

Universidade de São Paulo
Instituto de Geociências

*A Zona de Cisalhamento Além Paraíba-Pádua (RJ): um estudo a partir da
Anisotropia de Suscetibilidade Magnética (ASM)*

Monografia - Trabalho de Formatura
Projeto 24/08

Cauê Silva Farias

**Orientador: Prof. Dr. Marcos Egydio da Silva – Departamento de Mineralogia e
Geotectônica**

SÃO PAULO

2024

Dedico este trabalho às Marias da minha vida
(à Aparecida e àquelas que não aparecem mais).

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Marcos Egydio.

À generosa professora Irene.

A todos os meus amigos aos quais quando perguntados seus nomes, a resposta é vívida “Chamai-me Urubu”.

À senhora Maria Aparecida da Silva, por ter me concebido um menino capaz. Sem ela, meu Mundo não existiria.

Ao senhor Francisco Morales Rodriguez por ter tornado homem quem ainda era menino.

Ao meu grande amigo Matheus Moraes, por me mostrar que é possível viver uma vida em sinceridade com os outros homens.

Ao meu amigo Vinicius de Lima Passos, pela lealdade.

A todos os meus companheiros de *Kickboxing*, em especial Luiz Henrique Mello Serafim e Vitor Bulbovas, por me ajudarem a reparar o que eu pensava ser irreparável.

Ao Gato e à Lili.

Ao Bono, que ainda ouço as patinhas baterem intensamente à porta quando estaciono meu carro.

Três Marias

Maria Aparecida

Maria que não mais aparece

E Maria que sempre desaparece

À primeira, romaria

Pela segunda, sesmaria

Da terceira, ciumaria

E por mais que me desarmaria

Ainda me amaria se lhe confessasse:

O que por você tramaria, Maria?

- Eu

RESUMO

As rochas de alto grau do Norte-Nordeste da Zona de Cisalhamento Além Paraíba-Pádua (ZCAPP) são bem documentadas e já foram fartamente descritas ao longo das décadas passadas. Em face dos trabalhos de Egydio-Silva *et al* (2005) e Raposo & Egydio-Silva (2001), sabe-se que há a transição de um regime estrutural transcorrente para um regime compressional. Este trabalho realizou um estudo aprofundado sobre os eventos deformacionais que levaram à conformação atual da ZCAPP em sua porção Norte-Nordeste a partir da análise de mineralogia magnética e anisotropia magnética. Para isso, é de grande importância a comparação entre os dados já existentes na literatura, onde foram caracterizadas as rochas do Complexo Juiz de Fora e dos milonitos presentes no Orógeno Ribeira - em função de sua anisotropia magnética - e os dados apresentados por este projeto. Para efeito deste relatório, durante o trabalho de campo foram visitados 7 sítios de coleta de testemunhos, com espécimes nomeados de A a G (variando em função de cada sítio), resultando num total de 122 cilindros, os quais tiveram a anisotropia magnética medidas por um susceptômetro *Kappabridge*. O comportamento estrutural verificado por meio da Anisotropia de Susceptibilidade Magnética mostra a foliação variando, em geral, de ENE/WSW, com a lineação paralela à foliação, de caráter vertical/subvertical, com orientação ENE/WSW. Os elipsóides de deformação obtidos a partir do estudo da ASM foram, em sua totalidade, categorizados como oblatos, com parâmetro de forma (T) oscilando entre 0,105 a 0,835 e, os valores do grau de anisotropia (P) variando de 1,103 a 2,194. As curvas termomagnéticas indicam que o principal mineral magnético é a magnetita, com a temperatura de Curie (580°C) expressa para todas as curvas. A disposição espacial das foliações e lineações magnéticas, condizentes com as foliações e lineações tectônicas, são adequadas e propícias em favor de uma tectônica transpressional para a ZCAPP.

ABSTRACT

The high-grade rocks of the North-Northeast Além Pádua Shear Zone (ZCAPP) are well documented and have been extensively described over the past decades. However, a study addressing the petrotects and deformation events from the perspective of Magnetic Susceptibility Anisotropy is still unpublished in the region, where it is known to comprehend a transition from a strike-slip structural regime to a compressive regime. This work carried out an in-depth study of the deformation events that led to the current conformation of the ZCAPP in its North-Northeast portion based on the analysis of magnetic mineralogy and magnetic anisotropy. Consequently, it is of great importance to compare the data already existing in the literature, where the rocks of the Juiz de Fora Complex and the mylonites present in the Ribeira Orogen were described - due to their magnetic anisotropy - and the data presented by this project. For the purposes of this report, during the fieldwork, 7 (seven) core collection sites were visited, with specimens named from A to G (varying according to each site), resulting in a total of 157 (one hundred and fifty-eight) cylinders, whose magnetic anisotropy was measured by a Kappabridge susceptometer. The structural behavior verified by means of Magnetic Susceptibility Anisotropy presents a foliation varying, in general, from ENE/WSW, with the lineation parallel to the foliation, of a vertical/subvertical character, with an ENE/WSW orientation. The deformation ellipsoids obtained from the ASM study were, in their majority, categorized as oblate, with a shape parameter (T) ranging from 0.105 to 0.835 and the values of the degree of anisotropy (P) ranging from 1.103 to 2.194. The thermomagnetic curves indicate that the main magnetic mineral is magnetite, with the Curie temperature (580°C) expressed for all curves. The spatial arrangement of the magnetic foliations and lineations, consistent with the tectonic foliations and lineations, are adequate and favorable in favor of a transpressional tectonics for the ZCAPP.

ÍNDICE

RESUMO	5
1. INTRODUÇÃO	1
2. METAS E OBJETIVOS.....	2
3. TRABALHOS PRÉVIOS.....	3
3.1. A PROVÍNCIA MANTIQUEIRA.....	3
3.2. O ORÓGENO RIBEIRA E A ZCAPP.....	4
3.3. O ORÓGENO RIBEIRA EM SUA PORÇÃO SUDESTE E ANÁLISE DE ASM.	5
3.4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA ASM	8
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	11
4.1. PREPARAÇÃO E TRATAMENTO DE AMOSTRAS	11
4.2. CURVAS TERMOMAGNÉTICAS.....	16
5. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	17
6. CONCLUSÕES	23
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

1. INTRODUÇÃO

A Zona de Cisalhamento Além Paraíba-Pádua (ZCAPP) é parte de um setor de intensa deformação formada em níveis crustais inferiores, a qual tem recebido crescente atenção da comunidade acadêmica nos últimos anos. Deve-se a esse progressivo interesse científico a sua significativa importância no desenvolvimento do cenário tectônico e na evolução do conhecimento geológico do Orógeno Ribeira, localizado no sudeste do Brasil.

Há uma gradativa curiosidade para estudá-la em detalhe, tanto do ponto de vista estrutural e deformacional, investigando seu desenvolvimento textural, nas escalas meso e microcristalinas, como também geocronológico (Cavalcante *et al.*, 2018; Giraldo *et al.*, 2019). O primeiro artigo reporta o desenvolvimento da petrotrama nas regiões de Além Paraíba e Santo Antônio de Pádua, e a temperatura da deformação nos milonitos quartzo feldspáticos, calculadas através do método Titânio em Quartz. O segundo texto relaciona-se às datações U-Pb em zircões presentes em ortognaisses e paragnaisses, na região da cidade de Três Rios e arredores, onde fez-se possível determinar a idade do pico metamórfico de 595-590 Ma.

O estado deformacional de rochas pode ser interpretado, entre outros fatores, a partir das próprias texturas destas rochas, podendo fornecer, também, importantes informações acerca de sua evolução tectônica (Parés, *et al.*, 2002).

A Anisotropia de Suscetibilidade Magnética (ASM) é uma ferramenta poderosa que tem sido aplicada em rochas para a determinação da orientação dos eixos principais, designados de K_{max} , K_{int} e K_{min} , cujas orientações revelam um importante significado estrutural (Borradaile & Jackson, 2010) podendo ser correlacionadas com as direções (X, Y e Z) do elipsoide de deformação. A trama magnética e outras anisotropias são descritas por tensores de segunda ordem e serem representados por um elipsoide de deformação.

As linhações magnéticas – representadas pelos *clusters* do principal eixo de máxima susceptibilidade do tensor de Anisotropia de Suscetibilidade Magnética (K_{max}) - em rochas deformadas, se apresentam como interseções entre o acamamento e clivagem, ou são paralelas à direção de extensão tectônica em zonas de alta deformação (Ferré *et al.*, 2014).

Atualmente, as técnicas de estudo de Anisotropia de Suscetibilidade Magnética vêm sendo aplicadas na Geologia Estrutural para o estudo em dois principais campos: o primeiro sendo a rochas metamorfizadas e tectonizadas (bem como sedimentos), e o segundo sendo rochas ígneas, funcionando como uma grande ferramenta para a investigação de fluxo magmático, bem como a alocação de diques e soleiras, além de outros corpos ígneos (Borradaile & Jackson, 2010).

Este trabalho, desenvolvido a partir de aplicação de técnicas de ASM na Zona de Cisalhamento de Além Paraíba-Pádua (ZCAPP), em sua porção mais Norte-Nordeste, complementa os estudos previamente realizados por Raposo e Egydio-Silva (2001), na porção mais Sul-Sudeste. Uma abordagem mais ampla, em ambos os setores, com domínios

estruturais distintos, foi realizada no trabalho de Egydio-Silva *et al* (2005). A ZCAPP é composta de milonitos/ultramilonitos, orto e paraderivados de alta temperatura com foliações subverticais, e lineação de estiramento mineral horizontal/subhorizontal, de orientação ENE/WSW, e critérios cinemáticos indicativos de movimento predominantemente dextral (Cavalcante *et al.*, 2018; Giraldo *et al.*, 2019).

A utilidade da ASM nos estudos estruturais e deformacionais é incontestável, sendo, portanto, uma ferramenta adequada que proporciona uma relação entre deformação, petrotrama e anisotropia magnética, haja vista que a ZCAPP corresponde a uma zona de cisalhamento dúctil, de escala litosférica, com intenso controle estrutural.

