



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
FACULDADE DE GEOLOGIA

CAROLINE DA CUNHA

"SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA E MINERAIS ÓXIDOS DE FE E TI DO  
GRANITO BOA SORTE - DOMÍNIO CARAJÁS"

BELÉM – PARÁ  
SETEMBRO – 2013

CAROLINE DA CUNHA

"SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA E MINERAIS ÓXIDOS DE FE E TI DO  
GRANITO BOA SORTE - DOMÍNIO CARAJÁS"

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Faculdade de Geologia  
do Instituto de Geociências da  
Universidade Federal do Pará- UFPA,  
em cumprimento às exigências para  
obtenção do grau de Bacharel em  
Geologia

Orientador: Prof. Dr. Davis Carvalho de  
Oliveira

BELÉM – PARÁ  
SETEMBRO– 2013

## FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFPA

---

C972s      Cunha, Caroline da  
              Suscetibilidade magnética e minerais óxidos de Fe e Ti do Granito  
Boa Sorte - Domínio Carajás / Caroline da Cunha – 2013

59 f. : il.

Orientador: Davis Carvalho de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em geologia) –  
Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de  
Geologia, Belém, 2013.

1. Geologia estratigráfica - Arqueano. 2. Suscetibilidade Magnética.  
3. Granitoide. 4. Domínio Carajás. I. Oliveira, Davis Carvalho de, *orient.* II.  
Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 22ª ed.: 551.712

---

CAROLINE DA CUNHA

"SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA E MINERAIS ÓXIDOS DE FE E TI DO  
GRANITO BOA SORTE, PORÇÃO SUL DOMÍNIO CARAJÁS, PROVÍNCIA  
CARAJÁS"

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Faculdade de Geologia  
do Instituto de Geociências da  
Universidade Federal do Pará- UFPA,  
em cumprimento às exigências para  
obtenção do grau de Bacharel em  
Geologia.

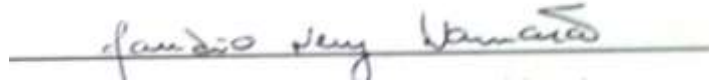
DATA DA APROVAÇÃO: 18/09/2013

CONCEITO: **EXCELENTE**

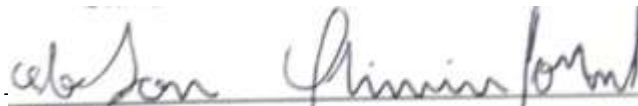
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Davis Carvalho de Oliveira  
Orientador  
Doutor em Geologia  
Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. Cláudio Lamarão - Membro  
Doutor em Geoquímica e Geologia  
Universidade Federal do Pará



Doutorando Eleilson Oliveira Gabriel - Membro  
Programa de Pós-Graduação em Geologia e  
Geoquímica  
Universidade Federal do Pará

“Um anjo vem todas as noites: senta-se ao pé de mim, e passa sobre o meu coração a asa mansa, como se fosse meu melhor amigo. Esse fantasma que chega e me abraça (asas cobrindo a ferida do flanco) é todo o amor que resta entre ti e mim, e está comigo.”

Lya Luft

Ao anjo Guacira, com todo o meu amor.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Federal do Pará e ao Grupo de Pesquisa de Petrologia de Granitoides (GPPG) do Instituto de Geociências (IG) da UFPA, pelo suporte técnico-científico e ao LABMEV pelas análises de minerais opacos.

Agradeço ao professor e orientador Davis Carvalho pelas contribuições para a realização deste trabalho.

Agradeço a Deus pelo dom da vida e pela serenidade necessária nas situações adversas. Aos meus pais, Eliomar Pereira e Diara da Cunha, e à minha irmãzinha Clara da Cunha, agradeço pelas palavras sábias, pelo amor, carinho e principalmente pela confiança. Aos meus tios, Antonio Picanço e Caroline Cunha, e ao meu quase irmão Igor Picanço, agradeço por todo o suporte, pela paciência nos meus momentos de estresse e por sempre me acolherem de braços abertos.

Agradeço aos meus grandes amigos Hanna Sales e Raphael Primo, por todo o companheirismo, amizade e pelos diversos momentos de descontração.

Um agradecimento especial à minha “amics” Roberta Cavalcante por toda paciência, que lhe é peculiar, pela cumplicidade, pelas horas de estudo, pelas dicas e mais dicas para a confecção deste trabalho. Por sempre ter uma palavra de incentivo, por mais que a situação não seja fácil, e pela grande amizade construída ao longo de cinco duradouros anos.

Agradeço ao Paulo Sérgio, uma amizade conquistada aos poucos, por todo o apoio e pelas diversas contribuições para a elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos da turma de Geologia 2009, Kaue, “Doug”, “Lulu”, “Negão”, Jhon, Lilian, Brenda, Thainá, “Jaque”, Raquel, “Loba Doida”, “Joãozinho”, “Pumba”, Luís e Almir, pela amizade construída ao longo desses anos. Agradeço aos meus amigos de todas as horas, Samuel Cândido e Nyanne Moritsuka, pela maravilhosa amizade e por sempre estarem do meu lado, e às minhas “divas” Ana Carolina Queiroga, Rafaella Nery e Fernanda Maués pelo carinho e pelos diversos momentos de felicidade.

Ao Eleilson Gabriel e ao Daniel Rodrigues pelo auxílio e disponibilização de dados importantíssimos. E aos colegas do GPPG, Fernando, Bhrenno, Fabriciana e Ingrid pela ajuda.

A vocês, os meus mais sinceros agradecimentos!

## RESUMO

O magmatismo granítico *stricto sensu*, chamado de Granito Boa Sorte, ocorre na região sudeste do estado do Pará, limite entre os municípios de Agua Azul do Norte e Canaã dos Carajás, inserido no contexto geológico da porção sul do Domínio Carajás. Este é formado predominantemente por monzogranitos que possuem biotita como principal mineral ferromagnésiano, tendo sido inicialmente correlacionado aos corpos peraluminosos da Suíte Plaquê. Estudos de suscetibilidade magnética (SM) realizados em 60 amostras representativas das duas fácies deste granito forneceram valores de SM variáveis, sendo possível identificar duas populações distintas, designadas genericamente de A e B. Os valores de SM do granito variam de  $0,0027 \times 10^{-3}$  a  $27,8000 \times 10^{-3}$  Slv, com média de  $3,9045 \times 10^{-3}$  Slv, aumentando no sentido da população A em direção a população B. As fases minerais opacas presentes nas rochas do Granito Boa Sorte são magnetita, ilmenita (treliça, *composite* externa e interna e sanduíche) e hematita. Feições texturais e as composições semiquantitativas nos minerais óxidos de Fe e Ti sugerem a existência e a formação da titanomagnetita durante o estágio precoce da cristalização. Processos de desestabilização substituíram parcialmente a magnetita por titanita. Durante o estágio *subsolidus*, a titanomagnetita originou a magnetita pobre em titânio e a ilmenita em suas variadas formas por processos de oxidação. Em condições mais oxidantes a magnetita foi afetada pelo processo de martitização dando origem à hematita. Os valores mais elevados de suscetibilidade magnética estão relacionados às amostras com maiores conteúdos modais de magnetita, enquanto as amostras que apresentam os menores valores magnéticos possuem magnetitas intensamente martitizadas. Algumas características permitem classificar o Granito Boa Sorte como granito da série da magnetita, entre elas os valores de SM relativamente elevados, bem como o conteúdo modal de minerais opacos (>0,1%) com presença marcante de magnetita em todas as suas fácies. Por meio da natureza dos minerais óxidos de Fe e Ti, foi possível definir que o Granito Boa Sorte foi formado em condições elevadas de fugacidade de oxigênio, entre os tampões HM e FMQ, um pouco acima do NNO, atingindo em condições *subsolidus*, fugacidades de oxigênio acima do tampão HM.

Palavras-chave: Geologia estratigráfica – Arqueano. Suscetibilidade Magnética.  
Granitoide. Domínio Carajás.

## ABSTRACT

The *stricto sensu* granitic magmatism, denominated Boa Sorte Granite, that occur in the southeast region of Pará, at the limit between the counties of Água Azul do Norte and Canaã dos Carajás, in the south portion of the Carajás Domain. It is formed predominantly by monzogranites that have biotite as major ferromagnesian mineral, and have been initially correlated to Plaquê Suite. The Magnetic Susceptibility (MS) studies on 60 representative samples of the two different facies of this pluton gave values of SM variables. The behavior of these values allow distinguish two distinct populations, designated of A and B. The values of MS obtained range from  $0,0027 \times 10^{-3}$  to  $27,8000 \times 10^{-3}$  SIv, with an average  $3,9045 \times 10^{-3}$  SIv, increasing from the population A towards to population B. The opaque mineral phases present in the rocks of the Boa Sorte granite are magnetite, ilmenite (trellis, external and internal composite and sandwich) and hematite. Textural features and semiquantitative compositions of the Fe-Ti oxides suggest the existence and formation of titanomagnetite during the early stage of crystallization. Destabilization processes allow the replacement of the magnetite by titanite. During the *subsolidus* stage, the titanomagnetite originated poor titanium magnetite and ilmenite from oxy-exsolution processes. Under more oxidizing conditions the magnetite is affected by the martitization process giving rise to hematite. The highest values of magnetic susceptibility are related to samples with higher modal content of magnetite, while the samples with the lowest magnetic values have magnetite with intense martitization process. Some features allow classify the Boa Sorte granite as magnetite-series granite, which including the relatively high values of SM and the modal content of opaque minerals (> 0.1%) with a strong presence of magnetite in this pluton. Through the nature of Fe-Ti oxide minerals, it was possible to define that the Boa Sorte granite was formed under conditions of high oxygen fugacity, between HM and FMQ buffer, above NNO, reaching in subsolidus condition, fugacity above HM buffer.

Keywords: Stratigraphic geology- Archean. Magnetic susceptibility. Granitoid Carajás Domain.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1- Mapa de localização da área estudada..... 13
- Figura 2- (a) Mapa de localização do Cráton Amazônico no contexto da Plataforma Sul Americana; (b) Províncias Geocronológicas do Cráton Amazônico e; (c) Mapa geológico da Província Carajás. .... 19
- Figura 3- Diagrama Q-(A+P)-M e Q-A-P, mostrando a distribuição modal no Granito Boa Sorte ..... 24
- Figura 4- a) Aspecto geral macroscópico da fácies BMz foliada, mostrando uma foliação penetrativa, marcada pela orientação preferencial dos cristais de biotita, feldspatos e quartzo; b) aspecto geral microscópico onde são observados porfiroclastos de plagioclásio (Pl), microclina (Mc) e *ribbons* de quartzo (Qtz) em meio aos agregados de neoblastos; c) mirmequita (Mir) em bulbo invadindo a microclina (Mc) no contato com o plagioclásio (Pl). Notar os neoblastos daquele mineral em contatos retos e junções tríplices na porção esquerda da fotografia; d) cristais de biotita (Bt) e muscovita (Ms) subautomórficos e sem sinais de deformação; e) Aspecto macroscópico da fácies LMz pouco deformada; f) Notar a forma subautomórfica da microclina (Mc), a intensa saussuritização do plagioclásio (Pl) e os subgrãos de quartzo (Qtz); g) cristal de plagioclásio intensamente saussuritizado nas bordas e com núcleo relativamente preservado; h) cristais de biotita intensamente cloritizados e associados a allanita (Aln) e zircão (Zr)..... 27
- Figura 5- Diagrama Ternário do sistema  $TiO_2-FeO-Fe_2O_3$ , mostrando os minerais óxidos de Fe e Ti mais comuns. As setas em vermelho indicam a direção do aumento da oxidação com razão Fe e Ti constante e as linhas pretas as soluções sólidas entre: 1) magnetita-ulvoespinélio (série titanomagnetita); 2) hematita-ilmenita (série ilmeno-hematita); 3) ilmeno-rutilo-pseudobrookita..... 32
- Figura 6- a) Histograma e polígono de frequência, referente aos dados de suscetibilidade magnética do Granito Boa Sorte; b) Gráfico de probabilidade normal (Simbologia conforme Figura 3). .... 36
- Figura 7- Diagramas binários mostrando as relações entre os valores de suscetibilidade magnética (SM) e os conteúdos modais de: a) opacos;

- b) máficos; c) biotita; d) quartzo e feldspato potássico. Simbologia conforme Figura 3..... 38
- Figura 8- Diagramas binários relacionando os valores de suscetibilidade magnética (SM) e a concentração de: a)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; b) MgO; c)  $\text{TiO}_2$  e d) ( $\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O}$ ) do Granito Boa Sorte. Simbologia conforme Figura 3. ... 40
- Figura 9- Principais formas de ocorrência da magnetita, luz refletida. a) e b) Cristais de magnetita, mostrando martitização evidente; c) Cristal de magnetita subautomórfica; d) Magnetita alterada para titanita. .... 44
- Figura 10- Diferentes tipos texturais de ilmenita, luz refletida. a) Cristal de magnetita transformado para ilmenitas em treliça (Ilm T); b) Cristal de magnetita associado à ilmenita composta externa (Ilm Cext); c) Cristal anédrico de magnetita associado à ilmenita composta externa (Ilm Cext); c) Cristal anédrico de magnetita associado à ilmenita composta interna (Ilm Cint); d) Cristais de magnetita associados à ilmenita sanduíche (Ilm S) e à ilmenita composta externa (Ilm Cext)..... 45
- Figura 11- Associação de minerais óxidos de Fe e T e imagens de elétrons retro-espalhados obtidas em microscópio eletrônico de varredura. a) Destaque para o espectro EDS com teor acentuado de titânio; b) Espectro EDS apresentando magnetita e ilmenita treliça; c) Espectro EDS mostrando magnetita com baixo teor de Ti associada à biotita; d) Associação de magnetita e titanita, acompanhada de espectro EDS.. 46
- Figura 12- Ordem de cristalização dos minerais opacos do Granito Boa Sorte 48
- Figura 13- Polígono de frequência referente aos dados de suscetibilidade magnética do Granito Boa Sorte e dos granitoides de Nova Canadá.. 50

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>1.1 Apresentação</b> .....	12
<b>1.2 Localização e acesso</b> .....	13
<b>1.3 Geologia Regional</b> .....	14
1.3.1 Domínio Rio Maria (DRM) .....	14
1.3.2 Domínio Carajás (DC) .....	16
<b>1.4 Geologia Local</b> .....	20
<b>1.5 Justificativa</b> .....	20
<b>1.6 Objetivos</b> .....	20
<b>1.7 Materiais e Métodos</b> .....	21
1.7.1 Pesquisa Bibliográfica .....	21
1.7.2 Suscetibilidade Magnética .....	21
1.7.3 Petrografia.....	22
1.7.4 Estudo de minerais óxidos de Fe e Ti .....	22
<b>2 PETROGRAFIA</b> .....	23
<b>2.1 Composições Modais</b> .....	23
<b>2.2 Aspectos Texturais</b> .....	24
<b>3 PETROLOGIA MAGNÉTICA</b> .....	31
<b>3.1 Introdução</b> .....	31
<b>3.2 Suscetibilidade Magnética (SM)</b> .....	32
<b>3.3 Relação entre Suscetibilidade Magnética e Composições Modais</b> .....	37
<b>3.4 Relações entre Suscetibilidade Magnética e Composições Químicas</b> .....	38
<b>3.5 Minerais óxidos de Fe e Ti</b> .....	41
3.5.1 Sequência de Formação .....	47
<b>4 DISCUSSÃO E COMPARAÇÕES ENTRE O GRANITO BOA SORTE E OS GRANITOIDES ARQUEANOS DA REGIÃO DE NOVA CANADÁ</b> .....	49
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	52
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	54

## **1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 Apresentação**

A Província Carajás (PC) situa-se na porção sudeste do Cráton Amazônico (ALMEIDA et al., 1981), no contexto geológico da Província Amazônia Central (TASSINARI; MACAMBIRA 1999, 2004) e, segundo Dall’Agnol et al., (1997), a mesma se divide tectonicamente em Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria (TGGRM) a sul, Bloco Carajás (BC) a norte e Domínio de Transição (DT) entre as duas primeiras. Vasquez et al., (2008), em revisão da geologia do estado do Pará, dividiram a Província Carajás em Domínio Carajás e Domínio Rio Maria, fazendo com que Feio et al., (2012) redefinissem o Domínio de Transição como Subdomínio de Transição, pertencente à porção sul do Domínio Carajás. É caracterizada por apresentar uma grande variedade de recursos minerais, incluindo depósitos de ferro, ouro, manganês, níquel e cobre, e isso motivou a realização de diversos estudos, os quais contribuíram para o conhecimento geológico da mesma. Tem merecido grande destaque no meio geológico devido ao seu enorme potencial econômico e à presença de importantes depósitos minerais, onde se destacam os de Fe, Au, Mn, Ni, Cu, Sn.

