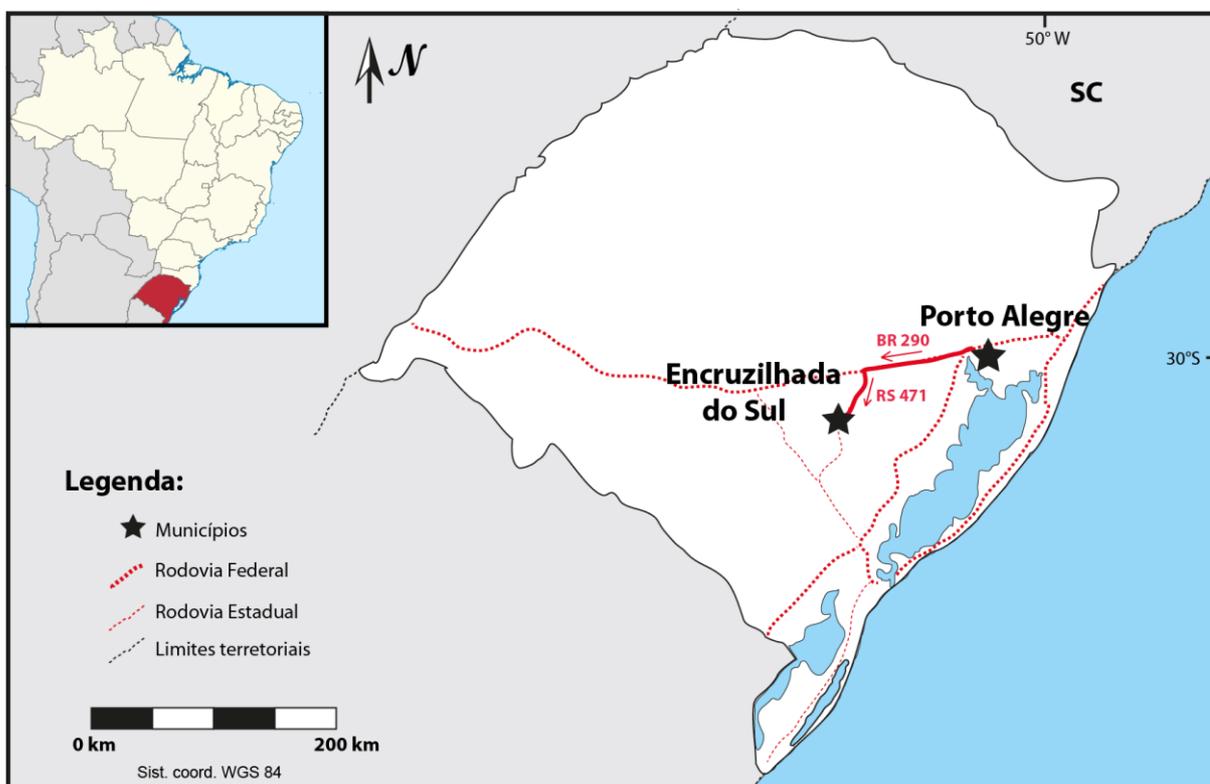


Figura 1. Mapa de localização geográfica com as rodovias de acesso à área de estudos.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1. Geologia Regional

O Escudo Sul-rio-grandense (ESRG) está inserido na porção meridional da Província da Mantiqueira (PM). A distribuição dos domínios da porção sul da PM indica a ocorrência de rochas paleoproterozóicas no nordeste de Santa Catarina, no sudoeste do Rio Grande do Sul e no sul do Uruguai. As associações de rochas Neoproterozóicas ocorrem ao longo do Cinturão Dom Feliciano (CDF) compreendem rochas de magmatismo de arco (oeste), sequências metamórficas de alto e baixo a médio grau e um vasto cinturão granítico de direção NE-SW que se estende do Uruguai até Santa Catarina (Fig. 2a)

A Província da Mantiqueira desenvolveu-se durante o Ciclo Orogênico Brasileiro/Pan-africano e sua porção meridional é caracterizada por um magmatismo de arco entre 900 e 700 Ma (e.g. Hartmann et al., 2001) e por um magmatismo pós-colisional com idades entre 650 e 580 Ma (Bitencourt & Nardi, 2000). Esse magmatismo teria sido controlado por uma descontinuidade de escala litosférica Neoproterozóica denominada Cinturão de Cisalhamento Sul-brasileiro (CCSb), que compreende uma vasta área com zonas de cisalhamento anastomosadas de cinemática predominantemente transcorrente, referentes à tectônica transpressiva do final do Ciclo Brasileiro, dando origem ao cinturão granítico alongado NE-SW, no Rio Grande do Sul denominado Batólito Pelotas.

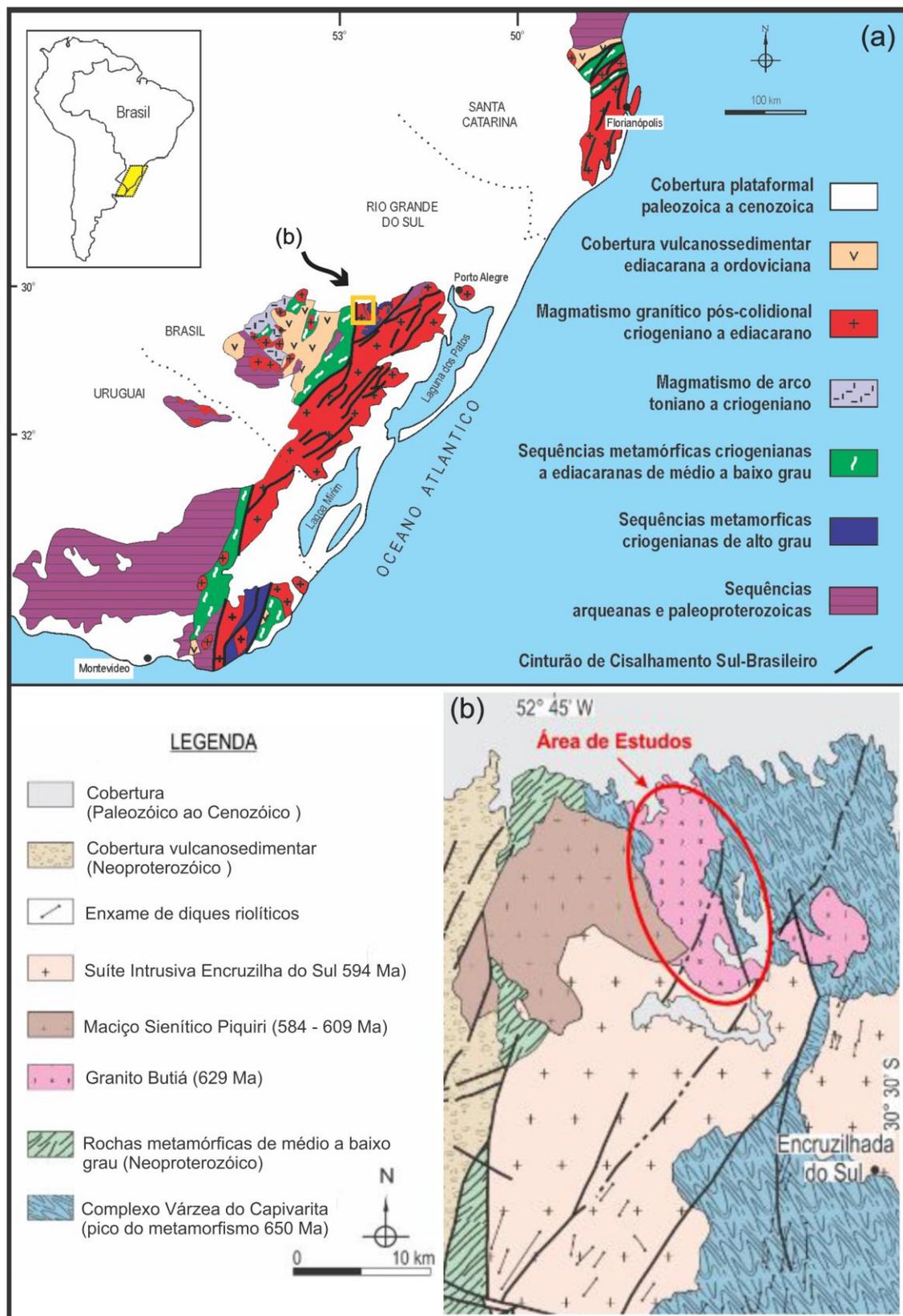


Figura 2. (a) Principais domínios geotectônicos do segmento meridional da Província Mantiqueira (modificado de Nardi & Bitencourt, 2007). (b) Mapa geológico regional com a localização da área de estudos. (modificado de De Toni, 2015).

2.2. Geologia Local

O Granito Butiá aflora na porção noroeste do Batólito Pelotas, onde está encaixado em gnaisses e sienitos sintectônicos do Complexo Várzea do Capivarita. O Maciço Sienítico Piquiri, situado a oeste, faz contato intrusivo com essas unidades (Fig. 2b). Ao sul da área de estudos, o GB faz contato com a Suíte Granítica Encruzilhada do Sul. Cada uma dessas unidades será abordada nos próximos itens, a fim de reunir as principais informações a respeito da evolução dos conceitos e dados publicados sobre a geologia local da região.

2.2.1. Complexo Várzea do Capivarita

O Complexo Várzea do Capivarita (CVC) é composto principalmente por paragnaisses, com ortognaisses e sienitos sintectônicos subordinados. Entretanto, alguns autores tenham agrupado os orto-derivados no Complexo Arroio dos Ratos (CAR) (e.g.; Phillip *et al.*, 2013; Bom *et al.*, 2014), entende-se que o CAR compreende ortognaisses cujos protólito são associações de granitóides da série TTG cujas idades datam do Paleoproterozóico (Gregory *et al.*, 2015) e distribuem-se à leste da Zona de Cisalhamento Transcorrente Dorsal do Canguçu.

Na região da Folha Passo das Canas, os orto- e paragnaisses do CVC ocorrem como fatias tabulares centimétricas a decamétricas intercaladas, sem relações intrusivas e com estrutura interna concordante (Martil, 2007; Niessing, 2008; UFRGS, 2008). Trabalhos mais recentes sugerem que o empilhamento dessas rochas deu-se concomitante a um evento metamórfico de fácies granulito, Durante esse evento se reconhece duas fases de deformação: a primeira, relacionada a uma tectônica de empurrão; e a segunda, sendo uma evolução transicional para um regime de cisalhamento com foliação de alto ângulo, que evoluiu progressivamente gerando uma zona de cisalhamento de direção NNW. As idades obtidas para o metamorfismo do CVC estão entre 640 e 650 Ma (Martil, 2016).

Subordinados aos gnaisses do CVC ocorrem sienitos sintectônicos denominados de Sienito Arroio das Palmas (SAP). Sua foliação é definida pelo alinhamento dos cristais de K-feldspato e localmente ocorrem zonas de alta deformação concordantes com a foliação principal, onde os porfiroclastos assimétricos apresentam caudas de recristalização que indicam sentido de movimento dextral (Niessing, 2008; De Toni, 2012; De Toni *et al.*, 2015). Os SAP têm idades de cristalização similares às idades atribuídas ao pico metamórfico do CVC, apontando 642 ± 10 Ma (LA-ICP-MS em zircão – Bitencourt *et al.*, 2011).

As condições de metamorfismo do CVC foram recentemente caracterizadas por Phillip *et al.* (2016) como de alta temperatura (720-820°C) e pressão intermediária (8 a 9 kbar), baseando-se nas paragêneses granada-cordierita-sillimanita e biotita. Em trabalhos anteriores, Philipp *et al.* (2013) e Bom *et al.* (2014) sugeriram que houve a migmatização dos paragnaisses com a geração de injeções leucograníticas que, ao se unirem, formariam corpos leucograníticos de espessura métrica, como possivelmente o Granito Butiá.

2.2.2. Granito Butiá

O Granito Butiá (GB) foi definido e caracterizado por Niessing (2008) em sua tese de mestrado e até o presente momento foi pouco estudado. Trata-se de um corpo alongado Norte-Sul que aflora numa área de aproximadamente 63 km², a cerca de 30 km a norte de Encruzilhada do Sul. Ele está encaixado em gnaisses e sienitos sintectônicos do CVC (Fig. 3a), que as vezes ocorrem como pendentes de teto nas porções centrais do GB. A oeste, o Maciço Sienítico Piquiri faz contato com o CVC e a noroeste com o GB. Na borda sudeste sobre o GB estão depositados os sedimentos da formação Rio Bonito – que afloram nas porções altas do Cerro Partido.

GB é um leucogranito peraluminoso que contém duas micas (biotita \pm muscovita) e sillimanita magmática como mineral acessório. Apresenta trama planar bem desenvolvida, marcada por foliação magmática com direção preferencial NNW-SSE e mergulhos com alto ângulo para SW ou NE. Essa orientação, concordante à foliação dos gnaisses e sienitos sintectônicos do CVC sugere a cristalização do GB

sob mesmo campo tensional. A trama linear raramente é observada em campo, embora em poucos locais ela se mostre com baixo caimento com sentido paralelo a direção de foliação. Niessing (2008) descreveu no GB duas variedades texturais: a) equigranular fina, restrita às bordas onde a foliação é bem desenvolvida – localmente milonítica e definida principalmente por sillimanita e biotita (Fig. 3b); e b) equigranular média a grossa, ocorrendo em direção ao centro do corpo, onde a foliação mostra-se menos desenvolvida (Fig. 3c) – podendo ocorrer zonas intercaladas com maior deformação e variação textural centimétrica. É comum a ocorrência de trama planar composta, cuja foliação principal (S) é truncada por uma foliação de cisalhamento (C) e forma com ela um par S-C, de cinemática dextral (Fig. 3d). A ocorrência desse marcador cinemático poderia ser interpretado como mais uma evidência da relação entre o posicionamento do GB e uma zona de cisalhamento transcorrente dextral, resultado de um regime transpressivo, registrado no CVC e descrito por Martil (2016).

Niessing (2008) ainda definiu alguns dados sobre a história de cristalização do GB, utilizando análises de petrografia, análise da deformação, química mineral, termobarometria e termometria. As temperaturas obtidas para a intrusão variam de 660°C a 750°C e as pressões entre 3.0 e 4.2 kbar, resultando em profundidades da ordem de 9-13 km. Segundo a autora, o magma cristalizou durante um regime tensional em que a deformação ainda estava presente durante a cristalização. A análise microtextural indica deformação gerada em alta temperatura (Fig. 4), com quartzo com padrão em tabuleiro de xadrez, mirmequitas, e fitas orientadas de agregados de quartzo e feldspato envoltos por biotita-muscovita-sillimanita alongados e as vezes em *kink bands*. por exemplo). Essa evidência, junto à orientação da foliação concordante a das rochas encaixantes, corroborou para a atribuição de um caráter sintectônico ao GB. Em um trabalho recente de Philipp *et al.* (2013), os autores incorporaram o GB na Suíte Cordilheira, anteriormente compreendida apenas pelos granitos Cordilheira, Arroio Francisquinho, Figueiras e Três Figueiras, já que todos esses granitos são peraluminosos e contêm duas micas. Os autores ainda sugerem que esses granitos seriam produto da fusão parcial dos paragneisses do CVC, bem como Bom *et al.* (2014) também citam essa possibilidade para o GB. Datações U-Pb SHRIMP em zircão apontam idades ígneas entre 634 e 625 ± 6 Ma para os granitos Cordilheira e Francisquinho e 605 ± 8 Ma para o Granito Figueiras

(Frantz *et al.* 2003). O GB foi datado por Bitencourt *et al.* (2015) que obtiveram a idade de 629 Ma em zircões por LA-MC-ICP-MS, interpretado como idade de cristalização.



Figura 3. (a) Relação intrusiva do GB nos Sienitos Arroio das Palmas do (CVC); (b) Foliação bem desenvolvida e localmente milonítica - borda; (c) Foliação magmática menos desenvolvida – centro; (d) Par de foliação S-C, mostrando cinética destal.(Fotos do autor).

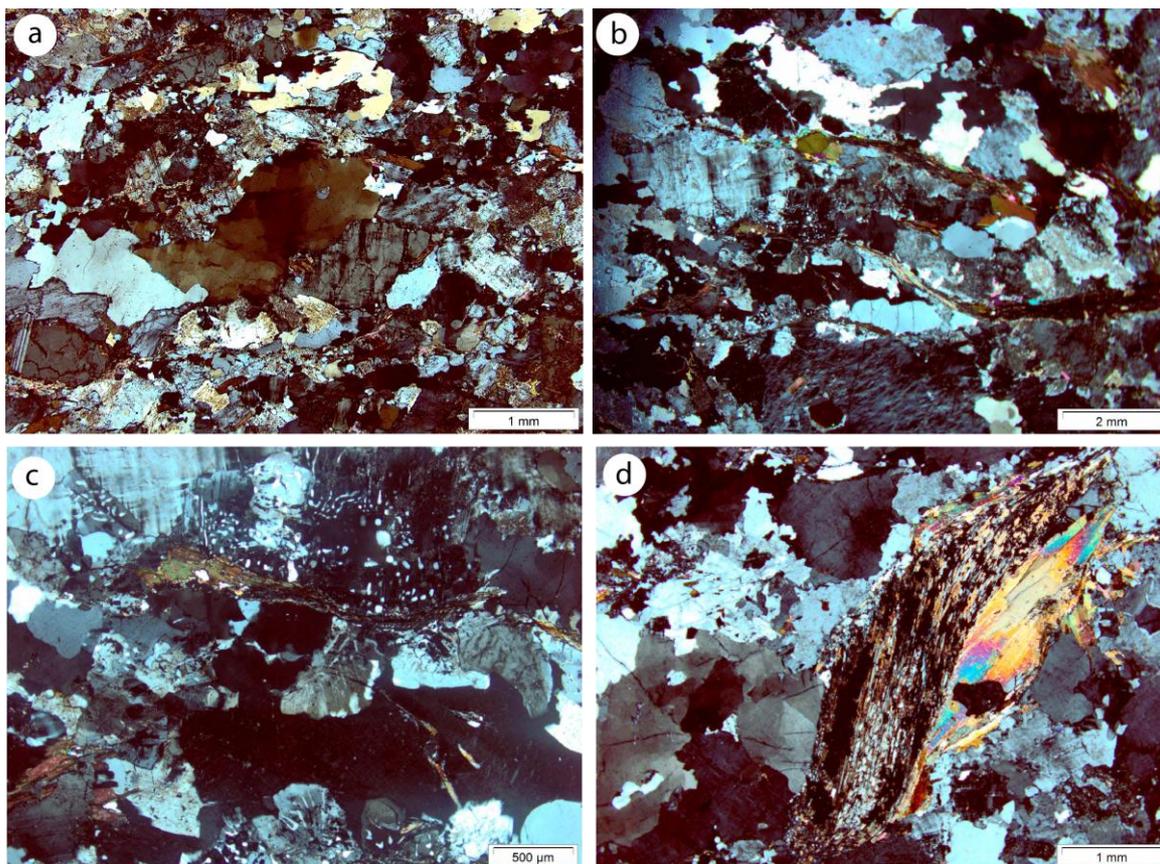


Figura 4. Evidências da deformação em alta temperatura encontradas no GB: quartzo com padrão em tabuleiro de xadrez (a), agregados orientados em fita de quartzo e feldspato envolvidos por biotite e muscovita (b), mirmequitização (c) e agregado de biotita-muscovita e silimanita deformado em *kink band*.

2.2.3. Maciço Sienítico Piquiri

O Maciço Sienítico Piquiri (MSP) afloram ao norte de Encruzilhada do Sul, numa área semi-circular de aproximadamente 140 km². Têm uma variada diversidade composicional, desde os termos álcali-feldspato-quartzo-sienito e álcali-feldspato-sienito a quartzo-sienito, sienito, quartzo-monzonito e monzogranito (Jost *et al.*, 1985; Stabel *et al.*, 2001). A textura varia de equigranular fina a grossa, das bordas para o centro do corpo, com porções porfíricas subordinadas, e localizadamente concentrações de minerais máficos e magacristais de K-feldspato. Segundo Nardi *et al.* (2008), possui foliação de fluxo magmático melhor desenvolvida nas porções de granulação grosseira dada pelo alinhamento dos cristais de K-feldspato e dos agregados máficos e enclaves microgranulares máficos. A trama linear e deformação no estado sólido não foram observadas pelo

autor. Quimicamente, tem afinidade shoshonítica (Stabel *et al.*, 2001), comprovada por estudos de química mineral e petrológicos, e caráter ultra-potássico (Nardi *et al.*, 2007).

Estudos recentes envolvendo relações estruturais e de ASM (Sbaraini, 2012), permitiram a divisão do corpo em diferentes fácies, cada uma delas com suas características magnéticas, petrológicas e estruturais. A geometria das lineações magnéticas permitiu que o autor observasse duas geometrias de fluxo principais: subvertical (nas bordas) e sub-horizontal (no centro). Levando assim, a interpretação de diferentes pulsos magmáticos envolvidos durante sua diferenciação magmática.

Recentemente a idade das fácies foi analisada por U-Pb em zircão (LA-MC-ICP-MS) que confirmou a duração do magmatismo sienítico a granítico ultrapotássico no intervalo de 609 a 584 Ma (Bitencourt *et al.*, 2015).

2.2.4. Granito Encruzilhada

Segundo Philipp & Campos (2005) as primeiras identificações das unidades plutônicas na região de Encruzilhada do Sul ocorrem na década de 40 com os trabalhos de Franco (1944) e Leinz *et al.* (1945). A Suíte Granítica Encruzilhada do Sul é composta por seis corpos graníticos a sieníticos, dos quais o Granito Encruzilhada (GE) é a principal unidade. Ele tem uma área de exposição descontínua de aproximadamente 55 km por 35 km, restrita à porção noroeste do Batólito de Pelotas (Vasquez, 1997).