2. METAS E OBJETIVOS

A análise de petrotramas ou *petrofabrics* usando Anisotropia de Suscetibilidade Magnética (ASM) é uma técnica bem estabelecida que tem sido usada, normalmente, para avaliar a evolução cinemática e tectônica de rochas granitoides, metamórficas e sedimentares (Borradaile *et al.*, 1997; Bouchez, 1997; Ferré *et al.*, 2000) e fornece uma rápida informação sobre a petrotrama de rochas deformadas, assim como as orientações de estruturas planares e lineares, as quais podem ser facilmente reconhecidas em campo. Por exemplo, a lineação, que é definida como qualquer feição linear que ocorre de maneira penetrativa nas rochas, é uma estrutura particularmente útil ao se tentar decifrar a história deformacional de determinada região. Em regimes transpressionais, como é o caso da ZCAPP, a direção da lineação de estiramento não é necessariamente correlacionada com a direção da componente do cisalhamento simples da deformação e que pode ser tanto paralela, como perpendicular à zona de cisalhamento (Ferré *et al.*, 2005; Tikoff & Greene, 1997). Vários estudos demonstram que os eixos principais da ASM K_1 , K_2 , e K_3 coincidem, respectivamente com os eixos da deformação finita X, Y e Z (Borradaile *et al.*, 1981; Borradaile, 1991; Borradaile & Jackson, 2010).

A ASM de baixo campo é uma metodologia rápida e precisa de identificação de petrotramas, sendo capaz de caracterizar, de maneira eficiente, regiões aparentemente indeformadas (Raposo & Egydio-Silva, 2001). Uma análise estrutural utilizando ASM embasará um entendimento da foliação e lineação magnéticas desenvolvidas nos milonitos fortemente deformados, permitirá sua correlação com as estruturas observadas em afloramento, revelando suas características transpressiva, transcorrente ou transtratativa, identificação de sua mineralogia magnética e, possivelmente, uma comparação com as orientações preferenciais da rede cristalina dos principais minerais, já determinadas através do EBSD (*Electron Backscatter Diffraction*) (Raposo & Egydio-Silva, 2001; Cavalcante *et al*, 2018).

3. TRABALHOS PRÉVIOS

A Zona de Cisalhamento Dúctil de Além Paraíba-Pádua (ZCAPP) está incluída e exposta na porção mais central da Província Mantiqueira, uma região orogênica localizada no sudeste brasileiro. Os protólitos dos milonitos desta região são, principalmente, ortognaisses de alto grau metamórfico de composição granítica granodiorítica e tonalítica, bem como paragnaisses e granulitos maficos (Giraldo *et al.*, 2019).

3.1. A PROVÍNCIA MANTIQUEIRA.

A Província Mantiqueira (Figura 1) contém uma série de orógenos Neoproterozóicos no Sul e Sudeste brasileiro, sendo estes, respectivamente: o Ribeira, o Araçuaí, o domínio mais a Sul do Brasília, Dom Feliciano e São Gabriel (Almeida *et al.*, 1981).

A Província Mantiqueira foi submetida a uma sequência de eventos colisionais diacrônicos, a partir do orógeno São Gabriel (700 Ma) e, em sequência, no orógeno Brasília (650 – 600 Ma) e no orógeno Dom Feliciano (cerca de 600 Ma) e, por fim, nos orógenos Ribeira e Araçuaí entre 600 e 540 Ma (Heilbron *et al.*, 2010; Bento dos Santos *et al.*, 2015); Machado *et al.*, 2016). O amalgamento do Cráton do São Francisco com o Cráton do Congo resultou na incorporação do terreno Cabo Frio ao Orógeno Ribeira (ca. 520 Ma) durante um evento datado do Cambriano, sendo chamado de orogenia Búzios (Lee *et al.*, 2002; Silva Schmitt *et al.*, 2004).

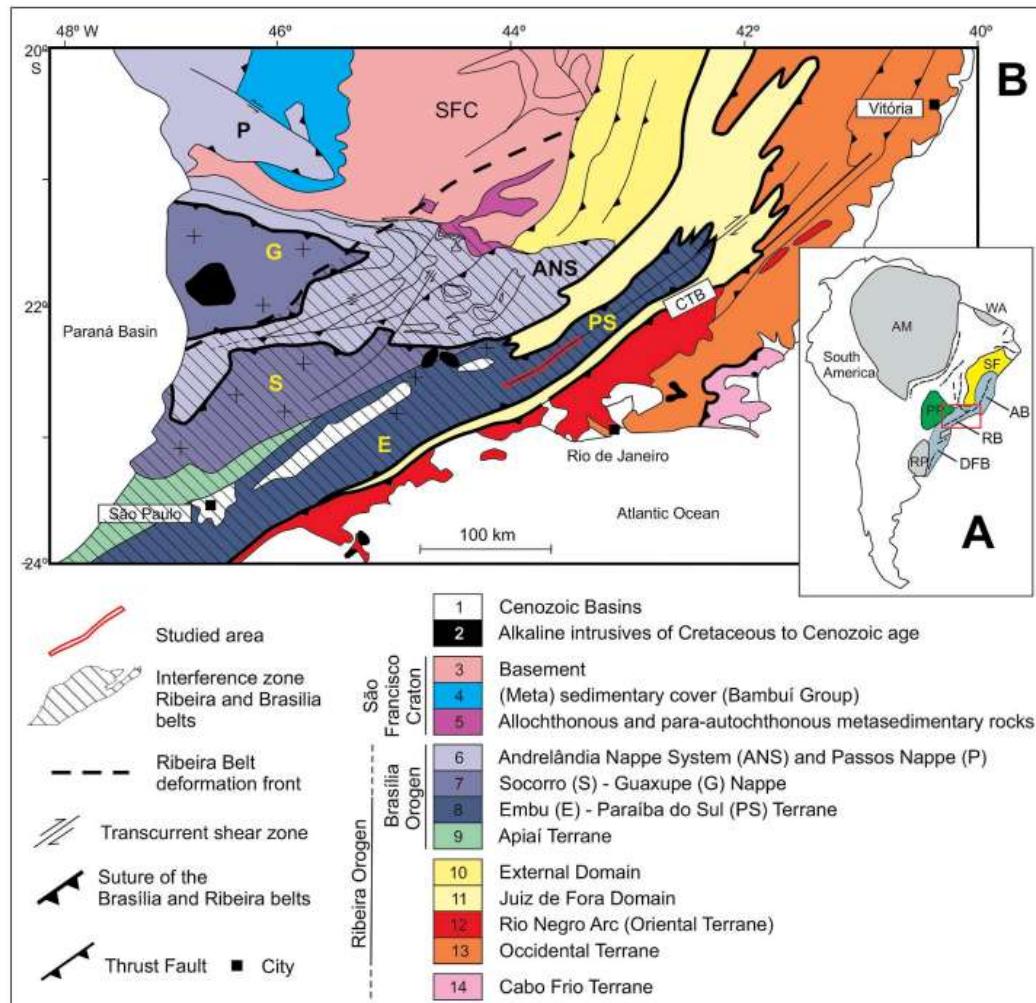


Figura 1: A) Configuração tectônica da Província Mantiqueira em relação à América do Sul. B) Mapa simplificado da região. Extraído de Giraldo *et al.*, 2019.

3.2. O ORÓGENO RIBEIRA E A ZCAPP.

O Orógeno Ribeira se estende por mais de 1400 km, paralelamente à costa sudeste brasileira, estando orientado, estruturalmente, a NE-SW e compreende os estados de São Paulo, Paraná e Rio de Janeiro, com sua orientação mudando para N-S nos estados do Espírito Santo e Minas Gerais (Egydio-Silva *et al.*, 2018). O Orógeno Ribeira é parte de uma cadeia orogênica complexa, chamada de Sistema Orogênico Brasiliano/Pan-Africano (Heilbron *et al.*, 2010).

Pode-se dividir o Orógeno Ribeira em três diferentes domínios: Sul, Norte e Central (Egydio-Silva *et al.*, 2005). O domínio Norte é caracterizado por rochas de foliação de baixo ângulo, enquanto o domínio Sul, por foliações verticais e zonas de cisalhamento com orientações paralelas ao orógeno. O domínio central, por fim, faz a junção dos outros dois domínios e demonstra, portanto, características transicionais.

O domínio Sul é composto de uma assembleia mineral correspondente a rochas metamórficas com paragênese variando de fácies anfibolito superior a granulito (Egydio-Silva *et al.*, 2005). Estas rochas são gnaisses e milonitos, envolvendo granulitos de composição norítica a granodiorítica, granada-biotita-plagioclásio gnaisses, anfibolitos e migmatitos ricos em biotita, geralmente apresentando porfiroclastos. O domínio Norte é composto, majoritariamente, de rochas em fácies granulito, com ortognaisses (migmatíticos) de composição granítica, norítica, tonalítica, granodiorítica e álcali-charnockítica. Bandamentos composticionais paralelos à foliação são muito bem documentados, com orientação N10-30E e leve mergulho para SE. O domínio Central apresenta tectonitos similares aos dos domínios Sul e Norte. No entanto, a geometria interna deste domínio é caracterizada pela coexistência de foliações com orientações discrepantes, ora tendo baixo ângulo, ora paralelas ao Orógeno. As condições metamórficas observadas nos dois diferentes momentos de falhamento são similares ($T>750^{\circ}$ C e $P = 0.6\text{-}0.7$ GPa), indicando que os regimes deformacionais devem ter ocorrido quase concomitantemente (Egydio-Silva *et al.*, 2005).

A ZCAPP corresponde a um corpo milonítico alongado, com dimensões aproximadas de 200 km de comprimento e 5 km de largura. Está orientada ENE-WSW e rege grande parte do rio Paraíba do Sul, situando-se ao domínio mais Central do Orógeno Ribeira (Giraldo *et al.*, 2019).

Os milonitos da ZCAPP são marcados por notável bandamento composicional e *boudinage* intensa, com intrusões alcalinas, apresentando, também, dobras mesoscópicas cerradas a isoclinais (Campanha, 1981).

3.3. O ORÓGENO RIBEIRA EM SUA PORÇÃO SUDESTE E ANÁLISE DE ASM.

A porção Sudeste do Orógeno Ribeira, já foi descrita anteriormente, em função da análise de ASM. Sessenta e seis amostras de granulitos originais da Zona de Cisalhamento Dextral de Além-Paraíba, coletadas por Raposo & Egydio-Silva, (2001) foram analisadas e foram determinadas, tanto a AARM (Anisotropia da Magnetização Remanente), quanto a ASM (Anisotropia de Suscetibilidade Magnética de Baixo Campo), constatando que, para estas rochas, as curvas de histerese (Figura 2) indicam que tanto os minerais paramagnéticos, quantos os minerais ferromagnéticos são portadores de ASM. Além disso, as tramas de AARM e ASM foram caracterizadas como coaxiais e de origem relacionada a tectonismo (mais precisamente aos eventos da Orogenia Brasiliana).