Dentro desse contexto Araújo et al., (1988) caracterizaram os corpos granitoides de orientação E-W, que ocorrem a sul do Domínio Carajás, como muscovita-biotita leucogranitos de assinatura metaluminosa a peraluminosa, associando-os aos granitos tipo S, os quais foram agrupados no contexto da Suíte Plaquê de idade  $2,729 \pm 29$  Ga. (AVELAR, 1996). As atividades de pesquisa previstas neste trabalho estão direcionadas para a porção sul do Domínio Carajás (VASQUEZ et al., 2008), também denominado de Subdomínio de Transição entre o Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria (TGGRM) e a Bacia Carajás (BC) (DALL’AGNOL et al., 2006; FEIO et al., 2011).

Apesar das informações sobre a petrografia, geoquímica e geocronologia desse corpo terem sido recentemente disponibilizadas por Rodrigues (2013), ainda não existiam informações referentes à suscetibilidade magnética (SM) das suas rochas, nem tampouco sobre a composição química dos principais minerais óxidos de ferro e titânio que as constituem. Em razão disso, pretende-se neste trabalho estudar o Granito Boa Sorte em termos de petrologia



### 1.3 Geologia Regional

O Cráton Amazônico configura-se como uma das principais unidades tectônicas da Plataforma Sul Americana e segundo Tassinari e Macambira (1999, 2004) este pode ser dividido em seis províncias geocronológicas: Amazônia-Central (>2,2 Ga.), Maroni-Itacaiúnas (2,2-1,95 Ga.), Ventuari-Tapajós (1,95-1,88 Ga.), Rio-Negro-Juruema (1,8-1,55 Ga.), Rondoniana-San Ignácio (1,55-1,3 Ga) e Sunsás (1,3-1,0 Ga) (Figuras 2a e 2b).

A Província Carajás (PC) localiza-se no extremo sudeste do Cráton Amazônico (ALMEIDA et al., 1981). De acordo com Tassinari e Macambira (1999, 2004) a PC está situada mais exatamente na Província Amazônia Central. Essa província mineral foi gerada, reativada e tectonicamente estabilizada no Arqueano. No Paleoproterozoico foi afetada por um evento magmático extensivo, marcado por intrusões graníticas anorogênicas e por diques associados (MACAMBIRA; LAFON 1995; DALL'AGNOL et al., 2005).

Souza et al., (1996) subdividiram a PC em dois blocos tectonicamente distintos, um mais antigo, a sul, denominado de Bloco Rio Maria, de idade Mesoarqueana, e outro, a norte, denominado de Bloco Carajás, com evolução no final do Neoarqueano (Figura 2c). Esta proposta tem sido fortalecida ao longo do tempo, como proposto por Dall'Agnol et al., (1997, 2006), que denominam estes blocos de Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria (TGGRM) e Bacia Carajás (BC), respectivamente, e o segmento entre os mesmos denominaram informalmente como Domínio de Transição (DT). Atualmente, Vasquez et al., (2008) subdividem a PC em dois domínios: o Domínio Rio Maria (DRM) e o Domínio Carajás (DC), fazendo com que Feio et al. (2012) redefinissem o DT como Subdomínio de Transição (ST), correspondente à porção sul do DC.

#### 1.3.1 Domínio Rio Maria (DRM)

O DRM é formado por unidades que compreendem *greenstone belts* e granitoides arqueanos. Essas unidades são cobertas por metassedimentos de idade também arqueana do Grupo Rio Fresco, e cortados por granitos anorogênicos paleoproterozoicos e diques associados da Suíte Jamon.

Os *greenstone belts* de Rio Maria, denominada de Super grupo Andorinhas, são sequências de rochas metavulcanossedimentares, com idade

de 2,98 Ga (AVELAR, 1996), inicialmente descritos por Cordeiro (1982) e Hirata et al., (1982), como constituída de uma unidade basal que engloba espessos derrames basálticos, intercalações de talco-xistos, metatufos, metacherts e BIF's (Grupo Babaçu). A unidade superior é formada por metapelitos, metapsamitos e metariodacitos (Grupo Lagoa Seca) e o Grupo Tucumã, denominado formalmente por Araújo e Maia (1991) para descrever as rochas supracrustais do extremo SW da Folha Serra dos Carajás sendo formado por sequências metavulcanossedimentares, que compreende uma intercalação de rochas metavulcânicas máficas, félsicas e metassedimentos (MACAMBIRA; VALE, 1996).

Segundo Leite et al. (2004), Dall'Agnol et al., (2006) e Almeida et al., (2011) os granitoides arqueanos do TGGRM são divididos em cinco grupos principais: **(1)** A série TTG mais antiga é representada pelo Tonalito Arco Verde (2,96 Ga; ROLANDO; MACAMBIRA 2003; ALMEIDA et al., 2011), que exhibe uma forte foliação, definida pela alternância do bandamento composicional, de granulação média, possuindo uma composição tonalítica a trondhjemítica, onde a biotita é a fase ferromagnésiana dominante (ALTHOFF et al., 2000). Trondhjemito Mogno (2,95 Ga e 2,92 Ga; MACAMBIRA, 1992; MACAMBIRA; LAFON, 1995), que consiste de um extenso batólito de composição trondhjemítica. Tonalito Mariazinha (2,94 Ga; ALMEIDA et al., 2011), constituído por epidoto-biotita tonalitos e pertence ao grupo de TTG com alto  $Al_2O_3$ . Complexo Tonalítico Caracol (2,94 Ga; LEITE et al., 2004, ALMEIDA et al., 2011) é caracterizado por apresentar um bandamento composicional de ocorrência muito regular, na maioria das vezes, essas rochas mostram-se muito deformadas (LEITE et al., 2004). **(2)** Os granitoides Sanukitoides ricos em Mg, que correspondem ao Granodiorito Rio Maria e rochas associadas (MEDEIROS; DALL'AGNOL, 1988; OLIVEIRA et al., 2009), com idade U-Pb em zircão de 2,87 Ga (LEITE; DALL'AGNOL, 1994), que é caracterizado como uma rocha de granulação média a grossa, foliação magmática moderada, saussuritização generalizada e assinatura cálcio-alcalina de alto Ni, Cr e LILE. **(3)** A Suíte Guarantã, de idade  $2875 \pm 8$  Ma e  $2872 \pm 7$  Ma (ALMEIDA et al., 2010; ALTHOFF et al., 2000), que engloba leucogranodioritos-granitos ricos em Ba e Sr, formados pelas intrusões do Granito Guarantã e dos Granodioritos Azulona e Trairão (DIAS, 2009; ALMEIDA et al., 2010), sendo que o

Granodiorito Grotão (GUIMARÃES, 2009) e pequenas ocorrências identificadas na região de Bannach e Xinguara são similares a esta suíte, embora ainda não se tenha obtido uma idade precisa para estes corpos. **(4)** O Trondhjemito Água Fria (2,86 Ga; LEITE et al., 2004) é o único membro dos TTG's mais jovens, sendo similar geoquimicamente ao Complexo Tonalítico Caracol e aos TTGs arqueanos, mas é comparativamente mais enriquecido em K (DALL'AGNOL et al., 2006). **(5)** Os leucogranitos potássicos de afinidade cálcio-alcalina, que são representados pelo Granito Xinguara, cuja idade mínima U-Pb em zircão é de  $2800 \pm 18$  Ma (MACAMBIRA, 1992), constituído de monzogranitos e sienogranitos cálcio-alcalinos (LEITE; DALL'AGNOL, 1994), intrusivo no Complexo Tonalítico Caracol e no Granodiorito Rio Maria. E Mata Surrão, de idade Pb-Pb em rocha total de  $2872 \pm 10$  Ma (GIBBS et al., 1986), localizado na porção sul da região de Redenção, e constitui-se de uma assembleia heterogênea de fácies monzograníticas (DALL'AGNOL et al., 2006).

O Grupo Rio Fresco é representado pelas rochas sedimentares clásticas de natureza plataformal, com sedimentos grosseiros na base gradando para mais finos, até sedimentos químicos no topo (HIRATA et al., 1982; DOCEGEO, 1988).

Os Granitos tipo A proterozoicos cujas datações apontam idades de 1,88 Ga (WIRTH et al., 1986; MACHADO et al., 1991; BARBOSA et al., 1995; DALL'AGNOL et al., 1999), são representados pelos corpos Seringa, Gradaús, São João e pelos granitos da Suíte Jamon, que incluem os granitos Musa, Jamon, Marajoara, Manda Saia, Bannach e Redenção (DALL'AGNOL et al., 2005; OLIVEIRA, 2001). São formados geralmente por monzogranitos e sienogranitos e, subordinadamente, álcali-feldspato granito, com assinatura geoquímica de granitos tipo-A.

### 1.3.2 Domínio Carajás (DC)

O Domínio Carajás é, segundo Dall'Agnol et al., (1997, 2006), dividido em Domínio de Transição (DT), que fica imediatamente acima do DRM, e Bacia Carajás (BC), que abrange toda a Serra dos Carajás. O termo "Domínio de Transição" foi usado por Dall'Agnol et al., (1997, 2006) para designar a região compreendida entre o Domínio Rio Maria e a Bacia Carajás e seria uma extensão do Terreno Mesoarqueano de Rio Maria intensamente deformada

pelos eventos neoarqueanos de formação da BC. Entretanto, Feio et al., (2012) mostraram que na área de Canaã dos Carajás, situada imediatamente a sul da Bacia Carajás, o magmatismo mesoarqueano é distinto daquele encontrado no Domínio Rio Maria e concluíram que, provavelmente, uma extensão da crosta de Canaã corresponderia ao substrato da Bacia Carajás de idade neoarqueana.

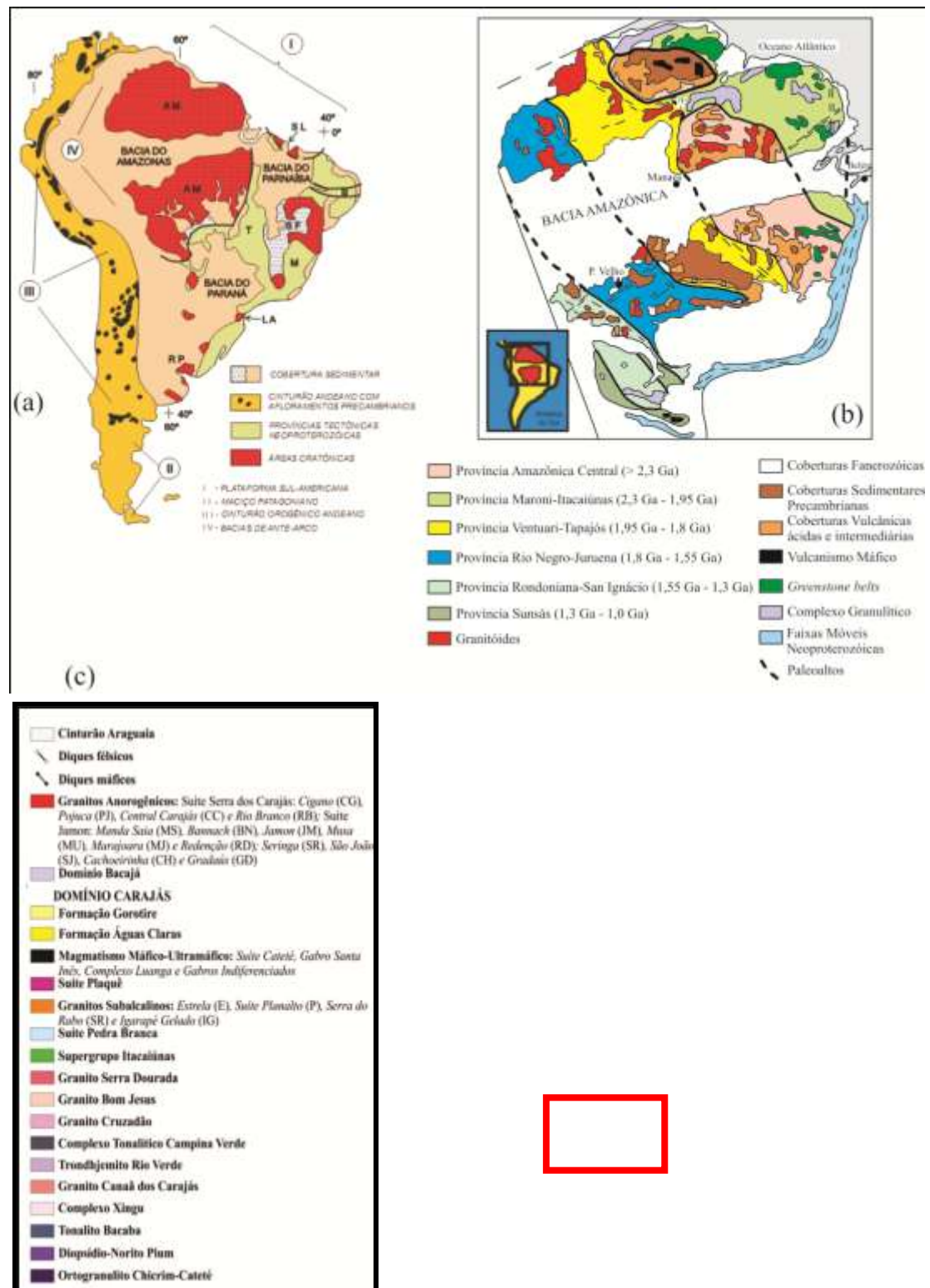
É no DT que afloram os corpos alongados de direção E-W descritos como rochas de alto grau metamórfico do Ortogranulito Chicrim-Cateté (VASQUEZ et al., 2008) e associações de noritos, quartzo-dioritos e ultramáficas do Diopsídio-Norito Pium (RICCI; CARVALHO 2006; SANTOS et al., 2012), anteriormente relacionados ao embasamento mesoarqueano denominado de Complexo Pium (ARAÚJO et al., 1988; ARAÚJO; MAIA, 1991; HIRATA et al., 1982). Segundo Pidgeon et al., (2000), este apresenta idade de 3,0 Ga e metamorfismo de 2,86 Ga. Porém, Santos et al., (2012), detalhando o Diopsídio-Norito Pium, encontrou idades Pb-Pb em zircão de  $2746 \pm 1$  Ma para estas rochas e as considera como de cristalização das mesmas, fazendo com que a origem metamórfica ou ígnea do Pium seja atualmente um assunto controverso. No entanto, estudos recentes indicam a existência de rochas ígneas charnockíticas (GABRIEL et al., 2010; FEIO et al., 2012) e granitoides neoarqueanos (GALARZA et al., 2012) intimamente associados ao Diopsídio-Norito Pium, sugerindo a existência de uma geração de rochas ígneas de idade similar à obtida por Santos et al., (2012).