O GE é intrusivo nas unidades vizinhas e em algumas porções os gnaisses do CVC ocorrem como xenólitos e *roof pendants* no GE. Ao norte e ao sul, observam-se corpos tabulares do granito cortando os para- e ortognaisses do CVC, e a noroeste, ele intrude o Anortosito Capivarita. As relações de contato com o Maciço Sienítico Piquiri mostram-se discordantes, ocorrendo tanto diques graníticos cortando o Sienito Piquiri como fragmentos dele no interior dos granitos. (Bitencourt *et al.*, 1993). Dados geocronológicos indicam idades ígneas de 582 ± 17 Ma (Rb-Sr – Vasquez, 1997) e 594 ± 1 Ma (U-Pb – Babinski *et al.*, 1997). Na área do presente trabalho, o Granito Encruzilhada não é expressivo e apenas faz contato com as porções sul do Granito Butiá e CVC.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo é dividido em subitens que descrevem as etapas do trabalho de pesquisa da seguinte forma: (a) etapa pré-campo, que envolveu pesquisa bibliográfica e preparação para o campo; etapa de campo, onde se verificou a qualidade dos afloramentos pré-selecionados e se realizou a amostragem de 14 deles; e, por fim, as análises de laboratório, que envolveram as técnicas descritas a seguir, sobre mineralogia magnética e as análises da anisotropia de susceptibilidade magnética.

3.1. Etapa pré-campo

Durante essa etapa inicial foi realizada a revisão bibliográfica inicial que se baseou em reunir informações sobre a área de estudos e o corpo granítico em questão e sobre o método de anisotropia de susceptibilidade magnética e sua aplicação à geologia estrutural de granitoides. Foram reunidos livros texto, teses, dissertações e artigos sobre esses dois assuntos e suas relações.

Em um segundo momento, foi criado um banco de dados em plataforma SIG, utilizando o *software ArcGis 10*, que reuniu os dados dos trabalhos de mapeamento geológico em escala 1:25000 realizados pela UFRGS nos anos de 2008 e 2009 e de cadernetas de campo de outros projetos realizados na área. Utilizando as descrições dos pontos desses projetos, foram pré-selecionados possíveis afloramentos para a amostragem para ASM, levando em consideração: o grau de alteração e de fraturamento, área de exposição e acessibilidade (proximidade de estradas). Os pontos foram classificados segundo uma escala de interesse, onde obtiveram maior pontuação aqueles que continham afloramentos com o menor grau de alteração e fraturamento, localizavam-se próximos a estradas e acessos de propriedades rurais e tinham maiores exposições (Fig.5a). A integração desses dados com imagens de satélite e cartas topográficas permitiu o planejamento da etapa de campo.

3.2. Etapa de Campo

A campanha de campo foi realizada em três etapas. A primeira (03/04 a 04/04/16) teve como objetivo a verificação de acessos e de afloramentos, os quais haviam sido pré-selecionados no banco de dados criado em SIG. As outras duas etapas tiveram como objetivo a coleta de testemunhos cilíndricos para ASM e duraram três dias cada uma, realizadas entre os períodos 17/03 a 19/03 e 29/06 a 01/07 de 2016, na região de Encruzilhada do Sul, RS.

A verificação em campo prévia à amostragem foi uma estratégia adotada para diminuir o risco do deslocamento até um afloramento impróprio para amostragem. Dentre os pontos pré-selecionados (Fig. 5a), foram escolhidos 14 deles para amostragem (Fig. 5b). A locação dos sítios de amostragem não pode seguir uma malha regular devido ao alto grau de alteração dos afloramentos do extremo sul e às vastas áreas de florestamento, localizados na porção norte-nordeste do GB. Mesmo assim, teve-se o cuidado para que a amostragem abrangesse tanto as bordas como o centro do corpo, já que variações texturais e deformacional existem entre ambas as partes.

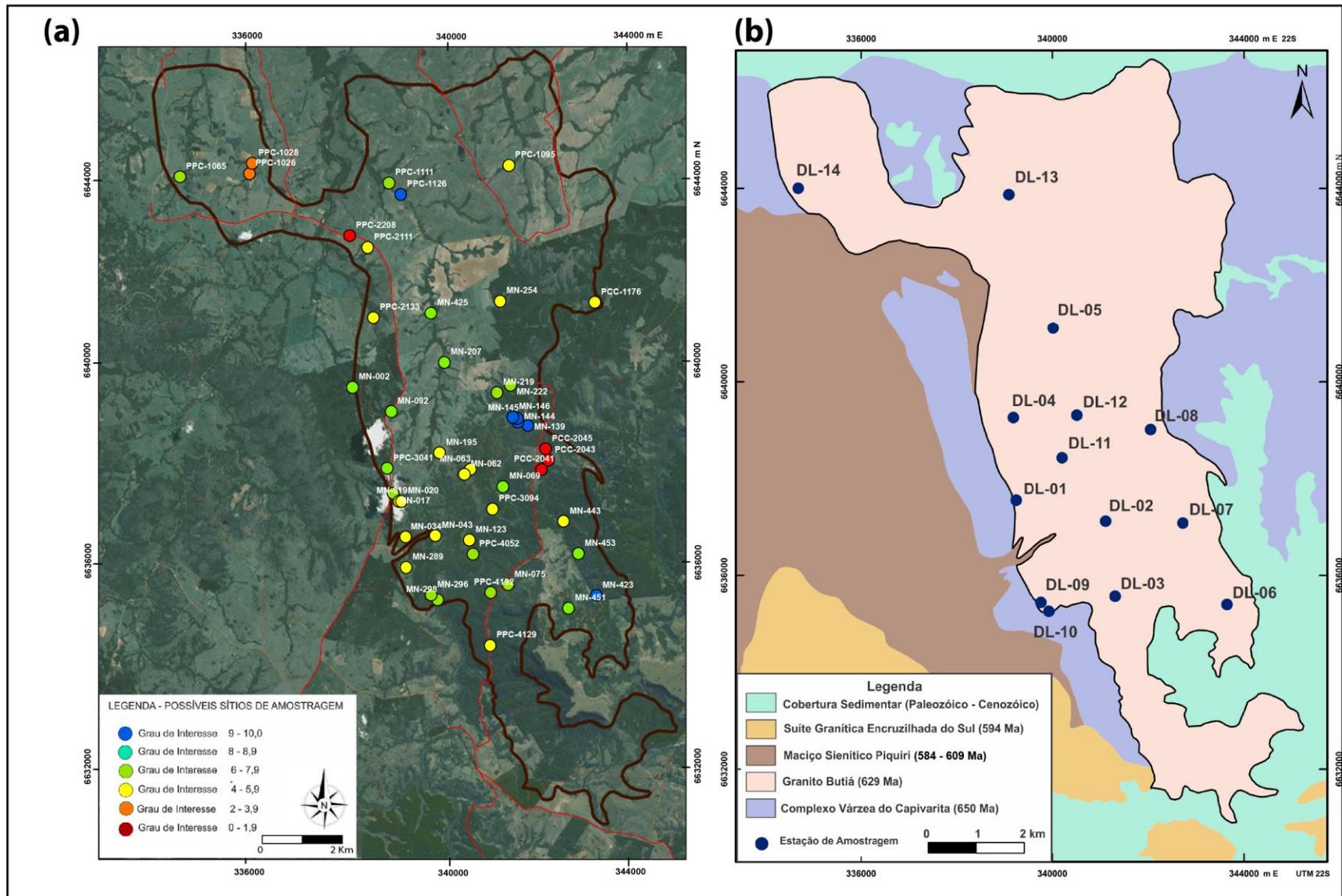


Figura 5. (a) Imagem de satélite com a localização dos possíveis pontos de amostragem reunidos em plataforma de SIG (ArcGis 10) classificados quanto ao grau de interesse. (b) Mapa de amostragem final, com os 14 sítios de amostragem ao longo do Granito Butiá. Base de dados modificado de UFRGS (2008).

3.2.1 - Amostragem

Em cada sítio de amostragem foram coletados de 10 a 12 cilindros orientados, cada um deles com 2,5 cm de diâmetro e de 3 a 15 cm de comprimento. Além disso, foram coletados e documentados dados estruturais de controle com a bússola (como foliação e lineação observados em campo), de localização geográfica (com utilização de GPS), fotografias e croquis e amostras para laminação, quando de interesse.

Para a obtenção dos cilindros, foi utilizada uma perfuratriz portátil da marca *STIHL*. Ela é composta por um motor dois tempos movido à gasolina, similar ao de uma motosserra, e tem acoplado uma broca cilíndrica oca cuja extremidade é diamantada, com 1" de diâmetro e 20 cm de comprimento. É interligado à perfuratriz, por meio de uma mangueira, um sistema de resfriamento e lubrificação da broca, composto por um galão, onde mistura-se água e óleo solúvel biodegradável, que são liberados na base da broca durante a perfuração (Fig. 6a). O procedimento de perfuração é iniciado realizando uma marcação com a broca de 1 cm de profundidade rente ao local a ser perfurado (Fig. 6b), para que caso ocorra a quebra do testemunho durante a perfuração, se tenha um referencial para reposicionamento (Fig. 6c-i). Após o procedimento de perfuração, cada cilindro tem sua posição espacial registrada (inclinação e azimute do furo) por meio de um orientador (Fig. 6c-ii) que tem uma haste cilíndrica oca e uma bússola magnética (e outra solar) acoplada, da seguinte maneira: (a) aqueles testemunhos que não quebraram durante a perfuração, e permaneceram em sua posição original na rocha: após encaixar a haste do orientador no furo, se ajusta a bússola para que fique em posição horizontal e é registrado o azimute da direção do furo, cujo referencial é a ranhura na base do orientador. Por meio dessa ranhura, marca-se com um fio de cobre o cilindro (Fig. 6c-iii) e após retirá-lo da rocha, passa-se caneta permanente na marcação (Fig. 6e), registrando o topo e a base identificando-o; (b) para aqueles cilindros que saem da posição original durante a perfuração: registra-se a orientação do furo com o orientador (sem o testemunho) e marca-se na rocha a posição da ranhura do orientador (Fig. 6d) e, então, se reposiciona o testemunho no furo (utilizando a marcação de 1 cm de profundidade realizada antes da perfuração final), e transfere-se a orientação da ranhura do orientador para o testemunho.

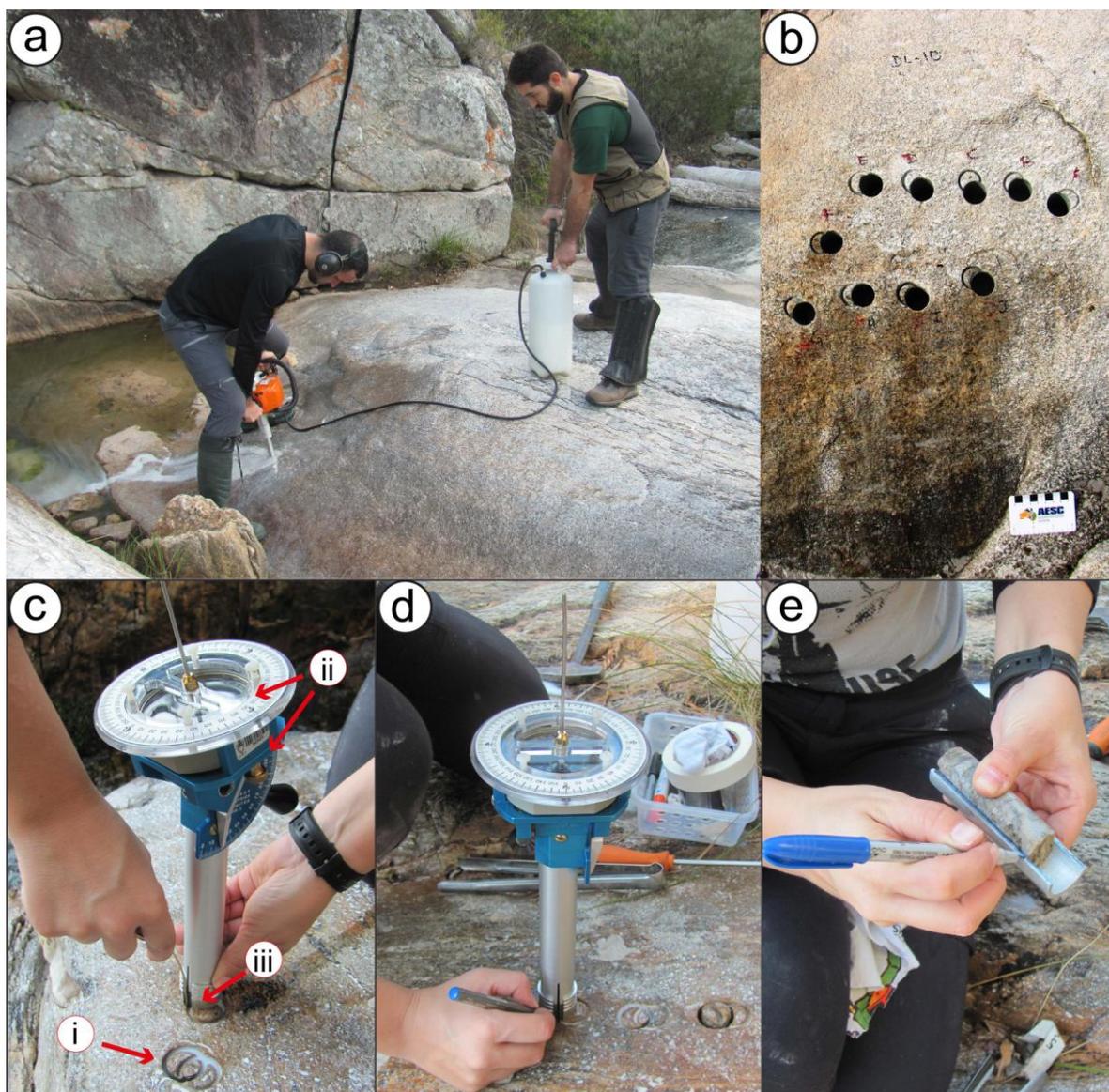


Figura 6. Procedimento de amostragem: (a) perfuração realizada com perfuratriz manual com broca diamantada e sistema de arrefecimento/ lubrificação acoplado; (b) Furos realizados no sitio DL-10, note que cada furo tem uma marcação rente a ele, que serve como referencial; (c) marca de referência (i), orientador com clinômetro e bússola (ii) acoplado e processo de marcação com arame de cobre (iii); (d) orientação de furo cujo cilindro quebrou durante a perfuração; (e) transferindo o referencial geográfico para o cilindro após sua orientação.

3.3. ESTUDO DA MINERALOGIA MAGNÉTICA

A caracterização da mineralogia magnética é fundamental nos estudos de ASM, pois é a mineralogia que determina a susceptibilidade magnética e suas anisotropias, sendo elas o resultado da orientação média da forma dos grãos (anisotropia de forma) e/ou da estrutura cristalina (anisotropia magnetocristalina) dos minerais que contribuem para a susceptibilidade magnética das rochas (Tarling & Hrouda, 1993). Por exemplo, na magnetita (ferromagnética), a anisotropia de forma dos cristais, quando alongados, pode se sobressair à anisotropia magnetocristalina. Já em minerais paramagnéticos (biotita, anfibólio, piroxênio) a anisotropia magnética é determinada pela sua rede cristalina, dependendo de como os íons de Fe se distribuem (Fig. 7).

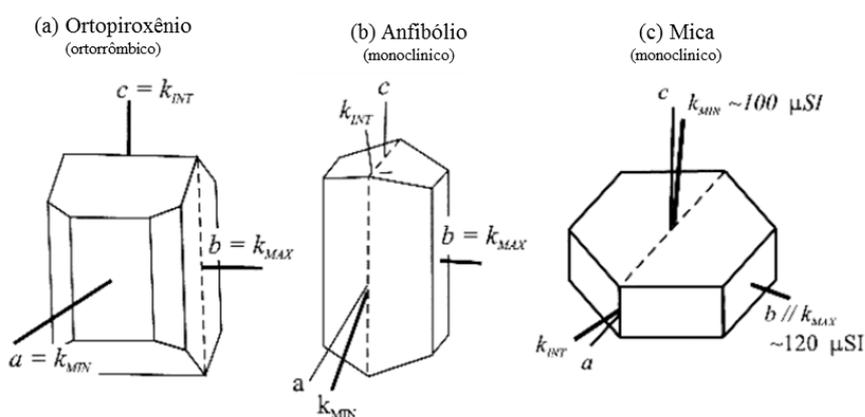


Figura 7. Relação entre os eixos de susceptibilidade magnética e o sistema cristalino dos minerais: ortopiroxênio (a), anfibólio (b) e biotita (c). Modificado de Borradaile & Jackson (2004).

O estudo da mineralogia magnética investiga quais são os principais minerais magnéticos na rocha por meio das técnicas: curvas termomagnéticas, curvas de aquisição de magnetização remanente isotérmica (MRI), curvas de histerese e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A descrição detalhada de cada técnica encontra-se nos itens subsequentes.

As análises magnéticas foram realizadas pelo autor em julho de 2016 no Laboratório de Paleomagnetismo e Geomagnetismo do IAG/USP, enquanto a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada posteriormente no Laboratório de Geologia Isotópica (LGI) do Instituto de Geociências da UFRGS.

3.3.1 - Curvas Termomagnéticas

O método consiste na leitura da susceptibilidade (K) da amostra em função da temperatura. A análise termomagnética em altas temperaturas é ideal para estimar as temperaturas de Curie/Néel características de cada fase mineral (e.g. Dunlop & Özdemir, 1997). Em baixas temperaturas, podem ser observadas transições de fase (i.e. transição de Morin, transição de Verwey) de alguns minerais. Para cada mineral magnético existe uma temperatura em que os momentos magnéticos (*spins*) se desorientam, fazendo com que o valor de susceptibilidade (K) decresça bruscamente. Na magnetita, por exemplo, essa transição de um comportamento ferromagnético para paramagnético ocorre a aproximadamente 580°C e é chamado de temperatura de Curie (e.g. Dunlop & Özdemir, 1997). Na hematita, essa transição ocorre a aproximadamente 675°C. Em rochas ricas em minerais paramagnéticos, não se observa grandes variações da susceptibilidade em função da temperatura, a não ser que durante o processo de aquecimento, cristalize algum mineral ferromagnético, como por exemplo, neoformação de magnetita à partir da biotita, observado por Trindade *et al.* (2001). Devido a este padrão, único para cada mineral magnético, se identificada o principal mineral portador do magnetismo da rocha.

Para a análise, são preparados cerca de 3 gramas em fração muito fina de rocha total proveniente de um dos espécimes representativo de cada sítio amostrado. O equipamento utilizado foi um susceptibilímetro KAPPABRIDGE MLY-4S e, acoplado a ele, um sistema de aquecimento CS4 e de resfriamento CSL (Fig. 8a). A aquisição dos dados é feita em duas etapas, uma de resfriamento e outra de aquecimento. Na etapa de baixa temperatura, parte da amostra é colocada em um porta-amostra que é resfriado dentro de um criostato de nitrogênio até -192°C, e em seguida, aquecida até temperatura ambiente. Na etapa de alta temperatura, outra parte da amostra é colocada no porta-amostras (Fig. 8b), que é aquecido por um fio de platina desde a temperatura ambiente até 700 °C em uma atmosfera de Argônio, utilizada para prevenir a oxidação da amostra. Os processos de medição de

susceptibilidade em função da temperatura são automatizados e quase contínuos, ocorrendo a cada incremento de 3°C, controlado pelo *software* do equipamento.

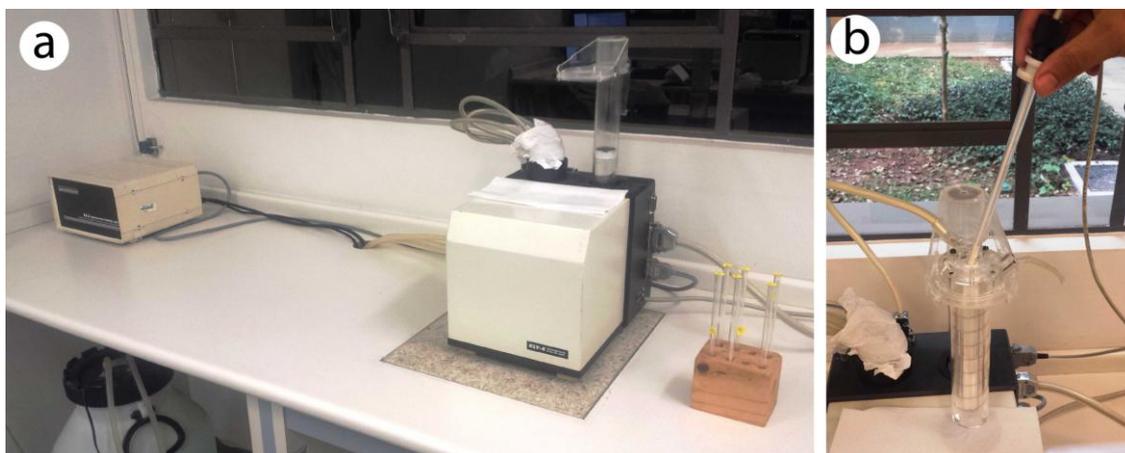


Figura 8. (a) Susceptibilímetro MLY-4S (branco) acoplado ao sistema de aquecimento (esq.) e as amostras pulverizadas dentro dos porta-amostras (dir.); (b) colocação da amostra dentro do cabeçote para iniciar o ciclo de alta temperatura.

3.3.2 - Curvas de aquisição de magnetização remanente isotérmica (MRI)

As curvas de MRI representam a capacidade de aquisição de magnetização remanescente dos minerais portadores de magnetização em ação de campos indutores cada vez mais elevados (neste experimento, até 1T) em temperatura ambiente e constante. Caso existam minerais ferromagnéticos na amostra, seus momentos magnéticos tendem a se alinhar, até que haja a saturação completa da magnetização. Já os minerais paramagnéticos, por não guardarem magnetização, não registram uma saturação completa com o aumento progressivo dos campos indutores aplicados.

Para esta análise, foi utilizada uma amostra cúbica com cerca de 0,5 cm³ cortada de um cilindro representativo de cada sítio. Cada amostra foi pesada para que posteriormente os dados de magnetização (M) obtidos fossem normalizados pela sua respectiva massa. A aquisição dos dados é realizada utilizando o magnetômetro VSM (*vibrating sample magnetometer*) MicroMag 3900 (Fig. 9), onde a amostra é colocada entre duas bobinas que geram um campo magnético em passos progressivos de 0 até 1T.