Sendo assim, justifica-se a interpretação de que a porção SE do Orógeno Ribeira tem seus minerais ferromagnéticos e paramagnéticos registrados ao mesmo evento metamórfico, com a foliação magnética coincidindo com o *strike*, ou seja, com a direção da ZCAPP, indicando relação de causalidade com as texturas das rochas locais (Raposo & Egydio-Silva, 2001).

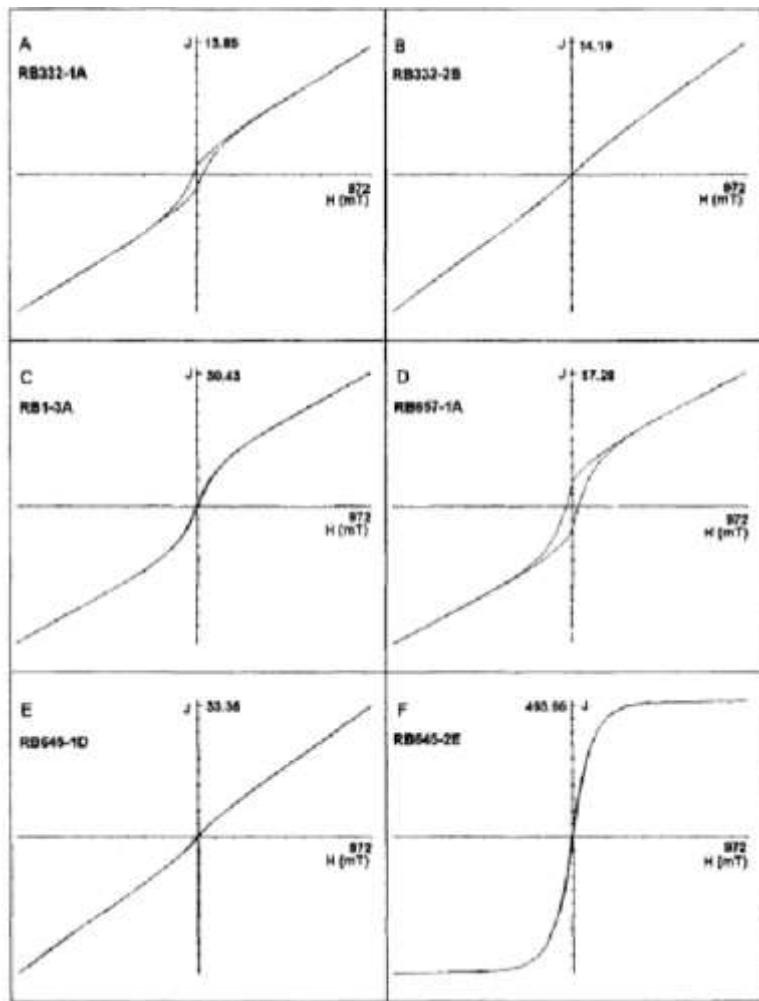


Figura 2. Loops de Histerese representativos para amostras com alto e baixo teor ferromagnético da região do Complexo Juiz de Fora. Retirado de Raposo & Egydio-Silva., 2001.

Interpreta-se que, para os granulitos do Complexo Juiz de Fora, em geral, as tramas de ARM e ASM são dotadas de forte foliação magnética com seu plano sendo perpendicular ao K_{\min} , apresentando lineação magnética horizontal (K_{\max}) (Raposo & Egydio-Silva, 2001. Figs. 3 e 4). Este padrão é concordante com as estruturas de foliação e lineação estudadas na geologia regional.

As direções horizontais e sub-horizontais da lineação magnética mudam de orientação conforme a Zona de Cisalhamento se alonga em direção ao Norte (Raposo *et al.*, 2001). A tendência da lineação magnética é NE, com leve mergulho subhorizontal, posteriormente E-W e passa a ser, gradativamente, N-S, enquanto a foliação magnética que tem orientação tendendo a NE (N40 – 50), com mergulho de alto ângulo, predominantemente para SE, passa a ter orientação com direção N2 - 30 e mergulho moderadamente sudeste (40° - 60°) (Figura 3 e 4). Estas variações ocorrem, em função da mudança de regime deformacional: a porção

norte da ZCAP entra em regime compressivo e a foliação rotaciona de Nordeste para Norte (Egydio-Silva *et al.*, 1999).

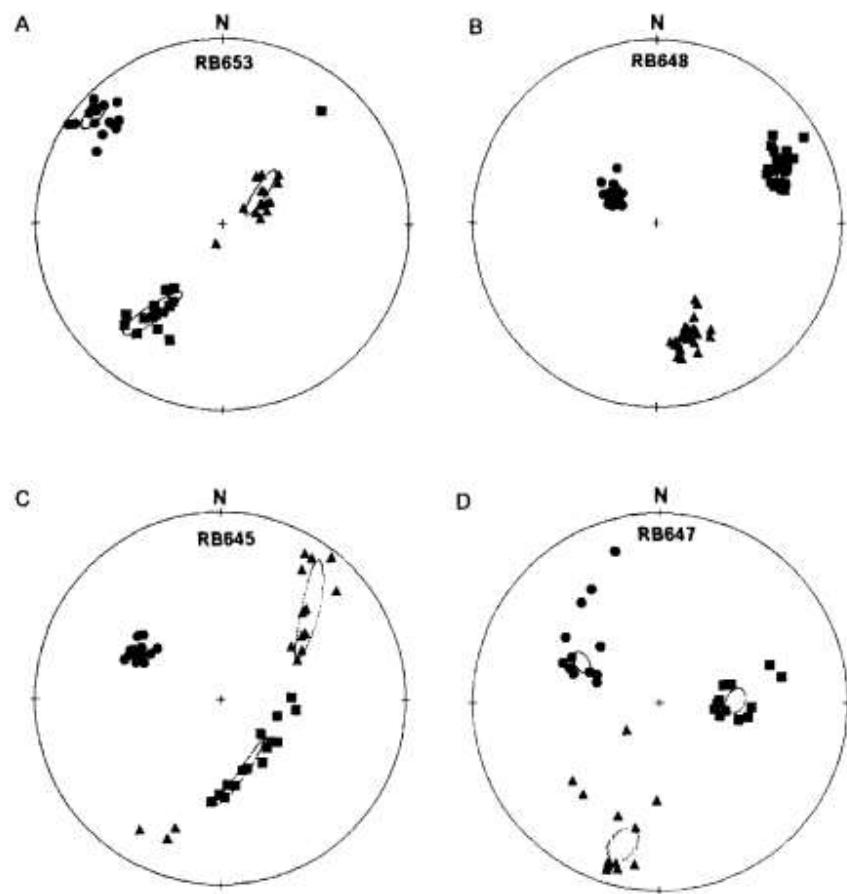


Figura 3. Exemplos de tramas magnéticas determinadas a partir de anisotropia de suscetibilidade magnética de baixo campo (ASM) para o Complexo de Juiz de Fora. Símbolos: quadrados = suscetibilidade máxima (K_{max}); triângulos = suscetibilidade intermediária (K_{int}); círculos = suscetibilidade mínima (K_{min}). Elipses de linha tracejada = elipses de confiança de 95%. Retirado de Raposo & Egydio-Silva (2001).

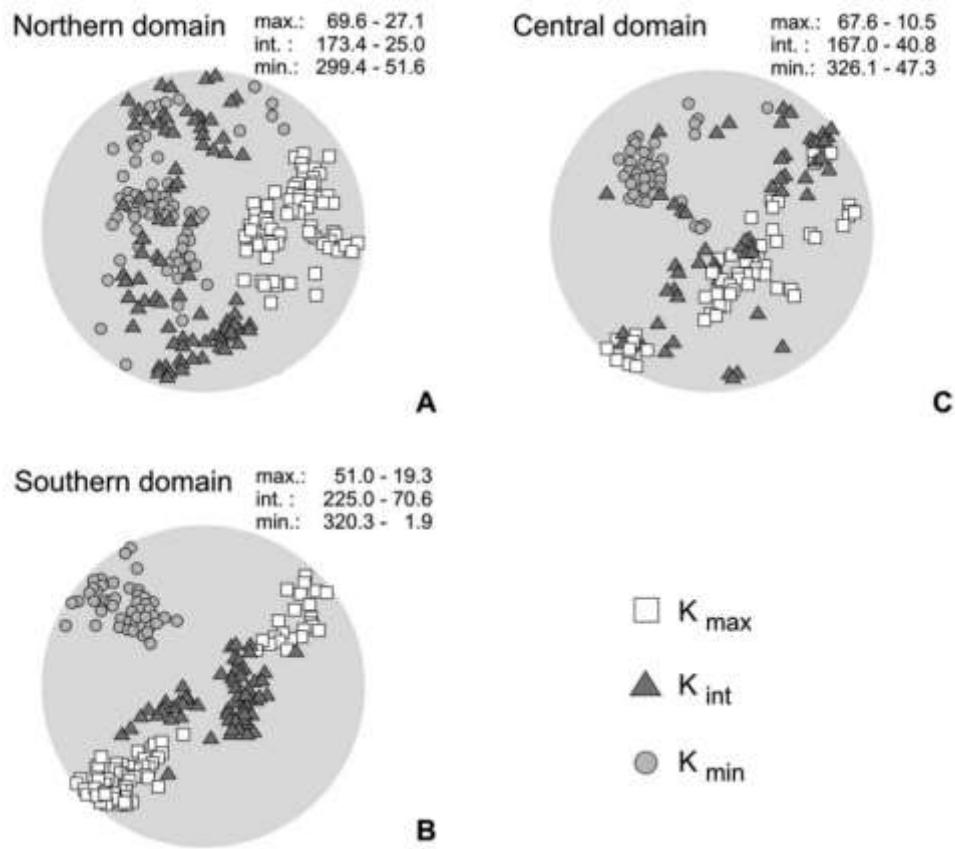


Figura 4. Tramas magnéticas determinadas por ASM. Retirado de Egydio-Silva *et al.*, (2005).