Na BC, dominam as sequências metavulcanossedimentares do Supergrupo Itacaiúnas (2,76-2,73 Ga; MACHADO et al., 1991) e granitos diversos de 2,76 a 2,56 Ga (Complexo Granítico Estrela, Suíte Planalto, granitos Serra do Rabo, Igarapé Gelado, *Old* Salobo, Suíte Plaquê; BARROS et al., 1997; HUHNS et al., 1999; SARDINHA, 2002; BARROS et al., 2009; LINDENMAYER, 1990; ARAÚJO et al., 1988, respectivamente). O Complexo Granítico Estrela é formado predominantemente por monzogranitos, cuja idade é de 2,76 Ga, atribuída à cristalização destas rochas (BARROS et al., 2001; BARROS et al., 2009). A Suíte Planalto aflora exclusivamente na porção sul do Domínio Carajás, representando uma associação de rochas subalcalinas. Segundo Huhn et al., (1999), o Granito Planalto é um *stock* de composição granítica, milonitizado nas bordas, aflorando próximo à Vila Planalto. O Granito

Serra do Rabo é formado por dois *stocks* sintectônicos localizados próximo à terminação leste da Falha Carajás, constituído predominantemente por álcali-feldspato granitos, com sienogranitos subordinados e idade 2,74 Ga (SARDINHA, 2002; BARROS et al., 2009). O Granito Igarapé Gelado está localizado no extremo norte do Domínio Carajás (BARBOSA, 2004). É formado por granodioritos e monzogranitos, com tonalitos, leucomonzogranitos e sienogranitos subordinados. A datação de um monzogranito desta unidade forneceu idade de 2,73 Ga (BARBOSA, 2004), a qual foi interpretada como sua idade mínima de cristalização. O Granito *Old Salobo* aflora nos domínios do depósito de cobre do Salobo como um stock monzogranítico com textura milonítica a protomilonítica interpretado como um corpo colocado sob condições crustais mesozonais (LINDENMAYER, 1990). Machado et al., (1991), obtiveram idade 2,57 Ga para a colocação deste granito. Exceto a Suíte Plaquê, todo esse magmatismo granítico neoarqueano apresenta assinatura geoquímica similar aos granitos tipo-A (Complexo Estrela, BARROS et al., 2009; Granito Serra do Rabo, SARDINHA et al., 2006; Igarapé Gelado, BARROS et al., 2009). Na área de Canaã dos Carajás, Feio et al., (2012) distinguiram quatro principais eventos magmáticos, três de idade mesoarqueana e um de idade neoarqueana: (1) em 3,05-3,0 Ga, houve a formação do protólito do complexo de Pium, do Tonalito Bacaba e de rochas com idades semelhantes, como indicado por zircões herdados encontrados em unidades diferentes; (2) o segundo evento (2,96-2,93 Ga) foi marcado pela cristalização do Granito Canaã dos Carajás e pela formação de rochas mais antigas do Trondhjemito Rio Verde; (3) no terceiro evento (2,87-2,83 Ga), houve a formação do Complexo Tonalítico Campina Verde, do Trondhjemito Rio Verde e dos granitos Cruzadão, Bom Jesus e Serra Dourada; (4) no Neoarqueano, em 2,75-2,73 Ga, um grande evento magmático foi responsável pela formação dos granitos subalcalinos da Suíte Planalto, granitos sódicos da Suíte Pedra Branca e de rochas charnoquíticas.

## Suscetibilidade Magnética e Minerais Óxidos de Fe e Ti do Granito Boa Sorte-Domínio Carajás

Figura 2- (a) Mapa de localização do Cráton Amazônico no contexto da Plataforma Sul Americana; (b) Províncias Geocronológicas do Cráton Amazônico e; (c) Mapa geológico da Província Carajás.



Fonte: a) Modificado de Cordani e Sato (1999); b) Modificado de Tassinari e Macambira (1999); Modificado de Vasquez et al., (2008) e Almeida (2010).

#### **1.4 Geologia Local**

O Granito Boa Sorte ocorre como um batólito que compreende uma área de aproximadamente 220 km<sup>2</sup> e se dispõe alongado na direção E-W, condizente com a estruturação regional, chegando a medir 37 km em seu eixo maior. Aflora na forma de blocos *in situ* ou rolados, tanto em áreas de relevo de morro, quanto arrasadas, com cotas variando entre 240 e 440 m.

O Granito Boa Sorte é formado essencialmente por rochas de composição monzogranítica, exibindo ainda composição granodiorítica. Rodrigues (2011) determinou que estas rochas possuem variações mineralógicas e texturais que permitiram distinguir duas variedades petrográficas: Biotita Monzogranito (BMz) e Leucomonzogranito (LMz). A fácies BMz possui coloração vermelho acinzentado com níveis pretos caracterizados pelos minerais máficos, principalmente a biotita, sendo holocristalina, fanerítica, inequigranular fina a média e hololeucocrática (5% < Máficos < 10%). A textura porfiroclástica está presente nestas rochas e é observada pela presença de porfiroclastos de plagioclásio e microclina, imersos em uma matriz de granulação mais fina. A fácies LMz diferencia-se da fácies BMz pelo menor conteúdo em minerais máficos (M < 5%), normalmente exibindo um baixo grau de deformação (RODRIGUES, 2011).

#### **1.5 Justificativa**

Os estudos desenvolvidos por Rodrigues (2011) permitiram um avanço considerável na caracterização mineralógica e textural, como também na assinatura geoquímica e idade de formação das rochas do Granito Boa Sorte. No entanto, não se dispõe de nenhuma informação sobre o comportamento em termos de suscetibilidade magnética das diferentes fácies já caracterizadas deste corpo. Também é desconhecida a natureza dos minerais óxidos de Fe e Ti, assim como suas variações texturais. Sendo assim, a petrologia magnética ajudará a estimar as condições de cristalização do magma gerador dessas rochas, discutir seus processos evolutivos, além de mostrar as possíveis afinidades com outras unidades geológicas análogas do Domínio Carajás.

#### **1.6 Objetivos**

O presente estudo tem como objetivo geral executar o estudo de petrologia magnética e a caracterização dos minerais óxidos de Fe e Ti do Granito Boa

Sorte, SE do estado do Pará. Para tanto foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- 1) Determinar o comportamento magnético do Granito Boa Sorte;
- 2) Caracterizar os minerais óxidos de Fe e Ti presentes nos granitoides e suas feições texturais;
- 3) Estabelecer relações entre o conteúdo modal de minerais opacos e os valores de suscetibilidade magnética;
- 4) Caracterizar as principais fases minerais presentes nestas rochas e obter as suas composições químicas semiquantitativas.
- 5) Comparar o comportamento magnético dessa unidade com outros granitos análogos que ocorrem na Província Carajás.

## **1.7 Materiais e Métodos**

### **1.7.1 Pesquisa Bibliográfica**

Foi realizado um levantamento bibliográfico referente à geologia da Província Carajás, com ênfase no Bloco Carajás, a fim de compreender a geologia e evolução de terrenos arqueanos e proterozoicos baseado na interpretação das características petrográficas e mineralógicas dos corpos, principalmente de rochas graníticas tipo A. Foram pesquisados temas relacionados à petrologia magnética, suscetibilidade magnética e caracterização minerais óxidos de Fe e Ti em rochas ígneas e seu significado, assim como aplicações da composição mineral como marcador das condições de formação de magmas, além da consulta de livros e publicações sobre imagens e análises de MEV-EDS.

### **1.7.2 Suscetibilidade Magnética**

As medidas de suscetibilidade magnética foram realizadas em 60 amostras de mão no Laboratório de Petrologia Magnética do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, utilizando suscetibilímetro SM-30, fabricado pela *ZH INSTRUMENTS*, que permite medidas em materiais com SM variando até  $1 \times 10^{-7}$  SI. O tratamento estatístico dos dados foi realizado com o programa Minitab 16, por meio da elaboração de diagramas de probabilidade e histogramas de frequência.

### 1.7.3 Petrografia

Foram realizadas revisões dos aspectos petrográficos do Granito Boa Sorte. Esta revisão consistiu com descrição mesoscópica, seguida de estudos de lâminas delgadas polidas em microscópio ótico com ênfase na descrição mineralógica detalhada das relações texturais dos minerais opacos, complementada pelas informações microscópicas em luz transmitida. Os dados de análises modais de Rodrigues (2011) foram plotados em diagramas Q-A-P, Streckeisen (1976) e Q-(A+P)-M, Le Maitre et al. (2002), permitindo assim classificar adequadamente as rochas estudadas, conforme estabelecido pela Subcomissão de Nomenclatura das Rochas Ígneas.

### 1.7.4 Estudo de minerais óxidos de Fe e Ti

O estudo dos minerais óxidos de Fe e Ti foi realizado inicialmente por meio de microscopia ótica com luz refletida e complementado com a caracterização das fases de maior interesse por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As análises de MEV foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura – LABMEV do IG da UFPA e constaram na obtenção de imagens de elétrons retroespalhados e análises químicas semiquantitativas por EDS (*Energy Dispersive Spectrometry*) de fases minerais previamente selecionadas. O MEV utilizado foi um LEO-Zeiss modelo 1430 sob as seguintes condições: corrente do feixe de elétrons=90  $\mu$ A, voltagem de aceleração constante=20 kV, distância de trabalho=15 mm, tempo de contagem para aquisição dos elementos=30s. As lâminas polidas foram previamente metalizadas com carbono.

## **2 PETROGRAFIA**

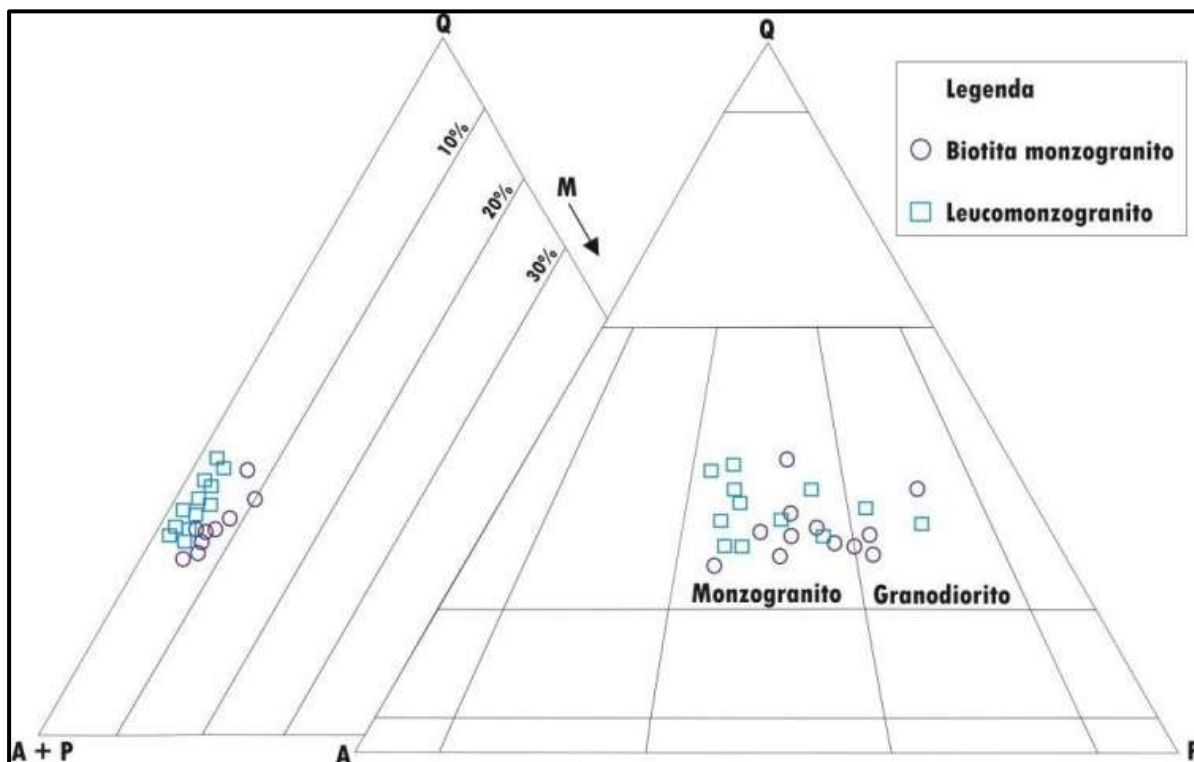
### **2.1 Composições Modais**

O Granito Boa Sorte é formado por rochas hololeucocráticas ( $M < 10\%$ ), faneríticas, variando de equigranular a inequigranular, granulação fina a média, localmente grossa. As rochas apresentam variados graus de deformação o que, por vezes, oblitera a textura granular hipidiomórfica primária. Possuem coloração variando de vermelho acinzentado a rosado, apresentando localmente pontuações escuras que correspondem aos minerais máficos.

Os dados das análises modais, quando plotados no diagrama Q-A-P (Figura 3 e Tabela 1 e 2; LE MAITRE et al., 2002, STRECKEISEN, 1976;), permitem a classificação do Granito Boa Sorte como sendo essencialmente monzogranítico, com uma pequena dispersão para o campo dos granodioritos. As variedades petrográficas apresentam mineralogia semelhante, com quartzo, microclina perítica e plagioclásio (Oligoclásio sódico  $An_{23-27}$ ) como minerais essenciais; biotita como mineral varietal; allanita, opacos, zircão, apatita, titanita e muscovita como minerais acessórios primários; e clorita, sericita-muscovita, epidoto, argilominerais e, por vezes, escapolita, carbonato e opacos, como fases secundárias.

De acordo com Rodrigues (2011), as variações mineralógicas e os valores modais de minerais máficos, principalmente o de biotita, permitiram a individualização de duas fácies petrográficas: Biotita Monzogranito (BMz;  $5\% < M < 10\%$ ); e Leucomonzogranito (LMz;  $M < 5\%$ ) (Figuras 4a e 4e, respectivamente). Os conteúdos modais de minerais opacos são baixos e geralmente não ultrapassam 1,0% da rocha total. As amostras da fácies BMz são as que apresentam as maiores concentrações médias de minerais opacos (0,27%), seguida de perto pelo LMz (0,21%).

Figura 3- Diagrama Q-(A+P)-M e Q-A-P, mostrando a distribuição modal no Granito Boa Sorte



Fonte: Modificado de Rodrigues (2011); Le Maitre et al., (2002); Streckeisen (1976).

## 2.2 Aspectos Texturais

Microscopicamente, as feições texturais desse corpo são um pouco variáveis. Com base na deformação dúctil das amostras foram identificados dois grupos texturais principais: rochas pouco deformadas (onde podem ser distinguidas mais facilmente texturas referentes ao estágio magmático, porém apresentando um maior grau de alteração hidrotermal) e rochas foliadas (rochas que sofreram um processo de recristalização mais intenso), predominantes em quase toda a extensão do corpo. É importante ressaltar que as variações texturais destas rochas não estão correlacionadas com as duas fácies anteriormente apresentadas, sendo o conteúdo de máficos utilizado para as futuras análises das rochas.

As rochas pouco deformadas apresentam coloração rosa acinzentado, aspecto isotrópico e textura granular hipidiomórfica média a grossa (Figura 4e), enquanto, as rochas foliadas distinguem-se do grupo anterior principalmente por apresentarem foliação milonítica pervasiva, forte à moderada, marcada pela orientação preferencial dos cristais de biotita e quartzo (Figura 4a), sendo que a textura magmática original foi obliterada e substituída por uma textura

milonítica e heterogranular, descrita por porfiroclastos de feldspatos com dimensões médias até 2 mm, em meio a uma matriz fina (< 1 mm) composta principalmente por neoblastos de feldspatos e quartzo.

O plagioclásio forma cristais subautomórficos a automórficos de granulação média a localmente grossa (até 7 mm) com contornos regulares e contatos retos ou ondulados com o quartzo. Em geral esses cristais são intensamente saussuritizados. Podem ocorrer em um mesmo cristal, zonas mais alteradas, em geral nas bordas, que tendem a invadir as porções centrais por meio dos planos de fraqueza, como clivagens, planos de macla ou fraturas, algumas vezes restando apenas “ilhas” de feldspato pouco alterado (Figura 4g). Nas rochas foliadas, ocorrem neoblastos de plagioclásio que apresentam granulação fina a muito fina, de contatos retos e em junções tríplexes, muitas vezes formando agregados entre si e os demais minerais félsicos (Figuras 4b e 4c), o que evidencia influência recristalização estática.

Os cristais de microclina, na variedade de rochas pouco deformadas, são subautomórficos a xenomórficos, de granulação média (em média 3 mm), localmente grossa (até 7 mm), contornos regulares onde podem ser observados contatos retilíneos à ondulados com o quartzo e irregulares com o plagioclásio (Figura 4f) onde chegam a desenvolver mirmequitas em bulbo ou de borda planar. Estes podem apresentar ainda macla em xadrez e finas lamelas de exsolução peritítica.