3.3.3 - Curvas de histerese

O método consiste em medir a magnetização em função de um campo magnético induzido. Dependendo do tipo de mineralogia (dia, para ou ferromagnética) as curvas de magnetização terão um padrão, que pode seguir uma função linear para minerais paramagnéticos e diamagnéticos, ou exponencial/sigmoidal para minerais ferromagnéticos. Além disso as curvas de histerese permitem verificar parâmetros dos minerais ferromagnéticos presentes nas rochas, destacando-se a magnetização de saturação (M_s), a magnetização remanente de saturação (M_{rs}), a coercividade (H_c) e a coercividade de remanência (H_{cr}).

A aquisição dos dados foi realizada para todos os sítios. Se utilizou a mesma amostra e o mesmo magnetômetro (VSM MicroMag 3900) utilizado para a aquisição das curvas de MRI (Fig. 9), entretanto as amostras são submetidas a um campo magnético (H) de até 1 T que é aplicado em duas direções (+1T até -1T), enquanto sua magnetização (M) é medida. Minerais ferromagnéticos atingem uma magnetização de saturação (M_s) com campos menores que 1 T, enquanto minerais paramagnéticos não atingem uma saturação máxima, gerando diferentes padrões de curvas nos gráficos de magnetização (M) vs. Campo aplicado (H).

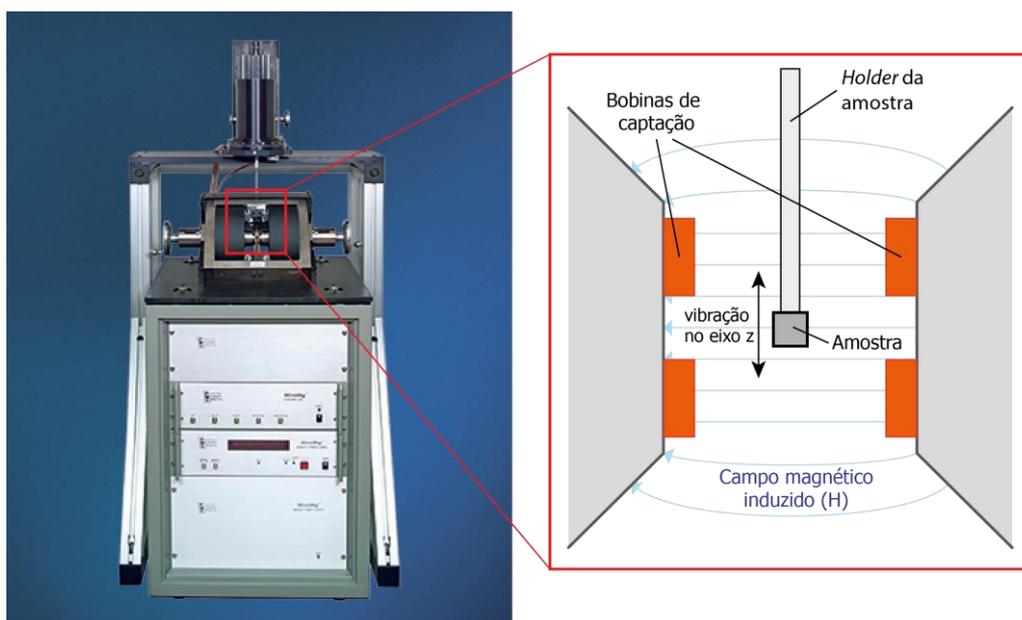


Figura 9. Magnetômetro MicroMag 3900 utilizado para a aquisição de curvas de MRI e histerese. Em detalhe, o sistema do *vibrating sample magnetometer* (VSM). Extraído e modificado do site da empresa *Lake Shore cryotonics*.

3.3.4 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura serve de método complementar ao estudo da mineralogia magnética, a fim de verificar as relações texturais entre os minerais opacos e óxidos com as demais fases minerais. Foi confeccionada uma lâmina a partir de um espécime representativo de 4 sítios escolhidos (DL-05, DL-08, DL-11 e DL-14) em função dos resultados obtidos pelos outros métodos investigativos da mineralogia magnética. As análises foram feitas no Laboratório de Geologia Isotópica da UFRGS (LGI-UFRGS), onde as lâminas delgadas foram metalizadas com carbono e analisadas ao microscópio eletrônico de varredura modelo JEOL JSM-6610LV acoplado um sistema EDS (*Energy Dispersive Spectrometer*) modelo *Bruker Nano XFlash detector 5030*, que permite a análise química pontual nas lâminas (Fig. 10).



Figura 10. Microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo JEOL JSM-6610LV acoplado ao sistema EDS, do Laboratório de Geologia isotópica - UFRGS.

3.4. ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (ASM)

A ASM é a ferramenta utilizada para o estudo da petrografia da rocha a partir dos eixos de susceptibilidade magnética. A técnica consiste em medir as principais direções de susceptibilidade magnética das amostras, que são representadas por eixos magnéticos. A obtenção destes dados é imprescindível para as interpretações da trama estrutural da rocha.

A susceptibilidade magnética (K) pode ser definida como a razão entre a magnetização induzida (M_i) e o campo indutor (H):

$$K = M_i / H \quad (1)$$

A anisotropia de susceptibilidade magnética nas rochas tem origem na estrutura cristalina (anisotropia magnetocristalina) e/ou na orientação média da forma dos grãos (anisotropia de forma) daqueles minerais que contribuem para a susceptibilidade magnética, cada qual com uma intensidade. (Tarling & Hrouda, 1993). A variação espacial da susceptibilidade magnética é dada por uma matriz simétrica de segunda ordem cujo tensor de susceptibilidade magnética (K_{ij}) depende da direção do campo induzido (H) e da direção da magnetização (M_j). Sendo i e j direções ($i, j = 1,2,3$). Dessa forma, as três principais direções de K são representadas pelos eixos K_1 , K_2 e K_3 , respectivamente, o eixo de susceptibilidade magnética máxima, intermediária e mínima. A representação espacial desses eixos é um elipsoide (Fig. 11a), que analogamente à geologia estrutural, fornece uma lineação e uma foliação (magnéticas), dadas respectivamente por K_1 e plano perpendicular a K_3 (Fig. 11b).

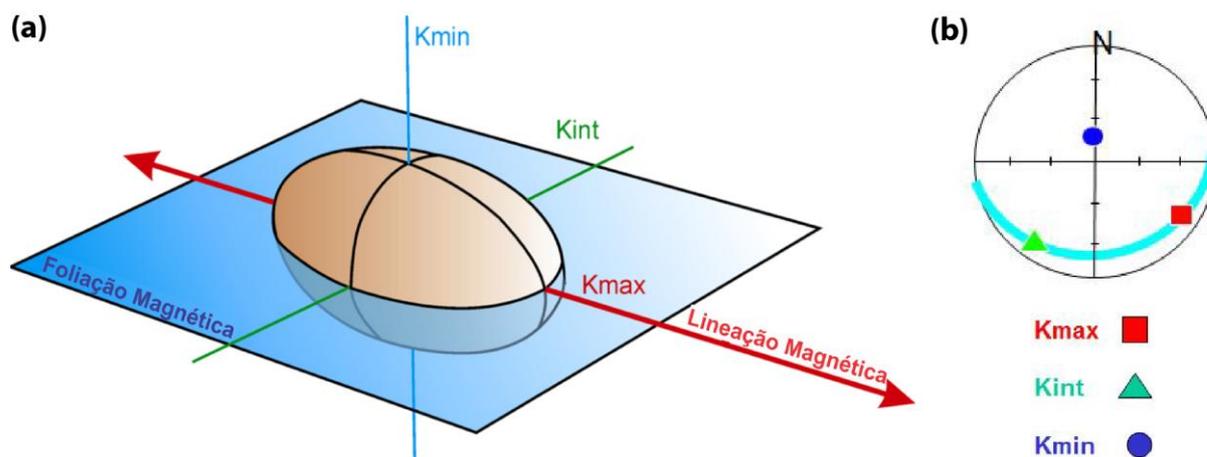


Figura 11. Representação tridimensional do elipsoide magnético (a) e seus respectivos eixos de susceptibilidade magnética plotados em estereograma (b). Modificado de Hrouda (2014) *in*: Physical principles of magnetic anisotropy course.

O Grau de anisotropia (P) do elipsoide é dado pela razão entre o eixo máximo e mínimo de susceptibilidade magnética ($P=K_1/K_3$). Muitos trabalhos de ASM correlacionam a variação de P com o grau de deformação de granitoides, seja no estado magmático, ou sólido de alta e baixa temperatura (Saint-Blanquat & Tikoff, 1996; Ferré *et al.*, 1997; Aranguren *et al.*, 1997).

A forma do elipsoide depende da relação dos três eixos, que varia de oblata (forma de disco), quando $K_1=K_2>K_3$; prolata (forma de charuto), quando $(K_1>K_2=K_3)$; triaxial ou neutro, quando $K_1>K_2>K_3$; e esférica quando $K_1=K_2=K_3$. A forma do elipsoide também é descrita pelo parâmetro de forma (T):

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

onde, valores de T de +1 a 0 referem-se a elipsoides oblatos a triaxiais ($T = 0$) e valores entre 0 e -1, elipsoides triaxiais a prolatos (Fig. 12). Os elipsoides oblatos têm uma foliação bem definida, no qual os eixos máximos e intermediários de susceptibilidade magnética se distribuem. Já a lineação é bem definida nos elipsoides prolatos. Nos elipsoides triaxiais pode ser definida tanto a foliação quanto a lineação, entretanto, suas médias são menos confiáveis se comparadas aos casos extremos (oblato e prolato). No caso dos elipsoides esféricos, não se definem nem lineação, nem foliação. Existe ainda formas intermediárias ou compostas que os

elipsoides podem desenvolver (triaxial oblata, triaxial prolata, triaxial esférica, oblata esférica e prolata esférica), entretanto é necessário analisar a relação dos eixos K_1 , K_2 e K_3 de forma quantitativa, como por exemplo o método de *bootstrap* de Constable & Tauxe (1990), utilizado no trabalho de Yokoyama (2008). Neste trabalho serão utilizadas apenas as quatro principais formas (oblata, prolata, triaxial e esférica).

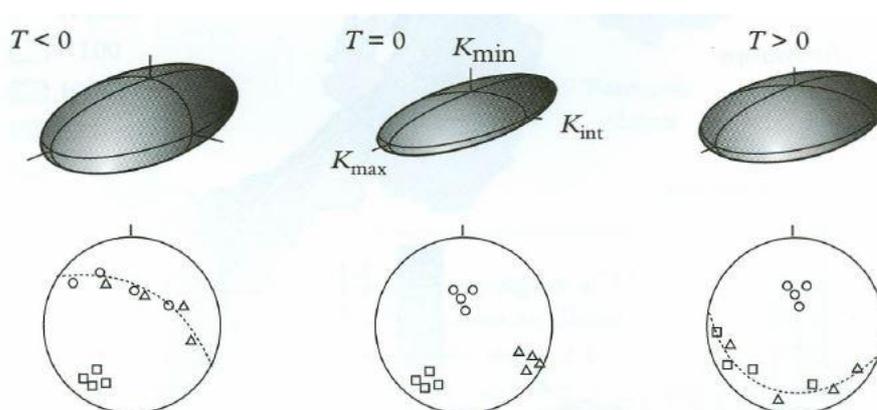


Figura 12. Representação tridimensional de elipsoides com diferentes parâmetros de forma (T), da esquerda para a direita: prolata, triaxial e oblata. Seus eixos de susceptibilidade magnética estão plotados nos respectivos estereogramas. Extraído de Nédélec e Bouchez (2015).

A relação entre o grau de anisotropia (P) e o parâmetro de forma (T) é chamada de *Jelinek Plot* (Jelinek, 1981) e descreve a excentricidade do elipsoide magnético em função de sua forma (Fig. 13).

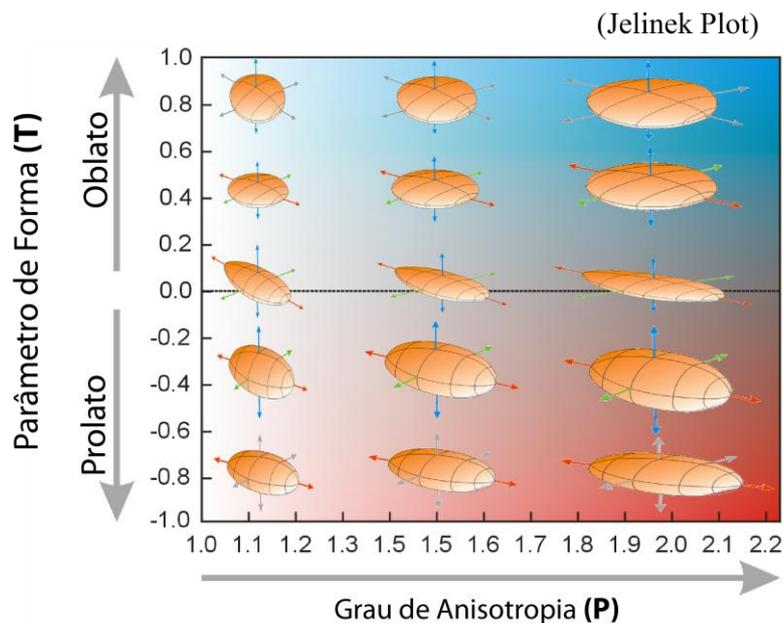


Figura 13. Representação dos elipsoides plotados no diagrama *Jelinek Plot* descreve a forma do elipsoide em função da sua anisotropia. Modificado de Hrouda (2014) *in*: Physical principles of magnetic anisotropy course.

A preparação das amostras para ASM, envolveu as seguintes etapas: os cilindros são serrados em espécimes de 22 mm utilizando uma serra com ajuste próprio para o corte (Fig. 14a e 14b); depois de serrados, os espécimes são renomeados e são marcados os 3 eixos em que serão realizadas as medidas de ASM (Fig. 14c); por último, eles são todos embalados em filme de PVC (Fig. 14d), para prevenção de contaminação do equipamento. Do total de 160 cilindros que haviam sido coletados foram gerados 466 espécimes.

Para a aquisição dos dados foi utilizado o susceptímetro *KAPPABRIDGE MFK1 – FA* da AGICO (Fig. 15a). O processo de aquisição dos dados baseia-se na leitura de três eixos, x, y, e z, ortogonais entre si, e na leitura de anisotropia total. Para isso, o operador coloca o espécime no cabeçote do susceptímetro (Fig.15b) e realiza uma medida para cada um dos três eixos, por meio de um sistema automatizado que rotacional o espécime durante o processo. A última leitura mede a anisotropia total (*K*) do espécime. As correções para a posição original da amostra em relação ao norte geográfico são feitas para cada espécime utilizando o referencial a orientação de cada cilindro, obtida em campo. Os dados são processados pelo *software ANISOFT 4.2*, da própria AGICO, que utiliza a estatística de Jelinek (1997), gerando uma média para cada eixo e diversos parâmetros.

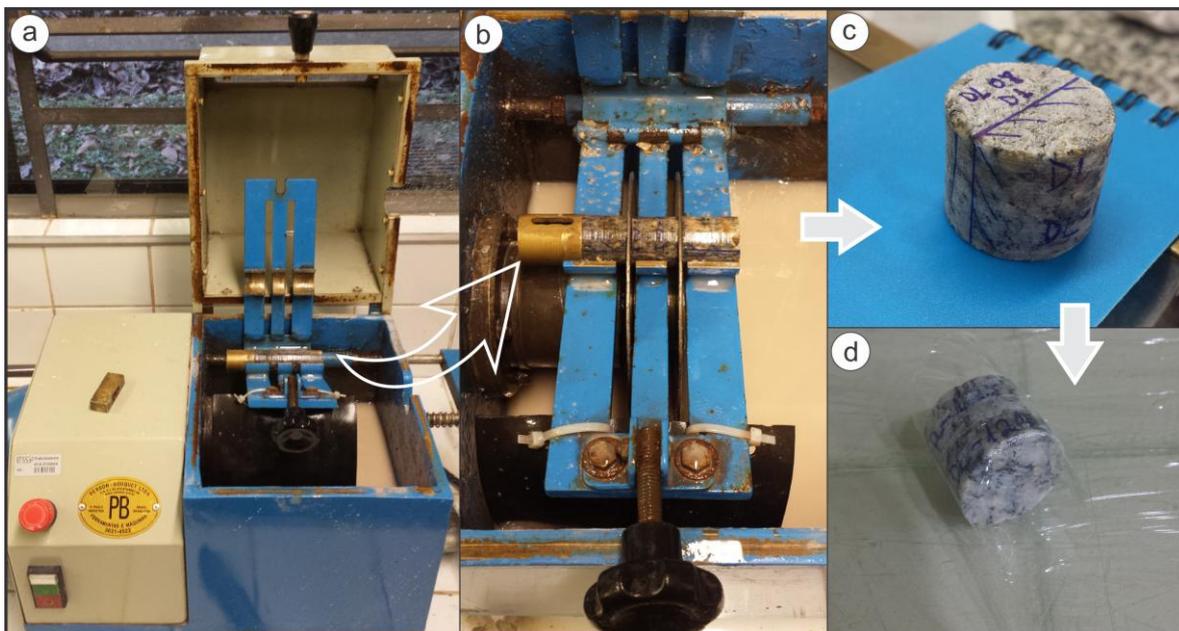


Figura 14. Preparação de amostras para ASM: corte dos cilindros em espécimes de 22 mm (a e b); marcação dos eixos que serão medidos no equipamento (c); processo de embalagem em filme de PVC para prevenção de contaminação dos espécimes (d).

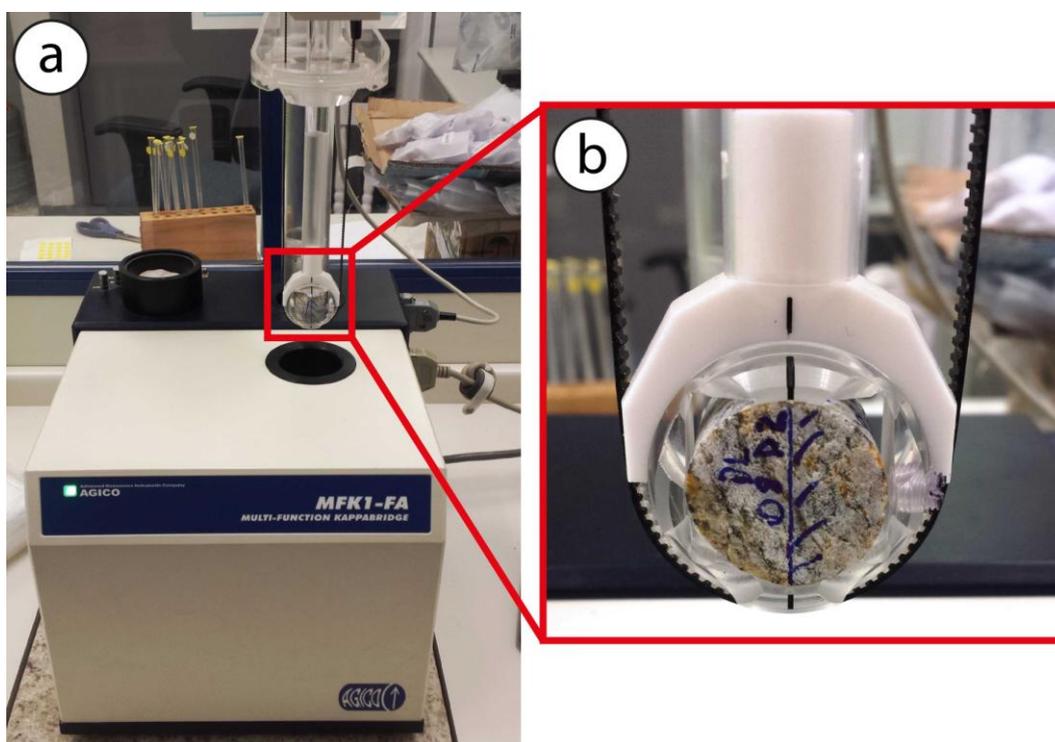


Figura 15. Susceptibilímetro Kappabridge MFK1-FA utilizado para a aquisição dos dados de ASM (a) e em detalhe o espécime posicionado no cabeçote do equipamento (b).

4. RESULTADOS

Os resultados a seguir são divididos em duas seções principais. A primeira refere-se à mineralogia magnética e descreve nas subseções os resultados obtidos com cada técnica analítica utilizada. A segunda descreve os dados escalares e direcionais obtidos pela análise da anisotropia de susceptibilidade magnética (ASM).

4.1. MINERALOGIA MAGNÉTICA

4.1.1 - Curvas termomagnéticas

As curvas termomagnéticas representativas do Granito Butiá estão na figura 16. Em todos os sítios, a susceptibilidade magnética (K) mostra valores baixos, que variam em função da temperatura. Nenhuma das curvas indicou transição de fase no ciclo de baixa temperatura, e todas tiveram comportamento irreversível, ou seja, a susceptibilidade magnética medida no ciclo de aquecimento sobe em função da temperatura (formação de outras fases minerais) até uma queda abrupta (temperatura de Curie) e, no ciclo de resfriamento, K mostra valores mais elevados que para o ciclo de aquecimento, devido à presença desses minerais neoformados. Essa mudança pode ser observada nas quatro amostras pelo aumento de K no ciclo de aquecimento (25°C a 700 °C); nas curvas dos sítios DL-03, DL-08 e DL-13 o aumento de K se intensifica a aproximadamente 400-500°C e sofre uma queda a 550~570°C, sugerindo a formação de magnetita ou titanomagnetita durante o aquecimento da amostra. No sítio DL-08 existe mais de uma queda abrupta, o que indica a presença de mais de uma fase mineral magnética (formada no ciclo de aquecimento). A curva do sítio DL-14 tem um comportamento anômalo, tendo o aumento de K a aproximadamente 280°C e sua queda constante a partir de 320°C. No ciclo de resfriamento, todas elas (exceto DL-03) têm o aumento de K próximo à temperatura de Curie das soluções de Fe-Ti (titanomagnetita); em DL-08 parece existir magnetita pura ($T_c \sim 585^\circ\text{C}$), gerada durante o ciclo de aquecimento.