3.4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA ASM

Os materiais apresentam magnetismo como consequência de momentos de dipolo magnético, ou seja, esse magnetismo é resultante de pares de cargas magnéticas e/ou de loops de corrente (Figura 5). Consequentemente, o momento magnético é expresso pela rotação de uma partícula elétrica ao redor do núcleo atômico.

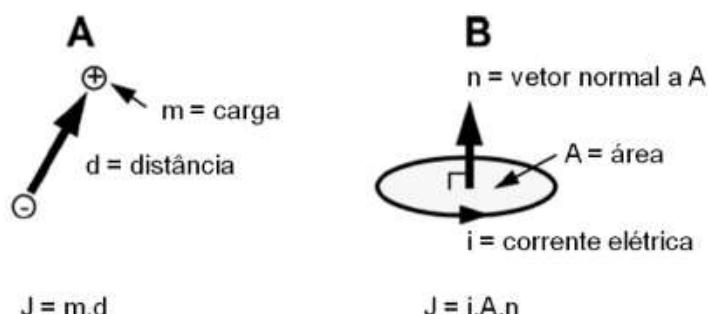


Figura 5. Representação da formação dos dipolos magnéticos seja por diferença de cargas magnéticas como por um loop de corrente elétrica. Extraído de Mondou (2010).

Para rochas, a estrutura do mineral apresenta uma disposição de momentos magnéticos que permite definir o momento magnético resultante (chamado de M), possibilitando a análise dos diferentes tipos de comportamento magnético dos minerais (Tarling & Hrouda, 1993).

Há dois tipos de magnetização presente em minerais magnéticos, sendo elas: magnetização induzida e magnetização remanente. Sendo a primeira, uma magnetização induzida durante a exposição do mineral ao campo magnético (ou seja, esta desaparece à medida em que a exposição ao campo não é mais aplicada). Já a segunda é um registro de um campo magnético que haveria atuado no mineral (ou seja, esta é preservada no material).

A magnetização induzida (M) apresenta relação de proporcionalidade direta à força do campo magnético aplicado (H), a partir da constante de proporcionalidade (K), do campo magnético (B) e da permeabilidade do espaço livre (μ). Esta relação é expressa pela seguinte equação:

$$M = K \cdot H = K \cdot \frac{B}{\mu_0} \quad (I)$$

Equação 1. Equação da magnetização induzida em função do campo magnético, da força do campo magnético aplicado e da permeabilidade do espaço livre.

A susceptibilidade magnética (K) varia conforme a disposição dos momentos magnéticos, gerando três distintos tipos de comportamento magnético: diamagnetismo; paramagnetismo; ferromagnetismo e antiferromagnetismo (Figura 6).

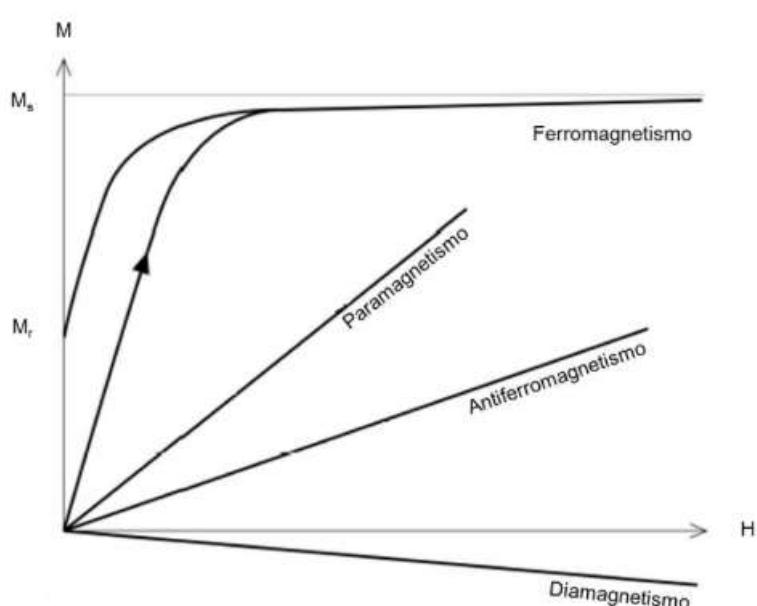


Figura 6. Variação da suscetibilidade magnética conforme descrita pela Equação 1. Extraído de Bouchez, 1997.

Materiais paramagnéticos são aqueles cuja magnetização é induzida mediante aplicação de campo magnético é de baixa intensidade, sendo esta magnetização paralela ao campo magnético e de mesmo sentido. São exemplos de minerais paramagnéticos a Biotita, a Ilmenita e os minerais do grupo do anfibólio.

Por outro lado, minerais diamagnéticos são aqueles cuja magnetização é induzida mediante aplicação de campo magnético é de baixa intensidade, porém, de sentido oposto ao do campo magnético aplicado. Este tipo de mineral apresenta, portanto, suscetibilidade magnética negativa e constante. São exemplos de minerais diamagnéticos o Quartzo e a Calcita (Tarling & Hrouda, 1993).

No caso dos minerais que possuem alto valor de suscetibilidade magnética, estes são chamados de Ferromagnéticos e sempre apresentam magnetização remanente. Esta magnetização remanente, no entanto, é limitada por um teto de saturação, onde a suscetibilidade magnética se estabiliza (Tarling & Hrouda, 1993).

Mediante a presença de meios anisotrópicos, a suscetibilidade magnética (K) passa a ser representada por uma matriz de segunda ordem, definida por um elipsoide triaxial (Figura 7), onde $K_{\max} \geq K_{\text{int}} \geq K_{\min}$.

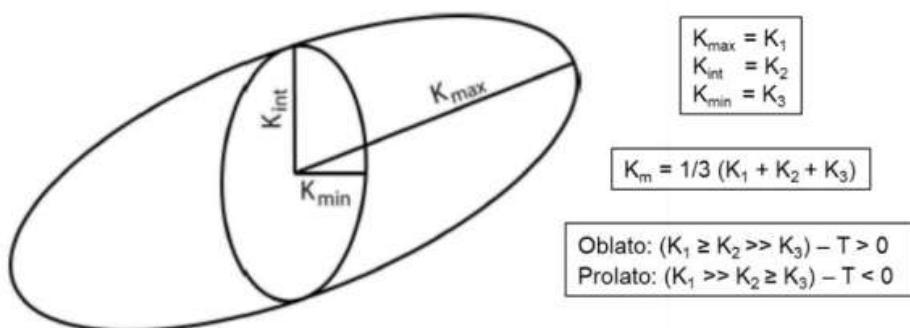


Figura 7. Elipsoide de anisotropia de suscetibilidade magnética. Extraído de Mondou, 2010.

A susceptibilidade magnética pode ser caracterizada por dois tipos de anisotropia na escala do retículo cristalino: a anisotropia magnetocristalina e a anisotropia de forma. A anisotropia magnetocristalina é o principal tipo de anisotropia e desempenha um papel crucial na determinação da anisotropia da susceptibilidade magnética de um mineral. Nesta situação, o valor de K é mais elevado na direção dos eixos cristalográficos, mas a variação na intensidade de K ao longo desses eixos é o que gera a anisotropia. Esse tipo de anisotropia é especialmente evidente em minerais como óxidos de titano-hematita, sulfetos de ferro e minerais paramagnéticos.

Por outro lado, a anisotropia de forma está presente, apenas, na magnetita e titanomagnetita. Contudo, a extensão dessa anisotropia pode variar em função da intensidade da anisotropia magnetocristalina.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. PREPARAÇÃO E TRATAMENTO DE AMOSTRAS

Neste projeto foram aplicados os métodos clássicos e já tradicionais de investigação em campo aliados à ASM. Amostras cilíndricas orientadas foram coletadas em sete (sete) diferentes sítios localizados nos arredores da cidade de Santo Antônio de Pádua – RJ (Figura 8), diretamente no campo, utilizando-se de uma furadeira portátil da marca *Still*. Foram consideradas prioritárias as amostragens das rochas miloníticas da zona de cisalhamento e dos gnaisses bandados das rochas regionais adjacentes à zona de cisalhamento. O mapa representado pela Figura 10 mostra a configuração espacial dos sítios visitados, bem como sua relação com a nomenclatura dos pontos referenciados neste trabalho.

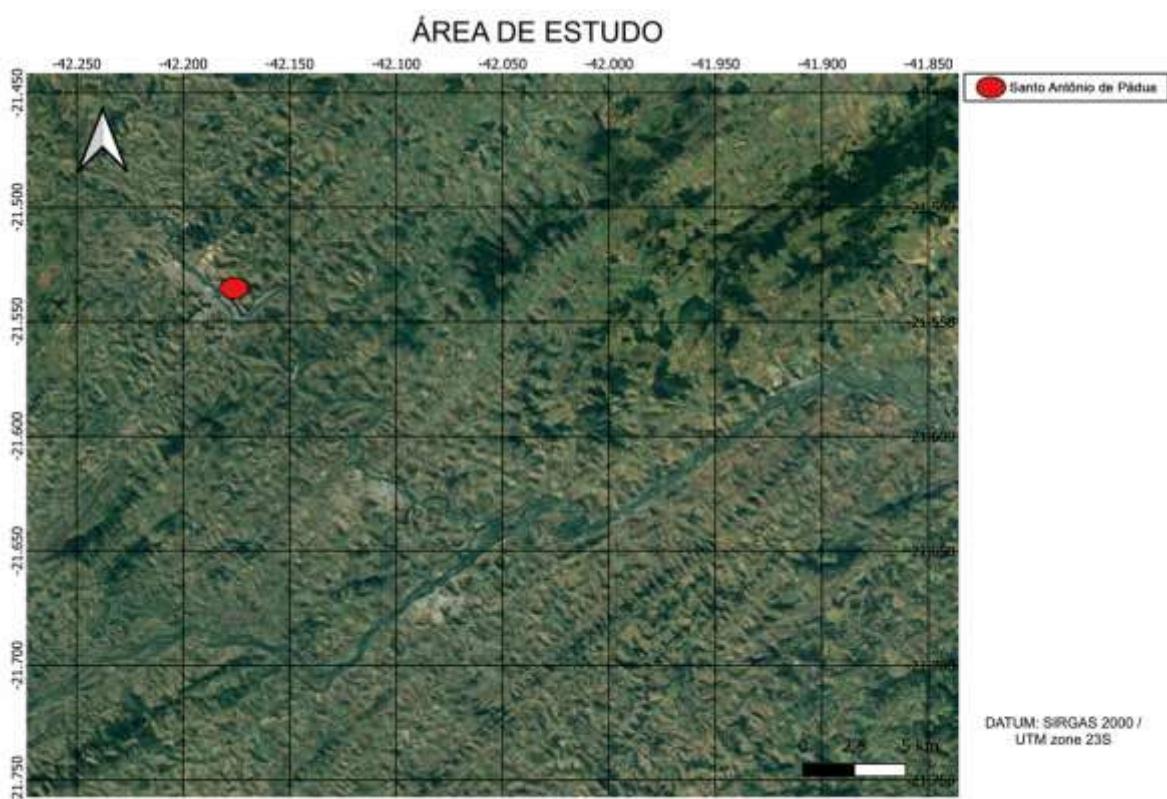


Figura 8. Mapa da Área de Estudo com referência à cidade de Santo Antônio de Pádua.