Os cristais de quartzo, segundo Barros e Dall’Agnol (1994), respondem mais prontamente à deformação do que os feldspatos e minerais máficos. Nas rochas pouco deformadas, as feições deformacionais mais importantes são a extinção ondulante moderada a forte, com formação de bandas de deformação e subgrãos (Figuras 4f e 4g).

Nas rochas foliadas, cristais de microclina e plagioclásio formam ainda porfiroclastos de granulação média (1 a 3 mm), por vezes com formas ocelares chegando a formar sombras de pressão. Nas amostras mais deformadas, podem apresentar ainda extinção ondulante fraca a moderada e fraturas em *kink bands*. No contato entre os feldspatos ocorre ainda mirmequitas em bulbo ou de borda planar invadindo os cristais de microclina (Figura 4c).

Na variedade de rochas foliadas é comum a presença de subgrãos de quartzo estirados na forma de *ribbons* por vezes centimétricos, formando

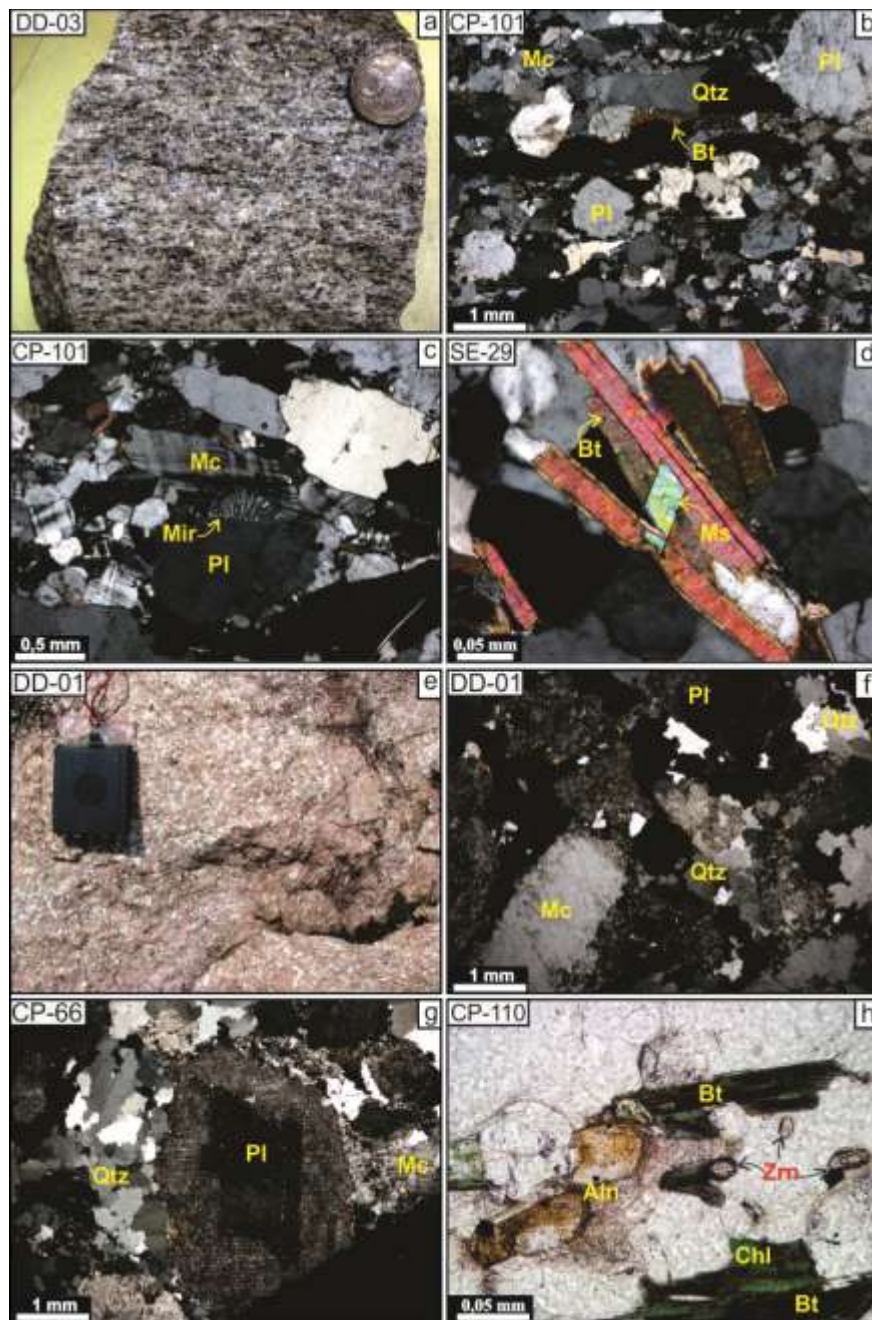
agregados entre si e fortemente orientados, bordejando os cristais maiores de feldspatos (Figura 4b).

A principal fase máfica é representada pela biotita. Nas variedades do grupo de rochas foliadas estas apresentam granulação fina a muito fina, formando lamelas automórficas a subautomórficas orientadas segundo o plano de foliação da rocha, por vezes com alteração moderada para clorita e, mais restritamente, epidoto, comumente exibindo um pleocroísmo forte a moderado. Ocorrem em meio aos neoblastos de feldspatos e quartzo, porém não apresentam feições nítidas de deformação (Figura 4d), o que sugere que estes cristais se reequilibraram após o final do último evento deformacional. Em relação à variedade do grupo de rochas pouco deformadas, as biotitas apresentam alteração parcial e muitas vezes total para clorita, além de titanita e epidoto, que ocorrem ao longo dos planos de clivagem da clorita, formando cristais subautomórficos. Apresenta inclusões de zircão e forma agregados máficos com opacos e allanita (Figura 4h).

Os minerais acessórios nas rochas foliadas, bem como nas pouco deformadas, são representados pela apatita, zircão, titanita e allanita. A apatita são cristais de granulação fina (< 0,4 mm), automórficos à subautomórficos, prismáticos, em geral com partição basal característica. O zircão são cristais de granulação muito fina, automórficos e zonados, que ocorrem associados aos agregados máficos, incluso na biotita onde geralmente ocorrem halos pleocróicos, ou ainda incluso na titanita, na allanita, e nos minerais opacos. A titanita ocorre com formas subautomórficas a xenomórficas, de granulação fina à localmente média (0,2 a 1,5 mm), ou como produto de alteração da biotita. E por fim, a allanita são cristais subautomórficos a automórficos, de granulação fina, geralmente associados aos agregados máficos, podendo ocorrer como inclusões na biotita.

*Suscetibilidade Magnética e Minerais Óxidos de Fe e Ti do Granito Boa Sorte-Domínio Carajás*

Figura 4- a) Aspecto geral macroscópico da fácies BMz foliada, mostrando uma foliação penetrativa, marcada pela orientação preferencial dos cristais de biotita, feldspatos e quartzo; b) aspecto geral microscópico onde são observados porfiroclastos de plagioclásio (Pl), microclina (Mc) e *ribbons* de quartzo (Qtz) em meio aos agregados de neoblastos; c) mirmequita (Mir) em bulbo invadindo a microclina (Mc) no contato com o plagioclásio (Pl). Notar os neoblastos daquele mineral em contatos retos e junções triplíceis na porção esquerda da fotografia; d) cristais de biotita (Bt) e muscovita (Ms) subautomórficos e sem sinais de deformação; e) Aspecto macroscópico da fácies LMz pouco deformada; f) Notar a forma subautomórfica da microclina (Mc), a intensa saussuritização do plagioclásio (Pl) e os subgrãos de quartzo (Qtz); g) cristal de plagioclásio intensamente saussuritizado nas bordas e com núcleo relativamente preservado; h) cristais de biotita intensamente cloritizados e associados a allanita (Aln) e zircão (Zr).



Fonte: Modificado de Rodrigues (2011).

Suscetibilidade Magnética e Minerais Óxidos de Fe e Ti do Granito Boa Sorte- Domínio Carajás

Tabela 1: Dados de composições modais do Granito Boa Sorte. Fácies BMz.

Fácies	BMz													
	CMD-03	CP-68B	SE-39	SE-29	DD-12	DD-06	SE-24	DD-04	EDC-38	CP-38	DD-05	ADK-81	DDA-10	Média
<b>Quartzo</b>	29,2	25,3	28,4	29,3	37,8	31,0	29,5	26,2	37,2	33,6	27,9	36,0	31,2	31,0
<b>Álcali-feldspato</b>	30,3	40,8	20,8	26,1	25,9	28,0	33,3	21,6	4,9	12,1	25,5	19,1	32,4	24,7
<b>Plagioclásio</b>	35,4	28,9	43,9	37,2	29,1	32,9	31,6	45,7	48,3	44,5	40,2	31,5	28,6	36,8
<b>Biotita</b>	4,9	4,9	4,9	6,7	6,4	7,9	4,8	5,6	6,6	9,7	5,8	10,5	5,9	6,5
<b>Opacos<sup>1</sup></b>	0,2	0,1	0,1	0,1	0,4	0,2	0,1	0,4	0,1	Tr	0,1	1,1	0,7	0,3
<b>Titanita</b>	-	Tr	Tr	-	0,1	Tr	Tr	-	-	Tr	Tr	Tr	-	0,1
<b>Zircão</b>	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	0,1	Tr	0,1
<b>Apatita</b>	-	-	-	Tr	Tr	-	-	Tr	-	Tr	-	Tr	-	Tr
<b>Allanita</b>	Tr	Tr	Tr	0,3	Tr	Tr	0,2	0,1	0,1	Tr	0,4	0,3	-	0,2
<b>Muscovita</b>	Tr	Tr	1,8	0,2	0,3	Tr	0,3	Tr	Tr	Tr	-	1,4	1,2	0,9
<b>Clorita</b>	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	0,4	-	-	Tr	Tr	-	0,4
<b>Epidoto</b>	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	0,1	Tr	Tr	0,1
<b>Clinozoisita</b>	-	-	Tr	Tr	Tr	-	Tr	-	-	-	-	Tr	-	Tr
<b>Escapolita</b>	-	-	Tr	0,1	Tr	-	Tr	-	2,8	-	-	Tr	-	1,5
<b>Félsicos</b>	94,9	95,0	94,9	92,8	93,1	91,9	94,7	93,5	90,4	90,2	93,6	88,0	93,4	92,8
<b>Máficos</b>	5,1	5,0	5,0	7,1	6,9	8,1	5,1	6,5	6,8	9,7	6,3	12,0	6,6	6,9
<b>Quartzo*</b>	30,8	26,6	30,5	31,6	40,7	33,7	31,3	28,0	41,2	37,3	29,8	41,6	33,8	33,6
<b>Álcali-feldspato*</b>	31,9	42,9	22,3	28,2	27,9	30,5	35,3	23,1	5,4	13,4	27,2	22,1	35,1	26,6
<b>Plagioclásio*</b>	37,3	30,4	47,2	40,2	31,4	35,8	33,5	48,9	53,4	49,3	42,9	36,4	31,0	39,8

Fonte: Modificado de Rodrigues (2011) / 1- Ilmenita, magnetita, hematita, calcopirita e pirita / \*Recalculado a 100% / - Mineral ausente / Tr- Mineral Traço de contagem inferior a 0,1%.

Suscetibilidade Magnética e Minerais Óxidos de Fe e Ti do Granito Boa Sorte- Domínio Carajás

Tabela 2: Dados de composições modais do Granito Boa Sorte. Fácies LMz.

(Continua)

Fácies	LMz												
	CP-66	DD-03	ADK-32	CP-106	ADK-41	CP-108	EDC-46A	SE-25	DDA-22	DDA-03	CP-107A	DD-01	DDA-20
<b>Amostra/ Mineral (%)</b>													
<b>Quartzo</b>	31,1	34,6	37,4	29,3	30,9	27,8	46,2	27,1	36,8	26,8	32,6	30,1	26,5
<b>Álcali-feldspato</b>	38,7	25,3	31,9	27,3	16,4	39,8	38,6	37,1	34,0	12,6	20,1	15,3	30,3
<b>Plagioclásio</b>	27,4	34,9	24,3	40,9	51,3	29,9	14,2	31,0	26,1	57,3	42,6	49,9	38,2
<b>Biotita</b>	-	3,7	Tr	1,9	0,5	0,9	0,2	3,6	3,0	2,7	3,8	0,3	4,4
<b>Opacos<sup>1</sup></b>	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	-	0,1	0,1	0,6	0,3	-	0,3
<b>Titanita</b>	-	0,1	Tr	-	Tr	Tr	-	Tr	-	-	0,1	-	-
<b>Zircão</b>	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	-	0,2	Tr	Tr	Tr	Tr	0,1
<b>Apatita</b>	-	Tr	-	-	-	Tr	-	Tr	-	-	-	-	-
<b>Allanita</b>	0,1	Tr	0,2	-	-	Tr	-	0,2	-	-	0,3	0,1	0,1
<b>Muscovita</b>	-	1,0	Tr	Tr	0,7	Tr	-	0,5	Tr	Tr	-	-	0,1
<b>Clorita</b>	2,0	Tr	2,0	0,3	Tr	1,5	0,8	0,2	Tr	-	-	3,2	Tr
<b>Epidoto</b>	0,4	Tr	2,2	Tr	0,1	Tr	-	Tr	Tr	-	-	0,6	-
<b>Clinozoisita</b>	-	Tr	Tr	-	-	Tr	-	-	-	-	-	0,3	-
<b>Escapolita</b>	0,2	0,3	1,8	-	Tr	-	-	-	-	-	-	0,2	-
<b>Félsicos</b>	97,2	95,8	93,6	97,5	99,3	97,5	99,0	95,7	96,9	96,7	95,3	95,3	95,1
<b>Máficos</b>	2,2	3,9	2,4	2,3	0,6	2,5	1,0	4,3	3,1	3,3	4,5	3,6	4,9
<b>Quartzo*</b>	32,0	36,5	40,0	30,1	31,3	28,5	46,7	28,5	38,0	27,7	34,2	31,6	27,9
<b>Álcali-feldspato*</b>	39,8	26,7	34,1	28,0	16,6	40,8	39,0	39,0	35,1	13,0	21,1	16,1	31,9
<b>Plagioclásio*</b>	28,2	36,8	26,0	41,9	52,0	30,7	14,3	32,6	26,9	59,3	44,7	52,4	40,2

Suscetibilidade Magnética e Minerais Óxidos de Fe e Ti do Granito Boa Sorte- Domínio Carajás

Tabela 3: Dados de composições modais do Granito Boa Sorte. Fácies LMz.