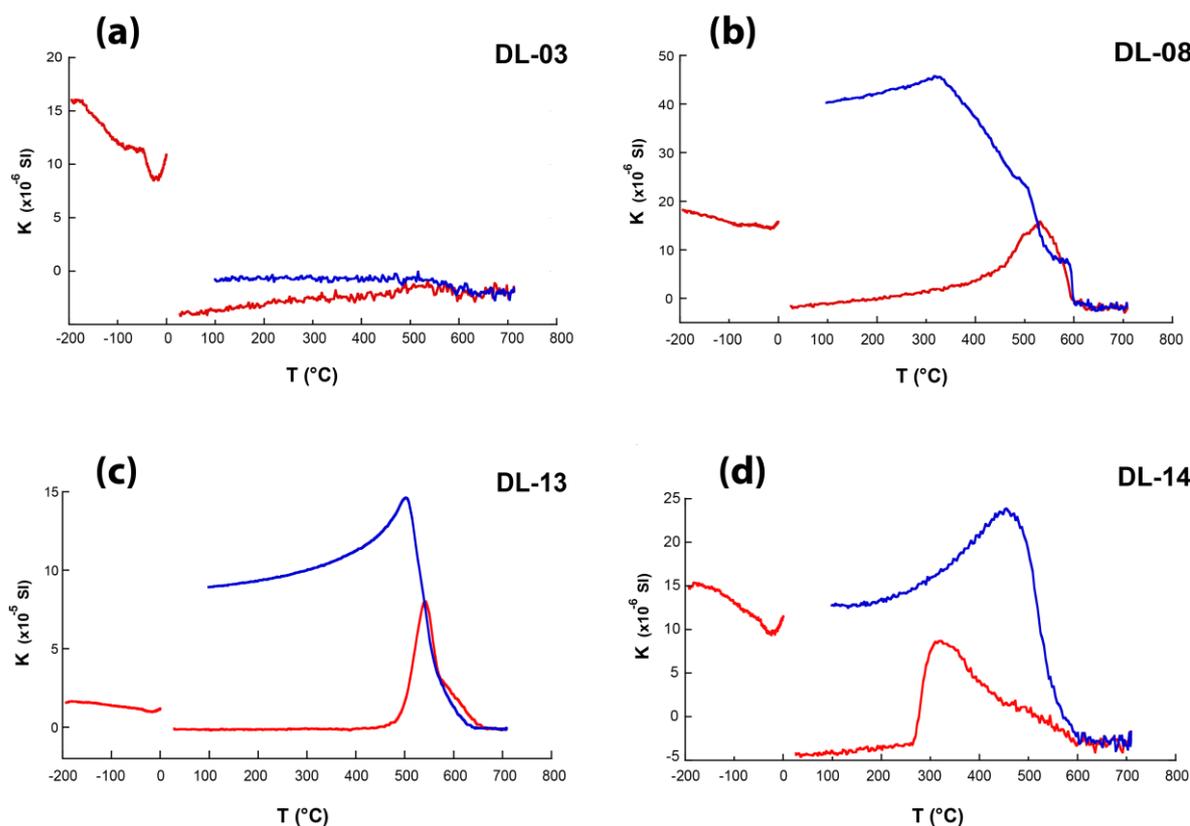


Figura 16. Curvas termomagnéticas representativas dos sítios DL-13 (A), DL-08 (B), DL-13 (C) e DL-14 (D). Estão representados os ciclos de aquecimento (vermelho) e resfriamento (azul).

4.1.2 - Curvas de aquisição de magnetização remanente isotérmica (MRI)

As curvas de aquisição de magnetização remanente isotérmica (MRI) são muito similares entre si. No padrão mais comum (65% dos sítios), a magnetização remanente varia muito em função do campo aplicado, não existindo um padrão contínuo e não ocorrendo saturação da magnetização remanente até 1 T (Fig. 17a). No sítio DL-14 existe uma linearidade positiva entre campo aplicado e magnetização remanente, também não havendo saturação até 1 T (Fig. 17b), típicos de mineralogia puramente paramagnética (e.g. Dunlop & Özdemir, 1997). Os sítios DL-05 e DL-08 parecem ter duas componentes, uma magnética de alta coercividade tem uma saturação aparente entre 100 mT e 200 mT, e outra paramagnética, mais evidente no sítio DL-08 devido à linearidade da curva para campos maiores que 200 mT (Fig. 17c). Por fim, a amostra DL-13 apresentou um padrão descontínuo para

campos menores que 200 mT e uma tendência à saturação quando o campo aplicado chega a valores próximos de 800 mT e 1T (Fig. 17d).

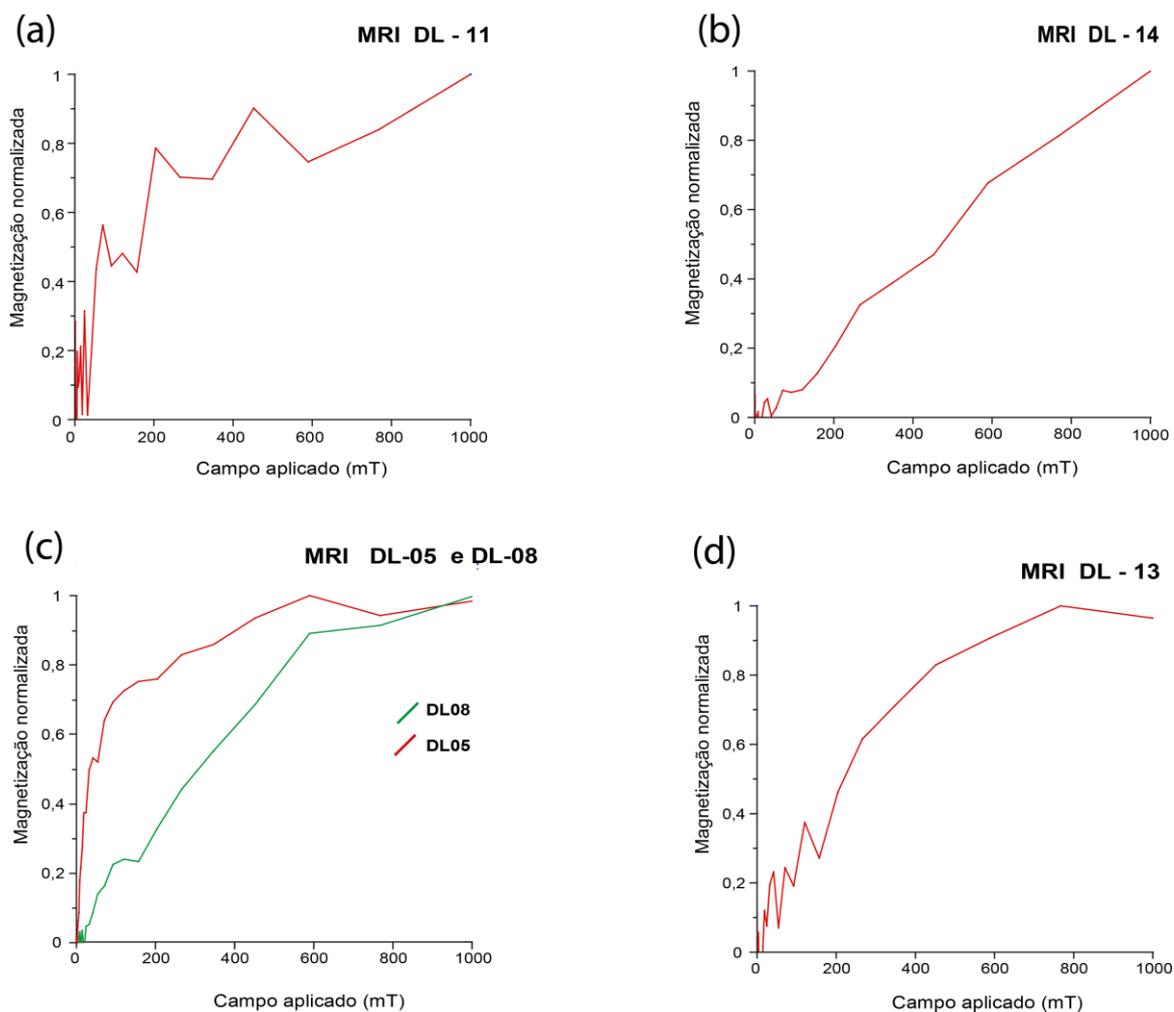


Figura 17. Curvas de aquisição de magnetização remanente isotérmica (MRI) representativas dos sítios DL 11 (A), DL 14 (B), DL 08 e 05 (C), e DL 13 (D). Os formatos das curvas e a não saturação com a aplicação de campo magnético artificial sugerem a presença de minerais paramagnéticos.

4.1.3 - Curvas de histerese

As curvas de histerese da figura 18 mostram, em geral, um padrão semelhante para a maioria os sítios estudados. A magnetização é zero quando o campo aplicado é nulo e, com o aumento do campo, a magnetização cresce ou decresce segundo uma função linear, revelando assim uma contribuição paramagnética no Granito Butiá. A única exceção ocorre no sítio DL-05 onde, se analisado em detalhe, percebe-se que, para valores baixos de campo aplicado, a curva obedece a uma função exponencial e em seguida uma função linear, o que indicaria que, mesmo com a forte contribuição paramagnética, tem-se uma pequena contribuição ferromagnética na amostra. Este padrão se repete mesmo após a correção da porção paramagnética.

Curvas de Histerese

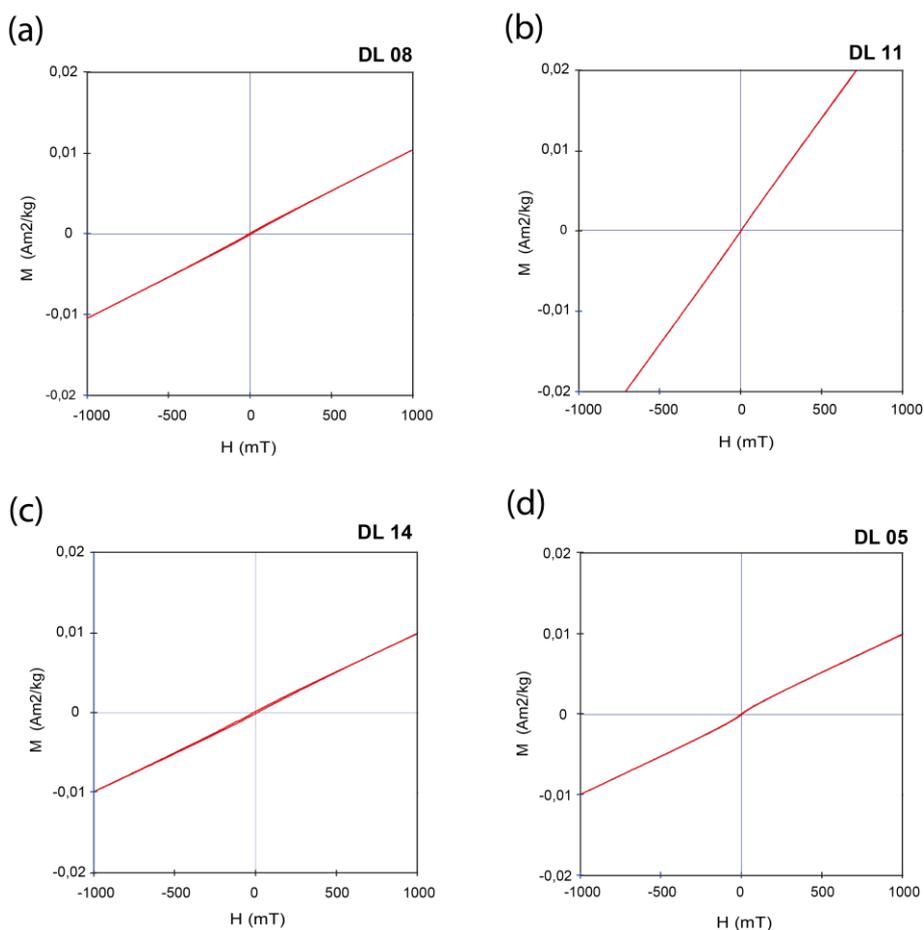


Figura 18. Curvas de histereses representativas dos sítios DL 08 (A), DL 11(B), DL 14 (C), e DL 05 (D). O formato das curvas de histerese sugere a presença de um mineral paramagnético, como a biotita, indicado pelo formato linear dos ciclos de histerese (traço em vermelho).

4.1.4 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Com base nos resultados obtidos nas curvas de histerese, curvas de MRI e ASM, foram selecionados quatro sítios (DL-05, DL-08, DL-11 e DL-14) para as análises no MEV-EDS.

A mineralogia máfica e opaca contribuem significativamente para a susceptibilidade magnética e sua anisotropia em rochas graníticas. No caso do Granito Butiá, a biotita é o principal mineral máfico, ocorrendo como agregados alongados que marcam a foliação. Muitas vezes a biotita está intercrescida com muscovita e, junto a elas, as vezes ocorre também silimanita magmática (Fig. 19a). Os dados de MEV-EDS mostram que ilmenita e rutilo são os principais óxidos de Fe e Ti encontrados nas lâminas em três lâminas de quatro analisadas (sítios DL-05, DL-08 e DL-11). A ilmenita forma cristais anédricos de até 100 μm , às vezes alongado, orientados no plano de foliação, entre os agregados de biotita + muscovita \pm silimanita (Fig. 19b e 19c). Ela possivelmente cristaliza em equilíbrio com esses minerais e é, portanto, primária. O rutilo ocorre principalmente como cristais aciculares/alongados cristalizados no plano de clivagem da biotita (Fig. 20a), principalmente naquelas mais ricas em titânio.

Na amostra DL-11 foi encontrado óxido de manganês (MnO) com hábitos disforme em porções próximas à biotitas cloritizadas, evidenciando uma possível origem secundária desses óxidos (Fig. 20b). Na amostra DL-14 a quantidade de micas é inferior à dos demais sítios, e o mineral opaco mais abundante é sulfeto de ferro, provavelmente pirita de origem secundária, uma vez que preenche fraturas abundantes (Fig. 20c). Óxidos de ferro foram apenas encontrados no sítio DL-05; eles ocorrem como pequenas inclusões irregulares dispersas em plagioclásio e feldspato potássico que não excedem 100 μm (Fig. 20D).

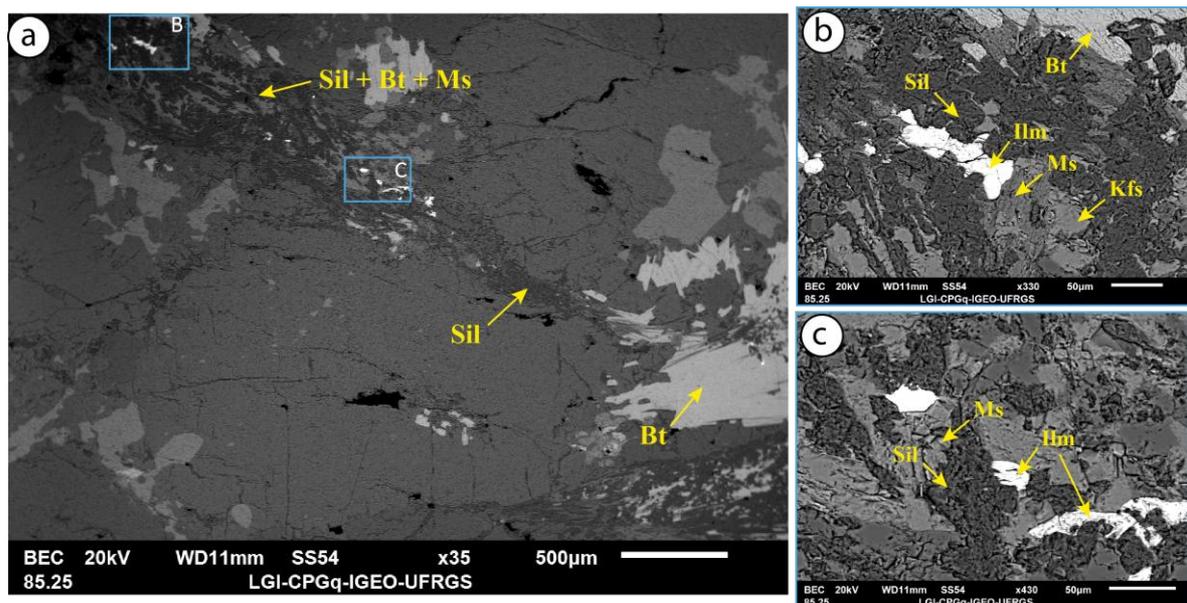


Figura 19. Fotos da lâmina do sítio DL-08: agregado de biotita, muscovita e silimanita marcando o plano da foliação, oblíquo na foto (do topo esquerdo ao canto direito) **(a)** e detalhe da foto anterior, com cristais de ilmenita alongado segundo o plano da foliação **(b)** e **(c)**. Legenda: biotita (Bt), silimanita (Sil), muscovita (Ms) ilmenita (Ilm) e feldspato potássico (Kfs).

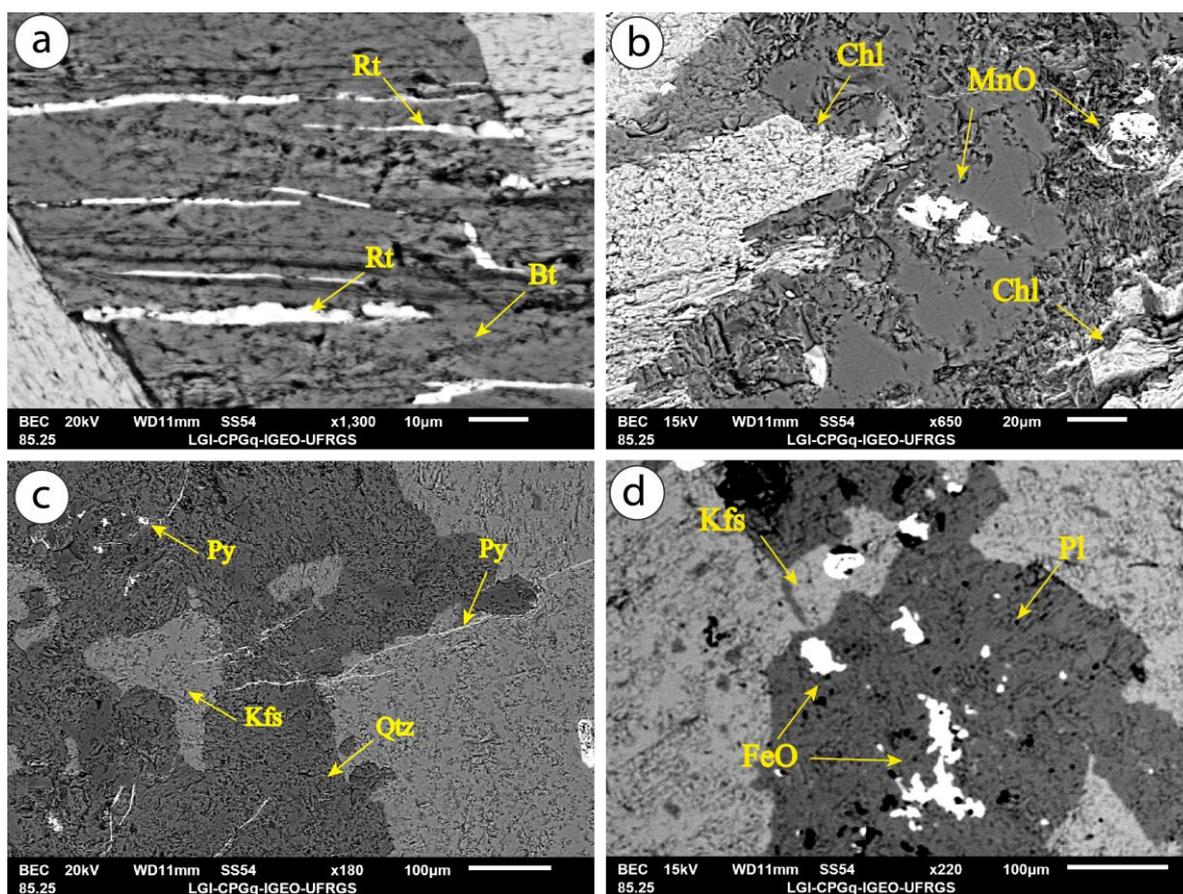


Figura 20. **(A)** DL-11: Rutilo cristalizado paralelo à clivagem da biotita, **(B)** DL-11: Óxido de manganês cristalizado em meio a biotita cloritizada e plagioclásio, **(C)** DL-14: Pirita preenchendo fraturas que cortam cristais de feldspato potássico e quartzo, e **(D)** DL-05: óxido de ferro alotriomórfico incluído em plagioclásio e feldspato alcalino. Legenda: biotita (Bt), rutilo (Rt), clorita (Chl), pirita (Py), feldspato potássico (Kfs), quartzo (Qtz), plagioclásio (Pl), óxidos de ferro (FeO) e óxidos de manganês (MnO).

4.2. TRAMA MAGNÉTICA

Os resultados obtidos nas análises de ASM para os parâmetros escalares e direcionais estão descritos em sequência para cada sítio (ver mapa de pontos – Fig. 21), e os valores médios desses parâmetros estão reunidos na tabela 2.

