

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**SIGNIFICADO DAS TRAMAS MAGNÉTICAS NO GRANITO CABREÚVA, SP.**

João Paulo Abujamra

Orientadora: Profa. Dra. Maria Irene Bartolomeu Raposo

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2015 / 26)

SÃO PAULO  
2015

TF  
A165  
JP.s



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

IGc-Instituto de Geociências



Significado das tramas magnéticas no granito Cabreúva,  
SP.

M26516



MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA

(TF-2015 / 26)

**SIGNIFICADO DAS TRAMAS MAGNÉTICAS NO GRANITO CABREÚVA, SP.**

João Paulo Abujamra

Orientadora: Profa.Dra. Maria Irene Bartolomeu Raposo

De acordo:

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Irene Bartolomeu Raposo

João Paulo Abujamra

SÃO PAULO

2015

## RESUMO

O granito Cabreúva, uma das quatro intrusões que formam o Complexo Granitóide Itu, é composto por fácies com estruturas predominantemente maciças e texturas isotrópicas. Como a petrografia é de difícil determinação nestas condições, foi realizado o estudo da anisotropia de suscetibilidade magnética (ASM) em 21 sítios para determinação da trama magnética do granito, além do estudo detalhado do magnetismo de rocha para 8 sítios.

O estudo de magnetismo de rocha demonstrou que a magnetita com grão aproximado de 25  $\mu\text{m}$  é o mineral responsável pelas propriedades magnéticas das rochas de todos os sítios estudados, sendo que apenas em um sítio (KB-11), a hematita também contribui para as propriedades magnéticas.

A trama magnética obtida é magmática, sendo que a lineação magnética representa o fluxo magmático. Estas lineações, de direção predominantemente NE, possuem baixos mergulhos. As foliações magnéticas podem ser separadas em dois grupos. No primeiro, situado na parte oeste do granito Cabreúva, os planos de foliação apresentam orientação NE a ENE, com mergulhos altos para NW. O segundo grupo, situado na parte central e leste do corpo, apresenta foliações com orientação que varia de NW a NNE, com mergulhos de baixo ângulo para SW a NW.

## ABSTRACT

Cabreúva granite, one of the four intrusions that constitute the Itu Granitoid Complex, contains mainly massive structures and isotropic texture. I was performed an anisotropy magnetic susceptibility (AMS) at 21 sites because the fabric was difficult to determine in these conditions, besides a detailed study of rock magnetism for 8 sites.

The study of rock magnetism showed that magnetite with grain size around 25  $\mu\text{m}$  is the mineral responsible for the magnetic properties of all the sites although at KB-11 site hematite contributes to magnetic properties.

The magnetic fabric is magmatic with the magnetic lineation representing the magmatic flow. These NE lineations show low dip, which suggests that the origin of the Cabreúva granite is not located in the study area. There are two groups of magnetic foliations. The first located in the west region of the Cabreúva granite presents foliation with NE to ENE azimuth, with high NW dip. The second group, located in the central-east area of the granite, shows foliation with NW to NNE azimuth, with low SW to NW dip.

## Sumário

<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1. Localização da Área .....	1
1.2. Metas e Objetivos .....	2
<b>2. Geologia e Estudos Prévios</b> .....	<b>3</b>
<b>3. Introdução Teórica</b> .....	<b>4</b>
3.1. Suscetibilidade Magnética .....	4
3.2. Anisotropia de Suscetibilidade Magnética (ASM) .....	6
3.3. Anisotropia de Remanência Magnética (ARM) .....	6
3.4. Curvas Termomagnéticas .....	6
3.5. Curvas de Histerese .....	7
3.6. Magnetizações Remanentes .....	8
<b>4. Materiais e Métodos</b> .....	<b>9</b>
4.1. Trabalhos de Campo .....	9
4.2. Procedimentos de Laboratório .....	10
4.3. Descrição Petrográfica .....	12
<b>5. Resultados Obtidos</b> .....	<b>13</b>
5.1. Sítios Amostrados .....	13
5.2. Petrografia .....	16
5.2.1. Amostras de Mão .....	16
5.2.2. Seções Delgadas .....	17
5.3. Magnetismo de Rocha .....	20
5.3.1. Curvas Termomagnéticas .....	20
5.3.2. Curvas de Indução e Desmagnetização por AF .....	22
5.3.3. Curvas de Histerese .....	25
5.4. Anisotropia de Suscetibilidade Magnética .....	27
5.5. ASM x AARM .....	30
<b>6. Discussão</b> .....	<b>32</b>
<b>7. Conclusões</b> .....	<b>33</b>
<b>8. Referências Bibliográficas</b> .....	<b>34</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O modo de colocação de intrusões graníticas, em geral, é estudado através da trama (*fabric*) ou petrotrama (*petrofabric*) destes corpos. A trama das rochas é dada pela disposição espacial dos grãos minerais. Nas rochas ígneas, uma trama planar define uma foliação magmática, que é gerada, por exemplo, por grãos tabulares de plagioclásio ou biotitas. Uma trama linear define uma lineação magmática e é difícil de ser vista em corpos graníticos. O estudo das tramas é feito tradicionalmente através de medidas de foliação e de lineação efetuadas no campo, ou ainda, em seções delgadas (platina universal). Entretanto, estes métodos não são adequados para rochas cuja petrotrama é fracamente desenvolvida ou inexistente. Neste caso, um método alternativo para estudar o modo de colocação dos corpos e investigar o fluxo magmático, consiste em empregar as técnicas de anisotropias magnéticas, particularmente a anisotropia de suscetibilidade magnética.

O granito Cabreúva, uma das quatro intrusões do Complexo Granitóide Itu, é composto por fácies com estruturas predominantemente maciças e texturas isotrópicas (Pascholati *et al.*, 1987, Galembeck, 1991). A dificuldade de se determinar a petrotrama em campo e até mesmo em estudos petrográficos, torna a anisotropia de suscetibilidade magnética um método eficiente na investigação do modo de colocação do granito Cabreúva, uma vez que as técnicas magnéticas permitem investigar a estrutura interna de plútons graníticos (Tarling & Hrouda, 1993; Bouchez, 1997), além de contribuir significativamente para os estudos de geologia estrutural e na compreensão da relação entre magmatismo e tectônica.

O estudo proposto tem por objetivo determinar as tramas magnéticas através das anisotropias de suscetibilidade e remanência magnética, visando investigar o modo de colocação do granito Cabreúva, uma vez que afloramentos com feições estruturais visíveis são pouco comuns. Além das anisotropias magnéticas foi realizado um estudo detalhado de magnetismo de rocha em oito amostras que representam todas as fácies amostradas do granito.

### 1.1. Localização da Área

A área de trabalho está localizada a aproximadamente 70 km da cidade de São Paulo. Encontra-se a leste das cidades de Itu e Salto, sul das cidades de Indaiatuba e Itupeva, norte da cidade de Cabreúva, como mostrado na Figura 1. A extensa malha rodoviária facilita o acesso e a circulação dentro da área.

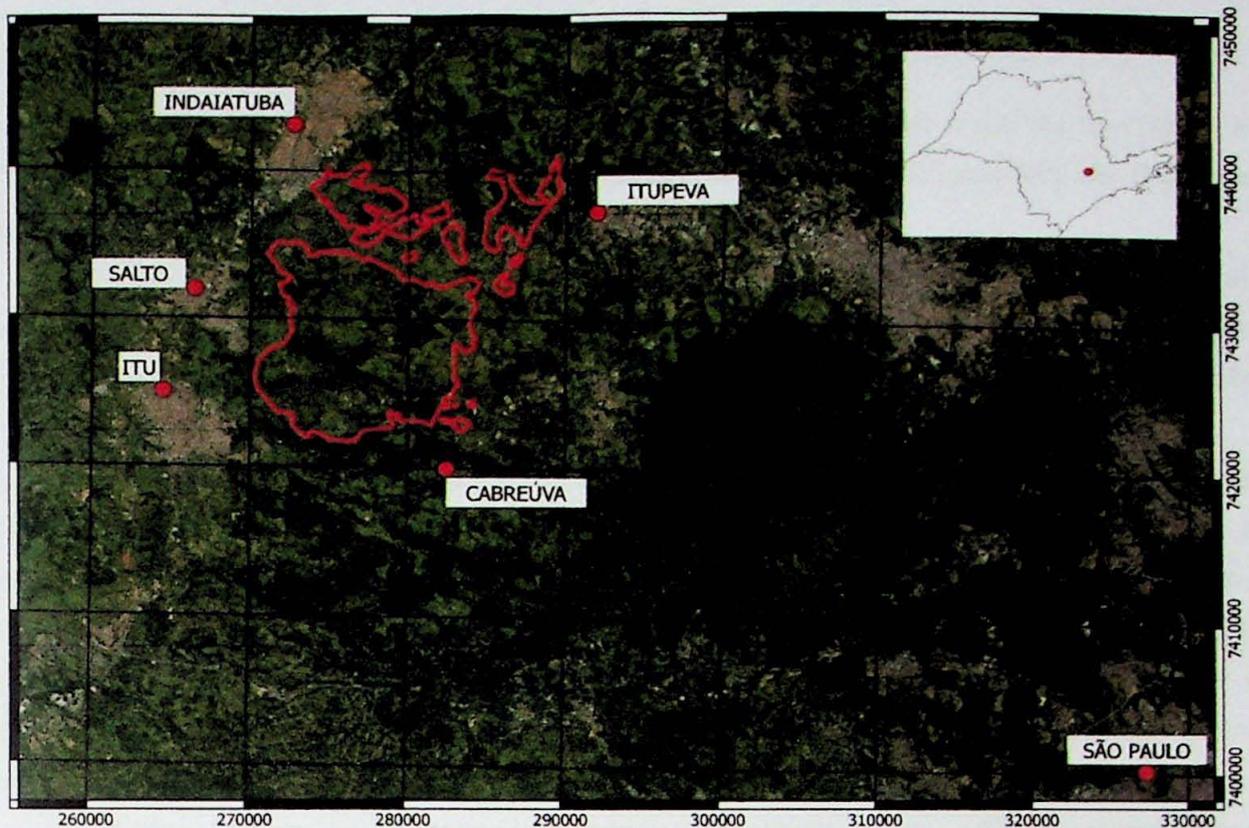


Figura 1 – Localização da área de estudo. Em vermelho, as bordas do granito Cabreúva modificado de Galembeck (1997).

## 1.2. Metas e Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo:

- Determinar a trama do granito Cabreúva através da Anisotropia de Suscetibilidade Magnética (ASM), visando a avaliação do fluxo magmático no granito.
- Estudar o magnetismo de rocha das principais fácies através de: determinação de curvas; de histerese, termomagnética, desmagnetização por campos magnéticos alternados; aquisição da magnetização remanente isothermal e aquisição da magnetização anisterética parcial. Estes dados permitem identificar os minerais ferromagnéticos presentes, o tamanho dos grãos destes minerais e os domínios magnéticos.
- Determinar a Anisotropia de Remanência Magnética (ARM) de alguns sítios visando obter a trama dada exclusivamente pelos minerais magnéticos.

## 2. GEOLOGIA E ESTUDOS PRÉVIOS

O granito Cabreúva é uma das quatro intrusões que formam o granito Itu (Janasi *et al.*, 2009), que por sua vez é um dos cerca de vinte corpos constituintes da Província Magmática Itu (PMI).

A PMI é um cinturão linear que se estende na direção NE pelo terreno Apiaí-Guaxupé próximo à borda da Bacia do Paraná. É constituída de cerca de 20 corpos graníticos de idade 590-580 Ma (Tassinari *et al.*, 1987, Janasi *et al.*, 2009) cuja composição é típica de granitos tipo-A subcalinos e cálcio-alcalinos (Janasi *et al.*, 2009).

O granito Itu situa-se dentro do terreno Apiaí-Guaxupé, próximo ao contato sul deste com o Domínio São Roque. O contato se dá na Zona de Cisalhamento Itu-Jundiuvira. A oeste, o granito Itu está parcialmente recoberto pela Bacia do Paraná. O corpo possui formato ovalado, com eixos; maior de cerca de 30 km e menor com 15 km. A área total do granito Itu é próxima de 300 km<sup>2</sup>. O contato com as rochas do terreno Apiaí-Guaxupé é intrusivo, o que é evidenciado pela grande quantidade de enclaves encontrados nas bordas do granito Itu (Galembeck, 1997). Falhas transcorrentes de direção NW-SE cortam o corpo.

Estudos iniciais de gamaespectrometria (Pascholati *et al.*, 1987) sugeriram que várias intrusões graníticas formavam o granito Itu, conclusão baseada principalmente na diferença detectada na razão U/Th dentro do corpo. Estudos gamaespectrométricos posteriores aliados a fluorimetria e autoradiografia (Pascholati, 1990) permitiram a classificação do granito Itu em Suíte Intrusiva Itu, constituída de, no mínimo, quatro intrusões graníticas evidenciadas pelas diferenças de teores de K, U e Th.

Estudos de mapeamento geológico realizados por Galembeck (1997) no granito (suíte) Itu permitiram a separação das intrusões graníticas, as quais foram denominadas de Itupeva, Indaiatuba, Salto e Cabreúva. O granito Itupeva está localizado na região norte da suíte Itu e tem como fácies mais comuns aquelas cinzas a rosadas, inequigranulares a equigranulares. O granito Indaiatuba é composto por apenas uma fácies porfiróide rapakivi, estando situado na região central e leste da suíte Itu e está compreendido entre o granito Cabreúva e o granito Itupeva sendo controlado pelas falhas de direção NW-SE. O granito Salto, a oeste da suíte Itu, é composto predominantemente por fácies rapakivis que são porfiróides e porfíricas.

O granito Cabreúva (objeto deste trabalho) é a maior intrusão da suíte Itu. Está em contato Complexo Itapira (Bloco Tectônico Jundiá) a sul e leste. A oeste está em contato com o granito Salto, que se distingue do Cabreúva mais facilmente pela textura rapakivi muito acentuada. A noroeste o Cabreúva faz contato com a Bacia do Paraná. A norte e nordeste o Cabreúva está em contato com o Granito Indaiatuba. Onze fácies foram descritas para o granito Cabreúva (Galembeck 1991, 1997): fácies quartzo-monzodiorítica equi-

inequigranular esbranquiçada (CB1), ocorre em um único ponto no centro do granito Cabreúva; fácies granodiorítica porfirítica rapakivi cinza (CB-2), está localizada em pequenas áreas na região central do granito Cabreúva; fácies quartzo-monzonítica a monzogranítica equigranular fina/média cinza (CB-3), ocorre em pequenas áreas na região norte e como intrusão no embasamento na região sudeste do corpo; fácies monzogranítica equigranular fina cinza (CB-4), ocorre em pequena área na borda oeste do granito Cabreúva; fácies sienita a monzogranítica rósea (CB-5), ocupa boa parte do centro do corpo; fácies quartzo-sienítica a sienogranítica equigranular grossa rósea (CB-6), é a fácies predominante do granito Cabreúva; fácies quartzo-sienítica a sienogranítica equigranular média rósea (CB-7), é a fácies comumente associada às bordas do granito Cabreúva. Fácies sienita- a monzogranítica equigranular fina a média rósea (CB-8), também associada às bordas do granito Cabreúva, comum no sul e norte do corpo; fácies monzogranítica porfirítica avermelhada (CB-9), pequena ocorrência dentro da intrusão Indaiatuba; fácies porfirítica cinza com quartzo hexagonal (CB-10), ocorre em pontos isolados no extremo norte do granito Cabreúva; associação xenolítica (CB-11), comum no contato entre o granito Cabreúva e Indaiatuba.