(Conclusão)

<b>Fácies</b>	<b>LMz</b>														
<b>Amostra/ Mineral (%)</b>	<b>DDA-20</b>	<b>DDA-17</b>	<b>ADK-34</b>	<b>EDC-45</b>	<b>DDA-01</b>	<b>DD-13</b>	<b>DDA-21</b>	<b>EDC-24</b>	<b>DD-02</b>	<b>EDC-36A</b>	<b>EDC-55</b>	<b>CP-110</b>	<b>EDC-54B</b>	<b>EDC-43</b>	<b>Média</b>
<b>Quartzo</b>	26,5	28,8	30,8	27,5	34,2	38,6	29,3	31,5	37,5	36,4	34,3	35,2	31	30,6	32,4
<b>Álcali-feldspato</b>	30,3	43,9	30,7	43,8	24,5	25,5	34,6	30,5	35,5	22,9	38,1	34,7	41,9	40,7	31,3
<b>Plagioclásio</b>	38,2	22,9	33,9	23,9	39,2	31,8	32,1	32,4	22,3	39,3	24,1	26,9	23,7	25,7	32,5
<b>Biotita</b>	4,4	3,9	3,9	4,3	0,7	2,9	3,9	4,1	3,3	0,9	2,2	2,7	2,7	2,9	2,6
<b>Opacos</b>	0,3	0,5	Tr	0,3	0,3	0,1	Tr	0,6	0,3	0,1	0,4	0,3	0,5	0,1	0,3
<b>Titanita</b>	-	-	Tr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Tr	Tr	0,1
<b>Zircão</b>	0,1	Tr	0,1	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	-	Tr	Tr	Tr	0,1
<b>Apatita</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Tr
<b>Allanita</b>	0,1	-	0,2	0,1	Tr	-	0,1	Tr	0,1	-	Tr	0,1	Tr	Tr	0,1
<b>Muscovita</b>	0,1	Tr	0,1	0,1	-	0,3	-	0,7	0,7	0,3	-	-	Tr	-	0,5
<b>Clorita</b>	Tr	-	0,1	Tr	1,0	0,2	-	0,2	-	0,1	0,9	-	-	-	1,0
<b>Epidoto</b>	-	Tr	0,2	-	-	-	-	Tr	-	Tr	-	-	Tr	Tr	0,7
<b>Clinozoisita</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3
<b>Escapolita</b>	-	-	-	-	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,52
<b>Félsicos</b>	95,1	95,6	95,5	95,3	97,9	96,2	96	95,1	96	98,9	96,5	96,8	96,6	97,0	96,5
<b>Máficos</b>	4,9	4,4	4,3	4,7	2,0	3,2	4,0	4,9	3,7	1,1	3,5	3,1	3,2	3,0	3,2
<b>Quartzo*</b>	27,9	30,1	32,3	28,9	34,9	40,3	30,5	33,4	39,3	36,9	35,5	36,4	32,1	31,5	33,7
<b>Álcali-feldspato*</b>	31,9	45,9	32,2	46,0	25,0	26,6	36,0	32,3	37,3	23,2	39,5	35,8	43,4	42,0	32,6
<b>Plagioclásio*</b>	40,2	24,0	35,5	25,1	40,0	33,2	33,4	34,3	23,4	39,9	25,0	27,8	24,5	26,5	33,8

Fonte: Modificado de Rodrigues (2011) / 1- Ilmenita, magnetita, hematita, calcopirita e pirita / \*Recalculado a 100% / - Mineral ausente / Tr- Mineral Traço de contagem inferior a 0,1%.

### **3 PETROLOGIA MAGNÉTICA**

#### **3.1 Introdução**

Petrologia Magnética é a integração dos estudos de suscetibilidade magnética com a caracterização dos minerais óxidos de Fe e Ti e petrologia convencional para caracterizar a composição, abundância, microestrutura e paragénesese de minerais magnéticos, bem como para definir os processos que criaram, alteraram e/ou destruíram os minerais magnéticos nas rochas (CLARK, 1999). Segundo este mesmo autor, as propriedades magnéticas de uma rocha dependem da partição do Fe entre os minerais óxidos de Fe e Ti, fortemente magnéticos, e as fases fracamente magnéticas (silicatos, carbonatos, etc.). Esta partição depende, por sua vez, da composição química, do estado de oxidação do Fe e das condições petrogenéticas.

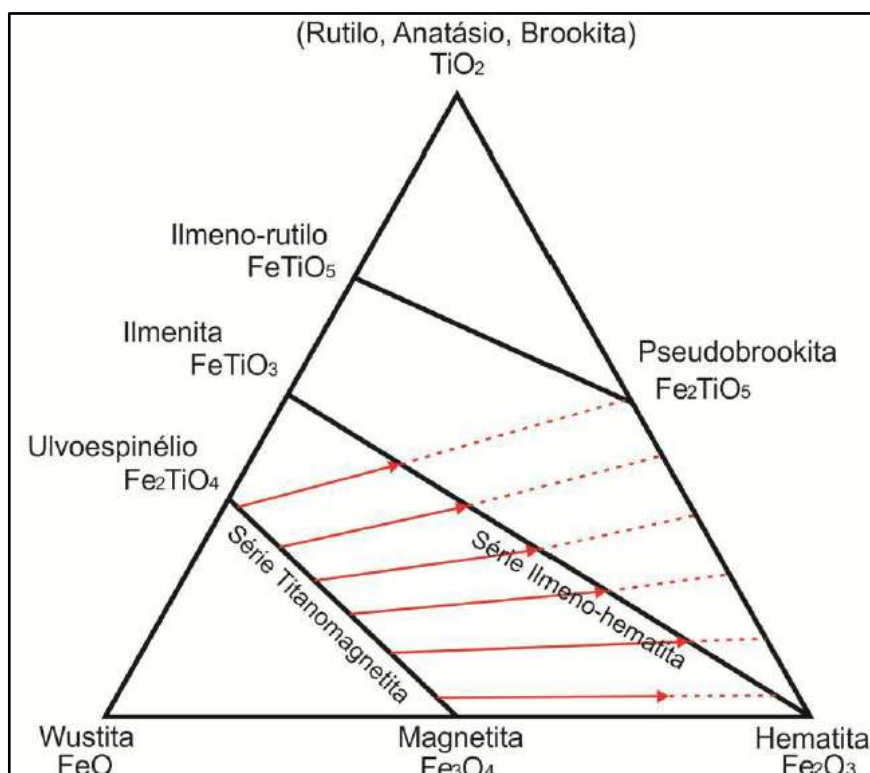
A suscetibilidade magnética (SM) de uma rocha está relacionada à quantidade, natureza, tamanho dos grãos e modo de distribuição dos minerais ferromagnéticos nela contidos. O equilíbrio desses minerais é controlado pelas condições físico-químicas, que são responsáveis pela intensidade e estabilidade da SM no decorrer do tempo. Além disso, as rochas mostram características magnéticas similares às dos minerais ferromagnéticos que elas contêm. Um dos fatores que favorece a utilização da SM é a relativa rapidez com que um grande número de medidas pode ser obtido, sem haver destruição dos minerais magnéticos presentes na rocha.

Haggerty (1979) dividiu os minerais magnéticos formadores de rocha em: a) minerais formados por óxidos de Fe e Ti (visualizados no diagrama FeO-TiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Figura 5); b) sulfetos à base de Fe, Ni e S; e c) ligas metálicas de Fe, Ni e Co. Além destes, podem existir soluções sólidas entre os componentes de cada sistema, sendo que as propriedades magnéticas dos minerais formadores dessas soluções variam em função do grau de solubilidade do sólido. As composições dos minerais individuais são controladas por suas temperaturas iniciais de formação, pela composição química da rocha ou magma, pela presença do *solvus* ao longo da solução sólida e pela  $fO_2$  e  $fS_2$ .

Os primeiros estudos relacionados à SM de granitoides do Cráton Amazônico foram elaborados por Dall'Agnol et al., (1988). Posteriormente,

outros estudos detalhados foram realizados a fim de verificar as diferenças petrográficas e geoquímicas observáveis nestas rochas e nas fácies de um mesmo corpo granítico, que podiam estar relacionadas à variação do conteúdo de magnetita e, por sua vez, à variação de SM (MAGALHÃES, 1991; MAGALHÃES; DALL'AGNOL, 1991; MAGALHÃES; DALL'AGNOL, 1992).

Figura 5- Diagrama Ternário do sistema  $TiO_2$ -FeO- $Fe_2O_3$ , mostrando os minerais óxidos de Fe e Ti mais comuns. As setas em vermelho indicam a direção do aumento da oxidação com razão Fe e Ti constante e as linhas pretas as soluções sólidas entre: 1) magnetita- ulvoespínélio (série titanomagnetita); 2) hematita-ilmenita (série ilmeno-hematita); 3) ilmeno-rutilo-pseudobrookita.



Fonte: Haggerty (1979).

### 3.2 Suscetibilidade Magnética (SM)

Foram realizadas neste trabalho medidas de suscetibilidade magnética (SM) em 60 amostras representativas do Granito Boa Sorte. Diversas medidas foram efetuadas (em média três) em superfícies planas de cada amostra e a média aritmética das medidas efetuadas foi assumida como representativa daquela amostra.

Os valores de SM (Tabela 3) do Granito Boa Sorte variam de  $0,0027 \times 10^{-3}$  (valor mínimo) a  $27,8000 \times 10^{-3}$  Slv (valor máximo), com média de  $3,9045 \times 10^{-3}$ .

*Suscetibilidade Magnética e Minerais Óxidos de Fe e Ti do Granito Boa Sorte-  
Domínio Carajás*

10<sup>-3</sup> Slv. Nota-se que 38% das amostras possuem SM com valor superior ao valor médio do corpo.

Tabela 4: Dados de suscetibilidade magnética (SM) do Granito Boa Sorte. (Continua)

<b>População</b>	<b>Amostras</b>	<b>Media (10<sup>-3</sup> Slv)</b>	<b>Log (K)</b>	<b>Opacos</b>	<b>Fácies</b>
B	EDC-57	27,8000	-1,5560	?	LMz
B	CP-109A	10,7167	-1,9699	?	BMz
B	SE-25	10,4467	-1,9810	0,1	LMz
B	DDA-22	9,3333	-2,0300	0,1	LMz
B	SE-29	8,1200	-2,0904	0,1	BMz
B	DDA-14	7,0967	-2,1489	?	BMz
B	DD-12	6,5267	-2,1853	0,4	BMz
B	DDA-03	6,4467	-2,1907	0,6	LMz
B	CP-107A	6,2133	-2,2067	0,3	LMz
B	DD-01	6,1067	-2,2142	0	LMz
B	DD-06	5,6367	-2,2490	0,2	BMz
B	DDA-12	5,6267	-2,2497	?	LMz
B	DDA-20	5,4900	-2,2604	0,3	LMz
B	SE-24	5,3033	-2,2755	0,1	BMz
B	DDA-17	5,2133	-2,2829	0,5	LMz
B	DDA-16A	4,8667	-2,3128	?	LMz
B	DDA-19	4,6033	-2,3369	?	LMz
B	ADK-34	4,5233	-2,3445	Tr	LMz
B	DDA-18	4,4900	-2,3478	?	LMz
B	DD-04	4,4867	-2,3481	0,4	BMz
B	EDC-45	4,2667	-2,3699	0,3	LMz
B	EDC-38	4,2433	-2,3723	0,1	BMz
B	DDA-09	3,9500	-2,4034	?	LMz
B	DDA-01	3,8600	-2,4134	0,3	LMz
B	DD-13	3,8067	-2,4195	0,1	LMz
B	DDA-21	3,7883	-2,4216	Tr	LMz
B	EDC-24	3,3733	-2,4719	0,6	LMz
B	EDC-46A	3,3133	-2,4797	0	LMz
B	DD-02	3,2533	-2,4877	0,3	LMz
B	ADK-35B	3,1467	-2,5021	?	LMz
B	CP-38	3,1067	-2,5077	Tr	BMz
B	EDC-36A	3,0450	-2,5164	0,1	LMz
B	EDC-55	3,0344	-2,5179	0,4	LMz
B	DD-05	2,8100	-2,5513	0,1	BMz
B	SE-27	2,8000	-2,5528	?	LMz
B	CP-110	2,7633	-2,5586	0,3	LMz
B	ADK-81	2,5900	-2,5867	1,1	BMz
B	CP-107B	2,5633	-2,5912	?	LMz
B	DDA-10	2,3800	-2,6234	0,7	BMz

*Suscetibilidade Magnética e Minerais Óxidos de Fe e Ti do Granito Boa Sorte-Domínio Carajás*

<b>População</b>	<b>Amostras</b>	<b>Media (10<sup>-3</sup> Slv)</b>	<b>Log (K)</b>	<b>Opacos</b>	<b>Fácies</b>
B	EDC-54B	2,2700	-2,6440	0,5	LMz
B	DDA-11	2,2333	-2,6510	?	BMz
B	EDC-43	2,1733	-2,6629	0,1	LMz
B	DDA-24	1,9967	-2,6997	?	LMz
A	CP-66	1,6867	-2,7730	0,1	LMz
A	CMD-03	1,6767	-2,7756	0,2	BMz
A	DDA-15	1,6700	-2,7773	?	BMz
A	CP-68B	1,3300	-2,8761	0,1	BMz
A	EDC-37	1,2975	-2,8869	?	LMz
A	DD-07	1,2367	-2,9077	?	BMz
A	DD-03	1,1550	-2,9374	0,1	LMz
A	ADK-32	0,9623	-3,0167	0,2	LMz
A	CP-106	0,8387	-3,0764	0,1	LMz
A	EDC-56B	0,5967	-3,2243	?	LMz
A	ADK-41	0,5257	-3,2793	0,1	LMz
A	CP-108	0,5190	-3,2848	0,1	LMz
A	PT-65	0,3940	-3,4045	?	LMz
A	SE-33A	0,3280	-3,4841	?	LMz
A	SE-39	0,1673	-3,7764	0,1	BMz
A	ADK-33	0,0667	-4,1761	?	LMz
A	CP-67	0,0027	-5,5740	?	LMz

?-Conteúdo de opacos não determinado;

(Conclusão)

Os parâmetros estatísticos das amostras estudadas são apresentados na tabela 4. O histograma e polígono de frequência (Figura 6a) mostraram, de maneira geral, que a distribuição das amostras neste corpo é unimodal, com o pico máximo em torno dos valores de log (K) -2,5 e -2,25 ( $3,162277 \times 10^{-3}$  e  $5,623413 \times 10^{-3}$  Slv, respectivamente).

Os dados de SM quando plotados no gráfico de probabilidade normal possibilitam a separação de 2 (duas) populações ou grupos, designados genericamente de A e B, com características magnéticas distintas (Figuras 6a e 6b), onde os valores de SM aumentam no sentido da população A para a população B. Tais populações foram definidas a partir de segmentos de reta com diferentes inclinações, os quais cobrem intervalos distintos de SM, partindo dos menores para os maiores valores de SM, e seus parâmetros estatísticos são sumarizados na tabela 5. Tanto a população A, quanto a população B, englobam amostras das fácies Biotita Monzogranito e Leucomonzogranito, sendo a população A, composta predominantemente por amostras da fácies Leucomonzogranítica.

Tabela 5: Parâmetros estatísticos dos dados de SM do Granito Boa Sorte.

<b>Parâmetros Estatísticos</b> <b>Número de Amostras= 60</b>	<b>K (x10<sup>-3</sup>Slv)</b>
Média	3,9045
Mediana	3,1267
Média Geométrica	2,3427
Variância	16,0233
Desvio Padrão	4,0029
Valor Mínimo	0,0027
Valor Máximo	27,8000

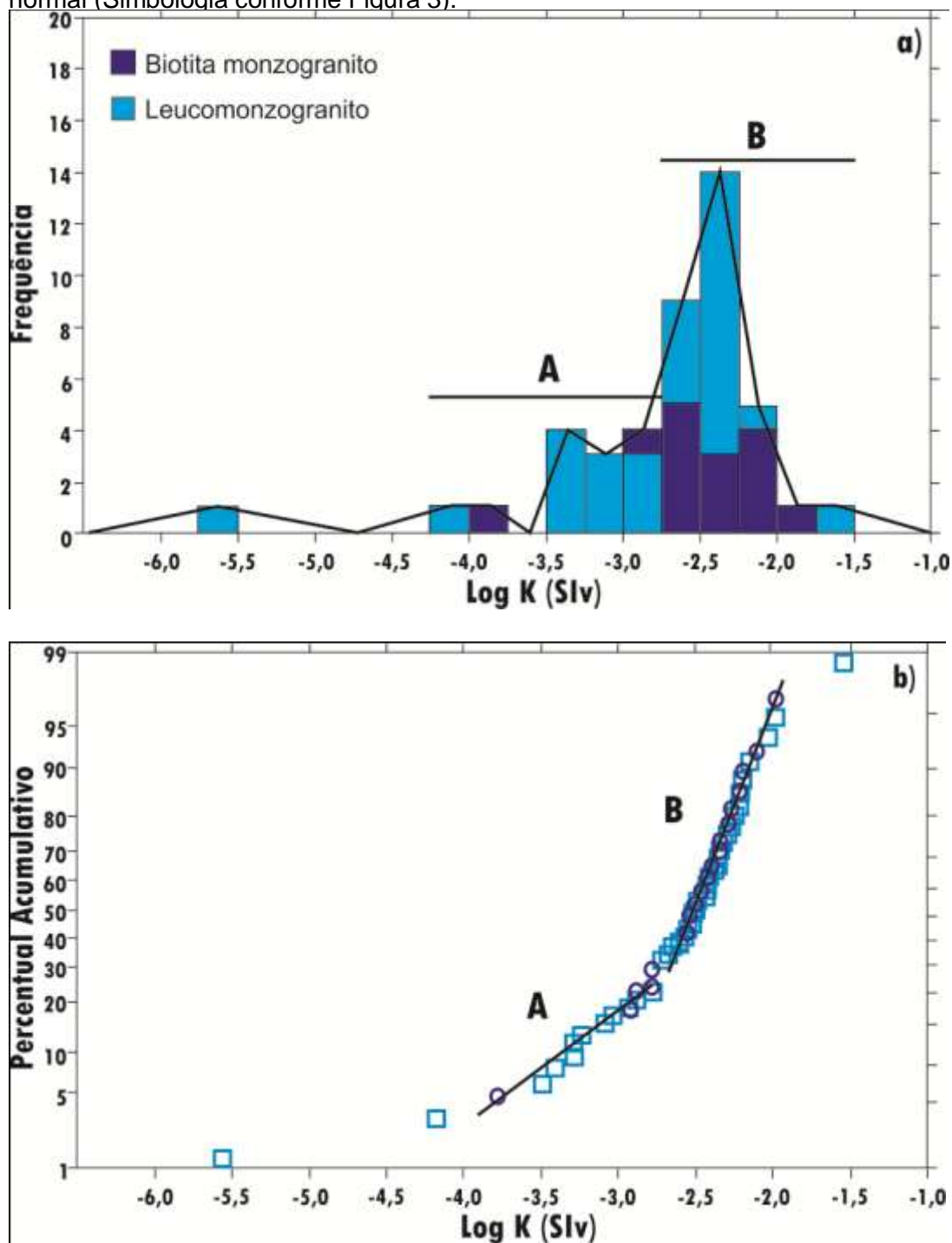
Tabela 6: Parâmetros estatísticos das duas populações de SM do Granito Boa Sorte.