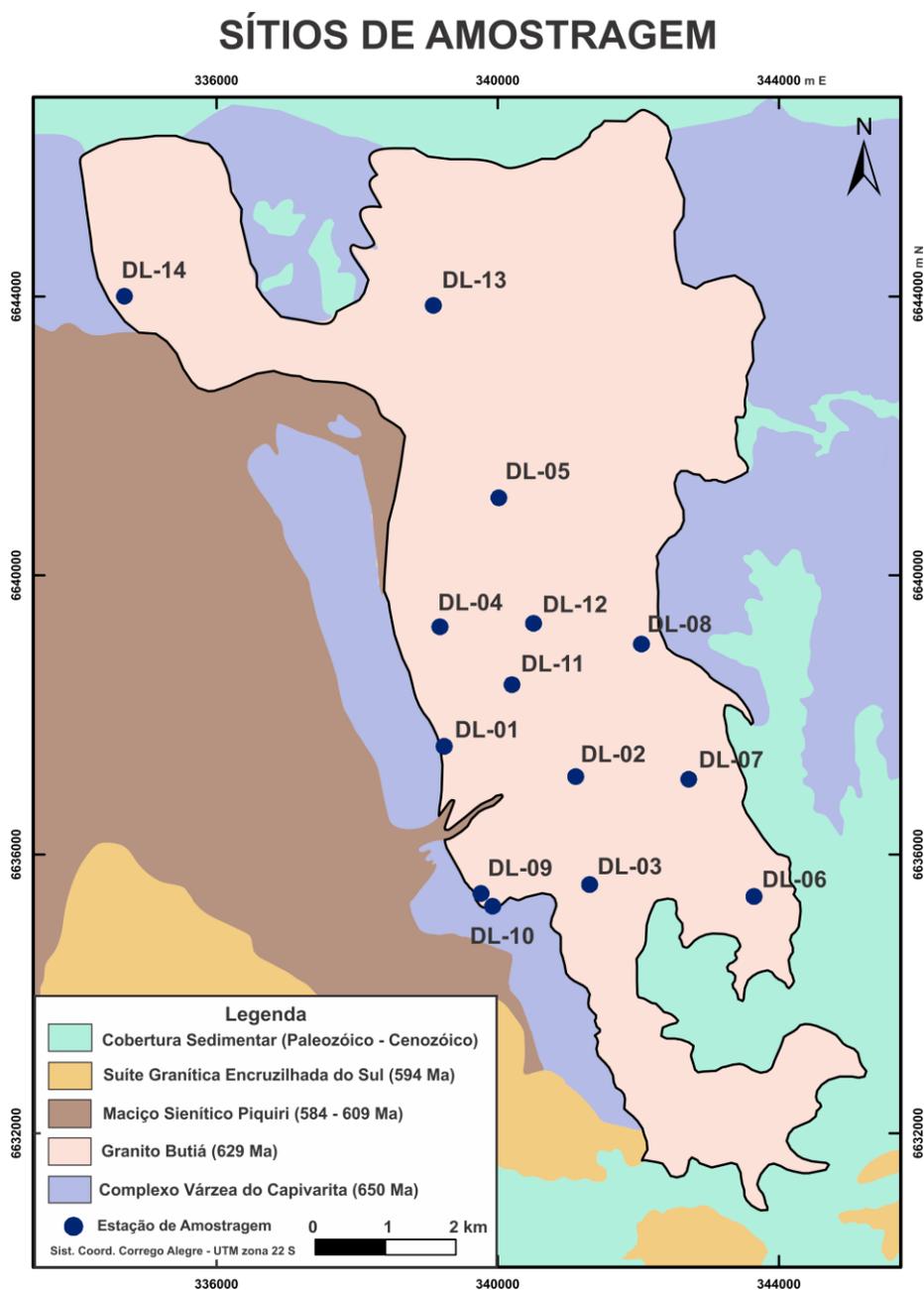


Figura 21. Mapa geológico com os sítios amostrados. Base do mapa modificado de UFRGS (2008).

Tabela 1 - Parâmetros escalares e direcionais dos 14 sítios amostrados ao longo do Granito Butiá, onde: (n) número de espécimes utilizados para os cálculos estatísticos, (N) número total de espécimes medidos, (Km) susceptibilidade magnética média do sítio, (P) grau de anisotropia ($P=K_1/K_3$), (T) parâmetro de forma, (K_1, K_2 e K_3) eixos máximo, intermediário e mínimo, (Dec) declinação (Inc) inclinação e e1, e2, e3 correspondem aos semi-ângulos das elipses de confiança (95%) em torno das respectivas direções médias.

Sítio	Parâmetros Escalares						Parâmetros direcionais								
	UTM	UTM	n/N	Km (SI)	P	T	K ₁			K ₂			K ₃		
	E (m)	N (m)					Dec (°)	Inc (°)	e1	Dec (°)	Inc (°)	e2	Dec (°)	Inc (°)	e3
DL-01	339241	6637550	30/30	3,25E-05	1,253	0,908	172	38	62,6	348	52	62,6	080	02	7,7
DL-02	341112	6637116	25/34	6,13E-05	1,101	0,397	272	56	12,8	163	21	14,6	063	25	12,6
DL-03	341312	6635571	28/31	4,05E-05	1,154	0,532	331	14	14,4	160	75	14,5	061	02	7,5
DL-04	339181	6639267	28/31	4,57E-05	1,141	0,560	320	51	16,9	145	39	16,9	053	03	8,6
DL-05	340017	6641115	33/38	3,32E-05	1,073	0,387	316	26	26,2	195	47	26,2	064	31	15,5
DL-06	343648	6635400	30/30	3,82E-05	1,259	0,640	147	12	12,2	275	71	11,2	054	14	7,9
DL-07	342718	6637078	31/31	3,48E-05	1,246	0,560	323	14	8,5	200	65	8,1	059	20	8,6
DL-08	342047	6639019	34/34	4,21E-05	1,112	0,400	309	31	10,7	194	34	11,0	069	40	7,5
DL-09	339717	6635263	36/36	2,31E-05	1,266	0,810	169	19	51,9	041	60	51,8	267	21	10,9
DL-10	339739	6635211	37/37	3,67E-05	1,136	0,823	045	61	33,4	171	18	33,4	269	22	7,0
DL-11	340206	6638434	28/31	5,49E-05	1,127	0,636	315	26	21,2	170	59	20,8	053	15	15,8
DL-12	340515	6639316	26/31	6,60E-05	1,118	0,623	312	23	15,0	185	55	14,9	055	25	9,1
DL-13	339088	6643876	34/44	5,31E-05	1,108	0,749	299	66	60,7	184	11	60,9	090	21	18,4
DL-14	334691	6644006	32/34	9,59E-06	1,209	0,272	324	06	31,9	219	67	31,9	056	22	9,7

DL-01

A susceptibilidade magnética média (K_m) dos espécimes é baixa, tendo um valor médio de $3,25 \times 10^{-5}$ SI. O grau de anisotropia (P) é relativamente alto e varia de 1,145 a 1,315 e, quando correlacionado aos valores de susceptibilidade magnética média (K_m), decresce levemente (Fig. 22). O parâmetro de forma (T) tem valores elevados (próximo a $T = 1$) e um valor médio de 0,908, o que indica um elipsoide magnético quase puramente oblato (Fig. 22b).

Os eixos mínimos (K_3) de susceptibilidade magnética têm uma forte correlação entre si e plotam todos muito próximos, evidenciando uma foliação magnética muito bem marcada de direção aproximadamente N-S e com alto ângulo de mergulho para E ou W. Os eixos magnéticos intermediários (K_2) e máximos (K_1) distribuem-se ao longo do plano da foliação magnética e têm caimentos que variam de baixo a alto ângulo. Entretanto, a atitude média da lineação magnética dada pelo eixo máximo (K_1) é (38;172), ou seja, moderado a baixo caimento para o sul (Fig. 22c).

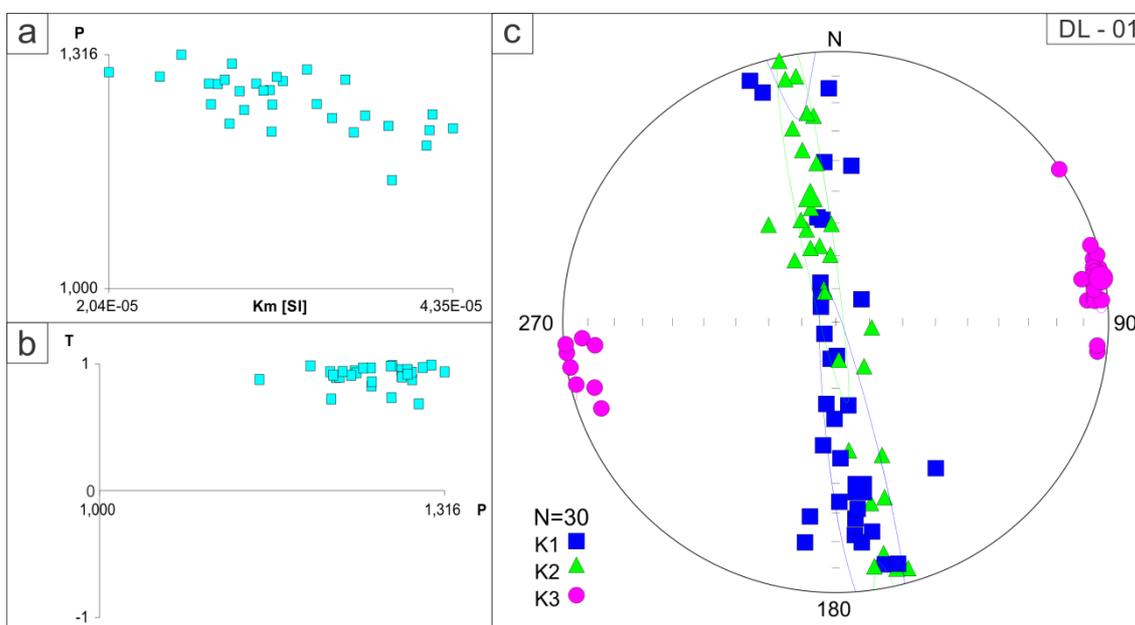


Figura 22. Dados obtidos para o sítio DL-01: **(a)** grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), **(b)** parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; **(c)** eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiárea de Schmidt, hemisfério inferior).

DL-02

Neste sítio foram amostrados 12 cilindros resultando em um total de 34 espécimes. Os cilindros D, E e F foram obtidos em uma dobra assimétrica de escala de afloramento; o cilindro F foi retirado da zona de charneira, enquanto D e E foram retirados do flanco curto da dobra (Fig. 23). No flanco comprido da dobra foram retirados os cilindros G, H e I. Nele a foliação magmática S_{0-m} (80/261) medida em campo tem atitude semelhante à de zonas onde não se observam dobras, com atitude média S_{0-m} (70/282). Os cilindros restantes (A, B, C, J, K e L) foram retirados fora da zona dobrada e os dados estão representados na figura 24.



Figura 23. Dobra em escala de afloramento no sítio DL-02, onde foram amostrados os cilindros D, E e F com a respectiva atitude de foliação medida em campo. Vista em planta.

Os espécimes D, E e F foram analisados separadamente (Fig. 24). O grau de anisotropia (P) tem valores baixos, da ordem de 1,10 (Fig. 24a), e o parâmetro de forma (T) indica elipsoide prolato, com a maioria das amostras no campo de $T < 0$ (Fig. 24b). As medidas indicam uma lineação bem desenvolvida, marcada pelo agrupamento do eixo máximo (K_1) de susceptibilidade magnética. Os eixos mínimo (K_3) e médio (K_2) se distribuem em um círculo máximo perpendicular a K_1 , conforme esperado para elipsoides prolatos. A orientação do círculo máximo indica a posição da foliação magnética. Os dados obtidos em flancos e charneiras de mesodobras se distribuem ao longo deste meridiano (Fig. 24c).

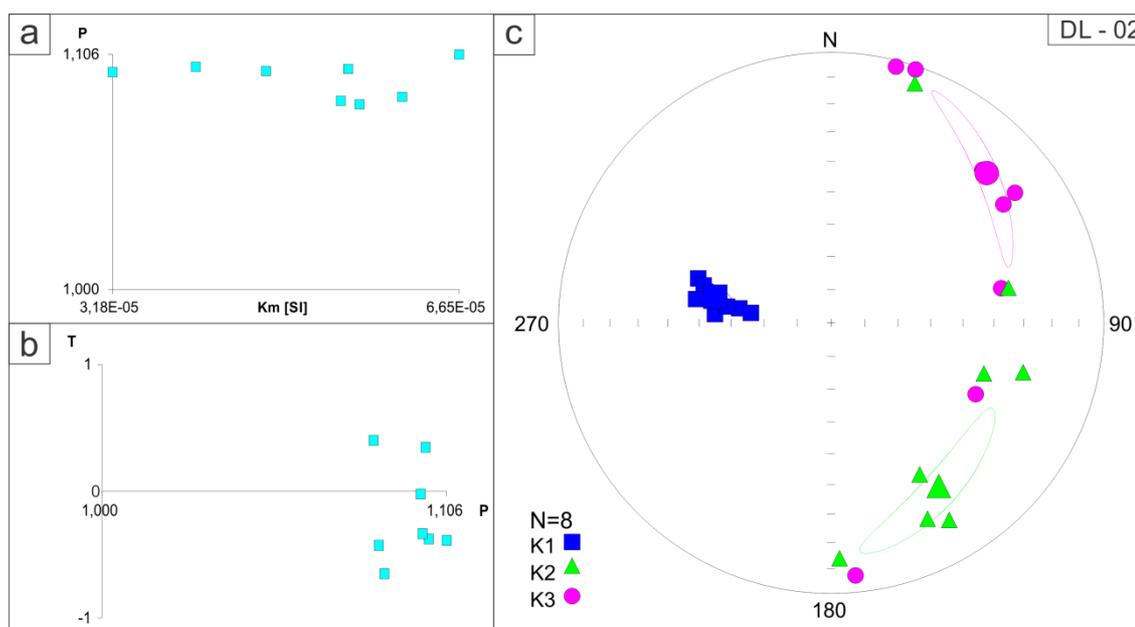


Figura 24. Dados referentes aos cilindros D, E e F amostrados na dobra do sítio DL-02. (a) Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), (b) Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; (c) Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).

Para o restante das amostras, a susceptibilidade magnética média (K_m) varia bastante, tendo valores entre $3,18 \times 10^{-5}$ e $8,44 \times 10^{-5}$, com um valor médio de $6,13 \times 10^{-5}$ SI. O grau de anisotropia (P) é baixo (média 1,101) e cresce em função da susceptibilidade magnética (K_m). A análise do parâmetro de forma (T) (Fig. 25b), em conjunto com a distribuição dos eixos magnéticos, descreve o comportamento de um

elipsoide entre triaxial e oblato, embora a maioria das medidas plotem no campo $T > 0$.

A figura 25c indica que existem dois grupos de valores muito próximos entre si para os eixos K_1 , K_2 e K_3 , embora em geral eles apresentem uma baixa dispersão. A foliação magnética, marcada pelo eixo K_3 , mostra direção NNW-NW com mergulhos moderados para WSW a SW. A lineação magnética (K_1) tem caimento moderado a alto para W.

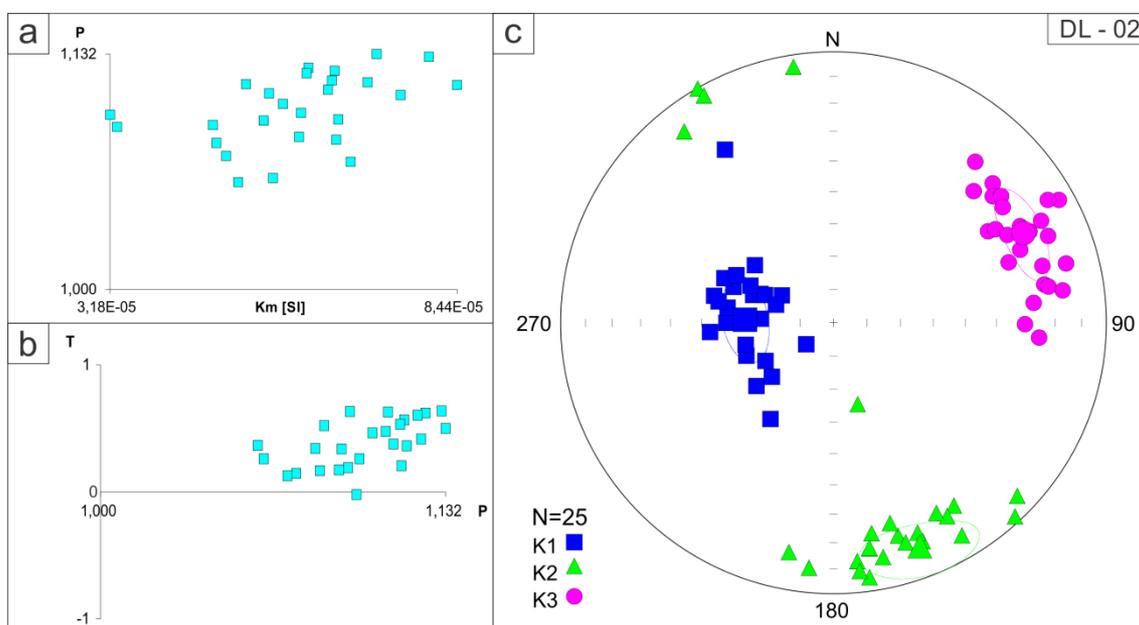


Figura 25. Espécimes dos cilindros A, B, C, J, K e L do sítio DL-02, onde **(a)** Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), **(b)** Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; **(c)** Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).

DL-03

A susceptibilidade magnética média (K_m) do sítio tem um valor de $4,05 \times 10^{-5}$ SI. O grau de anisotropia (P) tem valores moderados a alto, com valor médio de 1,154 (Fig. 26a). O parâmetro de forma (T) (Fig. 26b) tem valores moderados e, embora todos estejam no campo de $T > 0$, a forma que melhor descreve o elipsoide é a triaxial-oblata, já que a distribuição dos eixos intermediário e máximo não formam uma guirlanda no plano da foliação.

Na Fig. 26c, observa-se uma pequena dispersão dos valores de K_1 , K_2 e K_3 , demonstrando duas famílias com atitudes muito próximas de foliação e lineação magnética. Em média, a foliação magnética (K_3) tem altos ângulos de mergulho para WSW ou ENE e a lineação magnética (K_1) tem caimentos de baixo ângulo para NNW ou SSE.

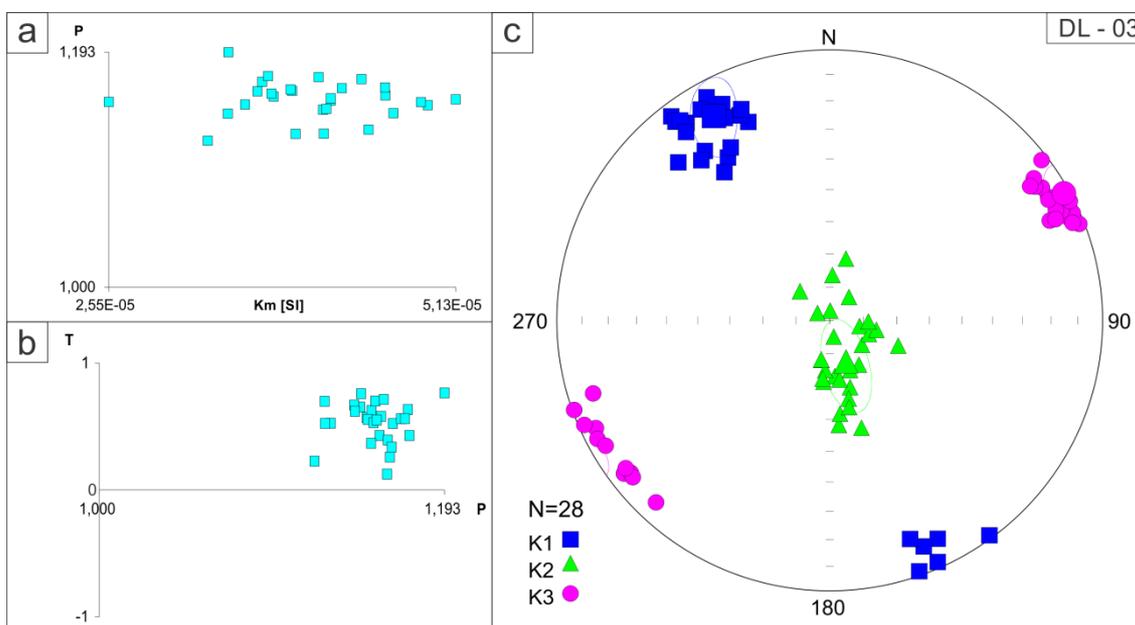


Figura 26. Dados obtidos para o sítio DL-03: **(a)** Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), **(b)** Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; **(c)** Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).

DL-04

A susceptibilidade magnética média (K_m) do sítio tem um valor médio de $4,57 \times 10^{-5}$ SI. O grau de anisotropia (P) varia de baixo a moderado e tem média de 1,14 (Fig. 27a). O parâmetro de forma (T) apresenta valores altos a moderados que plotam no campo $T > 0$ e descreve um elipsoide oblato, com foliação bem marcada, onde os eixos máximo e intermediário se distribuem.

A figura 27c mostra que os eixos mínimos (K_3) de susceptibilidade magnética agrupam-se sutilmente em dois grupos de valores próximos entre si, com o valor médio plotando entre eles, evidenciando duas famílias de foliação magnética de direção aproximadamente NW-SE e com alto ângulo de mergulho para SW ou NE. Os eixos máximos (K_1) evidenciam uma lineação magnética com caimentos moderados para NW.

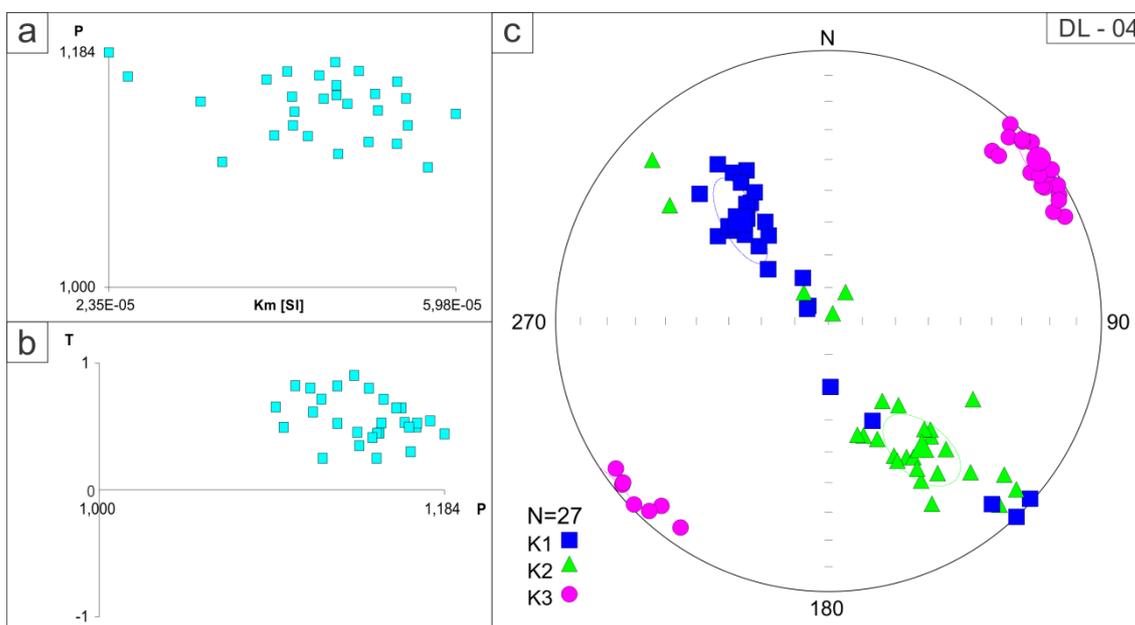


Figura 27. Dados obtidos para o sítio DL-04: (a) Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), (b) Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; (c) Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).