Cabe ressaltar que os granitos da suíte Itu estão sendo remapeados e reanalisados por Giovanna Pereira na sua tese de doutorado, que está em andamento.

### **3. INTRODUÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1. Suscetibilidade Magnética**

A suscetibilidade magnética  $K$  de um material é a constante de proporcionalidade entre a magnetização induzida  $M$  e o campo magnético aplicado  $H$  (Tarling & Hrouda, 1993), conforme a expressão:

$$M=KH$$

Desta maneira,  $K$  é uma medida de quão fácil é a magnetização de um material quando submetido a um campo magnético. Dependendo das propriedades magnéticas do material, ele pode ser descrito como diamagnético, paramagnético ou ferromagnético, podendo este último ser ferrimagnético ou antiferromagnético (Figura 2).

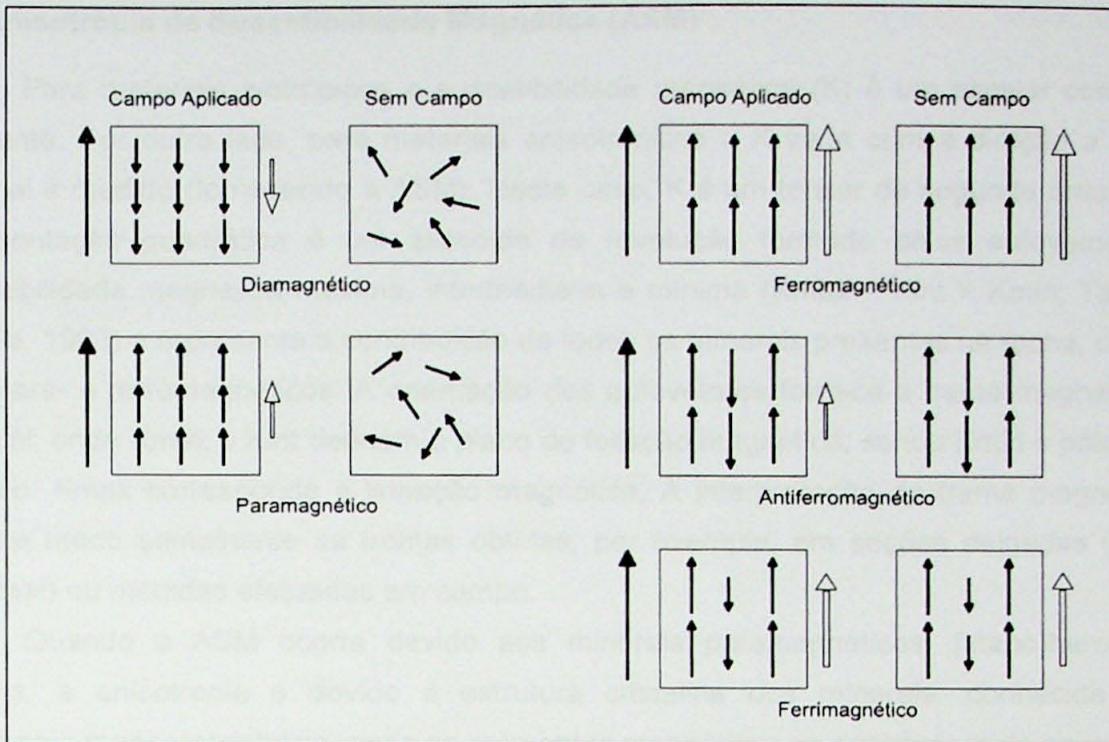


Figura 2 – Comportamento dos diferentes tipos de materiais quando submetidos a um campo magnético. A seta preta representa o campo magnético aplicado, a seta branca a magnetização induzida no material. Notar que apenas materiais ferromagnéticos mantêm magnetização de remanência. Retirado de Tarling & Hrouda, 1993.

Os materiais diamagnéticos (Figura 2) possuem suscetibilidade magnética negativa. Ao serem submetidos a um campo magnético adquirem magnetização fraca no sentido contrário ao campo aplicado. Quando o campo é retirado a magnetização cai a zero.

Os materiais paramagnéticos (Figura 2) possuem suscetibilidade magnética positiva. A magnetização induzida por um campo possui a mesma direção e sentido deste, mas assim como os materiais diamagnéticos, ela não é mantida quando o campo cessa.

Os materiais ferromagnéticos (Figura 2) apresentam valores de suscetibilidade magnética mais elevados que os demais. Ao serem submetidos a um campo magnético apresentam forte magnetização no mesmo sentido deste. Quando o campo é retirado o material mantém uma magnetização remanente (apresentam histerese). Os materiais ferromagnéticos podem ser antiferromagnéticos ou ferrimagnéticos. Os materiais antiferromagnéticos são aqueles que apresentam momentos magnéticos paralelos de igual intensidade, mas com sentidos opostos, o que provoca um cancelamento destes momentos e, portanto, não apresentam magnetização remanente. Já os materiais ferrimagnéticos apresentam momentos magnéticos paralelos, que apesar de terem sentidos opostos, apresentam uma diferença na intensidade que torna possível a retenção da magnetização mesmo quando retirado o campo magnético (Figura 2).

### **3.2. Anisotropia de Suscetibilidade Magnética (ASM)**

Para materiais isotrópicos a suscetibilidade magnética ( $K$ ) é um escalar com valor constante. Por outro lado, para materiais anisotrópicos o  $K$  varia com a direção a qual o material é medido (fornecendo a ASM). Neste caso,  $K$  é um tensor de segunda ordem cuja representação quadrática é um elipsoide de revolução formado pelos autovetores de suscetibilidade magnética máxima, intermediária e mínima ( $K_{max} > K_{int} > K_{min}$ ; Tarling e Hrouda, 1993) e representa a contribuição de todos os minerais presentes na rocha, ou seja, dia-, para- e ferromagnéticos. A orientação dos autovetores fornece a trama magnética do material, onde  $K_{max}$  e  $K_{int}$  definem o plano de foliação magnética, sendo  $K_{min}$  o pólo desta foliação.  $K_{max}$  corresponde a lineação magnética. A interpretação da trama magnética é feita de modo semelhante as tramas obtidas, por exemplo, em seções delgadas (platina universal) ou medidas efetuadas em campo.

Quando a ASM ocorre devido aos minerais paramagnéticos, (titano)hematita e pirrotita, a anisotropia é devido à estrutura cristalina dos minerais, conhecida como anisotropia magnetocristalina, onde os momentos magnéticos se posicionam de acordo com a direção de mais fácil magnetização (Tarling e Hrouda, 1993). Por outro lado, quando a ASM é controlada pelos minerais (titano)magnetita ou magnetita a anisotropia é dada pela forma do grão (anisotropia de forma), onde  $K_{max}$  é paralelo ao maior eixo do grão, enquanto que  $K_{min}$  é paralelo ao menor eixo do grão (para grãos multi-domínio) (Raposo, 2009).

### **3.3. Anisotropia de Remanência Magnética (ARM)**

Uma ferramenta auxiliar para estudos de ASM é a anisotropia de remanência magnética. A ARM é uma anisotropia calculada através da imposição de uma magnetização artificial em diferentes posições de uma amostra de rocha. A ARM também é um tensor de segunda ordem, e é dada exclusivamente pelos minerais magnéticos presentes nas rochas (Jackson, 1991). A comparação das tramas dadas pela ASM e ARM permitem verificar tramas relacionadas com eventos distintos. Além disso, essa comparação permite identificar a presença de tramas anômalas causadas por grãos de domínio-simples (SD) de (titano)magnetitas. Na presença destes grãos, os eixos  $K_{max}$  e  $K_{min}$  dados pela ASM estão trocados entre si.

### **3.4. Curvas Termomagnéticas**

As curvas termomagnéticas relacionam a suscetibilidade magnética total da amostra com a temperatura (alta e baixa) a qual ela está submetida. O objetivo deste experimento é

determinar; transições de fases magnéticas (baixa temperatura) e a temperatura de Curie ( $T_c$ ) dos minerais magnéticos. A  $T_c$  é aquela que acima da qual o mineral magnético comporta-se como paramagnético e nesse valor a magnetização ou a suscetibilidade torna-se zero. A  $T_c$  é característica de cada mineral magnético (Butler, 1992).

### 3.5. Curvas de Histerese

A curva de histerese é um gráfico que relaciona campo magnético x magnetização induzida. Para obter a curva de histerese um campo magnético crescente deve ser aplicado em uma amostra de rocha até o campo magnético máximo do equipamento. Ao retirar gradualmente o campo a amostra perde parte da magnetização, restando a magnetização remanente ( $M_r$ ). Posteriormente o campo magnético é aplicado no sentido oposto. O resultado deste experimento é uma curva como vista na Figura 3.

As curvas de histerese indicam se há minerais do tipo ferromagnéticos, paramagnéticos ou diamagnéticos nas amostras e também permitem o conhecimento do estado de domínios magnéticos. Os domínios magnéticos são regiões no retículo cristalino que se comportam como um dipolo magnético. Quanto menor a região, menor a quantidade de domínios magnéticos. Se o cristal for pequeno o bastante apenas um domínio magnético é formado (single-domain, SD) e o material apresentará uma força coerciva alta. Com o aumento do tamanho do retículo domínios magnéticos passam a coexistir (multi-domain, MD) e a força coerciva diminui.

Os domínios magnéticos e as forças coercivas estão intimamente ligadas ao tamanho do grão magnético.

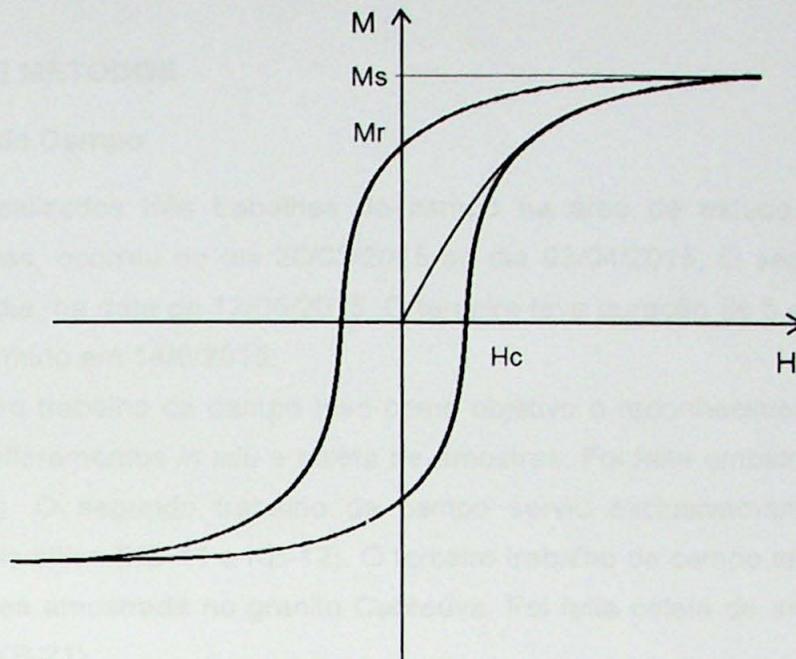


Figura 3 – Exemplo de curva de histerese. H: Campo Magnético; M: Magnetização Induzida; Mr: Magnetização remanente; Hc: Força Coerciva.

### 3.6. Magnetizações Remanentes

- Magnetização Remanente Natural (MRN). É a magnetização adquirida pela rocha desde a época de sua formação e sem nenhum tratamento de laboratório. A MRN é uma somatória das componentes primária (da época de formação da rocha) e secundária (adquirida após a formação da rocha). Para isolar a componente primária, utiliza-se os processos de desmagnetização por campos magnéticos alternados (AF). O processo de desmagnetização por AF consiste em expor um espécime a um campo alternado oscilatório, começando num campo de pico que vai decrescendo até zero. Com a alternância rápida do campo, os momentos magnéticos vão apresentar direções e sentidos de forma aleatória reduzindo a magnetização dos grãos com coercividade menores que o campo AF aplicado.

- Magnetização Remanente Anisterética Parcial (pARM). É a magnetização artificial adquirida pela indução de um campo contínuo na presença de um campo alternado. O objetivo deste experimento é determinar o tamanho dos grãos magnéticos (Jackson *et al.*, 1988).

- Magnetização Remanente Isotermal (IRM). A IRM é uma magnetização artificial adquirida em um curto intervalo de tempo a uma temperatura constante sobre a influência de campos externos fortes. A IRM é adquirida por grãos ferromagnéticos com fora coerciva menor ou igual a intensidade do campo aplicado (Butler, 1992). Na natureza, esse tipo de magnetização ocorre devido à queda de raios nos afloramentos. A IRM também é adquirida em laboratório e serve para estudar os minerais magnéticos.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Trabalhos de Campo

Foram realizados três trabalhos de campo na área de estudo. O primeiro, com duração de 5 dias, ocorreu do dia 30/03/2015 ao dia 03/04/2015. O segundo foi realizado em apenas um dia, na data de 12/06/2015. O terceiro teve duração de 5 dias, com início em 10/08/2015 e término em 14/8/2015.

O primeiro trabalho de campo teve como objetivo o reconhecimento inicial da área, localização de afloramentos *in situ* e coleta de amostras. Foi feita amostragem em 10 sítios (KB-1 a KB-10). O segundo trabalho de campo serviu exclusivamente para coleta de amostras em dois sítios (KB-11 e KB-12). O terceiro trabalho de campo teve como objetivo a expansão da área amostrada no granito Cabreúva. Foi feita coleta de amostras em mais 9 sítios (KB-13 a KB-21).

Para localização em campo foram utilizadas as cartas topográficas de Cabreúva (IBGE, 1973) e Indaiatuba (IBGE, 1973), de escala 1:50.000. Para auxiliar na navegação dentro da área foram confeccionados mapas com base em imagens de satélite e mapas rodoviários. As imagens de satélite foram obtidas através programa do "Google Earth". Os mapas rodoviários foram obtidos através do "Open Streets". O mapa geológico utilizado nesta pesquisa foi produzido por Galembeck (1997), cuja forma digital foi cedida pela doutoranda Giovanna Pereira.

A amostragem foi feita em rochas sãs (Figura 4), *in situ*, sendo utilizado uma perfuratriz portátil, movida a gasolina, com brocas diamantadas. Cilindros de 25mm de diâmetro e altura de no mínimo 22mm, foram retirados da rocha, os quais foram devidamente orientados através de bússolas solar e magnética. Foram coletados, em média, treze cilindros de cada sítio. Os cilindros, após a orientação, foram retirados e identificados com o nome do sítio de origem seguido de uma letra, conforme o furo de amostragem. No sítio KB-01, por exemplo, foram retirados 13 cilindros, que foram identificadas de KB-01A a KB-01M.