<b>Parâmetros Estatísticos</b>	<b>K (x10<sup>-3</sup>Slv)</b>	
	<b>A</b>	<b>B</b>
Média	1,3983	4,9785
Mediana	0,9005	4,0967
Média Geométrica	0,5843	4,2481
Variância	5,7199	16,7472
Desvio Padrão	2,3916	4,0923
Valor Mínimo	0,0027	1,9967
Valor Máximo	1,6867	27,8000

A população A, composta por 29,4% de amostras da fácies Biotita Monzogranito e 70,5% por amostras da fácies Leucomonzogranito, corresponde às amostras de mais baixa SM, onde englobam aproximadamente 28% das amostras estudadas e apresentam valores situados no intervalo de  $0,0027 \times 10^{-3}$  a  $1,6867 \times 10^{-3}$  Slv, com valor médio de  $1,3983 \times 10^{-3}$  Slv (Tabela 4; Figuras 6a e 6b).

A população B, composta tanto por amostras da fácies Biotita Monzogranito (30,2%) quanto por amostras da fácies Leucomonzogranito (60,7%), com 71% do total de amostras, apresenta valores de SM entre  $1,9967 \times 10^{-3}$  e  $27,8000 \times 10^{-3}$  Slv com média de  $4,9785 \times 10^{-3}$  Slv (Tabela 4; Figuras 6a e 6b).

Figura 6- a) Histograma e polígono de frequência, referente aos dados de suscetibilidade magnética do Granito Boa Sorte; b) Gráfico de probabilidade normal (Simbologia conforme Figura 3).



Fonte: elaborado pela autora.

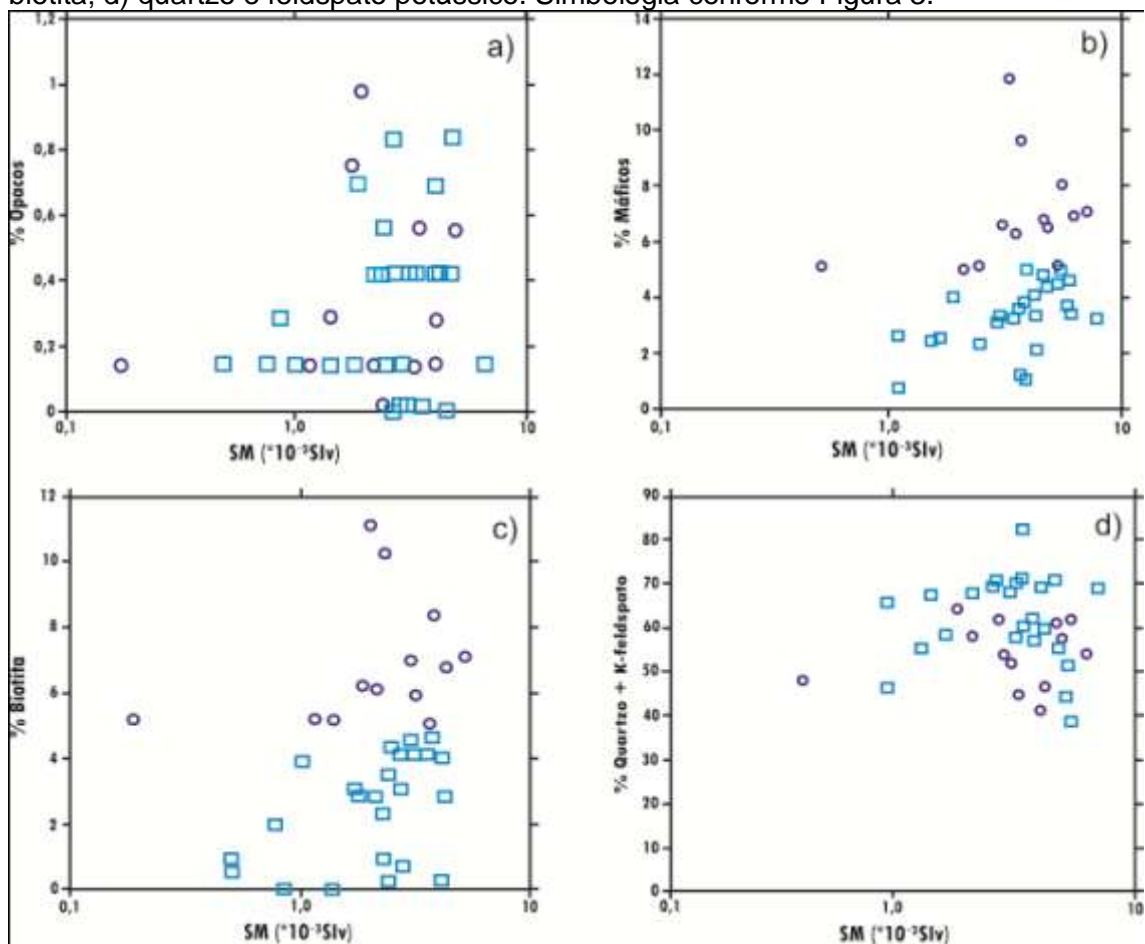
### **3.3 Relação entre Suscetibilidade Magnética e Composições Modais**

As análises modais inseridas neste trabalho foram obtidas por Rodrigues (2011), que realizou estudos petrográficos detalhados no Granito Boa Sorte. As proporções modais de minerais opacos, biotita, quartzo e feldspato potássico, bem como total de máficos serão confrontadas com as variações de suscetibilidade magnética encontradas no pluton granítico, de modo a entender as possíveis relações entre essas variáveis.

O conteúdo modal de minerais opacos do Granito Boa Sorte varia entre 0,1% e 1,0%. As amostras da fácies LMz apresentam os maiores valores modais de opacos, por vezes superiores a 0,4%, embora existam algumas amostras com baixos conteúdos destes minerais. Na fácies BMz, são mais comuns valores modais menores ou iguais a 0,4%, apesar de raras amostras apresentarem teores modais superiores ou iguais a 0,5%.

Nota-se na correlação entre os valores SM e o conteúdo modal de minerais opacos das fácies do Granito Boa Sorte, uma sutil correlação positiva, além de uma forte superposição entre as amostras deste corpo (Figura 7a). Quanto ao conteúdo de minerais máficos, observa-se uma clara correlação positiva com os valores de SM (Figura 7b), havendo um expressivo aumento destas variáveis no sentido dos LMz em direção à fácies BMz. Comportamento semelhante é observado para biotita (Figura 7c). Já para a somatória quartzo e feldspato potássico, ao ser correlacionada com os valores de SM, mostra um comportamento diferente dos anteriores, apresentando tendência geral à uma correlação negativa com a SM (Figura 7d).

Figura 7- Diagramas binários mostrando as relações entre os valores de suscetibilidade magnética (SM) e os conteúdos modais de: a) opacos; b) máficos; c) biotita; d) quartzo e feldspato potássico. Simbologia conforme Figura 3.



Fonte: elaborado pela autora.

### 3.4 Relações entre Suscetibilidade Magnética e Composições Químicas

As composições químicas médias, compiladas de Rodrigues (2011), para elementos maiores do Granito Boa Sorte podem ser vistas na Tabela 6. As amostras estudadas mostram uma correlação positiva entre os valores de SM com os valores dos óxidos  $Fe_2O_3t$ ,  $MgO$  e  $TiO_2$  (Figuras 8a, 8b e 8c), de modo geral, com crescimento gradual nos valores de SM paralelamente ao aumento dos valores destes óxidos. Estas correlações deixam clara a relação existente entre as variações de SM e os conteúdos de óxidos constituintes dos minerais máficos, confirmando o indicado pelos dados modais. Observa-se ainda uma forte correlação negativa entre os valores de SM e os óxidos de  $SiO_2$  e  $K_2O$  (Figura 8d), semelhante ao que foi constatado para as somas dos valores modais de quartzo e K-feldspato.

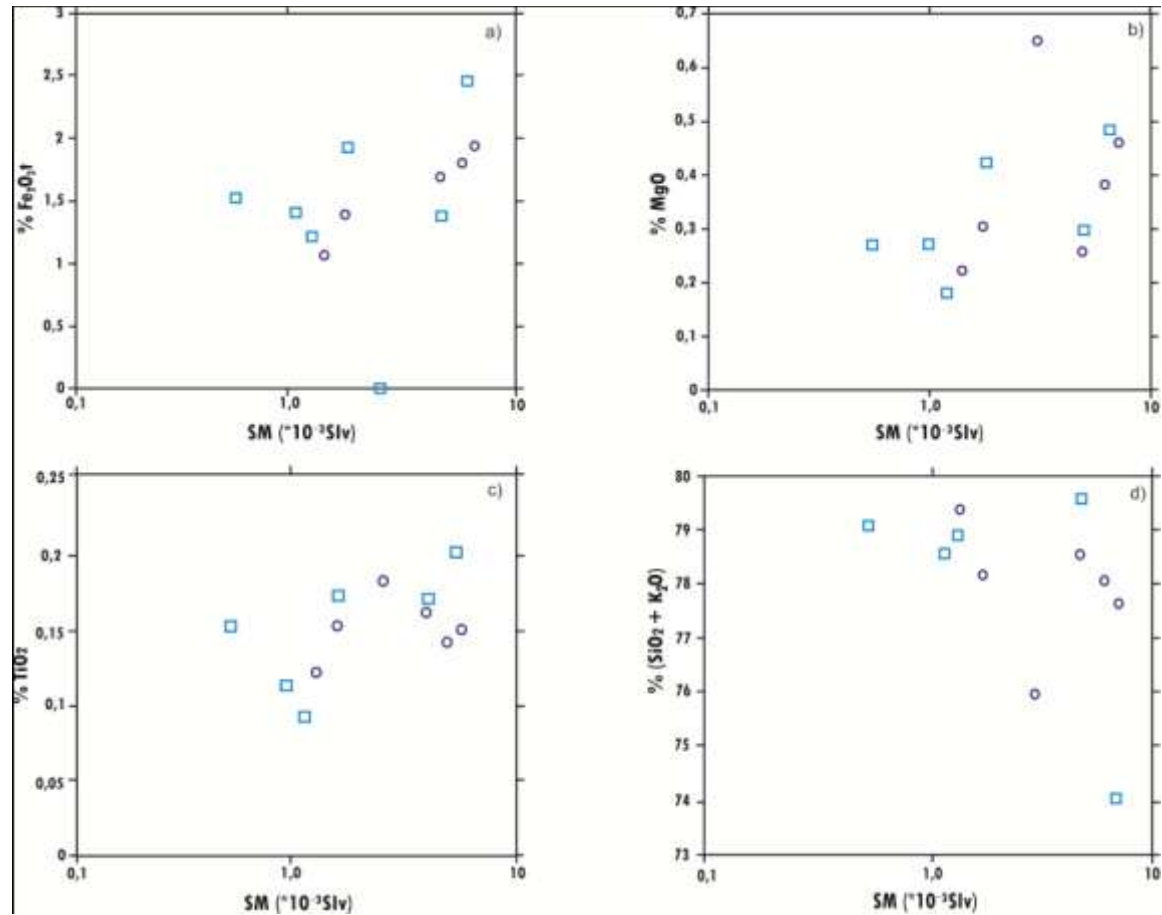
Suscetibilidade Magnética e Minerais Óxidos de Fe e Ti do Granito Boa Sorte- Domínio Carajás

Tabela 7: Composições químicas médias (elementos maiores) e valores de suscetibilidade magnética do Granito Boa Sorte.

Fácies	BMz						LMz						
	Amostras/ Óxidos (%)	CP-68B	CMD-03	DD-05	DD-04	DD-06	DD-12	CP-108	ADK-32	DD-03	CP-66	ADK-34	DD-01
SiO <sub>2</sub>	73,23	73,49	70,74	73,3	72,97	72,68	73,33	72,87	74,63	72,35	73,94	69,87	71,38
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,96	13,93	14,53	13,8	13,78	14,03	13,74	13,89	13,49	14,08	13,56	15,35	14,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	1,07	1,39	2,34	1,7	1,8	1,93	1,52	1,38	1,22	1,92	1,37	2,43	2,28
MgO	0,22	0,3	0,64	0,26	0,38	0,46	0,27	0,27	0,18	0,42	0,3	0,48	0,41
CaO	0,82	1,4	1,63	1,21	1,4	1,41	1,02	1,07	1,06	1,46	0,99	1,97	1,45
Na <sub>2</sub> O	3,2	3,61	3,5	3,43	3,36	3,44	3,18	3,32	3,92	3,49	3,16	4,11	3,3
K <sub>2</sub> O	6,11	4,63	5,22	5,25	5,09	4,94	5,73	5,73	4,24	4,9	5,62	4,25	5,49
TiO <sub>2</sub>	0,12	0,15	0,18	0,16	0,14	0,15	0,15	0,11	0,09	0,17	0,17	0,2	0,21
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,09	0,07	0,08	0,05	0,06	0,06	0,04	0,03	0,03	0,06	0,04	0,06	0,06
MnO	0,02	0,03	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03
PF	1,0	0,7	0,9	0,6	0,7	0,6	0,8	1,1	0,9	0,9	0,6	1,0	1,0
<b>Total</b>	99,84	99,70	99,78	99,80	99,70	99,72	99,80	99,78	99,79	99,76	99,77	99,73	99,71
<b>(%SiO<sub>2</sub> + K<sub>2</sub>O)</b>	79,34	78,12	75,96	78,55	78,06	77,62	79,06	78,6	78,87	77,25	79,56	74,12	76,87
<b>SM (x10<sup>-3</sup>) Slv</b>	1,3300	1,6767	2,8100	4,4867	5,6367	6,5267	0,5190	0,9623	1,1550	1,6867	4,5233	6,1067	10,4467

Fonte: Modificado de Rodrigues (2011).

Figura 8- Diagramas binários relacionando os valores de suscetibilidade magnética (SM) e a concentração de: a)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; b) MgO; c)  $\text{TiO}_2$  e d)  $(\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O})$  do Granito Boa Sorte. Simbologia conforme Figura 3.



Fonte: elaborado pela autora.