DL-05

A susceptibilidade magnética média (K_m) dos espécimes tem um valor médio de $3,32 \times 10^{-5}$ SI. O grau de anisotropia (P) é baixo, tendo valores entre 1,037 e 1,117 e um valor médio de 1,073 (Fig. 28a). O parâmetro de forma (T) mostra valores em todos os campos, $T < 0$, $T = 0$ e $T > 0$ (Fig. 28b), e representa um elipsoide com forma triaxial, com alta dispersão das medidas.

Os dados direcionais mostram que existe uma dispersão entre os valores de cada um dos eixos, mesmo que embora cada eixo magnético K_1 , K_2 e K_3 plote em um respectivo quadrante (Fig. 28c), ou seja, a foliação e lineação magnética não são tão bem definidas. A foliação magnética, marcada por (K_3), tem direção média NW-SE e moderado ângulo de mergulho para SW. A lineação magnética (K_1) tem em média baixo ângulo de caimento para NW.

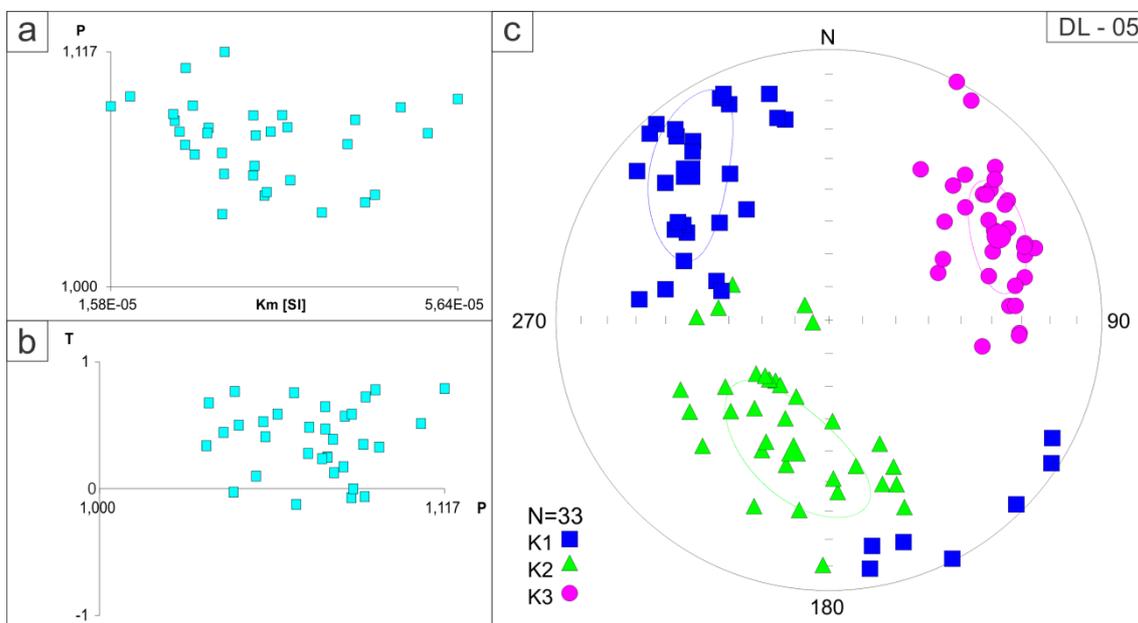


Figura 28. Dados obtidos para o sítio DL-05: **(a)** Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), **(b)** Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; **(c)** Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).

DL-06

A susceptibilidade magnética média (K_m) do sítio é $3,82 \times 10^{-5}$ SI. O grau de anisotropia (P) tem valores altos, entre 1,194 e 1,304 (Fig. 29a). O parâmetro de forma (T) mostra um forte agrupamento dos valores no campo do de $T > 0$ (Fig. 29b). A análise de T em conjunto à distribuição distinta dos três eixos no estereograma, mostra que o elisoide é triaxial, tendo foliação e lineação definidas.

Em relação aos eixos magnéticos (Fig. 29c), observa-se que os eixos mínimos (K_3) e máximos (K_1) de susceptibilidade magnética agrupam-se em duas famílias com atitudes próximas entre si, evidenciando duas foliações magnéticas de direção NW-SE com mergulhos para SW e WSW e duas lineações magnéticas com caimentos de baixo ângulo para SE e SSE.

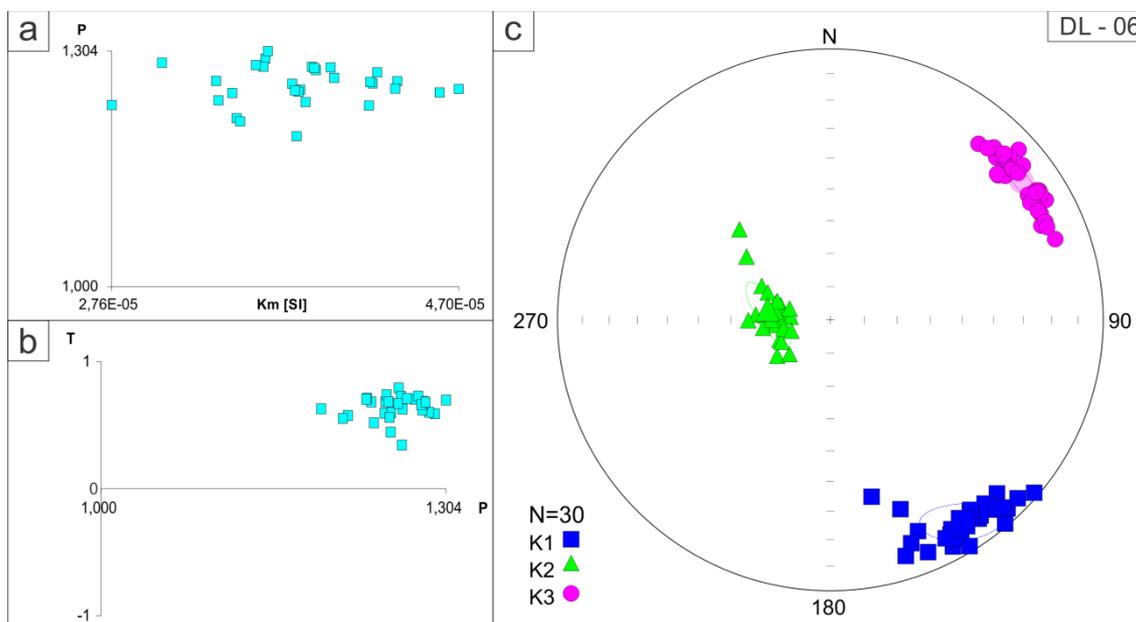


Figura 29. Dados obtidos para o sítio DL-06: **(a)** Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), **(b)** Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; **(c)** Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).

DL-07

A susceptibilidade magnética média (K_m) dos espécimes tem um valor médio de $3,48 \times 10^{-5}$ SI. O grau de anisotropia (P) tem valores altos de até 1,344 e diminuí em função de K_m (Fig. 30a). O parâmetro de forma (T) tem valores moderados a altos, com a maioria no campo de $T > 0$ (Fig. 30b), entretanto o elipsoide tende a triaxial devido a distribuição distinta dos eixos magnéticos no estereograma.

A figura 30c indica que os eixos mínimos (K_3) e máximos (K_1) de susceptibilidade magnética agrupam-se sutilmente em duas famílias com atitudes próximas, indicando duas foliações magnéticas de direção NW-SE com altos ângulos de mergulho para SW e WSW e lineações magnéticas com caimentos de baixo ângulo para NW-NNW.

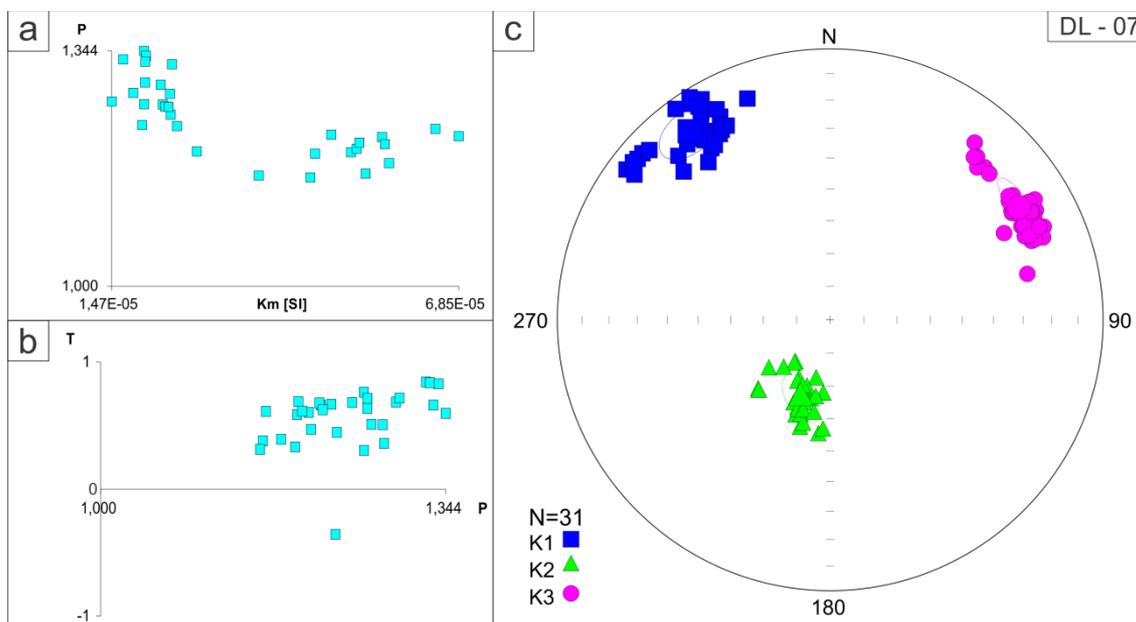


Figura 30. Dados obtidos para o sítio DL-07: **(a)** Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), **(b)** Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; **(c)** Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).

DL-08

A susceptibilidade magnética média (K_m) dos espécimes tem um valor médio de $4,21 \times 10^{-5}$ SI e o grau de anisotropia (P) apresenta valores baixos a moderados, entre 1,074 e 1,149 (Fig. 31a). O parâmetro de forma (T) cresce em função do grau de anisotropia e têm os valores de $T > 0$ (Fig. 31b). A sutil distribuição dos eixos K_1 e K_2 no plano da foliação mostra um elipsoide que tende de triaxial a oblato.

A figura 31c mostra que a foliação magnética é bem definida por K_3 e tem direção NNW-SSE e que a pequena dispersão de K_1 , no plano da foliação, mostra uma lineação menos definida com caimento moderado a baixo para NW.

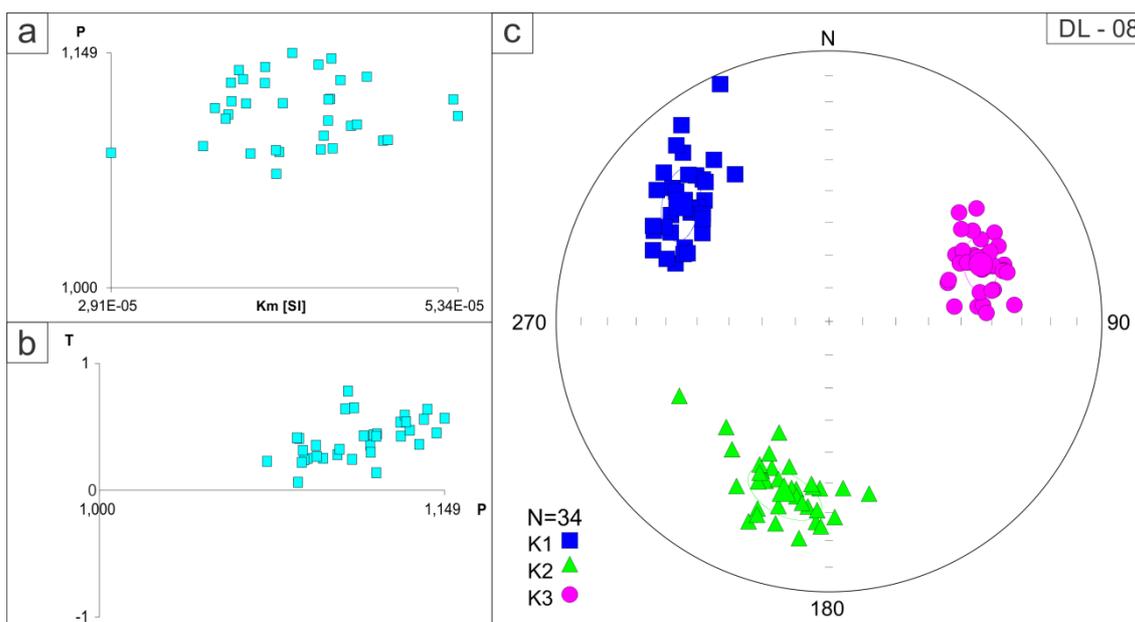


Figura 31. Dados obtidos para o sítio DL-08: **(a)** Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), **(b)** Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; **(c)** Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).

DL-09

A susceptibilidade magnética média (K_m) dos espécimes tem um valor médio de $2,31 \times 10^{-5}$ SI. O grau de anisotropia (P) tem valores elevados, chegando a 1,381 (Fig. 32a). O parâmetro de forma (T) tem valores elevados, com média de 0,810 (Fig. 32b), e pela análise integrada à relação entre os eixos, define um elipsoide oblato, com trama planar bem desenvolvida, marcada pelo agrupamento de K_3 e distribuição de K_1 e K_2 no plano da foliação magnética.

A figura 32c mostra que a foliação magnética tem em média direção N-S com altos ângulos de mergulho para leste, mesmo que alguns dados demonstrem uma variação na direção para NNW-SSE e mergulhos para ENE. O elipsoide oblato não permite definir bem a lineação; mesmo assim ela tem caimentos de baixo ângulo para norte e sul, e é paralela à direção da foliação.

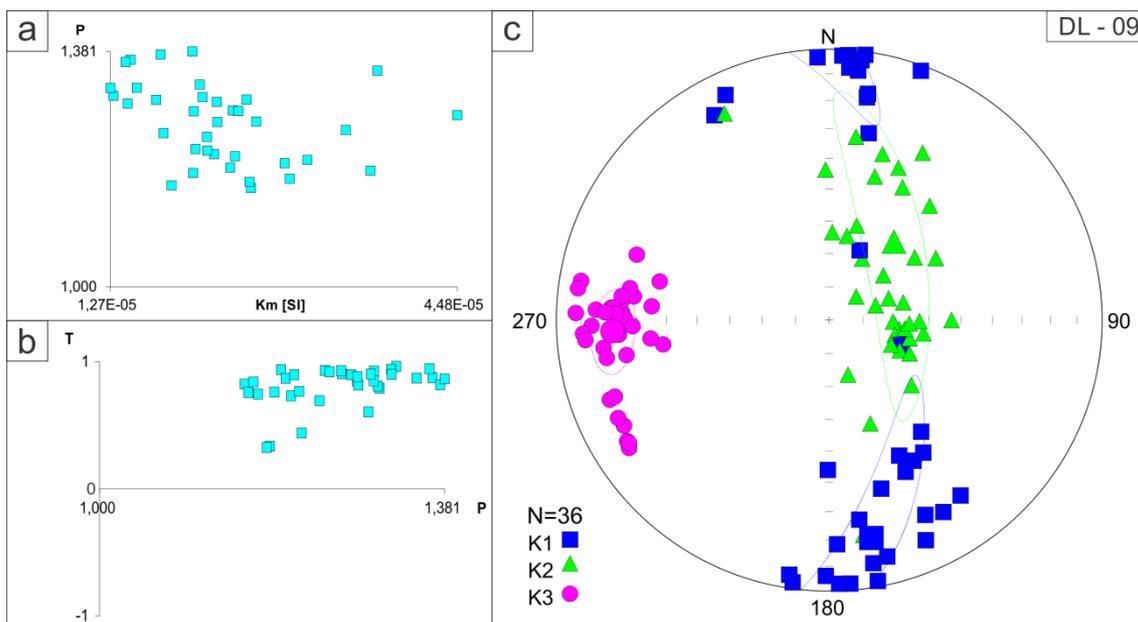


Figura 32. Dados obtidos para o sítio DL-09: **(a)** Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), **(b)** Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; **(c)** Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).

DL-10

A susceptibilidade magnética média (K_m) dos espécimes tem valor médio de $3,67 \times 10^{-5}$ SI e o grau de anisotropia (P) varia pouco, com média 1,136 (Fig. 33a). O parâmetro de forma (T) tem valores elevados (média 0,823), que plotam no campo do elipsoide oblato ($T > 0$) (Fig. 33b). A análise de T em conjunto à orientação dos eixos mostra elipsoide oblato, portanto apenas a foliação pode ser definida com segurança. A lineação não é bem definida, em função da forma do elipsoide oblato. O eixo mínimo K_3 indica foliação magnética de direção N-S com alto ângulo de mergulho; a lineação se distribui no quadrante NE, com caimento de alto a baixo ângulo.

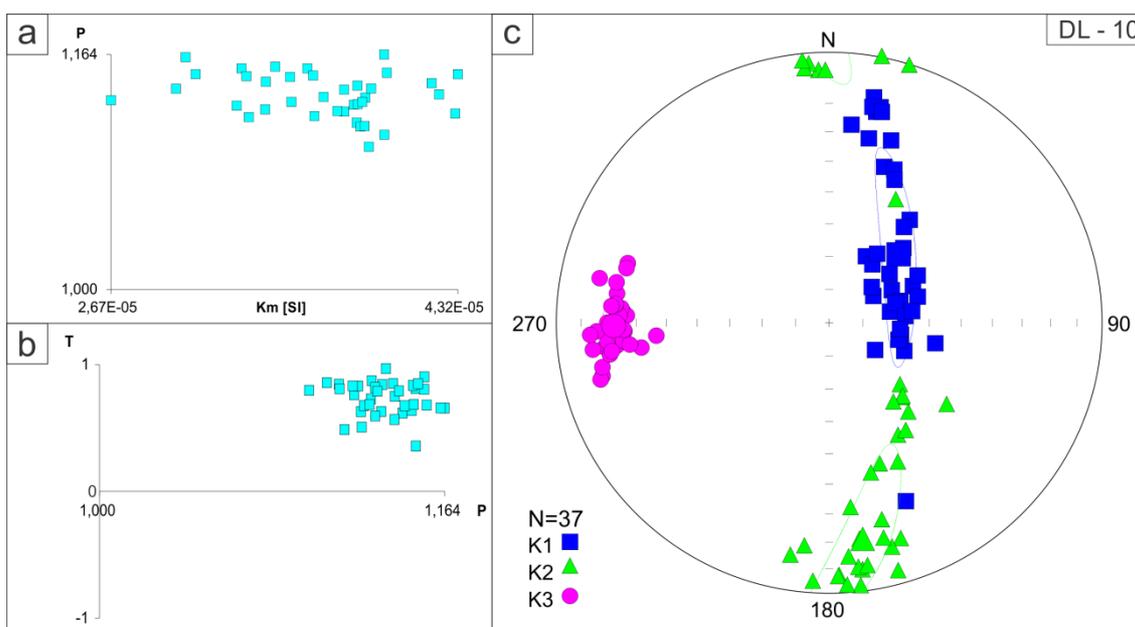


Figura 33. Dados obtidos para o sítio DL-10: **(a)** Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), **(b)** Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; **(c)** Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).

DL-11

A susceptibilidade magnética (K_m) tem valor médio de $5,49 \times 10^{-5}$ SI e o grau de anisotropia (P) tem valores moderados que variam pouco, com um valor médio de 1,127 (Fig. 34a). O parâmetro de forma (T) tem valores moderados a altos, com média de 0,636, todos plotando no campo de $T > 0$ (Fig. 34b); mesmo assim, a distribuição dos eixos representa um elipsoide triaxial, com foliação e lineação magnética não tão definidos (Fig. 34c). Os eixos mínimo (K_3) e máximo (K_1) de susceptibilidade magnética agrupam-se em três grupos com valores próximos entre si, mostrando que existe uma variação direcional da foliação e lineação magnética. A foliação magnética tem direção NNW a NW com altos ângulos de mergulho para WSW e SSW. A lineação magnética tem baixos caimentos para NNW e WNW.