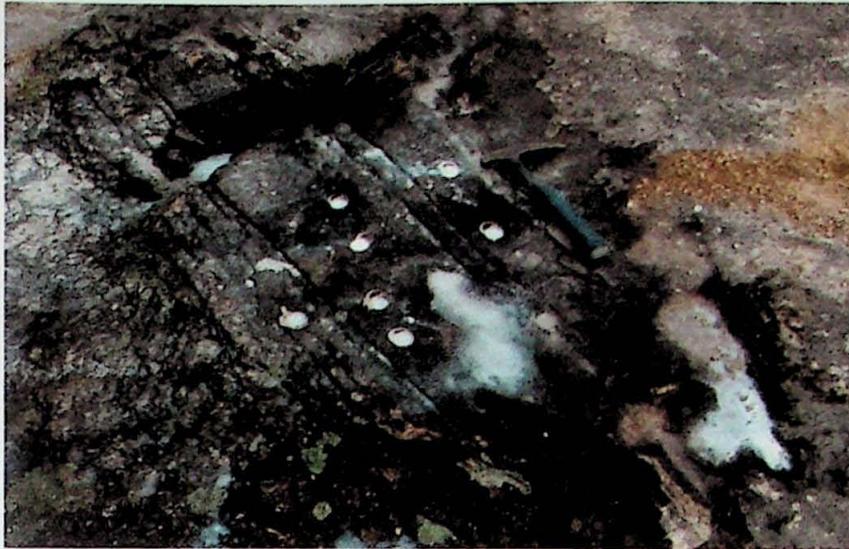


Figura 4 – exemplo de afloramentos no granito Cabreúva

#### 4.2. Procedimentos de Laboratório

Os cilindros coletados em campo foram serrados de forma que a altura de cada espécime não passasse de 22mm, medida máxima aceita pelos equipamentos de medida. Cada cilindro deu origem a cerca de 3 espécimes, com diâmetro da base de 25mm e altura de 22mm. A orientação feita em campo foi transferida para os espécimes que posteriormente foram devidamente identificados e embalados em papel filme para evitar contaminação dos equipamentos.

Após preparação das amostras, foram realizados os seguintes procedimentos: determinação da anisotropia de suscetibilidade magnética (ASM), aquisição das curvas de histerese, desmagnetização por campos magnéticos alternados (AF), indução da magnetização anisterética parcial (pARM), obtenção da magnetização isoterma (IRM), desmagnetização da IRM saturada, aquisição das curvas termomagnéticas e determinação da anisotropia de remanência magnética (ARM).

A ASM e a suscetibilidade magnética dos espécimes foram determinadas através do equipamento Kappabridge (KLY-4S). Cada espécime foi inserido no porta-amostra em três posições diferentes, obtendo-se assim os valores da suscetibilidade magnética para três direções ortogonais entre si (representadas pelos eixos de suscetibilidade máxima, intermediária e mínima ( $K_{max} > K_{int} > K_{mín}$ )). O procedimento foi repetido para todos os espécimes de cada sítio. Os valores foram plotados em estereogramas e a orientação destes eixos forneceu a trama magnética para os 21 sítios amostrados.

O estudo do magnetismo de rocha detalhado foi realizado em oito diferentes sítios (KB-2, KB-6, KB-7, KB-11, KB-14, KB-17, KB-18 e KB-20). Esta análise tem por finalidade

investigar as propriedades magnéticas das rochas estudadas. Os espécimes selecionados foram submetidos aos seguintes procedimentos:

- Medida e desmagnetização (AF) da Magnetização Remanente Natural (MRN): a MRN foi medida no magnetômetro JR-5A. Após a medida da MRN, o espécime foi exposto a um campo alternado de pico de 5 mT, que foi reduzido a zero enquanto a amostra era rotacionada. Este procedimento continuou com acréscimo de 5 mT até que se atingisse o valor de 100 mT (exceto para o espécime do sítio KB-11, onde o valor máximo do campo alternado foi de 200 mT, pois a magnetização não decresceu em 100 mT devido a presença de minerais ferromagnéticos de força coerciva muito alta). Este experimento visa o conhecimento da força coerciva dos minerais magnéticos presentes nas amostras.
- Medidas da Magnetização Remanente Anisterética Parcial (pARM, Jackson, *et al.*, 1988): O espécime, previamente desmagnetizado no procedimento anterior, foi exposto a um campo alternado de pico de 95 mT. Enquanto este campo era reduzido a zero, um campo contínuo simultâneo foi aplicado em intervalos de 10 mT (o primeiro foi de 0-10 mT). Após esta indução, a magnetização remanente da amostra foi medida, a amostra foi desmagnetizada em campo alternado de 100mT, antes de uma nova indução, o procedimento foi repetido para novos intervalos (10-20 mT, 20-30 mT, etc). O experimento foi finalizado quando o último intervalo (90-95 mT) foi medido. A amostra foi novamente desmagnetizada em campo alternado de pico de 100 mT. Este experimento permite investigar o tamanho do grão magnético.
- Medidas da Magnetização Remanente Isotermal (IRM): o espécime previamente desmagnetizado no procedimento anterior, foi submetido a campos magnéticos fortes e crescentes através do magnetômetro do tipo Pulse (Magnetic Measurements) e logo após, a magnetização remanente foi medida no magnetômetro JR-5A. O campo inicial foi de 5mT, com acréscimo 20 mT até 500 mT (no caso da amostra KB-11, o campo máximo foi de 2500 mT). O resultado deste experimento mostra o valor do campo magnético em que a amostra é saturada (quando houver saturação). Quanto maior a força coerciva do mineral, maior é o campo magnético necessário para atingir a saturação. Portanto os minerais de menor coercividade tendem a se saturar antes daqueles mais coercivos. Quando o mineral atinge a saturação, ele não se magnetizará mais.
- Medidas da desmagnetização da IRM: o espécime, previamente magnetizado no procedimento anterior, foi submetido a desmagnetização em campo

alternado, com intervalos de 10 mT, até se atingir o pico de 100 mT ou 200 mT.

- As curvas de histerese foram adquiridas a partir de espécimes pulverizados em moinho de ágata. O equipamento utilizado para a medição foi o VSM (Vibrating Sample Magnetometer). Neste equipamento a amostra é submetida a campos magnéticos sucessivos cada vez mais altos, medindo a magnetização da amostra de acordo com a intensidade do campo aplicado, até o campo máximo de 1T. O campo magnético foi então aplicado em sentido oposto, até o campo máximo. Por fim, o campo foi imposto no mesmo sentido do primeiro passo, e a curva de histerese foi obtida.
- Foi feita a aquisição das curvas termomagnéticas, suscetibilidade magnética em função de baixa e alta temperatura. As curvas foram determinadas através dos aparatos CS-3 e CS-3L acoplados ao Kappabridge, visando o conhecimento dos portadores magnéticos. Esse experimento consiste em submeter as amostras pulverizadas a ciclos de aquecimento e resfriamento, sendo a suscetibilidade magnética medida a cada temperatura. No experimento de baixa temperatura (nitrogênio líquido), as amostras são resfriadas até -196°C e aquecida até a temperatura ambiente. Já no de alta temperatura as amostras são aquecidas até 700°C em atmosfera de argônio, para evitar a oxidação dos minerais durante o aquecimento. As curvas termomagnéticas são usadas para identificação de minerais magnéticos através da temperatura de Curie.

A anisotropia de remanência (Jackson *et al.*, 1991) foi determinada através da aplicação da magnetização artificial anisterética (AARM). Esta anisotropia foi determinada para os sítios KB-02, KB-06, KB-07 e KB-11. Cinco espécimes foram selecionados para cada sítio, desmagnetizados e, então, submetidos a um campo magnético alternado de pico de 60 mT (KB-02, KB-06 e KB-07) e 100 mT (KB-11) em uma posição determinada, com a superimposição de um campo direto fraco de 0,1 mT. A magnetização remanente anisterética (MRA) foi então medida, seguida da desmagnetização em campo alternado de pico de 70 mT (KB-02, KB-06 e KB-07) e 120 mT (KB-11), antes da indução da magnetização em outra posição. O procedimento foi repetido para 7 posições diferentes, de acordo com os eixos X (N-S), Y (E-W) e Z (ortogonal ao X e Y).

#### **4.3. Descrição Petrográfica**

Para a descrição petrográfica, tanto de amostras de mão quanto de lâminas delgadas em microscópio, foram utilizados os mesmos critérios apresentados por

Galembeck (1997), uma vez que o nosso estudo foi baseado no mapa geológico produzido nesta monografia. Desse modo o índice de coloração (Tabela 1) e o tamanho absoluto dos grãos (Tabela 2) foram utilizados na petrografia. O termo porfiróide utilizado por Galembeck (1997) corresponde a fenocristais inseridos em uma matriz média, média-grossa ou grossa.

Índice de Coloração	
0 – 5%	Granito hololeucocrático
5 – 10%	Granito leucocrático
10 – 20%	Granito normal
>20%	Melagranitóide

Tabela 1 – classificação dos granitos amostrados segundo o Índice de Coloração segundo Galembeck (1997)

Tamanho Absoluto dos Cristais	
<0,1 mm	Densa
0,1 – 1,0 mm	Fina
1,0 – 10 mm	Média
10 – 30 mm	Grossa
30 – 100 mm	Muito grossa

Tabela 2 – Classificação dos granitos coletados quanto ao tamanho absoluto dos cristais segundo Galembeck (1997)

## 5. RESULTADOS OBTIDOS

### 5.1. Sítios amostrados

A figura 4 mostra a localização dos sítios amostrados e na Tabela 3 estão representados; as coordenadas UTM, número de cilindros coletados, número de espécimes derivados dos cilindros para cada sítio, fácies descritas em campo e a equivalência das fácies dadas por Galembeck (1997).

Sítio	UTM N	UTM E	Amostras	Espécimes	Fácies Representada	Equivalente Galembek (1997)
KB-1	7425685.12	282239.70	13	31	Fácies 1 – Grossa	CB-6
KB-2	7423512.40	276468.70	16	29	Fácies 1 – Grossa	CB-6
KB-3	7423227.08	276084.09	9	19	Fácies 1 – Grossa	CB-6
KB-4	7423087.54	276014.56	10	24	Fácies 1 – Grossa	CB-6
KB-5	7423241.06	272348.25	10	23	Fácies 2 – Média	CB-7
KB-6	7423388.08	272110.59	10	25	Fácies 2 – Média	CB-7
KB-7	7426472.12	270937.11	12	33	Fácies 2 – Média	CB-7
KB-8	7426237.11	274472.44	10	19	Fácies 1 – Grossa	CB-6
KB-9	7425804.42	275819.97	10	28	Fácies 1 – Grossa	CB-6
KB-10	7426235.17	277942.65	6	9	Fácies 1 – Grossa	CB-6
KB-11	7428327.76	278477.26	15	22	Fácies 4 – Fina	-
KB-12	7428327.76	278477.26	16	35	Fácies 3 – Porfíroide	CB-5
KB-13	7429454.95	281980.90	13	19	Fácies 1 – Grossa	CB-6
KB-14	7428944.27	279903.92	16	33	Fácies 3 – Porfíroide	CB-5
KB-15	7429911.38	277893.11	11	30	Fácies 1 – Grossa	CB-6
KB-16	7431651.28	273890.65	15	27	Fácies 1 – Grossa	CB-6
KB-17	7432583.06	275065.52	12	30	Fácies 1 – Grossa	CB-6
KB-18	7428356.57	277225.33	11	33	Fácies 1 – Grossa	CB-6
KB-19	7430564.14	274646.68	16	40	Fácies 1 – Grossa	CB-6
KB-20	7434224.88	272739.16	20	35	Fácies 1 – Grossa	CB-6
KB-21	7423973.87	277185.95	15	33	Fácies 1 – Grossa	CB-6

Tabela 3 – Sítios amostrados, incluindo identificação, coordenadas UTM, número de amostras, número de espécimes, fácies do granito (detalhadas no texto) e denominação da fácies segundo Galembek (1997), sendo: CB-5: sieno a monzogranito porfíroide, róseo; CB-6: Sienogranito equigranular grosso, róseo; CB-7: Sienogranito equigranular médio, róseo.

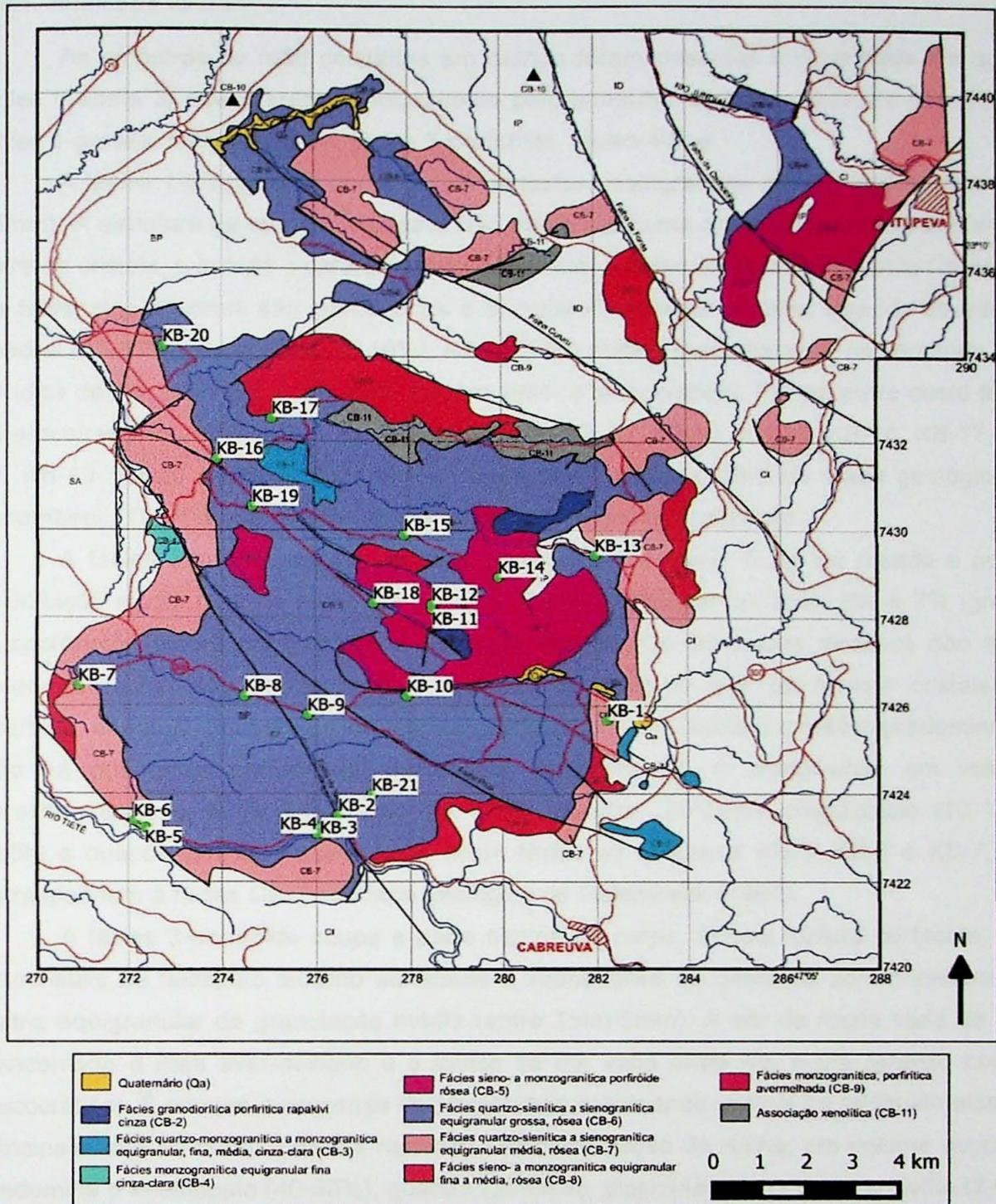


Figura 5 – Localização dos sítios amostrados em mapa modificado de Galembeck (1997).