### **3.5 Minerais óxidos de Fe e Ti**

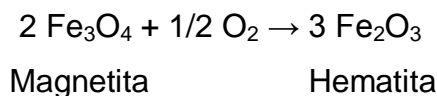
O estudo dos minerais óxidos de Fe e Ti do Granito Boa Sorte, foi realizado com o objetivo de determinar sua natureza, abundância relativa e variedades texturais. Estes minerais, de acordo com as composições modais mostradas nas tabelas 1 e 2, mostram pequenas variações em seus conteúdos nas duas fácies identificadas (0,25% a 0,3% -valores médios).

Os minerais opacos das rochas do Granito Boa Sorte ocorrem como fases acessórias. Estes minerais apresentam-se como cristais subédricos a euédricos, possuindo granulação fina, onde raramente atingem 1,0 mm. Apresentam-se, predominantemente, inclusos nos feldspatos, ou ainda associados aos agregados de minerais máficos, principalmente à titanita e biotita.

As variedades Biotita Monzogranito e Leucomonzogranito do Granito Boa Sorte não apresentam diferenças expressivas em relação aos minerais opacos encontrados. Em geral, os principais minerais opacos identificados em ambas as variedades foram a magnetita (Mt), a hematita (Hm) e a ilmenita (Ilm), esse último ocorrendo basicamente sob as formas de Ilm treliça (Ilm T), composta interna (Ilm Cint), composta externa (Ilm Cext) e, mais raramente, sanduíche (Ilm S), segundo a terminologia sugerida por Buddington e Lindsley (1964), Haggerty (1981, 1991) e Dall’Agnol et al., (1997). A Mt é o mineral dominante nas duas fácies e apresenta-se com diferentes intensidades de oxidação e substituição por martita, o que reflete em variações dos valores de suscetibilidade magnética (SM).

A magnetita é a principal fase mineral opaca encontrada. Apresenta-se predominantemente como cristais subautomórficos de granulação fina, associados principalmente à biotita e à titanita, variavelmente apresentam processo de martitização (Figuras 9a e 9b ), sendo mais intenso em amostras que apresentam os mais baixos valores de SM. A magnetita tende a mostrar faces bem definidas, por vezes chegando a formar cristais automórficos (Figura 9c). Pode também apresentar-se como “ilhas” nas titanitas, decorrentes do processo de substituição da magnetita por titanita (Figura 9d). O processo de martitização afeta, segundo Haggerty (1981), cristais de magnetita pobres em Ti com a substituição parcial do cristal de magnetita por martita ocorrendo ao

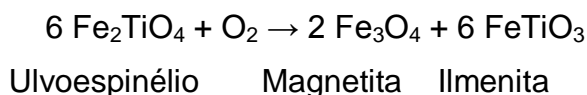
longo dos planos {111} da Mt hospedeira, sendo a formação de martita explicada pela reação abaixo:



A ilmenita frequentemente encontra-se associada à magnetita. Três principais tipos texturais de ilmenita foram identificados: *trellis* ou treliça (Ilm T), *composite* ou composta externa (Ilm Cext) e interna (Ilm Cint), e *sandwich* ou sanduíche (Ilm S) (Figuras 10a, 10b, 10c e 10d, respectivamente).

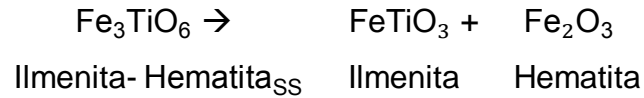
Análises semiquantitativas, obtidas por meio de EDS em microscópio eletrônico de varredura (MEV), demonstram que os cristais de magnetita possuem baixos teores de titânio (Figura 11). Isto, juntamente com sua associação com diversos tipos texturais de ilmenita, sugere que a associação magnetita-ilmenita foi derivada de titanomagnetita (solução sólida entre ulvoespínélio e magnetita). Este processo, que leva à transformação da titanomagnetita primária em intercrescimentos de magnetita com ilmenita, ocorre por meio de uma série complexa de reações de reequilíbrio durante o resfriamento e não envolve apenas exsolução, mas também oxidação de modo a transformar o componente ulvoespínélio da titanomagnetita em ilmenita. Daí ser designado como processo de oxi-exsolução (BUDDINGTON; LINDSLEY 1964; DALL'AGNOL et al., 1997; MAGALHÃES; DALL'AGNOL, 1992; OLIVEIRA et al., 2002).

A Ilm T desenvolve-se em até três planos distintos em um mesmo cristal de magnetita (BUDDINGTON; LINDSLEY, 1964; HAGGERTY, 1981). A formação dos intercrescimentos de magnetita e ilmenita em treliça, como explicado anteriormente, é atribuída à transformação da titanomagnetita através de processos de oxidação-exsolução. De acordo com Buddington e Lindsley (1964), essa transformação ocorre a temperaturas (T) inferiores a 620°C, caracterizando uma reação no estágio *subsolidus*. Deste modo, a reação envolvida neste processo seria:



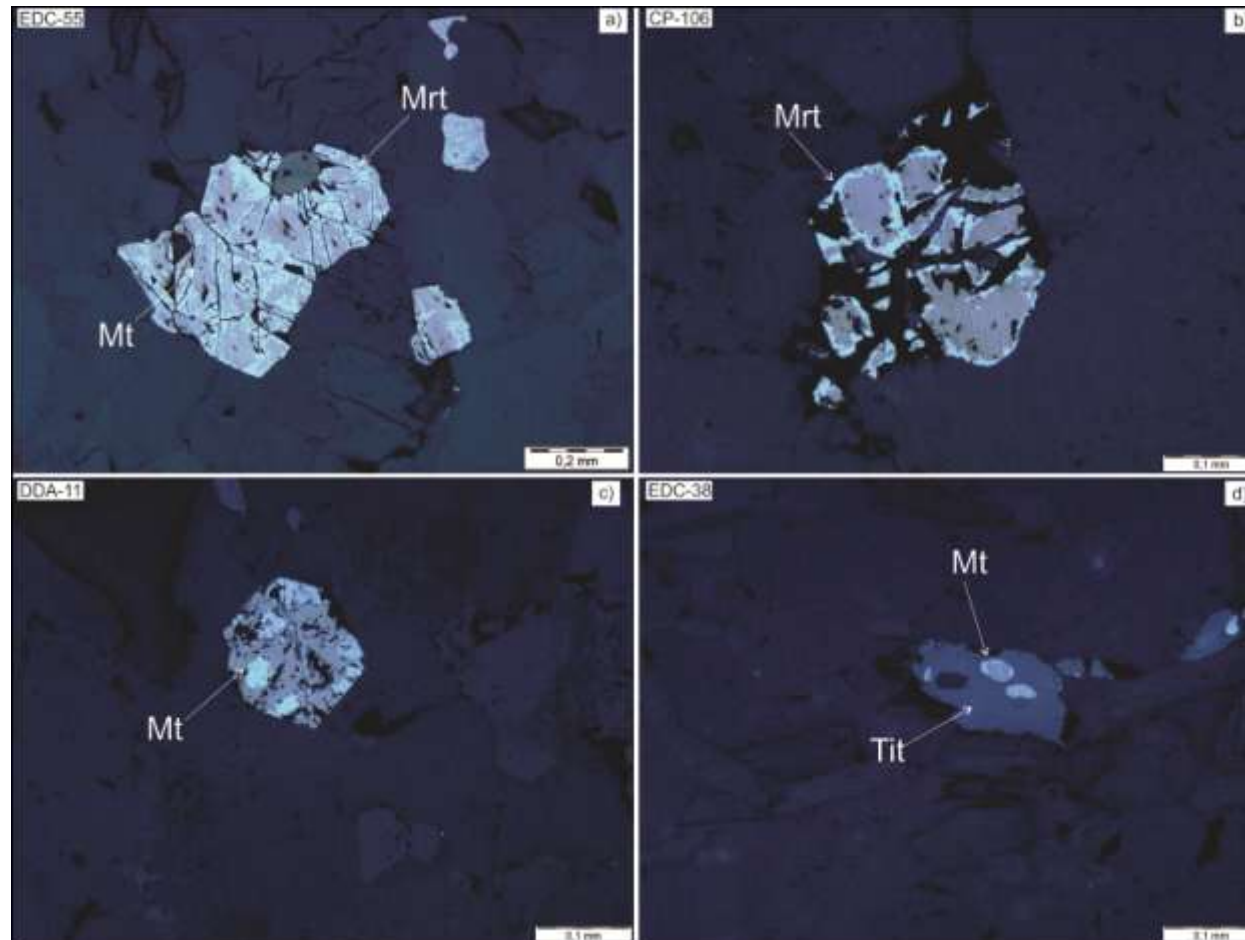
*Suscetibilidade Magnética e Minerais Óxidos de Fe e Ti do Granito Boa Sorte-Domínio Carajás*

A presença dos intercrescimentos de ilmenita e hematita pode ser explicada por exsolução no estágio *subsolidus* a partir da solução sólida formada no estágio magmático entre esses dois minerais Haggerty (1981), segundo a reação:



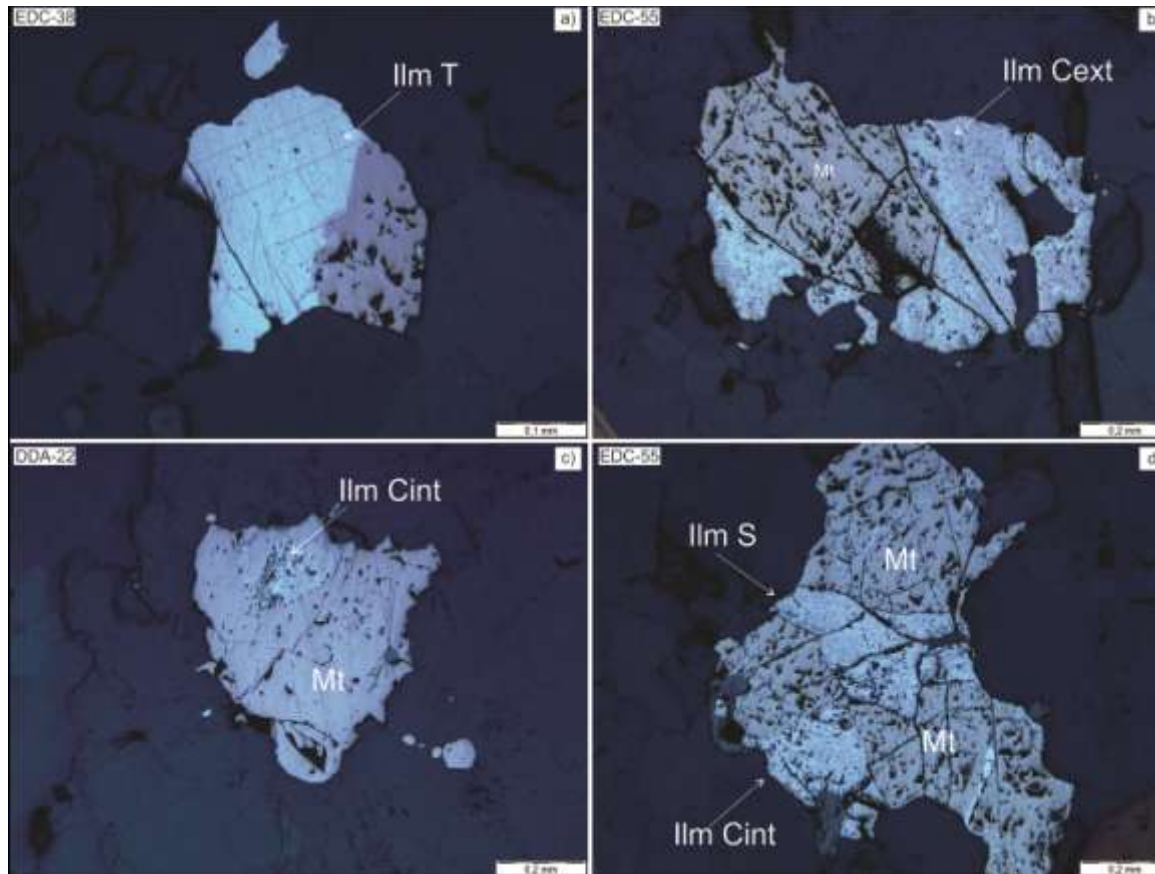
A hematita (Hm) ocorre somente como produto de alteração da magnetita sob a forma de martita que exibe, em geral, formas irregulares, desenvolvendo-se a partir da borda, bem como ao longo de todo o cristal de magnetita hospedeira.

Figura 9- Principais formas de ocorrência da magnetita, luz refletida. a) e b) Cristais de magnetita, mostrando martitização evidente; c) Cristal de magnetita subautomórfica; d) Magnetita alterada para titanita.



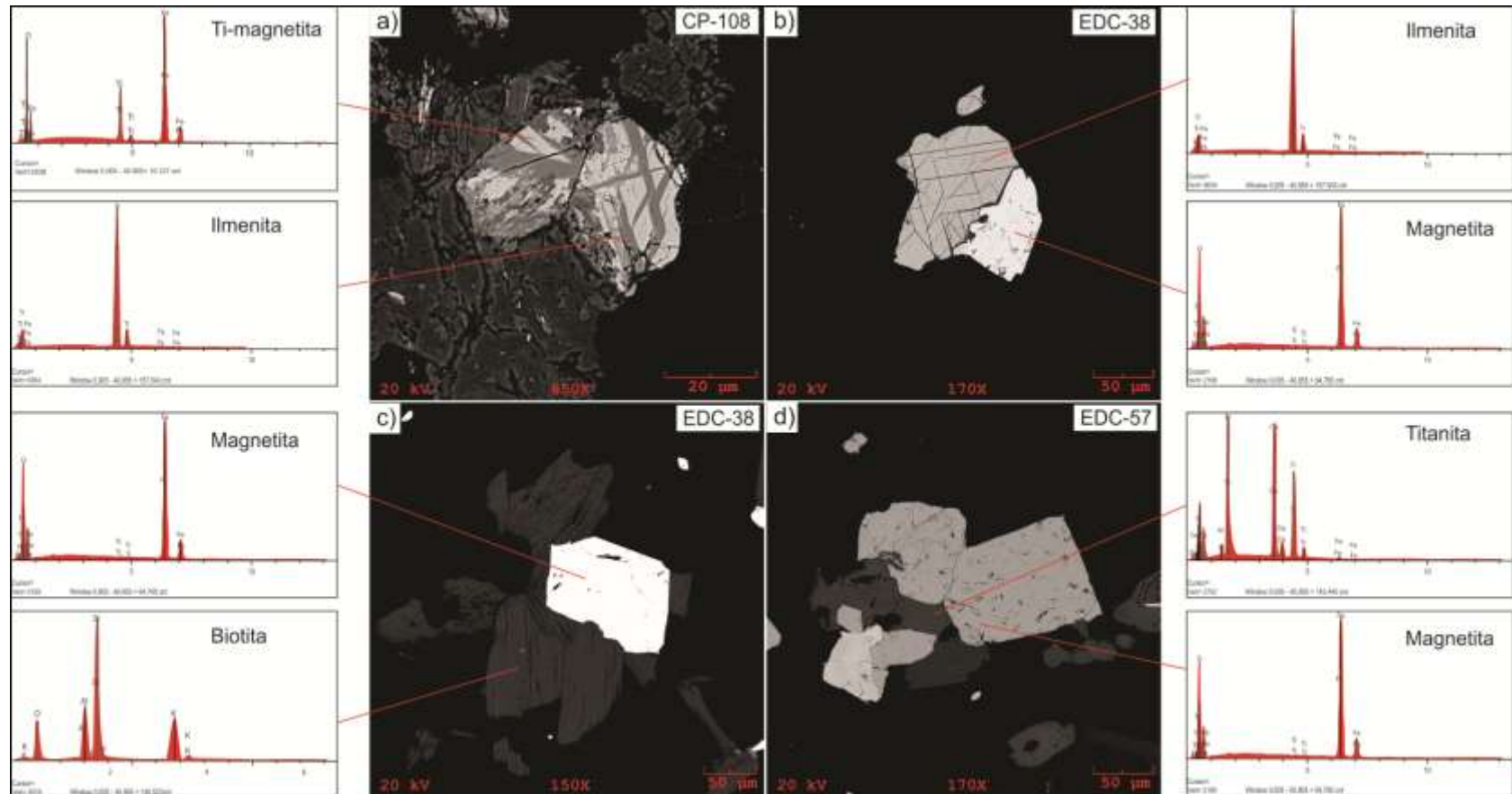
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 10- Diferentes tipos texturais de ilmenita, luz refletida. a) Cristal de magnetita transformado para ilmenitas em treliça (Ilm T); b) Cristal de magnetita associado à ilmenita composta externa (Ilm Cext); c) Cristal anédrico de magnetita associado à ilmenita composta externa (Ilm Cext); c) Cristal anédrico de magnetita associado à ilmenita composta interna (Ilm Cint); d) Cristais de magnetita associados à ilmenita sanduíche (Ilm S) e à ilmenita composta externa (Ilm Cext).