Os trabalhos de campo foram realizados do dia 20/09/2024 ao dia 25/09/2024. A atividade foi desenvolvida, em grande parte, em pedreiras desativadas e lajedos de grande

porte, dada a necessidade de utilização de uma perfuratriz portátil e reservatório de água e óleo para a coleta dos testemunhos. A Tabela 1 expõe os afloramentos descritos durante o período.

SÍTIO	ESPÉCIMES	ORIENTAÇÃO
TFC - 01	TFC - 1A	085/45
	TFC - 1B	320/33
	TFC - 1C	156/27
	TFC - 1D	171/23
	TFC - 1E	150/12
	TFC - 1F	284/07
TFC - 02	TFC - 2A	317/63
	TFC - 2B	231/69
	TFC - 2C	294/43
	TFC - 2D	108/13
	TFC - 2E	121/17
	TFC - 2F	155/14
TFC - 03	TFC - 3A	150/12
	TFC - 3B	152/05
	TFC - 3C	131/08
	TFC - 3D	020/08
	TFC - 3E	073/08
	TFC - 3F	036/07
TFC - 04	TFC - 3G	039/10
	TFC - 4A	326/08
	TFC - 4B	333/12
	TFC - 4C	333/13
TFC - 05	TFC - 4D	310/08
	TFC - 5A	050/09
	TFC - 5B	312/16
	TFC - 5C	342/12
	TFC - 5D	086/07
	TFC - 5E	342/00
TFC - 06	TFC - 5F	110/02
	TFC - 6A	048/18
	TFC - 6B	309/28
	TFC - 6C	353/22
	TFC - 6D	350/08
	TFC - 6E	321/13
TFC - 07	TFC - 6F	301/26
	TFC - 7A	248/07
	TFC - 7B	200/08
	TFC - 7C	171/06
	TFC - 7D	160/08
	TFC - 7E	107/05
	TFC - 7F	123/06
	TFC - 7G	310/02

Tabela 1: Dados dos afloramentos descritos.

Para coletar os testemunhos (Figura 9), o procedimento padrão pode ser descrito por: primeiramente, perfurar a rocha a partir do uso de uma perfuratriz portátil alimentada a gasolina, acompanhada por um reservatório que bombeia uma solução de água e óleo que irá lubrificar a broca da perfuratriz, bem como a rocha a ser perfurada, evitando seu superaquecimento e o comprometimento dos minerais magnéticos.

Após a perfuração, o testemunho é orientado a partir de um aparelho composto por uma bússola solar e magnética, tomando, portanto, suas medidas de direção e mergulho (conforme ilustrado na Tabela 1). Em seguida, o testemunho deve ser identificado em seu topo e seu Norte, a partir do uso de uma caneta piloto simples.

Cada sítio amostrado rendeu espécimes nomeados de A até G (podendo variar em relação ao sítio). As medidas de ASM foram realizadas em um *Kappabridge* susceptômetro (MFK1-FA com 3D Rotator) (Agico Ltd, República Tcheca). No total, 122 cilindros foram submetidos à análise via *Kappabridge*, uma vez que foram realizados de 3 a 7 furos por sítio, com cada sítio podendo gerar até 4 cilindros. Estes cilindros têm sua relação topo-base (marcada por caneta piloto) respeitada, permitindo uma associação de nomenclatura dos cilindros com a nomenclatura já utilizada na identificação dos testemunhos. Por fim, antes de introduzir os cilindros ao *Kappabridge* susceptômetro, os cilindros são marcados a cada 90 graus, a partir da posição Norte definida ainda em campo. Com a finalidade de evitar contaminação e danos ao aparelho, os cilindros devem ser embalados em filme plástico de PVC.

A susceptibilidade magnética é medida para diferentes orientações da amostra cilíndrica e é utilizada para calcular a intensidade dos três eixos do elipsoide de susceptibilidade magnética K_{\max} , K_{int} e K_{\min} . A interpretação dos dados será apresentada neste trabalho por meio das análises realizadas através do *Anisoft 5.0*.

As análises via *Kappabridge* susceptômetro foram desenvolvidas neste projeto no Laboratório de Anisotropias Magnéticas e Magnetismo de Rocha do IGc – USP.



Figura 9. Exemplo de testemunho coletado em campo (sítio TFC-03).

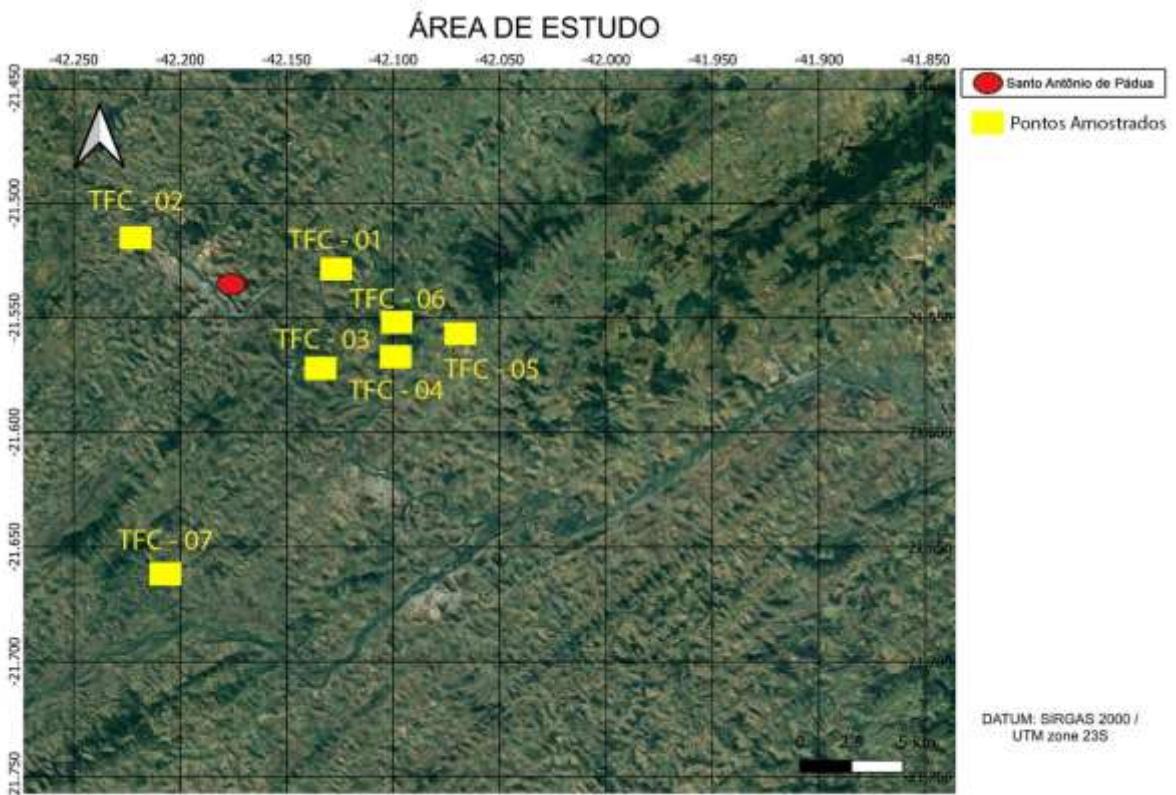


Figura 10. Mapa da área de estudo com os pontos amostrados e sua respectiva nomenclatura.

4.2. CURVAS TERMOMAGNÉTICAS

No intuito de identificar os minerais responsáveis pela mineralogia magnética, são determinadas as curvas termomagnéticas, correlacionando a suscetibilidade magnética com a variação da temperatura.

Esta análise consiste no processo de resfriamento e aquecimento de 20 gramas da amostra triturada (em fração areia fina), envolta em argônio. Por intermédio de Nitrogênio líquido, a amostra é resfriada à temperatura de - 200°C, sendo aquecida à temperatura ambiente logo em sequência. Após isso, é iniciado o aquecimento da amostra até 700°C, seguido de resfriamento à temperatura ambiente. As medidas de suscetibilidade são realizadas em intervalos de 3°C durante a totalidade do procedimento. Para este relatório, as medidas termomagnéticas foram realizadas apenas a alta temperatura.

Identifica-se dois possíveis tipos de situação a partir das curvas: trajetórias reversíveis ou irreversíveis. Se ambas as curvas apresentarem trajetórias semelhantes, interpreta-se que o mineral magnético não sofreu transformação durante o ciclo, com suas curvas sendo categorizadas como reversíveis. Por outro lado, se a trajetória de ambas for diferente, sugere-se que houve transformação da mineralogia durante o ciclo ou há uma combinação complexa de minerais ferromagnéticos, com as curvas consideradas irreversíveis.

5. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Como já citado anteriormente neste relatório, 7 (sete) diferentes sítios de coleta de testemunhos foram submetidos à análise de ASM, culminando na amostragem de 122 cilindros resultantes. A Tabela 2 expõe os dados tratados.