## 5.2. Petrografia

### 5.2.1. Amostras de mão

As amostras de mão coletadas em campo foram descritas e separadas em quatro fácies (Tabela 3) que diferem principalmente pelo tamanho relativo e absoluto dos cristais: fácies 1-grossa, fácies 2-média, fácies 3-porfiróide, fácies 4-fina.

A fácies 1-grossa é de cor rosada e de textura equigranular grossa (grãos entre 15 e 25mm). A estrutura da rocha é maciça e não existe nenhuma orientação preferencial visível entre os cristais, o que dá o caráter isotrópico comum à todas as fácies do granito Cabreúva. Os feldspatos alcalinos são subhedrais e compõe 45-55% do volume, seguido de quartzo anedral (25-35%), plagioclásio (5-10%). A biotita é o máfico predominante, colaborando para o índice de cor que varia entre 2-7% (granito holo- a leucocrático). Fazem parte desta fácies as amostras KB1, KB2, KB-3, KB-4, KB-8, KB-9, KB-10, KB-13, KB-15, KB-16, KB-17, KB-18, KB-19, KB-20 e KB-21. Esta fácies corresponde à fácies CB-6 do mapa geológico de Galembeck (1997) a qual é a fácies predominante do granito Cabreúva.

A fácies 2-média ocupa as bordas do granito Cabreúva. É de cor rosada e possui granulação média (cristais entre 5 e 10 mm). Possui índice de cor entre 5% e 7% (granito leucocrático), textura equigranular e estrutura maciça. Os feldspatos alcalinos dão a cor rosada à rocha, são subhedrais e ligeiramente maiores que os demais cristais. Os quartzos, anedrais, ocupam os interstícios dos feldspatos. A biotita é o máfico predominante. Não há orientação preferencial perceptível dos minerais. A composição em volume, aproximadamente, é de k-feldspato (40-50%), quartzo (25-35%), plagioclásio (10-15%), biotita e opacos (5-7%). Fazem parte desta fácies as amostras KB-5, KB-6 e KB-7, que correspondem à fácies CB-7 do mapa geológico de Galembeck (1997).

A fácies 3-porfiróide ocupa a parte central do corpo. Possui textura porfiróide, com fenocristais de feldspato alcalino euhedrais a subhedrais de cerca de 25mm imersos em matriz equigranular de granulação média (entre 1mm-5mm). A cor da rocha varia de rosa acinzentado a rosa avermelhado e o índice de cor varia entre 4% e 8% (granito holo- a leucocrático). É comum a presença de plagioclásio mantendo cristais de feldspato alcalino, principalmente na matriz (textura rapakivi). Na composição da rocha, em volume ocupado, predomina o k-feldspato (40-50%), quartzo (30-40%), plagioclásio (10-15%), e biotita (2-6%), além de opacos. Não há orientação preferencial perceptível dos cristais e fenocristais. Esta fácies é representada pelas amostras KB-12 e KB-14, que é equivalente à fácies CB-5 do mapa geológico de Galembeck (1997).

A fácies 4-fina é constituída por uma rocha de cor rosa pálido e granulação fina (grãos entre 0,5mm e 1,0mm). Ocorre na forma de veios de bordas regulares que cortam a fácies 3-porfiróide. O índice de cor é de aproximadamente 1% (granito hololeucocrático). Apresenta textura equigranular composta de grãos subhedrais cujos contatos entre si

variam de poligonais à hipidiomórficos. As amostras são compostas por k-feldspato (45-55%), quartzo (40-50%), plagioclásio (5-10%) e biotita (cerca de 1%), além de opacos. Esta fácies é representada pelo sítio KB-11 e não apresenta equivalência com as fácies do mapa geológico de Galembeck (1997), uma vez que foi considerado parte da fácies CB-5.

### 5.2.2. Seções Delgadas

Três seções delgadas, cedidas pela doutoranda Giovanna Pereira, foram analisadas ao microscópio óptico. São denominadas de Cab-14-9, Cab-14-10b e Cab-14-18 e correspondem as fácies 1-grossa e fácies 2-média.

A Cab-14-9 apresenta textura equigranular hipidiomórfica, com cristais de 1,5 a 3,5 mm. É composta por feldspato alcalino (45-50%), quartzo (35-40%), plagioclásio (10-15%) e biotita (2,5%). Como acessórios é comum a hornblenda (associada às biotitas), zircão, apatita e allanita. O feldspato alcalino, subheudral, apresenta exsolução de albita (pertita) e é o mineral mais abundante, além de apresentar os maiores cristais dentro da textura equigranular. O quartzo e plagioclásio são anedrais. Alguns raros cristais de quartzo apresentam extinção ondulante. A biotita, juntamente com os opacos, hornblenda e demais máficos, chegam a representar de 3,5 a 5,5% da área da lâmina. Opacos normalmente estão associados à biotita, muitas vezes como inclusões. Fotomicrografias desta seção estão na Figura 6.

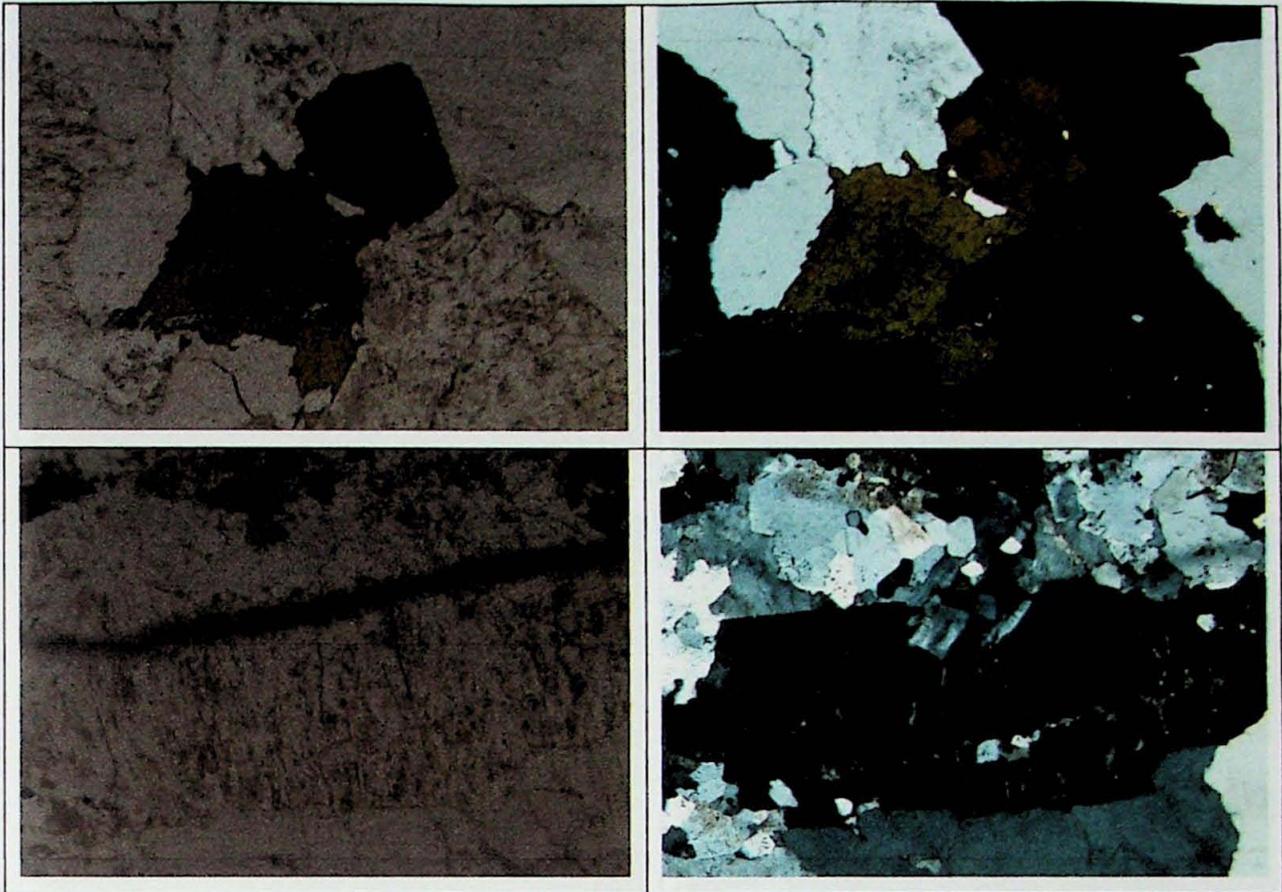


Figura 6 – Fotomicrografias da lâmina Cab-14-09, em objetiva 4x, sendo as imagens da direita sob polarizadores cruzados. No canto superior, destaque para os máficos anedrais, principalmente a biotita. No canto inferior, um cristal subheudral de feldspato alcalino, com exsoluções de albita.

A Cab-14-10b, possui textura inequigranular, hipidiomórfica, com tamanho dos cristais entre 0,2 - 2,0 mm. Composta de feldspato alcalino, quartzo, plagioclásio e biotita. Como acessórios: titanita, zircão, apatita e opacos. O feldspato alcalino compõe cerca de 40% da área da seção ocorrendo tanto como cristais subheudrais maiores quanto cristais menores anedrais na matriz. Os cristais maiores possuem exsolução (pertita). O quartzo (35%) e plagioclásio (10%) estão dispersos na matriz, muitas vezes são poligonais. O máfico predominante é a biotita, intersticial, sempre associada com minerais opacos. O índice de cor é estimado entre 4-6% O acessório mais comum é a apatita. Fotomicrografias desta seção estão na Figura 7.

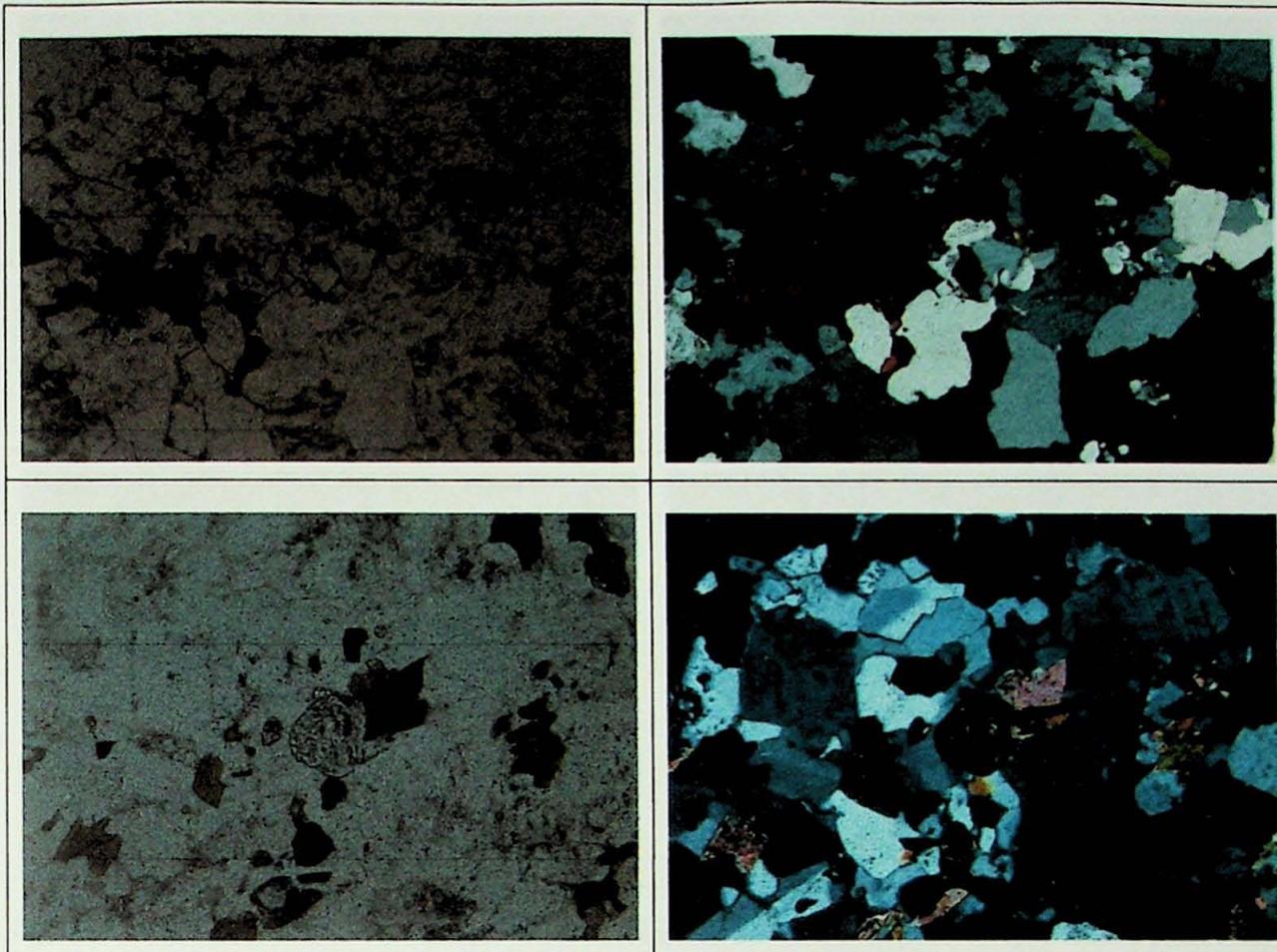


Figura 7 – Fotomicrografias da lâmina Cab-14-10b, sendo as imagens da direita a mesma área com polarizadores cruzados. As imagens no canto superior foram feitas com objetiva 4x, e mostram a textura geral da rocha, com cristais da matriz anedrais poligonais e as biotitas intersticiais. No canto inferior, imagens feitas com objetiva 10x, mostrando uma apatita de corte basal, acessório muito comum.