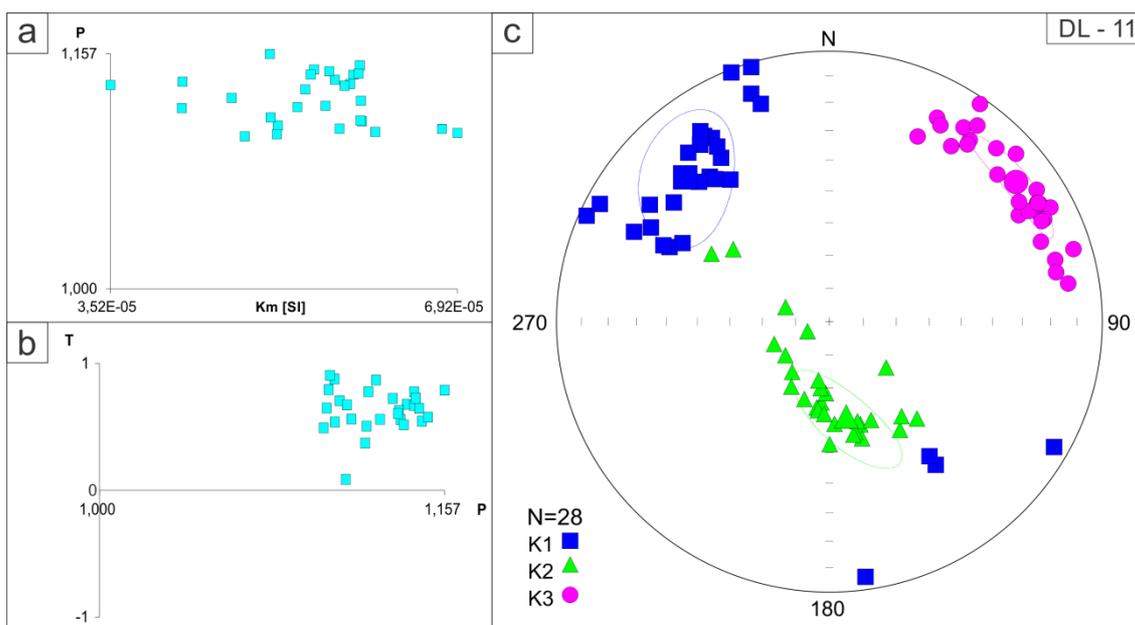


Figura 34. Dados obtidos para o sítio DL-11: **(a)** Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), **(b)** Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; **(c)** Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).

DL-12

A susceptibilidade magnética média (K_m) dos espécimes tem valores mais elevados comparados aos outros sítios, com valor médio de $6,60 \times 10^{-5}$ SI (Fig. 35a). O grau de anisotropia (P) é moderado, com um valor médio de 1,118. A relação entre os eixos mostra valores de $T > 0$ (Fig. 35b), e observando sua distribuição distinta em estereograma, indica um elipsoide triaxial com tendência a oblata, pelo fato de K_1 e K_2 terem uma pequena dispersão no plano da foliação (Fig. 35c). A foliação magnética tem direção NW-SE com altos ângulos de mergulho para SW; a lineação tem baixo ângulo de caimento para NW.

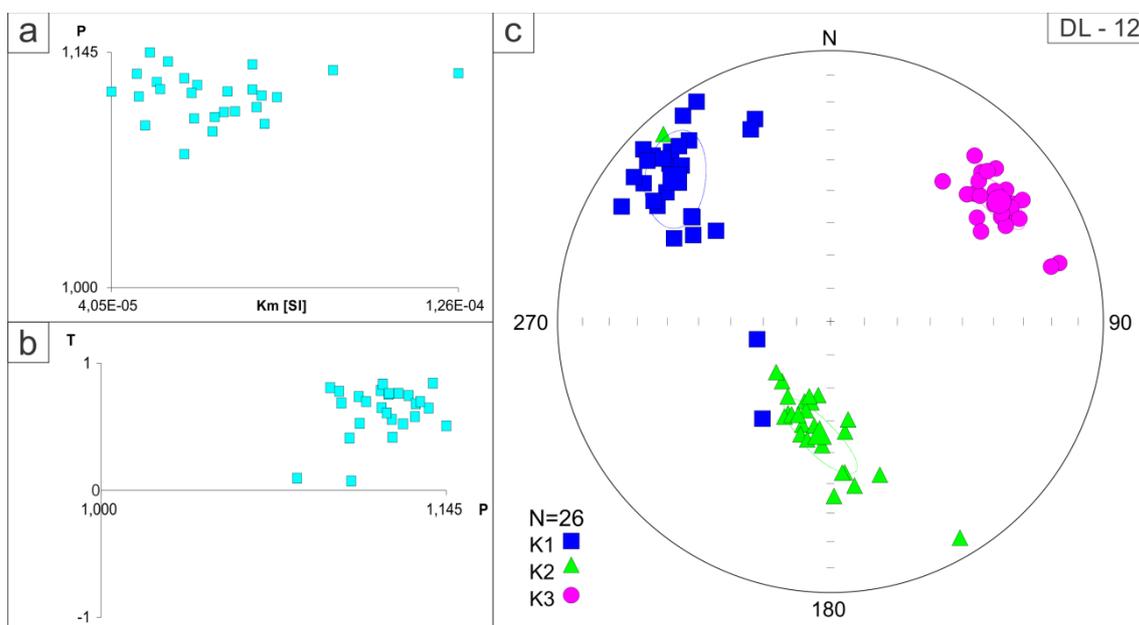


Figura 35. Dados obtidos para o sítio DL-12: **(a)** Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), **(b)** Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; **(c)** Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).

DL-13

Neste sítio foram amostrados 14 cilindros resultando em um total de 44 espécimes, sendo que 10 deles correspondiam a um bolsão pegmatítico e tiveram suas medidas de laboratório descartadas para fins estatísticos. A susceptibilidade magnética média (K_m) do sítio teve um valor médio de $5,31 \times 10^{-5}$ SI. O grau de anisotropia (P) é baixo e tem valores que variam de 1,069 a 1,154 e um valor médio de 1,108 (Fig. 36a). O parâmetro de forma (T) tem valores elevados, onde $T > 0$ (Fig. 36b); A análise de T em conjunto a distribuição do eixos no estereograma, sugere um elipsoide oblato: K_3 define bem a foliação e os eixos K_1 e K_2 se distribuem no plano da foliação. A foliação magnética tem direção N-S com altos ângulos de mergulho para W; a lineação é mal defendida (pois o elipsoide é oblato) tendo caimentos no quadrante NW do plano da foliação.

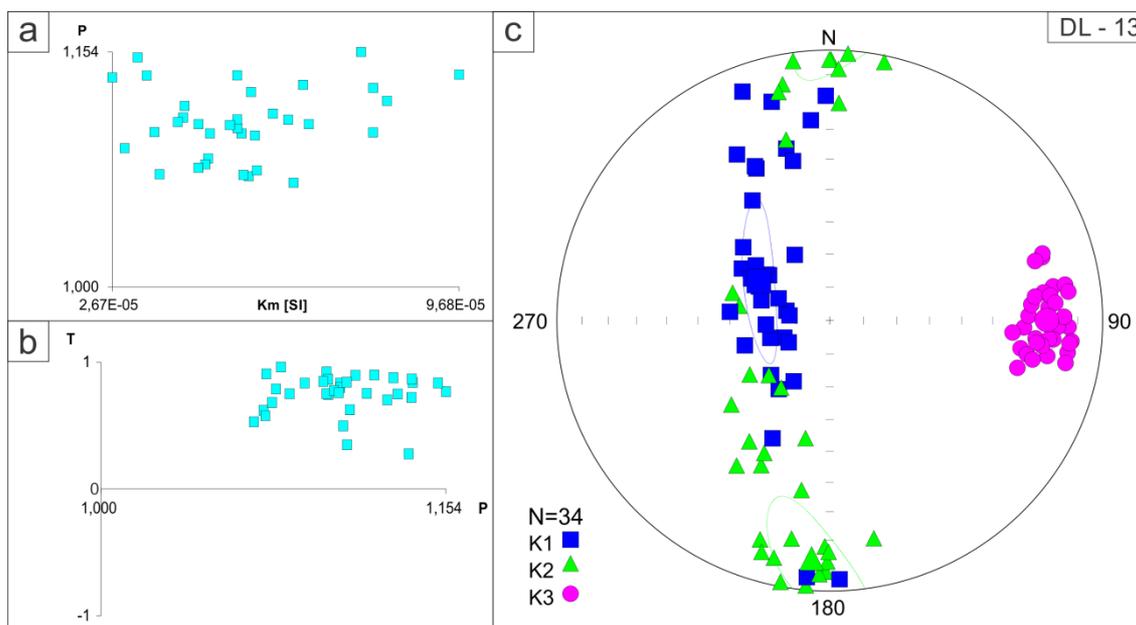


Figura 36. Dados obtidos para o sítio DL-13: **(a)** Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), **(b)** Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; **(c)** Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).

DL-14

A susceptibilidade magnética média (K_m) nesse sítio tem valores os valores mais baixos registrados para o Granito Butiá, que variam de $-1,33 \times 10^{-6}$ até $3,85 \times 10^{-5}$. O grau de anisotropia (P) varia muito, de 1,022 a 1,538. Na figura 37a observa-se que P tende a ser inversamente proporcional a susceptibilidade magnética média (K_m). A figura 37b mostra que o parâmetro de forma (T) tem valores que variam entre $0 > T > 0$, o que remete uma forma composta de oblato a prolato. A dispersão entre os valores dos eixos magnéticos K_1 , K_2 e K_3 (Fig. 37c) não define bem a foliação nem a lineação magnética; tendo a última, caimentos moderados para NW e SE; a foliação tem mergulho moderado para SW.

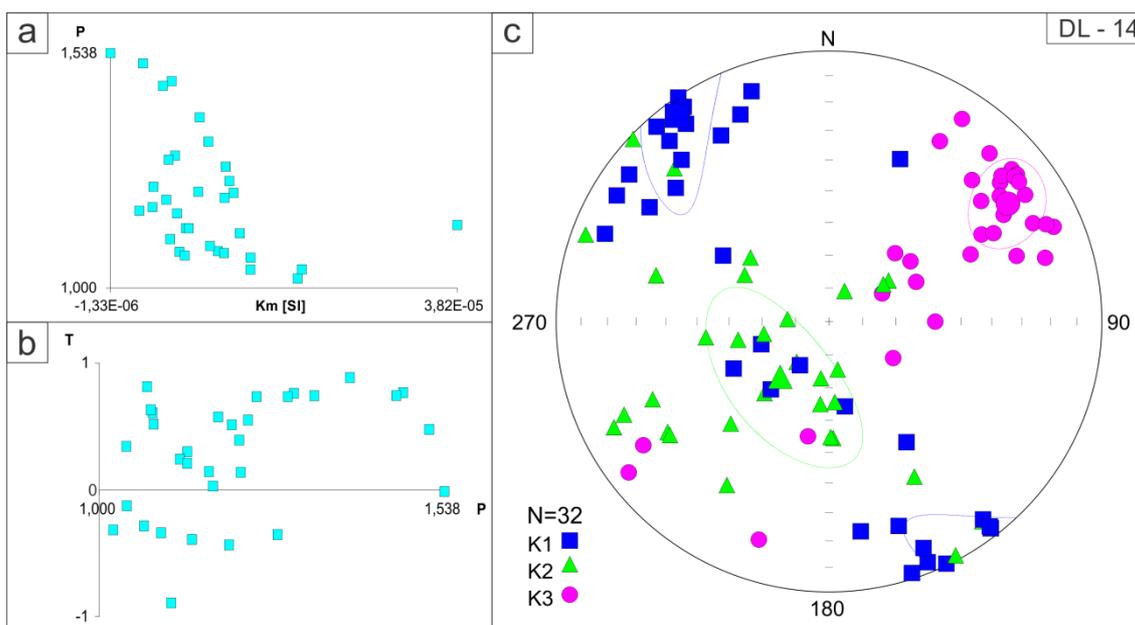


Figura 37. Dados obtidos para o sítio DL-14: **(a)** Grau de anisotropia (P) versus susceptibilidade magnética média (K_m), **(b)** Parâmetro de forma (T) versus grau de anisotropia; **(c)** Eixos magnéticos plotados em estereograma (rede equiária de Schmidt, hemisfério inferior).

5. DISCUSSÃO

5.1. Mineralogia Magnética

Os valores de susceptibilidade magnética total (K) do Granito Butiá estão representados no histograma da figura 38 e mostram-se valores típicos de granitos paramagnéticos, classificados por Ishihara (1977) como granitos da série da ilmenita, e que segundo ele, não ultrapassam $3,0 \times 10^{-3}$ SI devido a devido à ausência ou concentração extremamente baixa de minerais ferromagnéticos. Os resultados para K obtidos no GB se ajustam ainda melhor aos valores geralmente encontrados para leucogranitos paramagnéticos (Gleizes *et al.*, 1993; Aranguren *et al.*, 1997), que não excedem 10×10^{-5} SI.

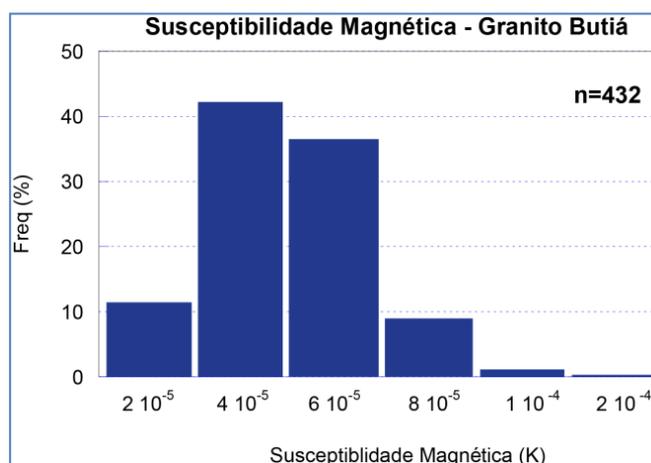


Figura 38. Susceptibilidade magnética total de todos os espécimes medidos (n=432).

Em relação ao que foi observado nas curvas de histerese e de aquisição da magnetização remanente isotermal (MRI), os padrões indicaram uma contribuição exclusivamente paramagnética, com exceção do sítio DL-05 e DL-08, onde se revela uma pequena parcela de minerais com saturação próxima de 100-200 mT, mas que não influenciam no comportamento magnético paramagnético geral do GB (Fig. 17c), observado também nas curvas de histerese (Fig. 18). Martín-Hernández & Hirt (2003) investigaram a contribuição de fases ferrimagnéticas dentro de cristais de biotita e em todos os experimentos mostraram uma componente ferrimagnética de

baixa coercividade com saturação em 300 mT, registrada também nas curvas de histerese no plano basal dos cristais. Esse mesmo comportamento poderia estar associado ao que ocorre nos sítios DL-05 e DL-08.

As curvas termomagnéticas também demonstraram a ausência de fases minerais ferromagnéticas primárias, que caso existissem, revelariam transições de fases minerais no ciclo de baixa temperatura (transição de Verwey e Morin). Além disso, todas as curvas mostraram comportamento irreversível com a neoformação de minerais durante o ciclo de aquecimento. As variações de K no ciclo de resfriamento, indica a neoformação de titanomagnetita cujas temperaturas de Curie (T_c) – 400-500°C (Fig. 16) - variam conforme a proporção Fe-Ti, tendo menores T_c aquelas com maiores quantidades de TiO_2 . Além disso, o sítio DL-08 apresentou a neoformação de mais de uma fase mineral, a magnetita, com T_c próxima de 585°C. Comportamento similar a este foi descrito por e Trindade *et al.* (2001) e Yokoyama (2008), que interpretaram como sendo cristalização de magnetita a partir da biotita. Essa explicação caberia bem para neoformação dos minerais no ciclo de aquecimento durante os experimentos, pois os dados de MEV-EDS indicam óxidos primários de Fe-Ti e biotitas ricas em titânio, o que composicionalmente seria possível.

Por fim, as análises da mineralogia opaca no MEV-EDS (Fig. 19 e 20) reforçam que a mineralogia predominantemente é paramagnética, composta essencialmente por biotita e uma quantidade reduzida, mas presente, de óxidos de Fe-Ti (ilmenita e rutilo), encontrados em como minerais acessórios e em geral orientados juntos à biotita, muscovita e silimanita no plano de foliação. Além disso as análises no MEV-EDS ajudaram na interpretação dos dados anômalos encontrados em algumas amostras, como é o caso do sítio DL-05 e DL-14. O DL-05 foi o único onde se encontrou óxidos de ferro, sendo ele possivelmente magnetita, e assim explicando a componente com saturações da magnetização em campos de ~100-200 mT nas curvas de MRI. No sítio DL-14 foram encontrados sulfetos de ferro (pirita) secundários em fraturas, explicando assim as transformações de fase mineral em temperaturas de 280-300°C da curva termomagnética desse sítio (figura 14c), podendo ser atribuído à transição de fase relacionada à pirita e/ou pirrotita, e descartando a possibilidade de estar atribuída à mineralogia primária do Granito

Butiá. Portanto, as análises indicam que a susceptibilidade magnética no GB, é determinada por minerais paramagnéticos principalmente a biotita.

5.2. A relação entre a trama magnética e a trama estrutural

O fato de a biotita ser o principal mineral magnético no GB faz dela um importante marcador da trama magnética. Segundo Nédélec & Bouchez (2015), essa relação existe devido aos eixos de susceptibilidade magnética nos filossilicatos serem paralelos aos seus eixos cristalográficos (Fig. 39). Portanto, a orientação dos cristais e agregados de biotita na rocha (que marcam foliação medida em campo) reflete diretamente a orientação da trama magnética (foliação e lineação).

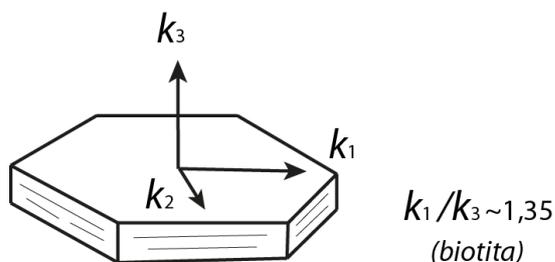


Figura 39. Relação os eixos de anisotropia magnética em um cristal de biotita. Modificado de Nédélec & Bouchez (2015).

As medidas de trama estrutural obtidas em campo e ,magnética obtidas em laboratório, estão dispostas no mapa magnético-estrutural (Fig. 40). A análise do mapa mostra a forte correlação elas (Fig. 40), conforme esperado para granitos paramagnéticos cuja anisotropia é dada principalmente por biotita.

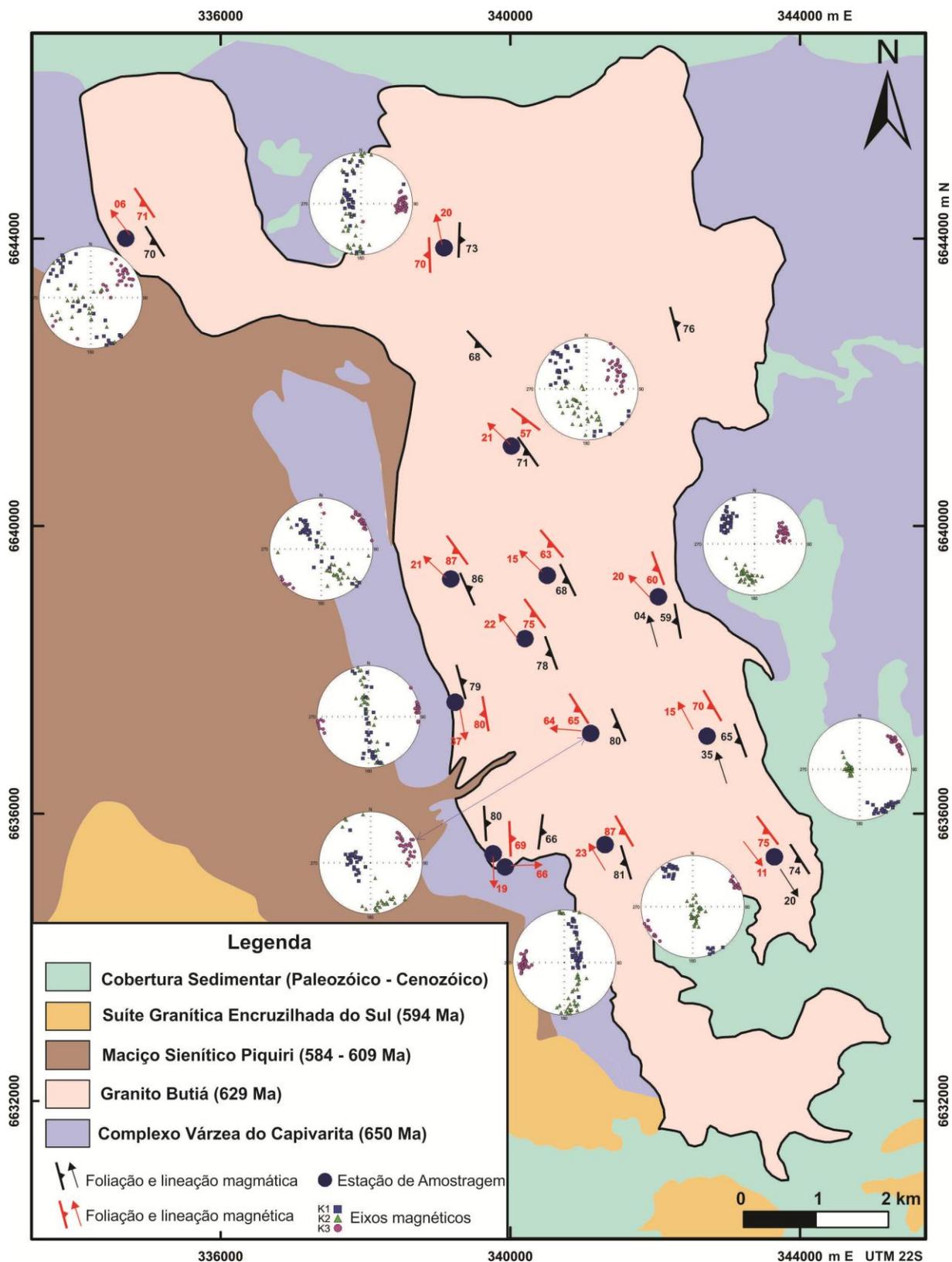


Figura 40. Mapa geológico integrado com os dados de foliação e lineação magnéticas (vermelho), estruturais medidos em campo (preto) e alguns esterogramas mais representativos com os valores médios dos eixos magnéticos, onde K_3 representa o pólo da foliação magnética e K_1 a lineação magnética. Mapa geológico base modificado de UFRGS (2008).