Sítio	n	Km	P	T	Kmax		Kint		Kmin	
					Dec (°)	Inc (°)	Dec (°)	Inc (°)	Dec (°)	Inc (°)
TFC01	26	8,44E-02	2,081	0,333	218,8	5	120,8	58,1	311,9	31,4
TFC02	23	2,33E-03	1,518	0,835	181,4	53	54,5	24,3	311,8	26,1
TFC03	26	1,02E-03	1,103	0,482	54,2	6,8	156	59,9	320,4	29,2
TFC04	14	2,96E-03	1,496	0,391	45,5	1,8	139,3	64,7	314,6	25,2
TFC05	14	7,23E-03	1,545	0,776	34,9	71,5	212	18,5	302,3	0,9
TFC06	12	4,05E-03	1,459	0,105	36,1	0,4	128,2	78	306	12 ^a
TFC07	7	6,91E-03	2,194	0,326	205,2	7,6	50,2	81,7	295,7	3,5

Tabela 2. Dados de ASM. “n”: número de amostras por sítio; “Km”: susceptibilidade média; “P”: grau de anisotropia; “T”: parâmetro de forma; “Dec (°)”: declinação; “Inc (°)”: inclinação; “Kmax”, “Kint”, “Kmin”: respectivamente, eixos máximo, intermediário e mínimo do elipsoide de ASM.

Os valores médios de susceptibilidade variam entre 1,02E-03 e 8,44E-02 (SI) (conforme Tabela 2). Sendo assim, observa-se que, em geral, as rochas analisadas apresentam valores altos de susceptibilidade magnética.

Além dos valores médios de susceptibilidade, é de notável importância a avaliação dos parâmetros P (grau de anisotropia), definido por $P = K_{\text{max}}/K_{\text{min}}$, e T (fator de forma), definido pela Equação 2. O grau de anisotropia, como sugere o nome, tem influência na magnitude do grau anisotrópico apresentado pela amostra. O fator de forma, por sua vez, permite avaliar a morfologia do elipsoide, possibilitando a categorização do mesmo entre oblato ou prolato.

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

Equação 2. Equação que demonstra o fator T em função de Kmax, Kint e Kmin.

Um elipsoide oblato corresponde a uma figura geométrica cuja elipse rotaciona em torno de seu eixo menor ($K_{max} = K_{int} >> K_{min}$), enquanto que, para elipsoides prolatos, a elipse rotaciona em torno de seu eixo principal ($K_{max} >> K_{int} = K_{min}$). A variação de T entre 0 e 1 define elipsoides neutros a oblato, enquanto se for de 0 a -1, o elipsoide é categorizado como neutro ou prolato (Tarling & Hrouda, 1993).

Como evidenciado pela Tabela 2, os valores de P para as amostras variaram de 1,103 a 2,194. Apesar da aparente alta amplitude na variação dos valores de P , a média aferida dos valores corresponde a 1,518, com desvio padrão de, aproximadamente 0,380. Para os valores de T , os valores variaram de 0,105 a 0,835, com média de 0,391 e desvio padrão de 0,260.

A partir do gráfico de dispersão apresentado na Figura 11, pode-se inferir que, pela relação entre os fatores P e T , todos os sítios analisados correspondem a rochas cujos elipsoides de ASM são oblato.

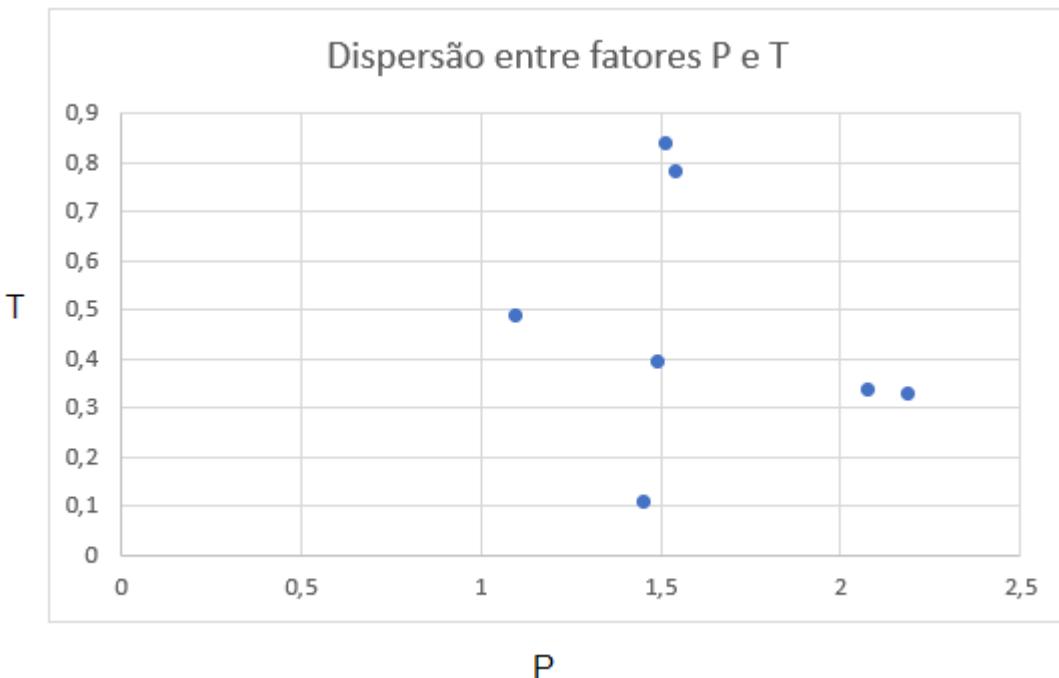


Figura 11. Gráfico de dispersão relacionando os fatores P e T , permitindo uma análise morfológica do caráter anisotrópico.

Para facilitar as futuras interpretações estruturais e de ASM a serem discutidas nos seguintes tópicos deste relatório, é importante categorizar os sítios visitados com base em sua disposição geográfica ao longo da ZCAPP e da área de interesse.

Ao noroeste da área de interesse e, também ao noroeste da cidade de Santo Antônio de Pádua localiza-se o sítio TFC-02 (Figura 12). Adiante, mais a Nordeste da ZCAPP estão os sítios TFC-01, TFC-03, TFC-04, TFC-05 e TFC-06 (Figura 13). Por fim, a Sudoeste da ZCAPP, próximo ao Rio Paraíba do Sul, localiza-se o sítio TFC-07 (Figura 14).

O sítio TFC-02 (Figura 12) apresenta foliação magnética predominantemente NE-SW, tendo apenas duas medidas discrepantes, próxima de EW, entretanto, a lineação magnética apresenta direção variável, ao longo do plano da foliação, desde paralela à foliação até perpendicular a este. À medida em que se atinge a porção mais a nordeste da ZCAPP (Figura 13), é possível destacar os seguintes pontos: em geral, a foliação e lineação magnéticas se mantêm paralelas, no entanto há uma leve tendência de deslocamento do rumo do mergulho da lineação magnética em direção N-S no sítio TFC-05 e, em comparação com a porção noroeste da área estudada, a inclinação se torna mais horizontal. Há uma discrepância em relação ao diagrama do afloramento TC 03 e dos demais, onde as orientações das foliações e lineações magnéticas são divergentes e incongruentes com os demais resultados obtidos. Razão dessa discordância ainda está sendo investigada.

Em relação à porção Sudoeste da ZCAPP (Figura 14), novamente a foliação magnética apresenta atitude NE-SW/subvertical e a lineação magnética paralela à foliação. Apenas uma medida forneceu direção NS/vertical para a foliação e NS/horizontal para a lineação magnética.

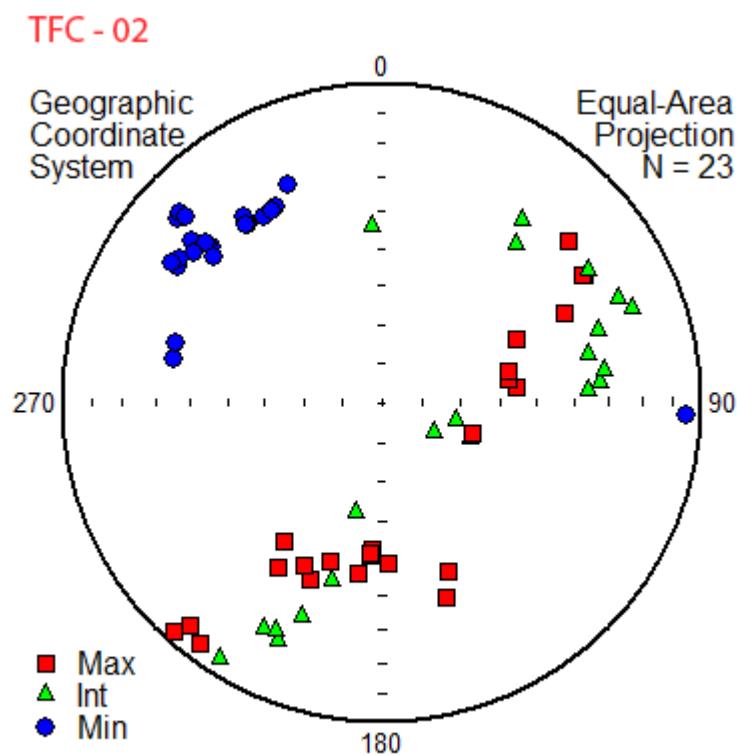


Figura 12. Sítio da porção Noroeste da ZCAPP (TFC-02) e sua foliação e lineação magnéticas. Valores médios e elipsoide de confiança para K_{max} (vermelho), K_{int} (verde) e K_{min} (azul). N: número de espécimes analisadas no sítio. Valores em sistema de coordenadas geográficas.