A Cab-14-18 possui textura inequigranular hipidiomórfica, com grãos variando de 2,0 a 6,0 mm. O feldspato alcalino é o mineral predominante, com cerca de 40% da área ocupada, com cristais grandes subheudrais. É comum a ocorrência de pertitização e inclusões de quartzo e feldspato, principalmente. Em alguns casos, a alteração na clivagem dos cristais maiores provoca uma cor de interferência muito alta. O quartzo é anedral e ocorre na matriz (entre 30-35% da área) juntamente com o plagioclásio, que pode ser subheudral ou anedral. Os máficos são quase inteiramente representados pela hornblenda, com raras biotitas e opacos associados. As fotomicrografias desta seção estão representadas na Figura 8.

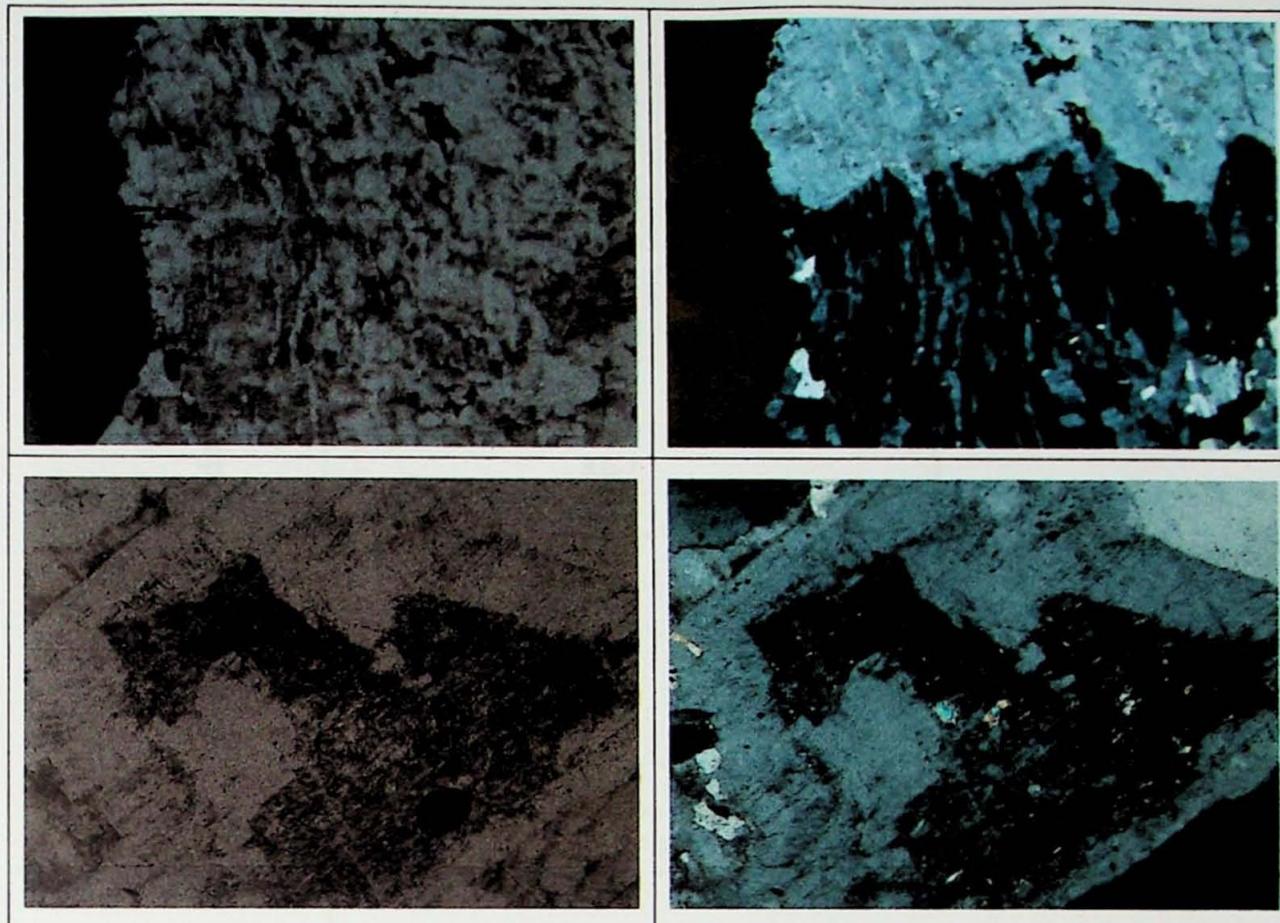


Figura 8 – Fotomicrografias da lâmina Cab-14-18, com objetiva de 10x e polarizadores descruzados (esquerda) e cruzados (direita). No canto superior, um feldspato alcalino com exsolução de albita e geminação visível. No canto inferior, um feldspato alcalino subhedral com o centro alterado.

### 5.3. Magnetismo de Rocha

#### 5.3.1. Curvas Termomagnéticas

As curvas de baixa temperatura apresentam (Figura 9) em todos os casos um pico de suscetibilidade magnética por volta de  $-150^{\circ}\text{C}$ , conhecida como transição de Verwey, típica de magnetita multi-domínio. As curvas de aquecimento mostram que a suscetibilidade magnética diminui em torno de  $580^{\circ}\text{C}$ , exceto para a amostra KB-11, que cai a zero aproximadamente a  $620^{\circ}\text{C}$  sugerindo que os minerais magnéticos presentes nas amostras são magnetita e hematita. Em alguns casos a suscetibilidade magnética aumenta em torno de  $200\text{-}300^{\circ}\text{C}$  (KB-2, KB-7, Figura 9). Esta alteração da suscetibilidade (mais visível na amostra KB-7), indica a presença de maghemita. Neste caso as curvas de aquecimento e resfriamento não são reversíveis, o que indica que a maghemita foi consumida durante o aquecimento. Na maioria das amostras analisadas as curvas de aquecimento e resfriamento são reversíveis, indicando que nenhuma fase mineral foi criada ou destruída (exemplo, KB-14, Figura 9).

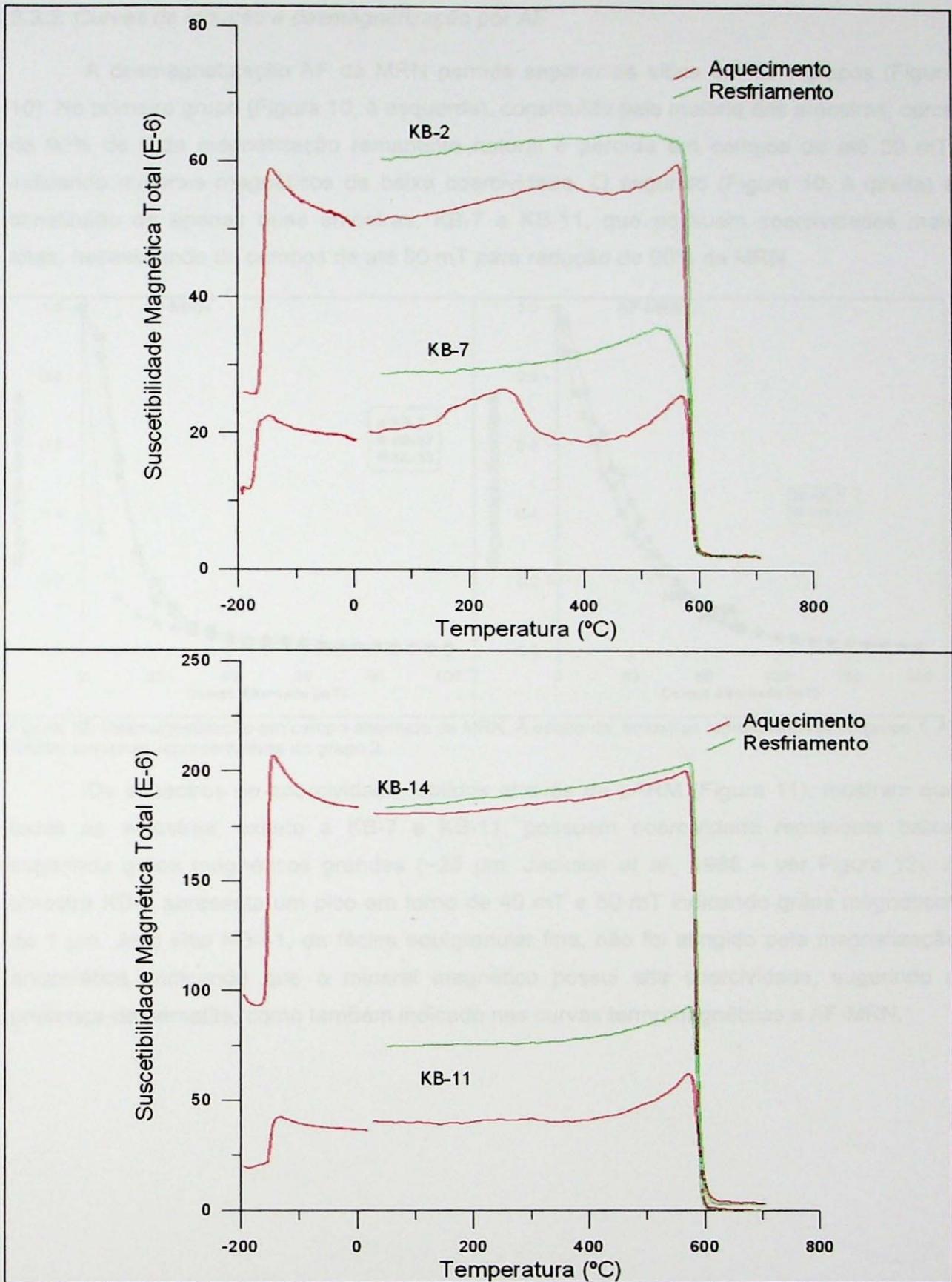


Figura 9 – Exemplos representativos de curvas termomagnéticas.

### 5.3.2. Curvas de indução e desmagnetização por AF

A desmagnetização AF da MRN permite separar os sítios em dois grupos (Figura 10). No primeiro grupo (Figura 10, à esquerda), constituído pela maioria das amostras, cerca de 90% de toda magnetização remanente natural é perdida em campos de até 30 mT, indicando minerais magnéticos de baixa coercividade. O segundo (Figura 10, à direita) é constituído de apenas duas amostras, KB-7 e KB-11, que possuem coercividades mais altas, necessitando de campos de até 80 mT para redução de 90% da MRN.

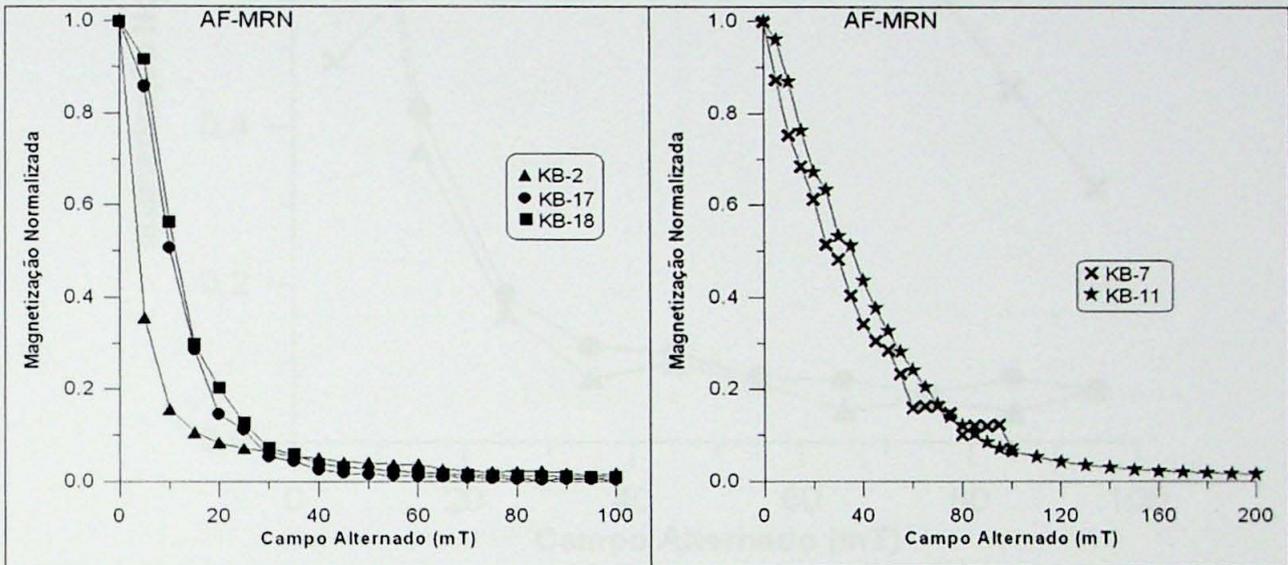


Figura 10- Desmagnetização em campo alternado da MRN. À esquerda, amostras representativas do grupo 1. À direita, amostras representativas do grupo 2.

Os espectros de coercividade, obtidos através da pARM (Figura 11), mostram que todas as amostras, exceto a KB-7 e KB-11, possuem coercividade remanente baixa, sugerindo grãos magnéticos grandes (~25  $\mu\text{m}$ , Jackson *et al.*, 1988 – ver Figura 12). A amostra KB-7 apresenta um pico em torno de 40 mT e 50 mT indicando grãos magnéticos de 1  $\mu\text{m}$ . Já o sítio KB-11, da fácies equigranular fina, não foi atingido pela magnetização anisterética, indicando que o mineral magnético possui alta coercividade, sugerindo a presença de hematita, como também indicado nas curvas termomagnéticas e AF-MRN.

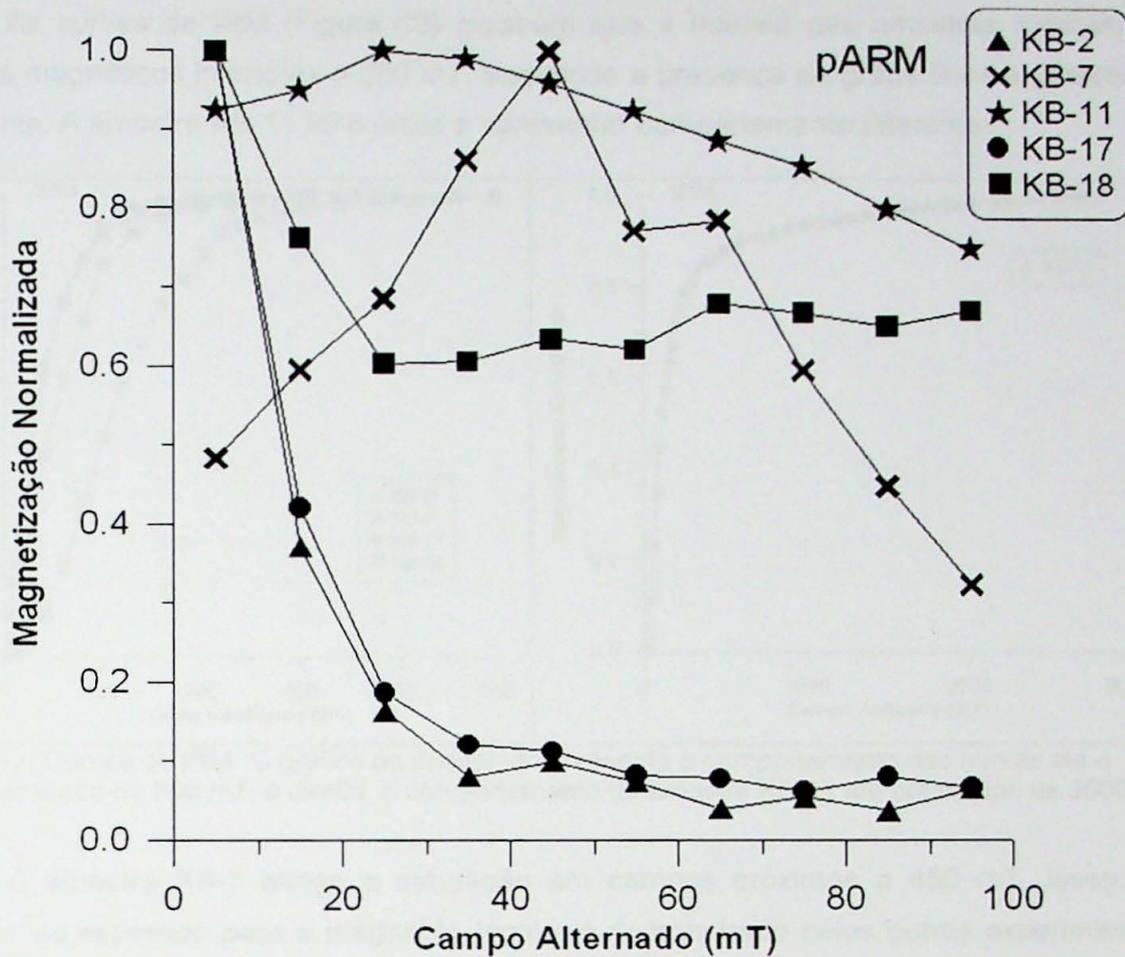


Figura 11 – Espectro de coercividade remanente segundo a magnetização remanente anisotrófica parcial (pARM).