5.3. Trama Magnética

Na figura 40, se observa que a foliação é sempre bem definida, dada pelos elipsoides oblatos e/ou triaxiais e, no geral, tem uma direção subparalela ao alongamento do corpo, com alto ângulo de mergulho para SW-WSW. Em alguns pontos (borda oeste, por exemplo) a foliação tende a subvertical. Além disso, alguns sítios apresentam duas famílias de foliação magnética com atitudes muito próximas entre si (DL-04, DL-03, DL-06, DL-07, DL-09). Esse padrão é explicado pelo fato de o Granito Butiá apresentar localmente uma trama planar composta, onde se desenvolve um par de foliações S-C em bandas de maior deformação, muito bem marcadas na borda leste, e em parte, no oeste do corpo. O comportamento dos eixos de susceptibilidade magnética em rochas com trama planar S-C mostra sempre uma trama magnética planar composta de duas foliações com direções próximas, sendo o plano bissetor delas o valor médio do eixo de susceptibilidade mínimo K_3 (Ono *et al.*, 2009; Aranguren *et al.*, 1996). O melhor exemplo desse caso no Granito Butiá se destaca no sítio DL-06 (*e.g.* Fig. 29c).

A lineação magnética no Granito Butiá deve ser analisada com atenção; ela não deve ser interpretada apenas com base nas direções dos seus eixos de susceptibilidade, mas sim na relação entre eles, representado pela forma do elipsoide (oblato, triaxial ou prolato). Desta forma, se fazem ausentes os elipsoides prolatos, os quais seriam os mais fidedignos marcadores da trama linear. Entretanto, os elipsoides triaxiais marcam ambos, lineação e foliação; sendo assim, pode-se determinar que a lineação magnética do GB tem baixo a moderado caimento para NW ou SE. Por outro lado, a lineação magnética obtida para os sítios onde o elipsoide é oblato (por exemplo, DL-01, DL-09, DL-10, DL-13 – ver Apêndice 1) deve ser analisada com atenção, pois nem sempre pode estar representando a trama mineral da rocha, medida em campo, ou seja, dentre os sítios que apresentaram lineação magnética com alto caimento (DL-02, DL-10 e DL-13) apenas DL-02 apresenta elipsoide triaxial, sendo assim, um valor confiável para lineação. Dessa forma, é levantada a hipótese de desse local representar uma possível zona de alimentação do magma.

Visto que a trama magnética é consistente com a trama estrutural, e que, no geral, a direção de foliação magnética tem direção NW-SE, ou seja, subparalela à direção do alongamento do corpo, com altos ângulos de mergulho; e a lineação magnética tem baixa obliquidade e baixo caimento, sugerindo a colocação do GB sob um regime de transcorrência. A análise cinemática com base na foliação S-C sugere, então, regime de transcorrência dextral.

5.4. Trama magnética e grau de anisotropia (P)

A variação espacial da anisotropia magnética (P) está representada no mapa da figura 41. Se distinguem três grupos para o grau de anisotropia (P), valores onde $P < 1,12$, considerados baixos em relação aos demais, onde $1,12 < P < 1,20$ que foram considerados como intermediários e valores altos, onde $P > 1,20$.

A distribuição no mapa mostra que os valores onde a anisotropia é maior se restringem às bordas (vermelho), e em direção ao centro do corpo, os valores diminuem gradativamente. Diversos trabalhos relacionam o grau de anisotropia (P) de granitoides com seu grau de deformação, seja no estado magmático, ou sólido de alta e baixa temperatura (Gleizes *et al.*, 1993; Saint-Blanquat & Tikoff, 1996; Ferré *et al.*, 1997; Aranguren *et al.*, 1997). Esses autores demonstram que, em áreas afetadas por zonas de cisalhamento, os corpos de granitoides – geralmente sintectônicos – apresentam uma zonation definida dos valores de anisotropia (P), de modo que ele aumenta gradativamente em direção às zonas de cisalhamento e em direção a zonas onde a deformação passa do estado magmático para o estado sólido de alta temperatura, até chegar a valores mais altos quando em baixas temperaturas.

No Granito Butiá, sugere-se que a variação do grau de anisotropia (P) está ligada a zonas de concentração da deformação, como nas bordas sudeste (DL-06, DL-07) e oeste (DL-01, DL-09, DL-14); sendo essa última, concordante com o que foi apresentado por Martil (2016) para porção do Complexo Várzea do Capivarita que faz contato com o Granito Butiá (sudoeste), onde a autora delimitou uma zona de mais alta deformação, definida como uma zona de cisalhamento de caráter transcorrente dextral.

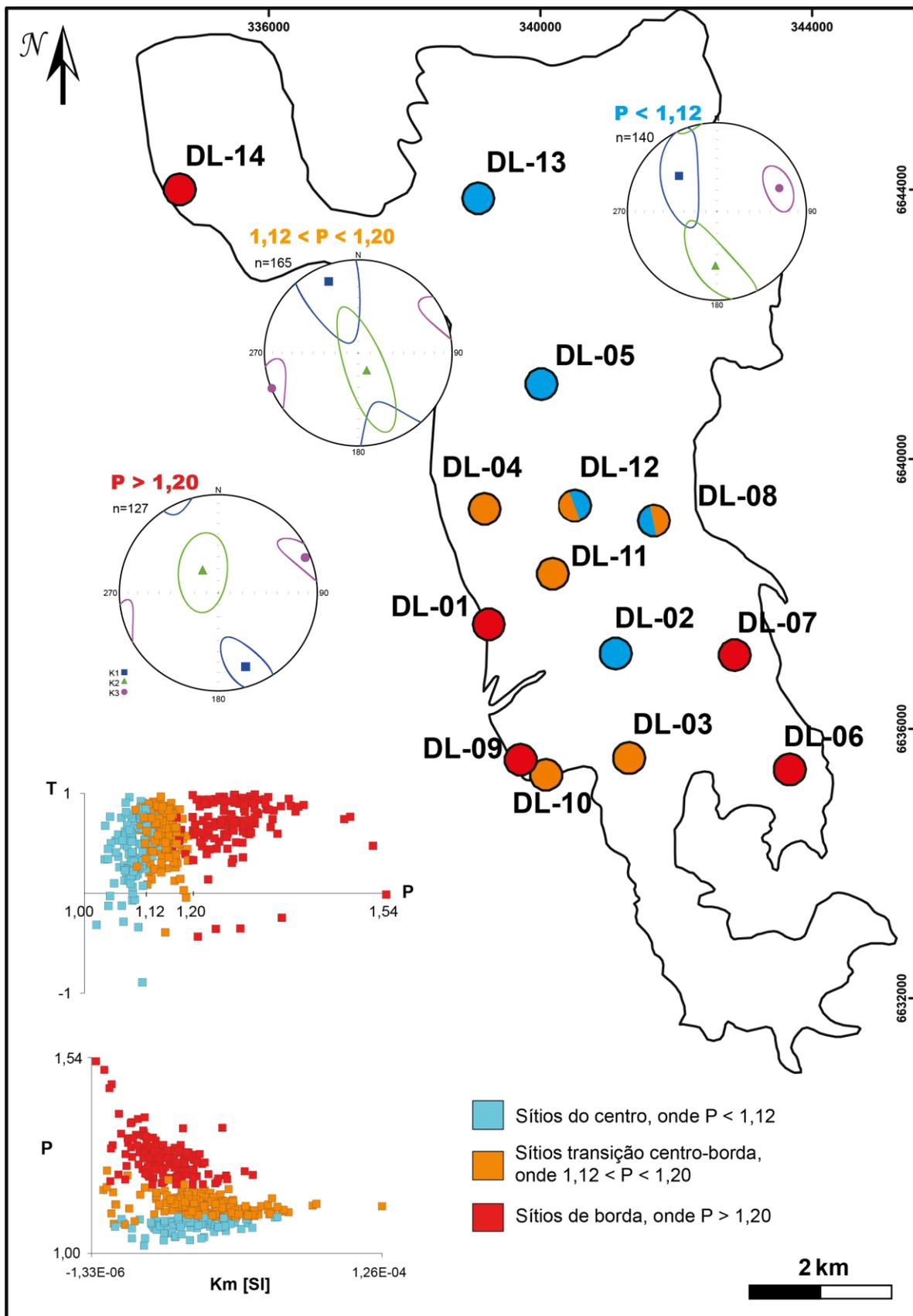


Figura 41. Mapa da distribuição dos valores do grau de anisotropia (P) e do parâmetro de forma (T) dos elipsoides magnéticos no Granito Butiá, com os respectivos dados direcionais divididos pelo grau de anisotropia (P).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Com base no que foi discutido nos capítulos anteriores, pode-se concluir que:

- (i) A susceptibilidade magnética no Granito Butiá é dada quase exclusivamente por minerais paramagnéticos, principalmente biotita. Portanto, a trama magnética é resultado da anisotropia gerada pelo alinhamento preferencial dos cristais desse mineral, que marcam a foliação da rocha;
- (ii) Os dados de trama magnética revelam forte correlação com os dados estruturais de campo, indicando que orientação dos eixos de susceptibilidade magnética teve origem durante a cristalização do magma e reflete o campo tensional ativo durante o posicionamento do GB;
- (iii) A foliação magnética tem direção preferencial NNW-SSE com altos ângulos de mergulho, e a lineação magnética tem baixo a moderado caimento paralelo à direção da foliação (baixa obliquidade). Esses dados, em conjunto com a cinemática horária revelada pelo par de foliações S-C, sugerem um posicionamento sob regime de transcorrência dextral;
- (iv) A variação espacial do grau de anisotropia (P) sugere que a deformação aumenta do centro para as bordas; e as zonas de mais alta deformação da porção oeste são consistentes com uma zona de cisalhamento de transcorrência dextral descrita nas encaixantes próximas.

Por fim, a anisotropia de susceptibilidade magnética mostrou-se uma poderosa ferramenta voltada ao estudo estrutural de corpos graníticos, neste caso contribuindo com dados a respeito do posicionamento do Granito Butiá.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aranguren, A., Cuevas, J., Tubia, J.M. (1996). Comsite magnetic fabrics from S-C mylonites. *Journal of Structural Geology* 18: 863-869.
- Aranguren, A., Larrea, F., Carracedo, M., Cuevas, J., e Tubia, J.M. (1997). The Los Pedroches batolith (Southern Spain): polyphase interplay between shear zones in transtension and setting of granites. In: J.L. Bouchez, D.H.W. Hutton and W.E. Stephens (eds.), *Granite: from segregation of melt to emplacement fabrics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 215-229.
- Archanjo, C.J., Campanha, G.A.C., Salazar, C.A., Launeau, P. (2012). Using MAS combined with mineral shape preferred orientation analysis to understand the emplacement fabrics of the Apiaí gabbro-norite (Ribeira Belt, SE Brazil). *International Journal of Earth Sciences* 101: 731-745
- Babinski, M., Chemale Jr., F., Van Schmus, W.R., Hartmann, L.A., & Silva, L.C. (1997). U-Pb and Sm-Nd geochronology of the Neoproterozoic Granitic-Gneissic Dom Feliciano Belt, Southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 10 (3-4): 263-274.
- Bitencourt, M.F., Gastal, M.C.P., Kirchein, R.E., Costa, K.B. & F.a.l. Toledo. (1993). Reavaliação preliminar das relações estratigráficas do Complexo Granítico Encruzilhada (CGE), RS. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DEL NEOPROTEROZÓICO- CAMBRICO DE LA CUENCA DEL PLATA, 1., 1993. Boletim de Resumos Expandidos, Las Palomas-Minas, Montevideo, Uruguai, DINAMIGE. v.2, n. 34, p.
- Bitencourt, M.F. & Nardi, L.V.S. (2000). Tectonic setting and sources of magmatism related to the southern Brazilian shear belt. *Revista Brasileira de Geociências*, 30: 184-187.
- Bitencourt, M.F., De Toni, G.B., Florisbal, L.M., Martil, M.M.D., Niessing, M., Gregory, T.R., Nardi, L.V.S., Heaman, L.M., Dufrane, S.A. (2011). Structural geology and U-Pb age of unusual Neoproterozoic syn-collisional syenite-tonalite association from southernmost Brazil. In: SEVENTH HUTTON SYMPOSIUM ON GRANITES AND RELATED ROCKS, Abstracts Book, Universidad de Salamanca, 21.
- Bitencourt, M.F., Nardi, L.V.S., Florisbal, L.M., Heaman, L. (2015). Geology, geochronology and petrogenesis of a Neoproterozoic, syntectonic sillimanite-muscovite-biotite granite from southernmost Brazil. In: EIGHTH HUTTON SYMPOSIUM ON GRANITES AND RELATED ROCKS, 2015, Florianópolis, Brasil, Book of Abstracts, PT.153.
- Bom, F. M., Philipp, R. P., Zvirtes, G. (2014). Evolução metamórfica e estrutural do Complexo Várzea do Capivarita, Cinturão Dom Feliciano, Encruzilhada do Sul, RS. *Pesquisas em Geociências*, 41(2): 131-153.
- Borradaile, G. J., & Jackson, M. (2004). Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS): Magnetic petrofabrics of deformed rocks. *Geological Society Special Publication*, 238, 299-360. DOI: 10.1144/GSL.SP.2004.238.01.18
- Bouchez, J.L. (1997). Granite is never isotropic: an introduction to AMS studies in granitic rocks. In: Bouchez, J.L., Hutton, D.H.W., & Stephens, W.E. (Ed.). *Granite: from segregation of melt to emplacement fabrics*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Constable, C., & Tauxe, L. (1990). The bootstrap for magnetic susceptibility tensors. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B6), 8383-8395.
- De Toni, G.B. (2012). Análise da deformação dos sienitos sintectônicos do Complexo Várzea do Capivarita. Porto Alegre, 63p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- De Toni, G.B. (2015). Mirmequitização penetrativa e a partição da deformação em sienitos sintectônicos: cristalização-deformação do Sienito Arroio das Palmas sob condições de fácies granulito em regime transpressivo. Porto Alegre, 68f. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Dunlop, D. J., & Özdemir, Ö. (2001). *Rock magnetism: fundamentals and frontiers* (Vol. 3). Cambridge university press.

Ferré, E., Gleizes, G., Djouadi, M.T., Bouchez, J.L., e Ugodulunwa, F.X.O. (1997). Drainage and emplacement of magmas along an inclined transcurrent shear zone: petrophysical evidenc from a granite-charnockite pluton (Rahama, Nigeria), in J.L. Bouchez, D.H.W. Hutton and W.E. Stephens (eds.), *Granite: from segregation of melt to emplacement fabrics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 253-274.

Frantz, J.C., McNaughton, N.J., Marques, J.C., Hartmann, L.A., Botelho, N.F., Caravaca, G. (2003). SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoids from southernmost Brazil: constrains on the temporal evolution of the Dorsal de Canguçu transcurrent Shear Zone and Eastern Dom Feliciano Belt. *In: SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY, IV, Short Papers, Salvador, SBG, vol. 1, pp. 174-177.*

Gleizes, G., Nédélec, A., Bouchez, J.L., Autran, A., & Rochette, P. (1993). Magnetic susceptibility of the Mont-Louis Andorra ilmenite-type granite (Pyrenees): a new tool for the petrographic characterization and regional mapping of zoned granite plutons. *Journal Geophysics Research.* 98(3): 4317-4331.

Graham, J.W. (1954). Magnetic susceptibility anisotropy: an unexploited petrofabric element. *Geol. Soc. Am. Abstr. Programm*, 65: 1257-1258.

Gregory, T.R., Bitencourt, M.F., Nardi, L.V.S., Florisbal, L.M., Chemale Jr.,F. (2015). Geochronological data from TTG-type rock associations of the Arroio dos Ratos Complex and implications for crustal evolution of southernmost Brazil in Paleoproterozoic times. *Journal of South American Earth Sciences*, (57):49-60.

Hartmann, L.A., Campal, J., Santos, J.O.S., McNaughton, N.J., Bossi, J., Schipilov, A., & Lafon, J.M. 2001. Archean crust in the Rio de la Plata Craton, Uruguay – SHRIMP U-Pb zircon reconnaissance geochronology. *Journal of South American Earth Sciences* 14, 557-570

Hrouda, F. (2014). Physical principles of magnetic anisotropy course. In: Castle Meeting, Évora, Portugal.

Ishihara, S., & Matsuhisa, Y. (1977). The magnetite-series and ilmenite-series granitoids and their 18 O/16 O isotope ratios. In *Abstr. 84th Annu. Meet. Geol. Soc.*

Jelinek, V. (1981). Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*,79, p.63-67.

Jelínek, V., & Pokorný, J. (1997). Some new concepts in technology of transformer bridges for measuring susceptibility anisotropy of rocks. *Physics and Chemistry of the Earth*, 22(1), 179-181.

Jost, H.; Brod, J.A.; Holz, M.; Kuhn, A.; Flor, M.A.D.; Ktonbauer, A.; Dillenburg, S. (1985). Geologia estrutural, petrografia e petrologia do Sienito Piquiri (Proterozóico Superior), Rio Grande do Sul. *In: Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, 2., 1985, Florianópolis. Anais... Florianópolis, SBG, pp. 63-61.*

Martín-Hernández, F., and Hirt., A. M., 2003. Paramagnetic anisotropy of magnetic susceptibility in biotite, muscovite, and chlorite single crystals, *Tectonophysics*, 367, 13–28, doi:10.1016/S0040-1951(03)00127-6.

Martil, M.M.D. (2007). *Relações de intrusão do Maciço Sienítico Piquiri, RS com suas Encaixantes*. Porto Alegre, 63p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Martil, M.M.D. (2016). O magmatismo de arco continental pré-colisional (790Ma) e a reconstrução espaço-temporal do regime transpressivo (650Ma) no Complexo Várzea do Capivarita, Sul da Província da Mantiqueira. Porto Alegre, 167f. Tese de doutorado em geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- Nardi, L.V.S., Pla Cid, J., Bitencourt, M.F. (2007). Minette mafic microgranular enclaves and their relationship to host syenites in systems formed at mantle pressures: major and trace element evidence from the Piquiri Syenite Massif, southernmost Brazil. *Mineralogy and Petrology*, 91(1-2): 101-116.
- Nardi, L. V. S., & Bitencourt, M. F. (2007). Magmatismo granítico e evolução crustal no sul do Brasil. IANUZZI, R.; FRANTZ, JC (Org.), 50: 125-139.
- Nardi L.V.S., Plá Cid, J., Bitencourt, M.F. & Stabel, L. (2008). Geochemistry and petrogenesis of post-collisional ultrapotassic syenites and granites from southernmost Brazil: the Piquiri Syenite Massif. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 80(2):353-371.
- Nédélec, A., Bouchez, J.L. (2015). *Granites: Petrology, Structure, Geological Setting, and Metallogeny*. Oxford University Press. 353p.
- Niessing, M. (2008). *Geology and stratigraphic definition of the Butiá Granite: a sillimanite-bearing syntectonic leucogranite from the Sul-rio-grandense Shield*. Munique, 88p. Dissertação de Mestrado, Civil and Geodetic Engineering, Technische Universität München.
- Ono, T., Hosomi, Y., Arai, H., & Takagi, H. (2010). Comparison of petrofabrics with composite magnetic fabrics of S–C mylonite in paramagnetic granite. *Journal of Structural geology*, 32(1), 2-14.
- Philipp, R.P., Massonne, H.J. & Campos, R. (2013). Peraluminous leucogranites of the Cordilheira Suite: A record of Neoproterozoic collision and the generation of the Pelotas Batholith, Dom Feliciano Belt, Southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 43: 8-24.
- Philipp, R.P., Bom, F.M., Pimentel, M.M., Junges, S. L., Zvirtes, G. (2016). SHRIMP U-Pb age and high temperature conditions of the collisional metamorphism in the Várzea do Capivarita Complex: Implications for the origin of Pelotas Batholith, Dom Feliciano Belt, Southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 66, 196-207.
- Saint Blanquat, M., and Tikoff, B. (1996). Development of magmatic to solid-state fabrics during syntectonic emplacement of the Mono Creek granite, Sierra Nevada batholith, in J.L. Bouchez, D.H.W. Hutton and W.E. Stephens (eds.), *Granite: from segregation of melt to emplacement fabrics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 253-274.
- Salazar, C. A., Archanjo, C. J., Babinski, M., & Liu, D. (2008). Magnetic fabric and zircon U–Pb geochronology of the Itaóca pluton: implications for the Brasiliano deformation of the southern Ribeira belt (SE Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, 26(3), 286-299.
- Sbaraini, S. (2012). *Dados de anisotropia de susceptibilidade magnética na modelagem tridimensional do Maciço Sienito Piquiril*. Porto Alegre. 54p. Monografia de Conclusão de Curso. Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Stabel, L.Z., Nardi, L.V.S., & Pla Cid, J. (2001). Química mineral e evolução petrológica do Sienito Piquiri: magmatismo shoshonítico, neoproterozóico, pós-colisional no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 31: 211–222.
- Tarling, D. H., & Hrouda, F. (1993). *The magnetic anisotropy of rocks*. London: Chapman & Hall. 217 p.
- Trindade, R. I., Raposo, M. I. B., Ernesto, M., & Siqueira, R. (1999). Magnetic susceptibility and partial anhysteretic remanence anisotropies in the magnetite-bearing granite pluton of Tourão, NE Brazil. *Tectonophysics*, 314(4), 443-468.
- Trindade, R.I.F., Bouchez, J.L., Bolle, O., Nédélec, A., Peschler, A., Poitrasson, F. (2001). Secondary fabrics revealed by remanence anisotropy: methodological analysis and examples from plutonic rocks. *Geophysical Journal International* 147, 310–318.
- UFRGS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. (2008). *Mapeamento Geológico 1:25.000 de parte das folhas Passo das Canas SH-22-Y-A-III-4 (MI2984/4) e Capané SH 22-Y-A-III-3 (MI2984/3)*, RS. Porto Alegre, UFRGS, 1 vol., 2 mapas, Curso de Geologia, Instituto de Geociências.

UFRGS 2009. Mapeamento Geológico 1:25 000 de parte da Folha Passo das Canas SH-22-Y-A-III-4 (MI2984/4), RS. Porto Alegre, 1 vol., 2 mapas. Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Vasquez, M. L. (1997). *Evolução petrogenética dos granitos da Suíte Intrusiva Encruzilhada do Sul - RS*. Porto Alegre, 196f. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Yokoyama, E., (2008). Trama magnética do núcleo soerguido da estrutura de impacto de araguainha (MT/GO). São Paulo, 173f. Dissertação de mestrado em Geofísica, Departamento de Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.

APÊNDICES

Apêndice 1. Dados da trama magnética para todos os sítios, onde: eixo máximo (K_1), eixo intermediário (K_2), eixo mínimo de susceptibilidade (K_3), numero de medidas (N).