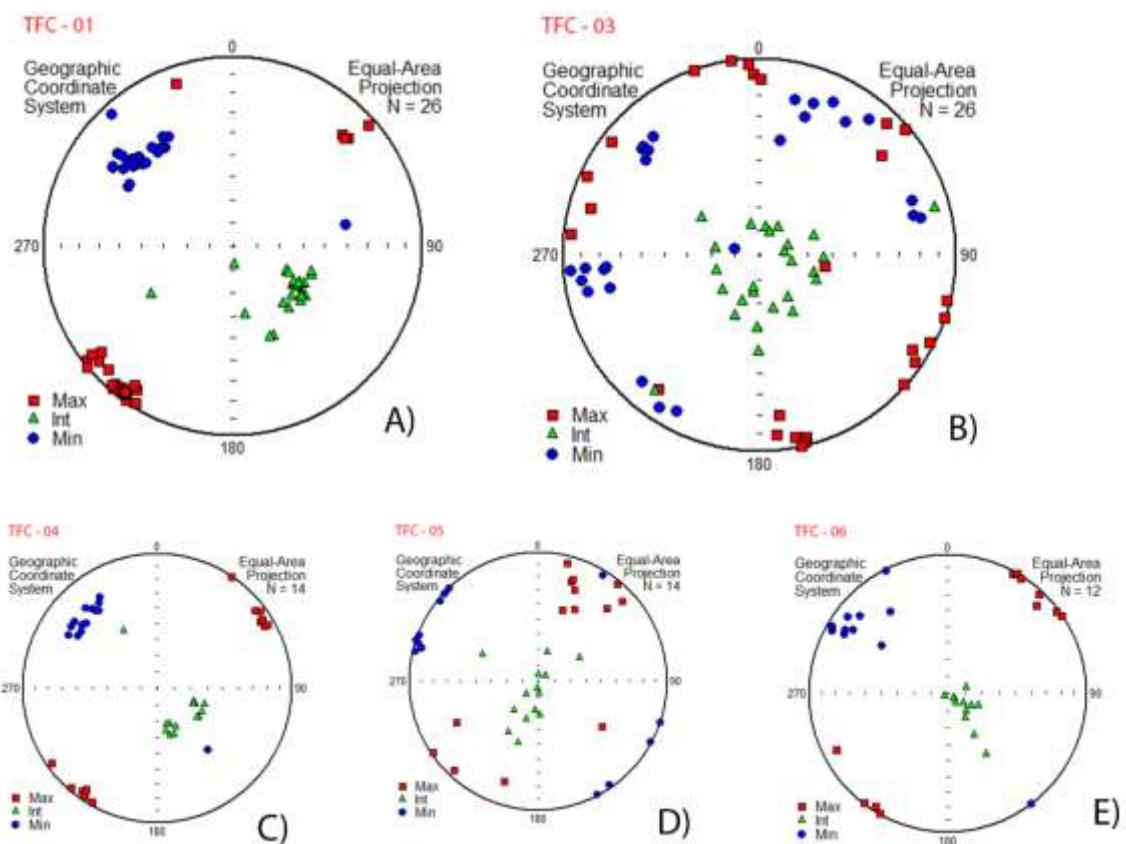


Figura 13. Sítios da porção Nordeste e sua foliação e lineação magnéticas. Valores médios e elipsóide de confiança para K_{max} (vermelho), K_{int} (verde) e K_{min} (azul). N: número de espécimes analisadas no sítio. A), B), C), D) e E): representação dos sítios TFC-01, TFC-03, TFC-04, TFC-05 e TFC-06, respectivamente. Valores em sistema de coordenadas geográficas.

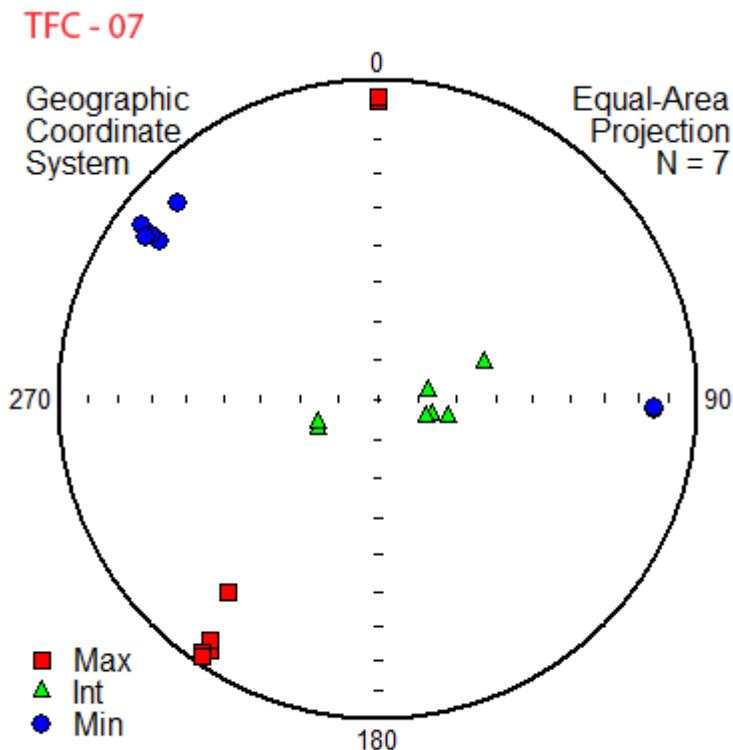


Figura 14. Sítio da porção Sudoeste da ZCAPP (TFC-07) e sua foliação e lineação magnéticas. Valores médios e elipsoide de confiança para K_{max} (vermelho), K_{int} (verde) e K_{min} (azul). N: número de espécimes analisadas no sítio. Valores em sistema de coordenadas geográficas.

Preliminarmente, nota-se que: i) em geral, as foliações magnéticas tendem a apresentar orientação NE/SW, com lineação paralela à foliação, com exceção do sítio TFC-03, como descrito acima; ii) o mergulho das lineações variam de sub-horizontais a horizontais, portanto direcionais com a foliação, com exceção do afloramento TFC-02 onde a lineação magnética descreve uma guirlanda ao longo do plano da foliação.

Dada a notável discrepância entre as estruturas magnéticas do sítio TFC-03 para as estruturas dos demais sítios, elaborou-se curvas termomagnéticas para o sítio TFC-03 e, comparativamente, para o sítio TFC-02, como ferramenta adicional de estudo e análise. As curvas obtidas são representadas neste relatório pelas Figuras 15 e 16, respectivamente.

As curvas termomagnéticas do sítio TFC-02 (Figura 15) demonstram o caráter irreversível e ferromagnético da mineralogia magnética dos tectonitos da ZCAPP. O comportamento das curvas de aquecimento e resfriamento para o sítio TFC-02 é notavelmente discrepante e marcado por um aumento na suscetibilidade magnética durante o resfriamento, quando a temperatura regride próxima aos 580°C. Este comportamento sugere que o principal mineral magnético da amostra é a Magnetita (Muxworthy *et al.*, 2023). Já no caso do sítio TFC-03 (Figura 16), durante todo o processo de aquecimento há uma queda na suscetibilidade magnética, com esta voltando a aumentar durante o resfriamento,

próximo aos 580°C. Em função do formato das curvas, é possível inferir que a magnetita foi formada durante o próprio aquecimento das amostras, a partir de outros minerais presentes nas rochas coletadas.

Os dados de termomagnéticos aliados ao diagrama apresentado na Figura 13 sugerem que, para o sítio TFC-03, é necessária uma investigação mais detalhada e pormenorizada, afim de definir o motivo de as estruturas magnéticas não corroborarem com as estruturas aferidas em campo.

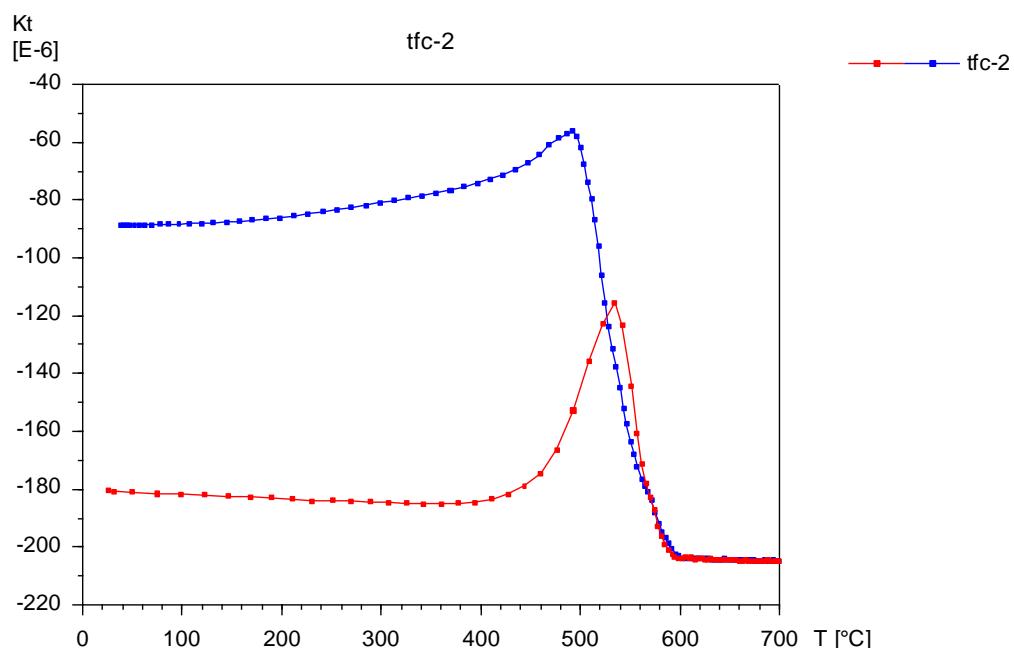


Figura 15. Curvas termomagnéticas referentes ao sítio TFC-02 da área de estudo. As curvas em vermelho e azul referem-se, nessa ordem, aos períodos de aquecimento e resfriamento. Kt: suscetibilidade normalizada em relação ao vazio.

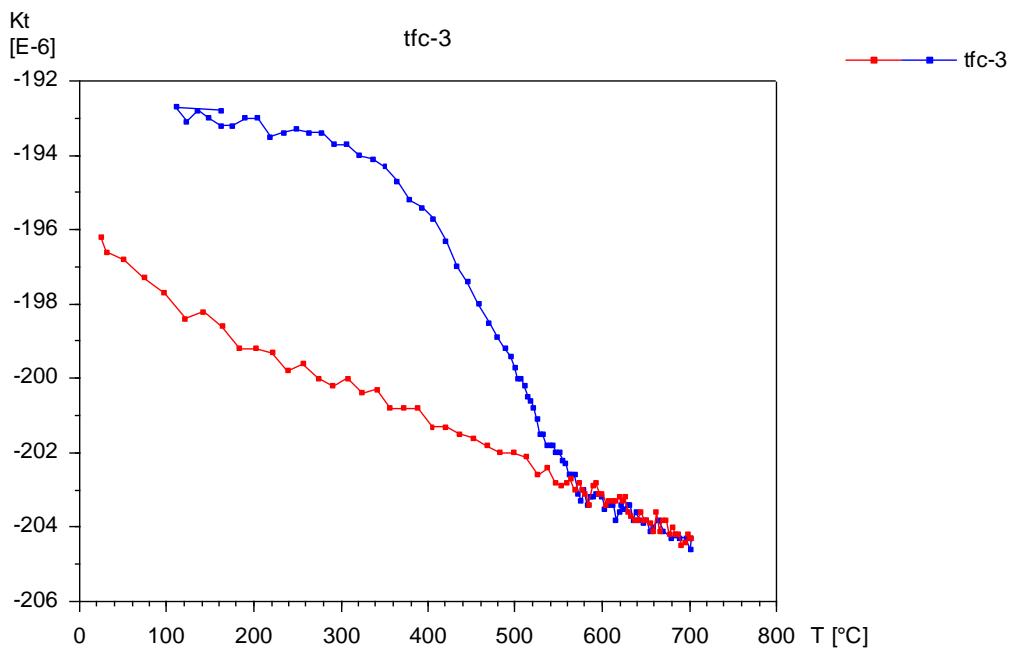


Figura 16. Curvas termomagnéticas referentes ao sítio TFC-03 da área de estudo. As curvas em vermelho e azul referem-se, nessa ordem, aos períodos de aquecimento e resfriamento. Kt: suscetibilidade normalizada em relação ao vazio.