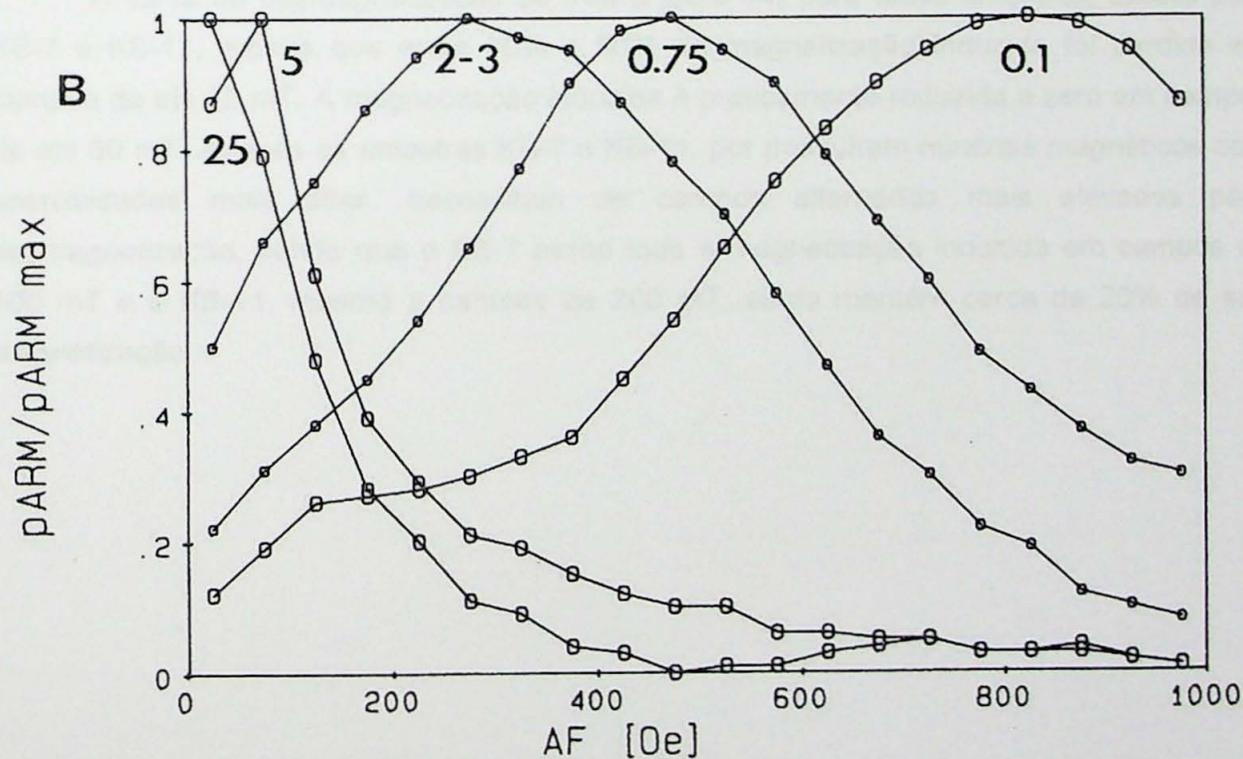


Figura 12 – Estimativas do tamanho do grão a partir do espectro de coercividade, retirado de Jackson, 1988.

As curvas de IRM (Figura 13) mostram que a maioria das amostras saturam em campos magnéticos inferiores a 300 mT, sugerindo a presença de grãos finos e grossos de magnetita. A amostra KB-11 foi a única a apresentar comportamento diferente.

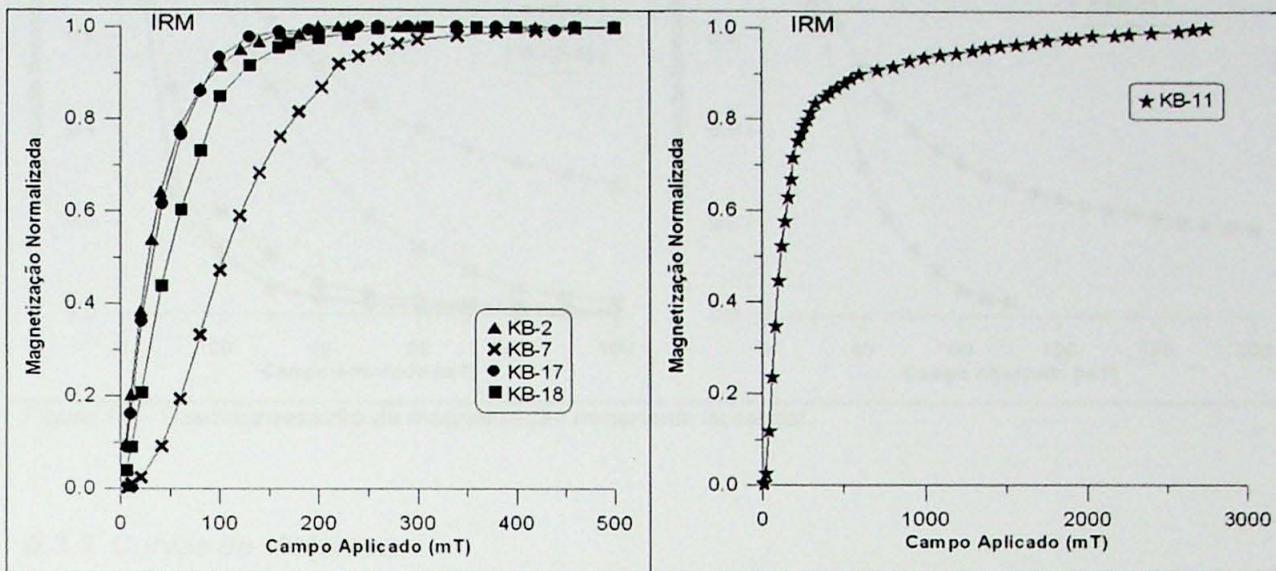


Figura 13- Curvas de IRM. O gráfico da esquerda representa o comportamento das curvas até o campo aplicado de 500 mT; à direita, o comportamento da amostra KB-11 até um campo de 3000 mT.

A amostra KB-7 atinge a saturação em campos próximos a 450 mT, levemente superior ao esperado para a magnetita (como já demonstrado pelos outros experimentos), de cerca de 300 mT (Butler, 1992). Já a amostra KB-11 não atinge a saturação nem em campos muito altos (2750 mT), o que indica a presença de hematita.

A curva de desmagnetização da IRM (Figura 14) para todas amostras, exceto para KB-7 e KB-11, mostra que entre 80% e 90% da magnetização induzida foi perdida em campos de até 20 mT. A magnetização induzida é praticamente reduzida a zero em campos de até 60 mT. Apenas as amostras KB-7 e KB-11, por possuírem minerais magnéticos com coercividades mais altas, necessitam de campos alternados mais elevados para desmagnetização, sendo que o KB-7 perde toda a magnetização induzida em campos de 100 mT e o KB-11, mesmo a campos de 200 mT, ainda mantém cerca de 20% de sua magnetização.

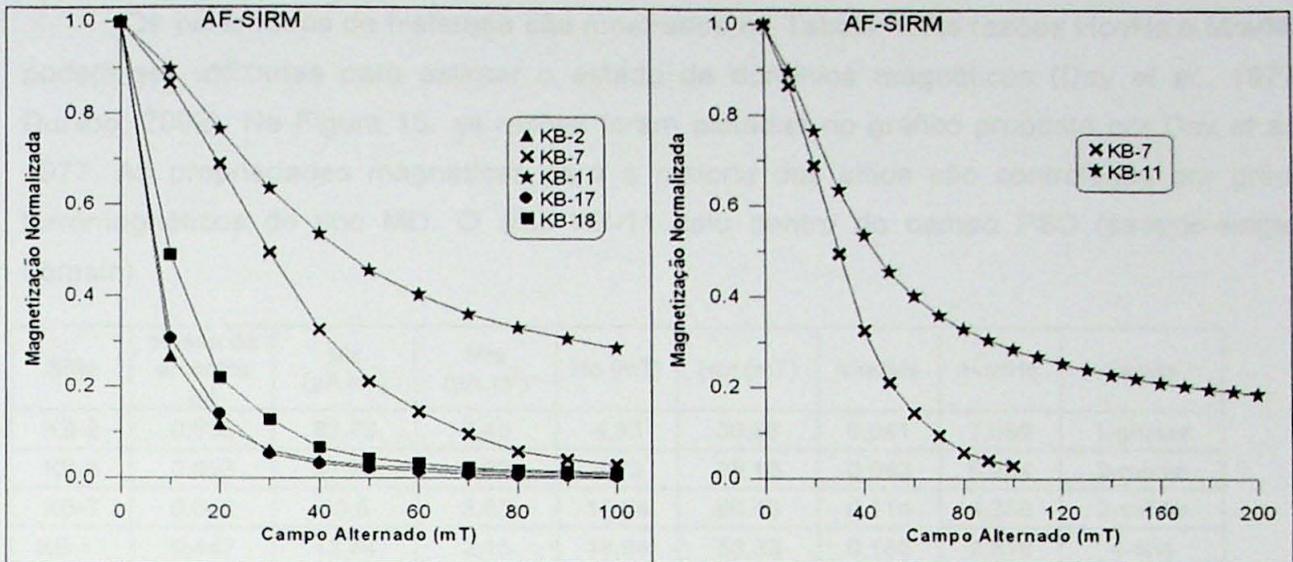


Figura 14 – Desmagnetização da magnetização remanente isothermal.

### 5.3.3. Curvas de Histerese

As curvas de histerese (Figura 15) mostram que há pouca contribuição de minerais paramagnéticos para a suscetibilidade magnética. A curva para maioria das amostras apresenta uma "cintura fina", com exceção da KB-7 e KB-11, que apresentam os maiores valores para a força coerciva (como também indicado na AF-MRN, pARM e na IRM).

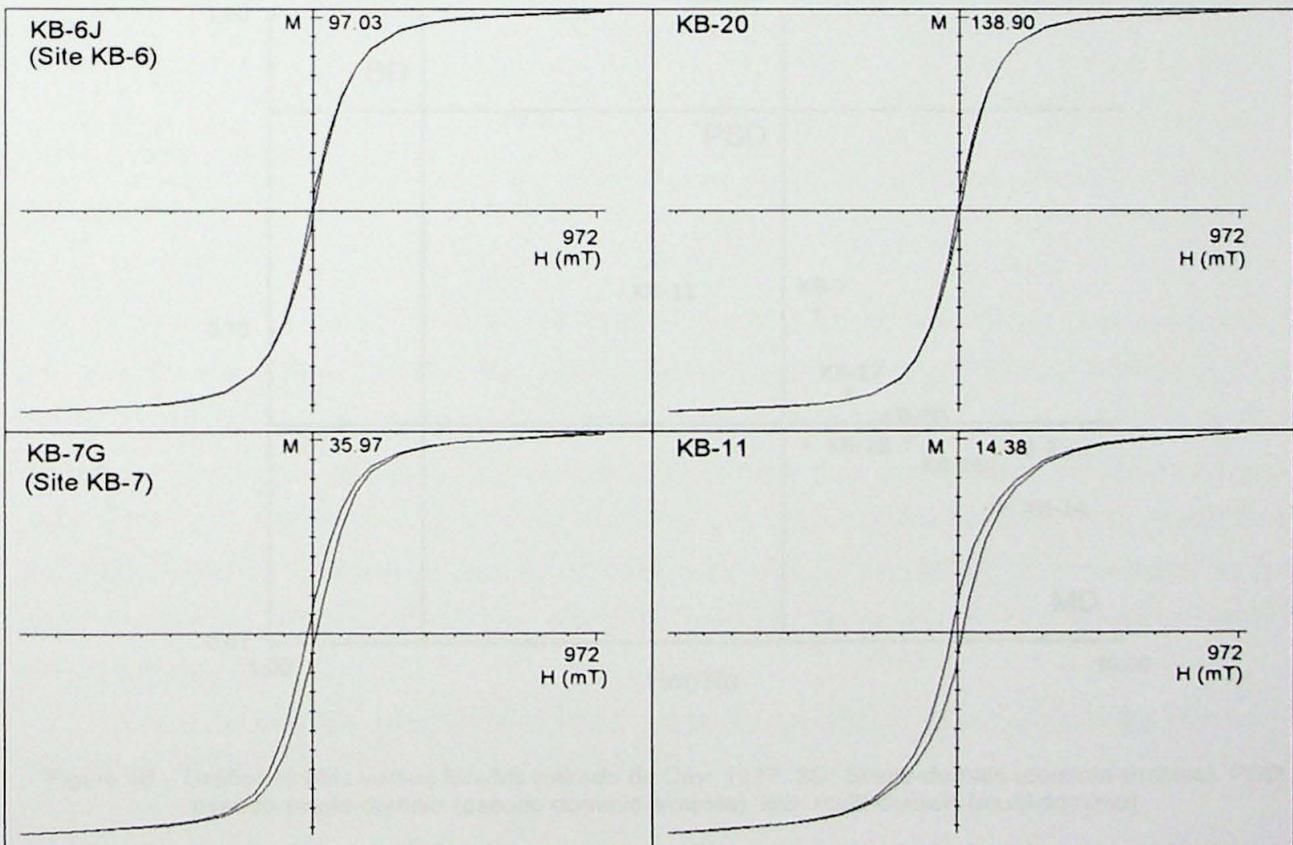


Figura 15 – Exemplos representativos de curvas de histerese dos sitios estudados.

Os parâmetros de histerese são mostrados na Tabela 4. As razões  $H_{cr}/H_c$  e  $M_{rs}/M_s$  podem ser utilizadas para estimar o estado de domínios magnéticos (Day *et al.*, 1977; Dunlop, 2002). Na Figura 16, as razões foram plotadas no gráfico proposto por Day *et al.*, 1977. As propriedades magnéticas para a maioria dos sítios são controladas por grãos ferromagnéticos do tipo MD. O sítio KB-11 caiu dentro do campo PSD (pseudo-single-domain).

Sítio	Massa da amostra (g)	$M_s$ ( $\mu A \cdot m^2$ )	$M_{rs}$ ( $\mu A \cdot m^2$ )	$H_c$ (mT)	$H_{cr}$ (mT)	$M_{rs}/M_s$	$H_{cr}/H_c$	Fácies
KB-2	0,635	83,73	3,45	4,33	30,68	0,041	7,086	1-grossa
KB-6	0,653	91,82	3,92	4,73	28,16	0,043	5,954	2-média
KB-7	0,643	33,5	3,83	15,24	66,43	0,114	4,359	2-média
KB-11	0,447	13,44	2,15	18,94	53,33	0,160	2,816	4-fina
KB-14	0,317	112,38	3,02	2,63	19,08	0,027	7,255	3-porfiróide
KB-17	0,472	148,12	9,38	6,51	31,04	0,063	4,768	1-grossa
KB-18	0,482	105,47	4,5	3,85	16,4	0,043	4,260	1-grossa
KB-20	0,591	135,52	6,08	4,58	25,72	0,045	5,616	1-grossa

Tabela 4 – Parâmetros de histerese para os sítios estudados.  $M_s$ : magnetização de saturação;  $M_{rs}$ : magnetização de saturação remanente;  $H_c$ : coercividade;  $H_{cr}$ : coercividade remanente.

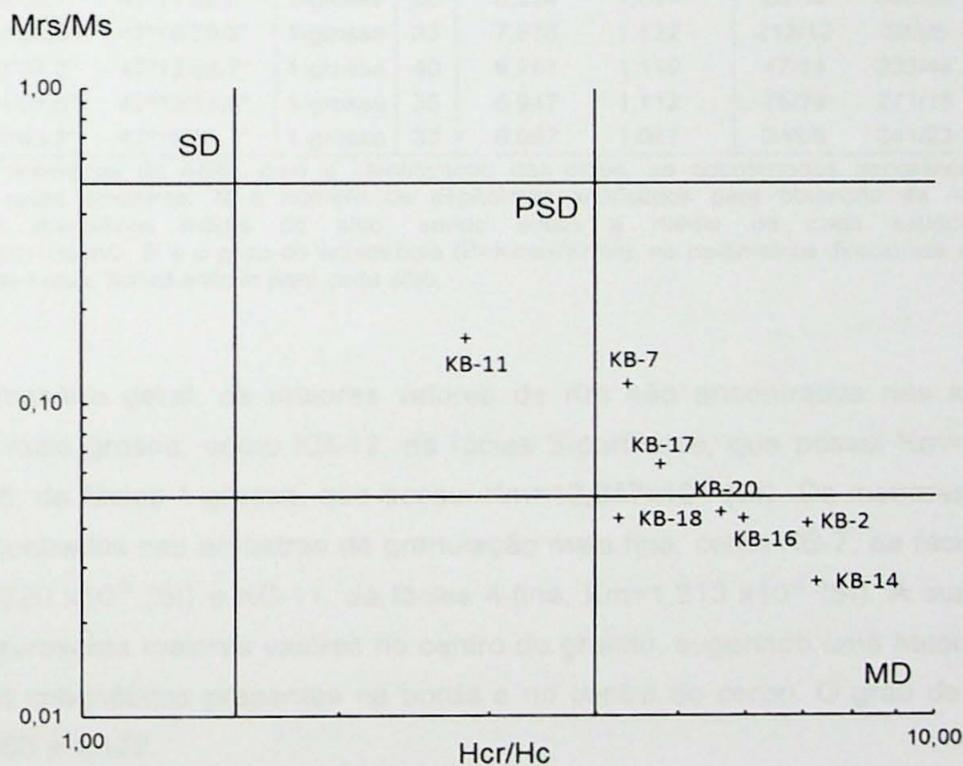


Figura 16 – Gráfico  $H_{cr}/H_c$  versus  $M_{rs}/M_s$  retirado de Day, 1977. SD: Single-domain (domínio simples), PSD: pseudo-single-domain (pseudo domínio-simples), MD: multi-domain (multi-domínio).

#### 5.4. Anisotropia de Suscetibilidade Magnética

Os dados escalares e direcionais de ASM obtidos para os 21 sítios amostrados estão representados na Tabela 5.

Sítio	Coordenadas		Fácies	N	Parâmetros escalares		Parâmetros Direcionais		
	Latitude	Longitude			Km ( $10^{-3}$ )	P	Kmax	Kint	Kmin
KB-1	23°15'48,4"	47°07'42,9"	1-grossa	31	4,607	1,083	299/9	207/10	71/76
KB-2	23°16'6,2"	47°11'07,0"	1-grossa	29	5,828	1,060	67/5	333/41	163/49
KB-3	23°17'05,3"	47°11'20,7"	1-grossa	19	5,995	1,065	247/6	342/41	150/49
KB-4	23°17'09,8"	47°11'23,2"	1-grossa	24	5,543	1,064	245/14	344/33	136/54
KB-5	23°17'03,0"	47°13'32,0"	2-média	23	2,501	1,052	50/51	274/30	171/22
KB-6	23°16'58,4"	47°13'40,3"	2-média	25	4,497	1,055	293/5	202/6	65/82
KB-7	23°15'17,4"	47°14'19,6"	2-média	33	1,220	1,079	58/18	212/70	326/8
KB-8	23°15'26,7"	47°12'15,9"	1-grossa	19	4,925	1,064	265/23	33/55	164/25
KB-9	23°15'41,5"	47°11'28,6"	1-grossa	27	8,750	1,100	263/4	357/44	168/46
KB-10	23°15'28,3"	47°10'13,9"	1-grossa	9	7,759	1,099	273/10	182/5	68/79
KB-11	23°14'20,7"	47°09'53,9"	4-fina	21	1,213	1,059	197/13	289/9	54/75
KB-12	23°14'20,7"	47°09'53,9"	3-porf	35	16,103	1,122	185/5	276/7	58/81
KB-13	23°13'47,1"	47°07'51,4"	1-grossa	19	3,613	1,078	146/3	236/14	43/75
KB-14	23°14'02,7"	47°09'04,7"	3-porf	33	4,043	1,080	261/13	353/5	103/76
KB-15	23°13'30,3"	47°10'14,9"	1-grossa	30	12,357	1,120	43/0	313/25	133/65
KB-16	23°12'31,8"	47°12'34,7"	1-grossa	27	4,737	1,068	59/29	240/61	150/0
KB-17	23°12'02,1"	47°11'52,9"	1-grossa	30	8,234	1,094	237/3	330/50	144/40
KB-18	23°14'20,5"	47°10'39,2"	1-grossa	33	7,878	1,122	212/12	303/5	54/77
KB-19	23°13'07,5"	47°12'08,7"	1-grossa	40	6,281	1,119	47/14	303/44	150/42
KB-20	23°11'07,6"	47°13'13,8"	1-grossa	35	5,947	1,112	75/74	271/15	180/4
KB-21	23°16'42,9"	47°10'43,1"	1-grossa	33	6,957	1,087	248/8	341/23	141/66

Tabela 5 – Parâmetros da ASM, com a identificação dos sítios, as coordenadas geográficas e a fácies representada pelas amostras. N é número de espécimes analisados para obtenção da ASM. Km é a suscetibilidade magnética média do sítio, sendo então a média de cada espécime segundo  $Km=(Kmax+Kint+Kmin)/3$ ; P é o grau de anisotropia ( $P=Kmax/Kmin$ ); os parâmetros direcionais são as médias dos autovetores Kmax, Kmed e Kmin para cada sítio.

De maneira geral, os maiores valores de Km são encontrados nas amostras de granulação mais grossa, como KB-12, da fácies 3-porfíroide, que possui  $Km=16,103 \times 10^{-3}$  (SI) e KB-15, da fácies 1-grossa, que possui  $Km=12,357 \times 10^{-3}$  (SI). Os menores valores de Km são encontrados nas amostras de granulação mais fina, como KB-7, da fácies 2-média, com  $Km=1,220 \times 10^{-3}$  (SI) e KB-11, da fácies 4-fina,  $Km=1,213 \times 10^{-3}$  (SI). A suscetibilidade magnética apresenta maiores valores no centro do granito, sugerindo uma heterogeneidade dos minerais magnéticos presentes na borda e no centro do corpo. O grau de anisotropia varia de 1,055 a 1,122.

Os eixos de ASM para cada sítio são bem agrupados como indicado pelos baixos valores do círculo de confiança de 95% (Figura 17).

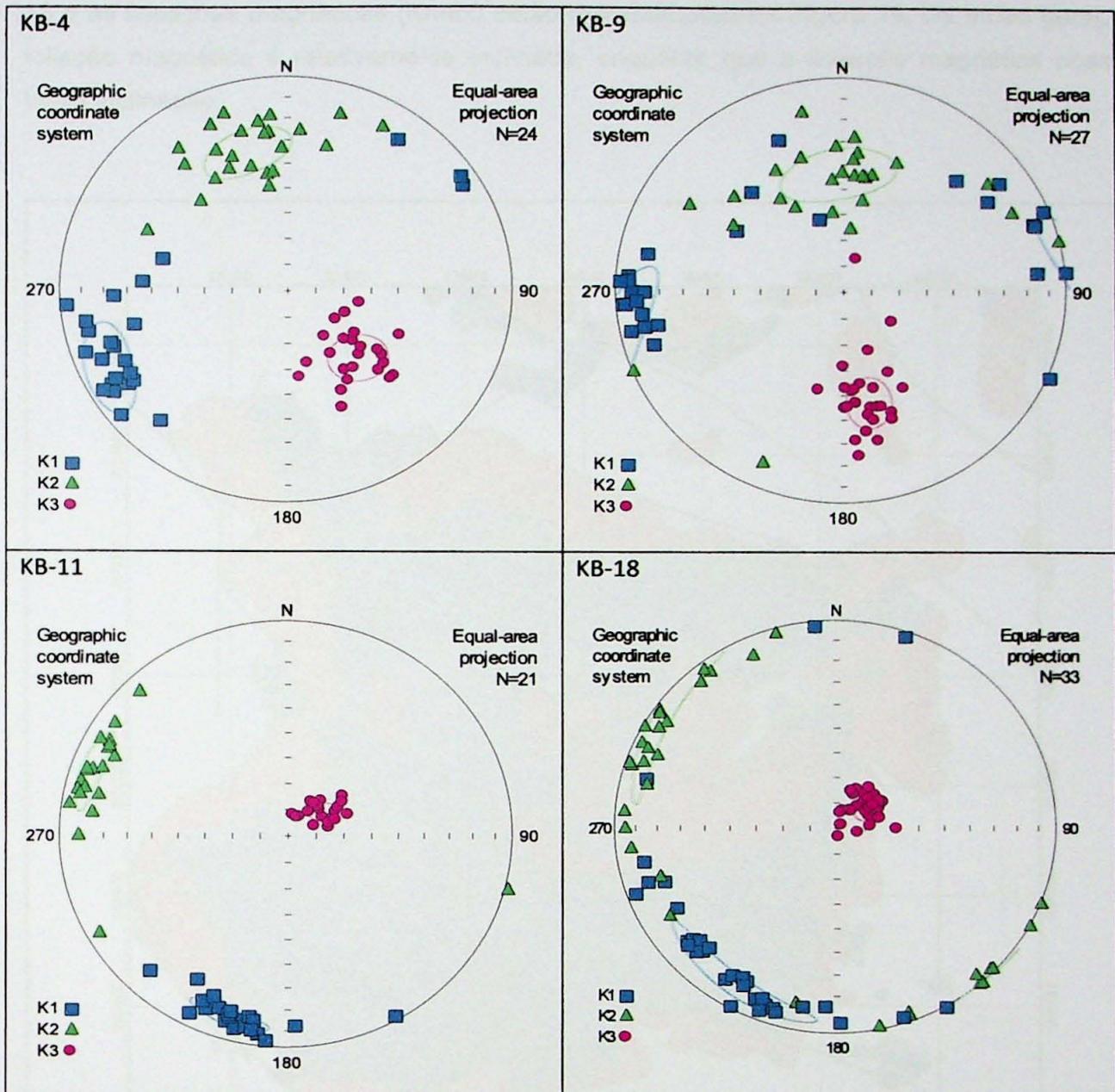


Figura 17 – Exemplos representativos das tramas magnéticas encontradas para o granito Cabreúva. K1= Kmax, K2= Kint e K3=Kmin. As circunferências representam o círculo de 95% de confiança.

É possível observar na Figura 17 que os pares KB-4 e KB-9 possuem tramas magnéticas parecidas, sendo a orientação do plano de foliação no KB-4 NE, e no KB-9 ENE. O mergulho do plano também é semelhante, com valor de  $36^\circ$  no KB-4 e  $44^\circ$  no KB-9. Outro par representado na Figura 17 possuem atitudes do plano de foliação muito parecidas entre si, sendo a orientação do plano em ambos os casos SE, e o mergulho do plano  $15^\circ$  e  $13^\circ$  respectivamente. A lineação magnética definida pelo eixo Kmax também é quase equivalente em ambos os casos.