6. CONCLUSÕES

A geologia regional da área estudada foi apresentada neste relatório em forma de revisão bibliográfica (conforme tópicos 3.1., 3.2. e 3.3.). A partir dos trabalhos de Egydio-Silva et al, (2005) e Raposo & Egydio-Silva, (2001), antecipava-se que os dados analisados neste trabalho corroborariam com os seguintes fatores: (i) o domínio Central do Orógeno Ribeira, onde se encaixa, genericamente, a ZCAPP, fosse marcado por tectonitos de transição entre dois distintos regimes de falha, sendo um transcorrente e outro compressional (Figura 17); (ii) os dados de ASM para o domínio Norte do Orógeno Ribeira mostrassem que, embora os polos de foliação magnética estejam bem agrupados, as linhas magnéticas são mais espaçadas, variando de paralelas a normais à direção da foliação; (iii) a análise termomagnética indicasse caráter paramagnético a ferromagnético para as amostras estudadas.

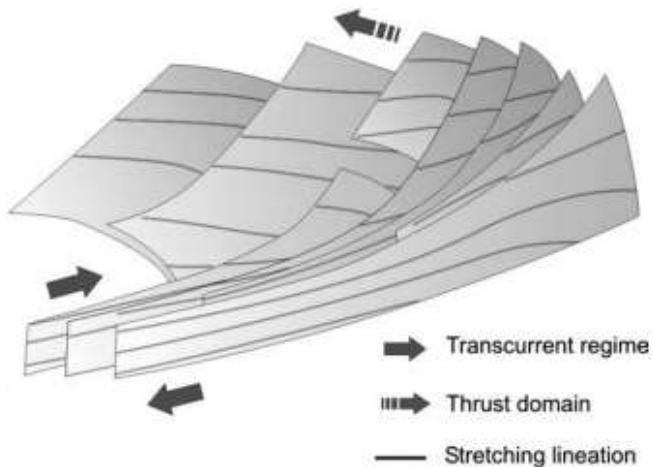


Figura 17. Diagrama ilustrando como a deformação e a cinemática variam ao longo dos diferentes domínios no Orógeno Ribeira. Retirado de Egydio-Silva *et al.*, (2005).

Os dados apresentados neste relatório contribuem com novas e adicionais informações sobre a ASM no contexto da ZCAPP, principalmente em relação às rochas protomiloníticas, orto-gnáissicas e paragnaissicas localizadas às bordas da ZCAPP, onde a deformação cisalhante é menos intensa e há, evidentemente, uma discrepância que necessita de uma investigação mais detalhada e pormenorizada.

Nos milonitos e ultramilonitos do interior da zona cisalhante, a ASM mostrou perfeito ajuste e concordância com as estruturas observadas e medidas de campo, tanto em relação à foliação, como também associada à lineação. A investigação sobre a mineralogia magnética indicou a presença de magnetita, complementando o trabalho desenvolvido por Bascou *et al.*, (2002). Outra informação relevante é a determinação da lineação magnética dos ortognaisses tonalíticos (afloramento TC-02), que apresenta uma distribuição em guirlanda, pois em afloramento sua determinação é incerta. No setor onde o trabalho foi desenvolvido os resultados não são distintos daqueles obtidos por Raposo & Egydio Silva (2001) e Egydio-Silva *et al.*, (2005). Não obstante, o trabalho aqui apresentado trouxe dados adicionais e significativos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bento dos Santos, T.M., Tassinari, C.C.G., Fonseca, P.E., 2015. Diachronic collision, slab break-off and long-term high thermal flux in the Brasiliano-Pan-African orogeny: Implications for the geodynamic evolution of the Mantiqueira Province. *Precambrian Research* 260, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.12.018>
- Borradaile, G. and Henry, B., 1997. Tectonic application of magnetic susceptibility and its anisotropy. *Earth Science Review* 42, 49–93.
- Borradaile, G. J. & Tarling, D.H., 1981. The influence of deformation mechanisms on magnetic fabrics in weakly deformed rocks. *Tectonophysics* 77, 151–168.
- Borradaile, G.J., 1991. Correlation of strain with anisotropy of magnetic susceptibility. *Pure Applied Geophysics* 135, 15–29.
- Borradaile, G.J., Jackson, M., 2010. Structural geology, petrofabrics and magnetic fabrics (AMS, AARM, AIRM). *Journal of Structural Geology* 32, 1519–1551. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.09.006>
- Bouchez, J.L., 1997. Granite is never isotropic: an introduction to AMS studies of granitic rocks. In: Bouchez, J. L., Hutton, D., H. W., S. (Ed.), *Granite: From Segregation of Melt to Emplacement Fabrics*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 95–112.
- Campanha, G.A.C., 1981. O lineamento de Além-Paraíba na região de Três Rios (RJ). *Revista Brasileira de Geociências* 3.
- Cavalcante, C., Lagoeiro, L., Fossen, H., Egydio-Silva, M., Morales, L.F.G., Ferreira, F., Conte, T., 2018. Temperature constraints on microfabric patterns in quartzofeldspathic mylonites, Ribeira belt (SE Brazil). *Journal of Structural Geology* 115, 243–262. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.07.013>
- Da Silva Schmitt, R., Trouw, R.A.J., Van Schmus, W.R., Pimentel, M.M., 2004. Late amalgamation in the central part of West Gondwana: New geochronological data and the characterization of a Cambrian collisional orogeny in the Ribeira Belt (SE Brazil). *Precambrian Research* 133, 29–61. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.03.010>
- de Almeida, F.F.M., Hasui, Y., de Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1981. Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth-Science Reviews* 17, 1–29. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9)
- Egydio-Silva, M., and Mainprice, D., 1999. Determination of stress directions from plagioclase fabrics in high grade deformed rocks (Alem Paraíba shear zone, Ribeira fold belt, southeastern Brazil): *Journal of Structural Geology*, v. 21, p. 1751–1771, doi:10.1016/S0191-8141(99)00121-2.
- Egydio-Silva, M., Vauchez, A., Raposo, M.I.B., Bascou, J., and Uhlein, A., 2005, Deformation regime variations in an arcuate transpressional orogen (Ribeira belt, SE Brazil) imaged by anisotropy of magnetic susceptibility in granulites: *Journal of Structural Geology*, v. 27,

- p. 1750–1764, doi:10.1016/j.jsames.2005.06.001.
- Egydio-Silva, M., Vauchez, A., Fossen, H., Gonçalves Cavalcante, G.C., Xavier, B.C., 2018. Connecting the Araçuaí and Ribeira belts (SE – Brazil): Progressive transition from contractional to transpressive strain regime during the Brasiliano orogeny. *Journal of South American Earth Sciences* 86, 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.06.005>
- Ferré, Eric C. & Améglio, L., 2000. Preserved magnetic fabrics vs. annealed microstructures in the syntectonic recrystallised George granite, South Africa. *Journal of Structural Geology* 22, 1199–1219.
- Ferré E.; Gébelin, A.; Till, J.; Sassier, C.; Burmeister, K., 2014. Deformation and magnetic fabrics in ductile shear zones: A review. *Tectonophysics* 629, 179–188.
- Ferré, E.C., Tikoff, B., Jackson, M., 2005. The magnetic anisotropy of mantle peridotites: Example from the Twin Sisters dunite, Washington. *Tectonophysics* 398, 141–166. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.02.001>
- Giraldo, S., Trouw, R.A.J., Duffles, P., Vinagre da Costa, R., Ibañez Mejia, M., Schwantes Marimon, R., 2019. Structural analysis combined with new geothermobarometric and geochronological results of the Além Paraíba shear zone, between Três Rios and Bananal, Ribeira Orogen, SE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 90, 118–136. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.11.018>
- Heilbron, M., Duarte, B.P., Valeriano, C. de M., Simonetti, A., Machado, N., Nogueira, J.R., 2010. Evolution of reworked Paleoproterozoic basement rocks within the Ribeira belt (Neoproterozoic), SE-Brazil, based on U-Pb geochronology: Implications for paleogeographic reconstructions of the São Francisco-Congo paleocontinent. *Precambrian Research* 178, 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.02.002>
- Lee, K.H., Jiang, Z., Karato, S.I., 2002. A scanning electron microscope study of the effects of dynamic recrystallization on lattice preferred orientation in olivine. *Tectonophysics* 351, 331–341. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00250-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00250-0)
- Mondou, M. 2010. Structural and thermal evolution of synkinematic batholith from the Neoproterozoic Araçuaí hot orogen (Eastern Brasil). Tese de Doutoramento. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 217 p.
- Muxworthy, AR., Turney, JN., Qi L., Baker EB., Perkins JR., Abdulkarim MA., 2023. Interpreting high-temperature magnetic susceptibility data of natural systems. *Front. Earth Sci.* 11:1171200. doi: 10.3389/feart.2023.1171200
- Parés, Josep M. and Pluijm, B.A., 2002. Evaluating magnetic lineations (AMS) in deformed rocks. *Tectonophysics* 350, 283–298.
- Raposo, M.I.B., and Egydio-Silva, M., 2001, Magnetic fabric studies of high-grade metamorphic rocks from the Juiz de Fora Complex, Ribeira Belt, Southeastern Brazil:

- International Geology Review, v. 43, p. 441–456, doi:10.1080/00206810109465025.
- Tarling, D.H. & Hrouda, F. 1993. The Magnetic Anisotropy of Rocks. London, Chapman & Hall, 217p.
- Tikoff, B. & Greene, D., 1997. Stretching lineations in transpressional shear zones: an example from the Sierra Nevada Batholith , California. Journal Of Structural Geology 19, 29–39.