Estes pares citados estão localizados próximos uns aos outros, como pode ser visto na Figura 5, e tramas parecidas são esperadas em condições normais. As foliações



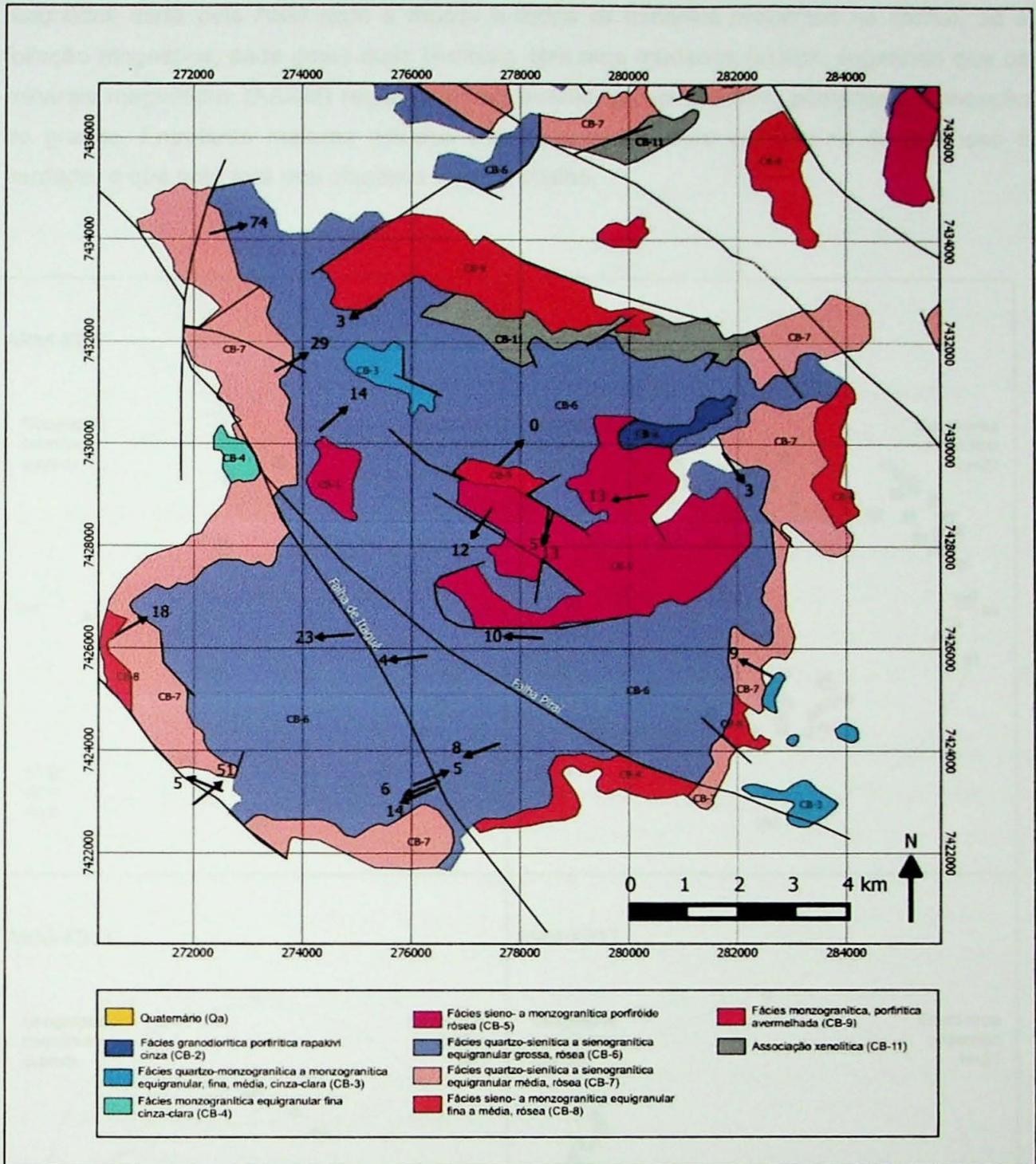


Figura 19 – Lineação magnética no granito Cabreúva em mapa modificado de Galembeck (1997).

### 5.5. ASM x AARM

A anisotropia de remanência anisterética foi calculada para cinco sítios, sendo que quatro deram resultado. As tramas dadas pela ASM e AARM são apresentadas na Figura 20. Observa-se que a direção da lineação magnética da trama AARM ( $K_{max}$ , que é devida exclusivamente aos minerais magnéticos) está ligeiramente diferente da direção da lineação

magnética dada pela ASM (que é devida a todos os minerais presentes na rocha). Já a foliação magnética, dada pelas duas técnicas, tem uma mudança brusca, sugerindo que os minerais magnéticos (AARM) registraram um evento, provavelmente, posterior à colocação do granito. Entretanto maiores estudos são necessários para verificar se de fato isso é verdade, o que está fora dos objetivos deste trabalho.

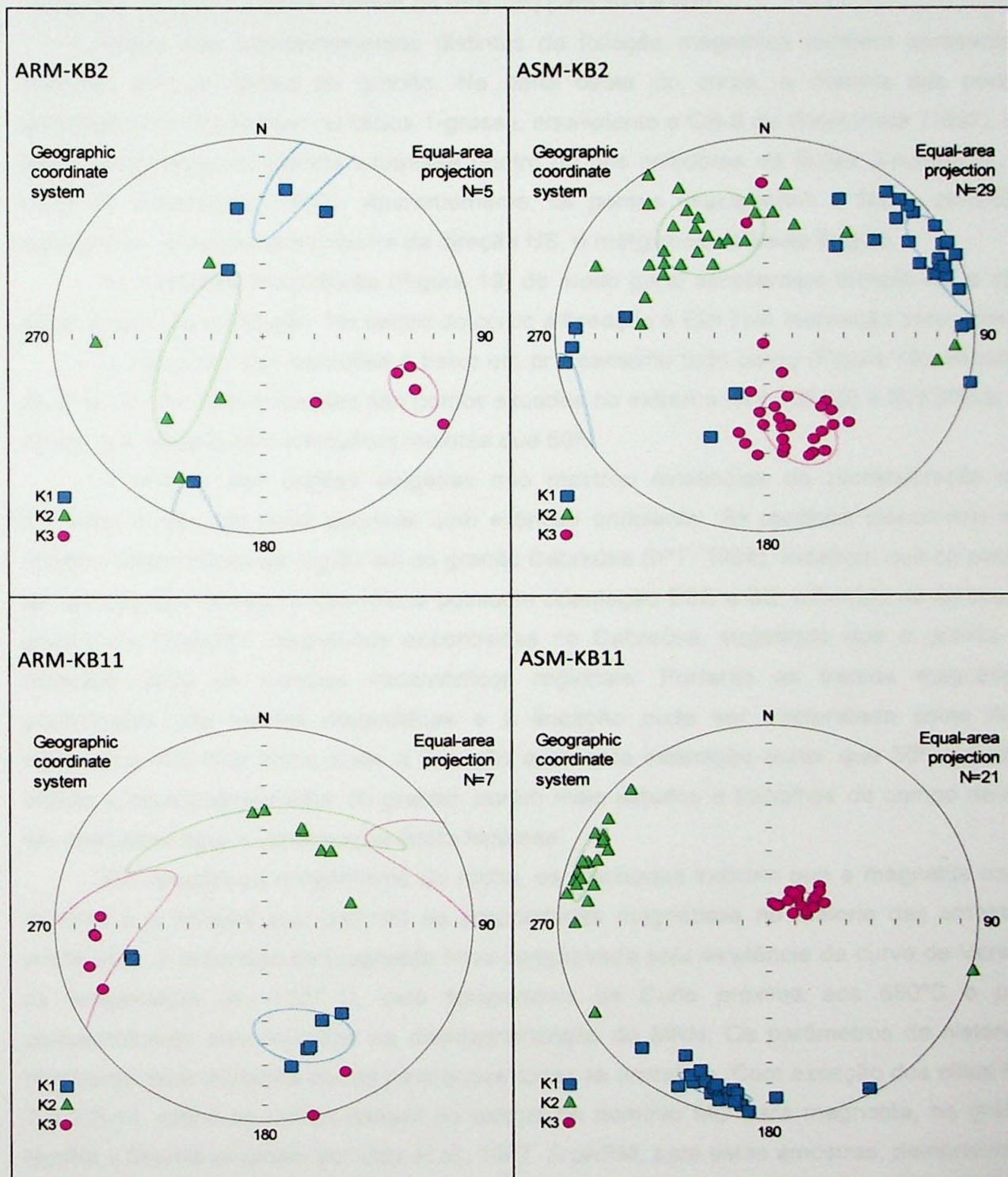


Figura 20 – Exemplos representativos de tramas de AARM e ASM.

## 6. DISCUSSÃO

As tramas magnéticas obtidas pela ASM mostram que é possível separar as foliações magnéticas (Figura 18) em dois grupos. Na parte oeste do corpo, predominam as de orientação NE a ENE, com mergulhos para NW que variam de 24° a 90°, observa-se que os sítios com foliações de mergulho mais elevados localizam-se na porção NW do corpo. Na parte centro-leste do granito, a orientação dos planos de foliação varia de NW a NNE, com mergulhos de baixo ângulo (variam de 9° a 15°) para SW a NW.

Esses dois comportamentos distintos da foliação magnética também apresentam relações com as fácies do granito. Na parte oeste do corpo, a maioria dos pontos amostrados se encontram na fácies 1-grossa, equivalente a CB-6 de Galembeck (1997). Na parte centro-leste, os pontos situam-se dentro ou nos arredores da fácies 3-porfiróide, ou CB-5 de Galembeck (1997). Aparentemente, os pontos relacionados à fácies porfiróide apresentam foliação mais próxima da direção NS, e mergulhos de baixo ângulo.

As lineações magnéticas (Figura 19) de modo geral apresentam direção NE e com baixo ângulo de inclinação. No centro do corpo a lineação é EW com inclinação horizontal.

O mergulho das lineações é baixo em praticamente todo corpo (Figura 19), variando de 0° a 29°. As duas exceções são pontos situados no extremo NW (KB-20) e SW (KB-5) do corpo, que apresentam mergulhos maiores que 50°.

A análise das seções delgadas não mostrou evidências de recristalização dos minerais, a não ser raros quartzos com extinção ondulante. As medidas disponíveis nas rochas metamórficas da região sul do granito Cabreúva (IPT, 1984), mostram que os planos de foliação das rochas metamórficas possuem orientação ESE a SE, diferindo de ambos os grupos de foliações magnéticas encontradas no Cabreúva, sugerindo que o granito foi colocado após os eventos metamórficos regionais. Portanto as tramas magnéticas encontradas são tramas magmáticas e a lineação pode ser interpretada como fluxo magmático. Os dois sítios onde a lineação apresenta inclinação maior que 50° poderiam indicar o centro alimentador do granito, porém mais estudos e trabalhos de campo devem ser efetuados para a confirmação desta hipótese.

Em relação ao magnetismo de rocha, os resultados indicam que a magnetita multi-domínio é o mineral que controla as propriedades magnéticas na maioria das amostras analisadas. A presença da magnetita ficou comprovada pela existência da curva de Verwey na temperatura de -150° C, pela temperatura de Curie próxima aos 580°C e pelo comportamento das amostras na desmagnetização da MRN. Os parâmetros de histerese mostraram coercividades baixas para quase todas as amostras. Com exceção dos sítios KB-7 e KB-11, todos os outros caíram no campo do domínio MD para magnetita, no gráfico  $H_{cr}/H_c \times M_{rs}/M_s$  proposto por Day *et al.*, 1977. A pARM, para estas amostras, demonstrou a presença de grãos de aproximadamente 25  $\mu\text{m}$ , compatíveis com a dimensão esperada para magnetita MD.

As amostras dos sítios KB-7 e KB-11 apresentaram coercividade mais alta. No gráfico  $H_{cr}/H_c$  x  $M_{rs}/M_s$ , situam-se dentro ou muito próximas do campo PSD. No caso do KB-7, alguns valores foram levemente destoantes dos esperados para a magnetita, como, por exemplo, a saturação da IRM em campos próximos a 450 mT (quando o esperado para a magnetita é 300 mT), ou a retenção de cerca de 20% da sua magnetização em campos próximos a 100 mT, durante a desmagnetização da MRN. Isso pode indicar a presença também de hematita como mineral ferromagnético. Tal presença é confirmada, no entanto, no caso do sítio KB-11, que só atingiu a saturação no IRM em campos de cerca de 2750 mT.

## 7. CONCLUSÕES

A magnetita com tamanho de grão aproximado de 25  $\mu\text{m}$  é o mineral responsável pelas propriedades magnéticas em todos os sítios estudados. Apenas no KB-11 a hematita também contribui para as propriedades magnéticas.

A trama magnética obtida por ASM é magmática sendo que a lineação representa o fluxo magmático na colocação do granito Cabreúva. Na parte oeste do granito Cabreúva, as foliações magnéticas possuem direções que variam de NE a ENE, com mergulhos de alto ângulo para NW. Na parte central e leste do granito, as foliações possuem direções que variam de NW a NNE, com mergulhos de baixo ângulo para SW a NW. A lineação magnética é praticamente horizontal em todo o granito, com direção predominante NE.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bouchez, J.L. 1997. Granite is never isotropic: an introduction to AMS studies of granitic rocks. In: Bouchez *et al.* (eds.) *Granite: From Segregation of Melt to Emplacement Fabrics*. Kluwer Academic Publishers, p. 95-112.
- Butler, R.F. 1992. *Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes*. Blackwell Scientific Publications, Boston.
- Day, R., Fuller, M., Schimdt, V.A., 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 13: 260-267.
- Dunlop, D.J. 2002. Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc), Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *Journal of Geophysical Research*, Vol 107, No. B3.
- Galembeck, T.M.B. 1991. *Aspectos geológicos, petrográficos e geoquímicos da Intrusão Cabreúva – Complexo Granitóide de Itu*. Dissertação (Mestrado), Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP.
- Galembeck, T.M.B. 1997. *O complexo múltiplo, centrado e pluriserial Itu-SP*. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP.
- IBGE. (1973). Carta topográfica – Cabreúva em escala 1:50.000, folha SF-23-Y-C-II-4. Ministério do Planejamento e Coordenação Geral, Departamento de Cartografia, São Paulo.
- IBGE. (1973). Carta topográfica – Indaiatuba em escala 1:50.000, folha SF-23-Y-C-II-2. Ministério do Planejamento e Coordenação Geral, Departamento de Cartografia, São Paulo.
- IPT. (1984). Mapa geológico da Folha de Cabreúva – escala 1:50.000, folha SF-23-Y-C-II-4. Divisão de Minas e Geologia Aplicada, São Paulo.
- Jackson, M. 1991. Anisotropy of magnetic remanence: a brief review of mineralogical sources, physical origins and geological applications, and comparison with susceptibility anisotropy. *Pure and Applied Geophysics*, 136, p. 1-28.
- Jackson, M.J., Gruber, W., Marvin, J.A., Banerjee, S.K. 1988. Partial anhysteretic remanence and its anisotropy: applications and grain-size-dependence. *Geophysical Research Letters*, 15(5), p. 440-443.

- Pascholati, E.M., Vlach, S.R., Amaral, G. (1987). Contribuição ao conhecimento da suíte intrusiva de Itu. In: *Simpósio Regional de Geologia*. Rio Claro: SBG. v. 1, p. 47-62.
- Pascholati, 1990. *Caracterização Geofísica da Suíte Intrusiva de Itu*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto Astronômico e Geofísico, USP.
- Raposo, M.I.B.; Gastal, M.C.P.; 2009. Emplacement of the main granite pluton of the Lavras do Sul intrusive complex, South Brazil, determined by magnetic anisotropies. *Tectonophysics*, 466 (2009) 18-31.
- Tassinari, C.C.G. 1987. 'Sr' and 'Pb' isotope evolution of granitoids in the São Paulo region, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*. V17, n4, p. 519-523.
- Tarling, D.H., Hrouda, F. 1993. *The magnetic anisotropy of rocks*, Capman & Hall, London.
- Janasi, V.A., Vlach, S.R.F., Campos, M.C., Ulbrich, H. H. G. J. Associated A-type Subalkaline and High-K Calc-Alkaline Granites in the Itu Granite Province, Southeastern Brazil: Petrological and Tectonic Significance. 2009. *The Canadian Mineralogist*. Vol 47, pp. 1505-1526