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 11- Associação de minerais óxidos de Fe e T e imagens de elétrons retro-espalhados obtidas em microscópio eletrônico de varredura. a) Destaque para o espectro EDS com teor acentuado de titânio; b) Espectro EDS apresentando magnetita e ilmenita treliça; c) Espectro EDS mostrando magnetita com baixo teor de Ti associada à biotita; d) Associação de magnetita e titanita, acompanhada de espectro EDS.



Fonte: elaborado pela autora.

### 3.5.1 Sequência de Formação

As evidências texturais descritas e as composições semiquantitativas nos minerais óxidos de Fe e Ti do Granito Boa Sorte permitem a definição de três estágios principais de cristalização (magmático, tardi-magmático e pós-magmático), conforme ilustrado pela Figura 12.

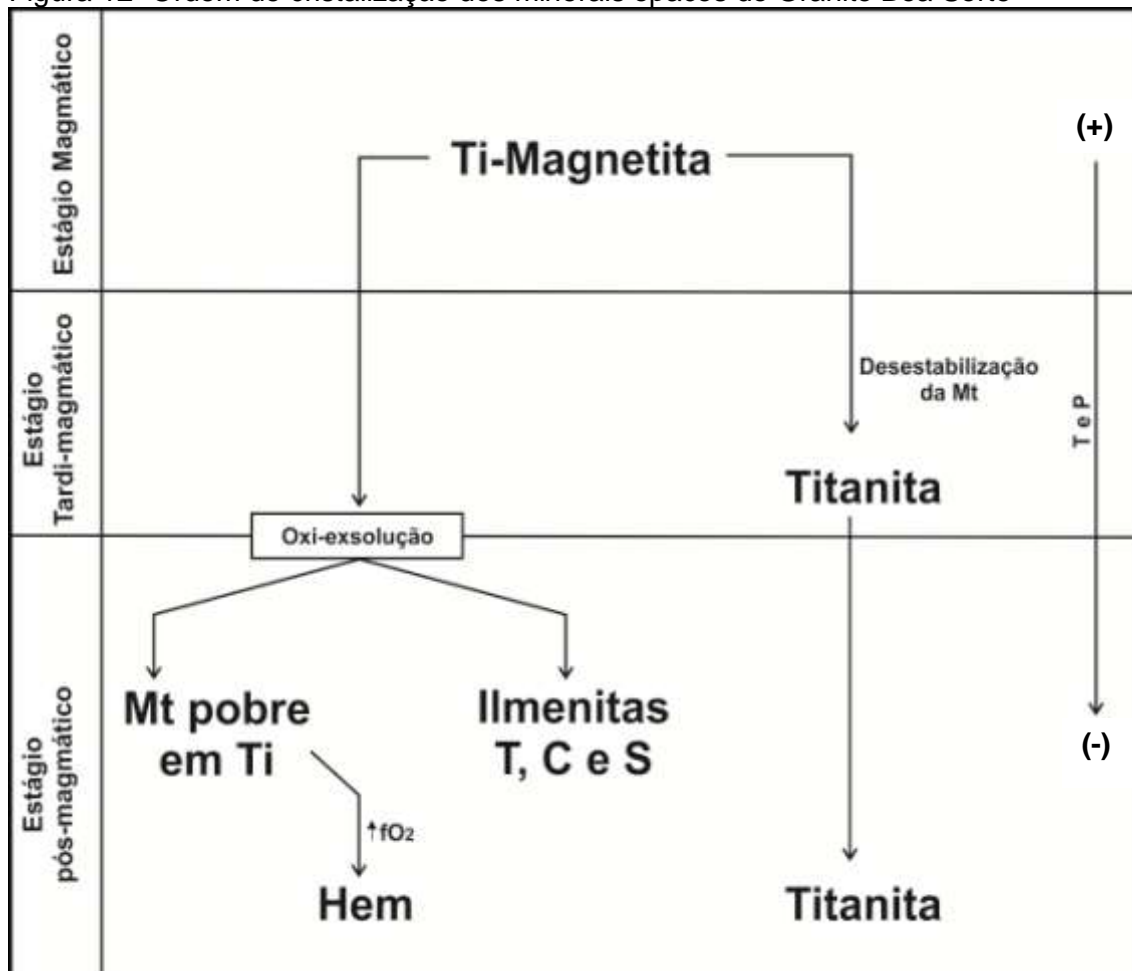
Estágio Magmático: este estágio não apresenta mais seus primeiros minerais de óxido de Fe e Ti formados representados na rocha. Segundo Buddington e Lindsley (1964) intercrescimentos de ilmenita na magnetita pobre em Ti são diagnósticos de reações de reequilíbrio intra-óxido nos primeiros óxidos cristalizados e envolvem a remoção de titânio da titanomagnetita (solução sólida entre ulvoespínélio e magnetita) para a formação de ilmenita *trellis* por oxi-exsolução (Figura 10a)

Estágio Tardi-magmático: este estágio é marcado pelo desenvolvimento de coroas de titanita nas magnetitas. Tal relação sugere a desestabilização da magnetita e sua substituição parcial com a utilização de titânio para a formação de titanita. O cálcio e o silício também necessários para a formação da titanita podem ser provenientes do próprio líquido magmático (DALL'AGNOL et al., 1999).

Estágio Pós-magmático: é caracterizado inicialmente pela formação de intercrescimento entre magnetita e ilmenita em treliça, compostas e sanduíche, assim a oxi-exsolução de hematita a partir da ilmenita que, segundo Almeida et al. (2007) formam uma solução sólida acima de 620° C, logo este processo ocorreu em condições *subsolidus*. Em mais baixa temperatura, também ocorreu a substituição da magnetita pobre em Ti pela martita, também em condições *subsolidus*, processo que tem relação direta com condições mais oxidantes durante a redução das condições de P e T na cristalização magmática. Com base nestas observações propõe-se a seguinte sequência de formação e evolução dos minerais opacos:

- 1) cristalização precoce de titanomagnetita; 2) desestabilização parcial da magnetita mais rica em Ti dando origem à titanita; 3) formação da magnetita pobre em Ti e ilmenita composta interna e em treliça a partir da oxidação-exsolução da titanomagnetita primária; 4) oxidação da magnetita gerando martita.

Figura 12- Ordem de cristalização dos minerais opacos do Granito Boa Sorte



Fonte: elaborado pela autora.

#### **4 DISCUSSÃO E COMPARAÇÕES ENTRE O GRANITO BOA SORTE E OS GRANITOIDES ARQUEANOS DA REGIÃO DE NOVA CANADÁ**

Com base no estudo elaborado, serão efetuadas comparações entre as propriedades magnéticas e características mineralógicas e texturais dos minerais óxidos de Fe e Ti dos granitoides arqueanos da região de Nova Canadá (Leucogranodiorito Velha Canadá- LGrdVC, Leucogranodiorito Nova Canadá- LGrdNC) estudados por Pinto Jr. (em preparação), com os dados gerados neste trabalho para o Granito Boa Sorte. De modo geral, os comportamentos magnéticos dessas rochas são muito semelhantes (Figura 13), existindo uma grande coincidência entre os limites de seus valores de SM (Tabela 7), sendo que as rochas do Granito Boa Sorte apresentam uma amplitude de SM levemente maior, apresentando os menores e os maiores valores magnéticos. Além disso, outra similaridade marcante dentre estas corpos, é o comportamento unimodal presente nos mesmos, onde o GBS apresenta os valores de SM de seu pico ligeiramente superior ao complexo de rochas de Nova Canadá (Figura 13).

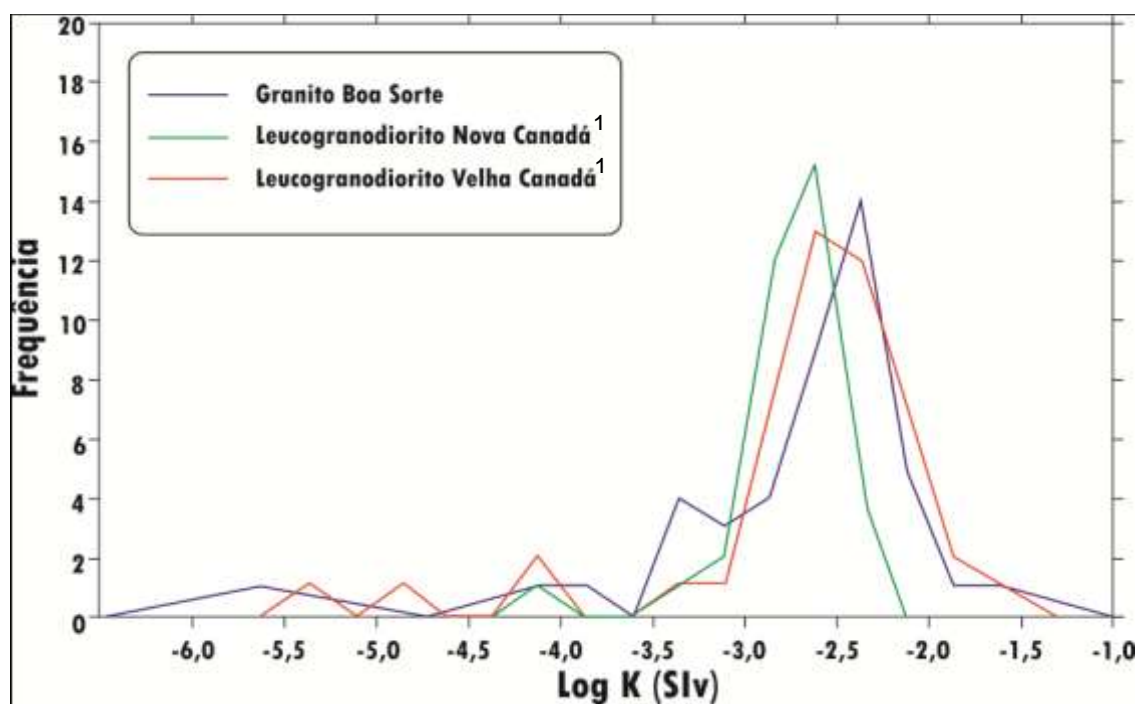
Os conteúdos de minerais opacos dos GBS, LGrdVC e LGrdNC são relativamente baixos (< 1%), os quais apresentam nítidas correlações positivas com os valores de SM de suas respectivas amostras. Comportamento similar é observado para o conteúdo total de minerais máficos.

A correlação SM e  $Fe_2O_3$  mostrou-se positiva para ambos os leucogranodioritos de Nova Canadá, assim como para o GBS. Este comportamento indica que a magnetita pode ser a principal fase responsável pelos valores mais elevados de SM nestas rochas, bem como os ferromagnesianos (paramagnéticos) que ainda influem nos valores de suscetibilidade, como indica a correlação entre SM e MgO, que também é positiva, tanto para o GBS, quanto para o LGrdVC e LGrdNC, confirmando o que foi observado na relação entre minerais máficos e SM nestas rochas. Já quando observados os teores de  $SiO_2$ , tem-se uma correlação negativa com os valores de SM, demonstrando que as rochas mais pobres em  $SiO_2$  e, portanto, relativamente menos evoluídas apresentam os menores valores de SM, sugerindo, dessa forma, que a suscetibilidade destes granitoides diminui com a diferenciação magmática.

No que se refere aos minerais óxidos de Fe e Ti dos corpos analisados, observa-se que também apresentam mineralogia semelhante, formada basicamente por magnetita, ilmenita e hematita (Tabela 8). As variedades texturais do GBS se assemelham àquelas observadas nos leucogranodioritos de Nova Canadá, principalmente nas rochas do LGrdVC. São formadas, sobretudo, por cristais de magnetita subautomórficos, martitizados, apresentando ainda, lamelas de oxi-exsoluções de ilmenita (Ilm T).

Em linhas gerais, as rochas do GBS apresentam fortes afinidades com os leucogranodioritos da área de Nova Candá, principalmente no que diz respeito à mineralogia de óxidos de Fe-Ti e aos seus valores de SM. Um sumário comparativo das principais características dos minerais óxidos de Fe-Ti presentes destes corpos é apresentado na Tabela 8.

Figura 13- Polígono de frequência referente aos dados de suscetibilidade magnética do Granito Boa Sorte e dos granitoides de Nova Canadá



Fonte: elaborado pela autora/ 1- Dados de Pinto Jr. (em preparação)

*Suscetibilidade Magnética e Minerais Óxidos de Fe e Ti do Granito Boa Sorte-Domínio Carajás*

Tabela 8: Algumas características magnéticas do Granito Boa Sorte e dos granitoides de Nova Canadá.

Parâmetros Estatísticos	K (x10 <sup>-3</sup> Slv)		
	GBS	LGrdVC <sup>1</sup>	LGrcNC <sup>1</sup>
Média	3,9045	3,9610	2,0411
Mediana	3,1267	2,9820	1,8175
Média Geométrica	2,3427	2,1612	1,7428
Variância	16,0233	0,0165	0,0008
Desvio Padrão	4,0029	4,0572	0,09116
Valor Mínimo	0,0027	0,0043	0,078
Valor Máximo	27,8000	24,7000	3,8935

1- Dados de Pinto Jr. (em preparação)

Tabela 9: Características dos minerais óxidos de Fe e Ti observadas no Granito Boa Sorte e nos granitoides de Nova Canadá.

Granitoides/ Característica	GBS	LGrdVC <sup>1</sup>	LGrcNC <sup>1</sup>
Composição	Monzo-granítica, subordinadamente granodiorítica	Granodiorítica	Granodiorítica
Magnetita	Presente em todas as amostras	Presente em todas as amostras	Presente em todas as amostras
Martita	Presente em todas as amostras	Ausente ou rara	Presente em amostras mais magnéticas
Ilm I	Ausente	Ausente	Presente nas amostras menos magnéticas
Ilm T	Presente em amostras menos magnéticas	Presente em amostras menos magnéticas	Ausente
Ilm C	Frequente	Ausente	Ausente
Ilm S	Rara ou ausente	Ausente	Ausente
Ilm P	Ausente	Presente em amostras menos magnéticas	Ausente ou rara

1- Dados de Pinto Jr. (em preparação)

## **5 CONCLUSÕES**

O estudo de petrologia magnética revelou que o Granito Boa Sorte apresenta duas populações com características distintas em termos de SM: a população A, correspondente às amostras de mais baixa SM, englobam aproximadamente 28% das amostras estudadas e apresentam valores de SM situados no intervalo de  $0,0027 \times 10^{-3}$  a  $1,6867 \times 10^{-3}$  Slv com valor médio de  $1,3983 \times 10^{-3}$  Slv; e a população B, com 71% do total de amostras estudadas, apresenta valores de SM entre  $1,9967 \times 10^{-3}$  e  $27,8000 \times 10^{-3}$  Slv com média de  $4,9785 \times 10^{-3}$  Slv.

Apesar de não serem claras as diferenças dos minerais opacos entre as duas diferentes fácies que compõem o Granito Boa Sorte, as variações de SM podem ser explicadas pela intensidade de oxidação, quantidade e tamanho dos minerais opacos. Os principais minerais opacos identificados no Granito Boa Sorte foram: magnetita pobre em Ti, ilmenita (Ilm T, Cint, Cext e S) e hematita, frequentemente representada pela variedade martita (Mrt).

As rochas do Granito Boa Sorte apresentam, no entanto, variações marcantes no que diz respeito às feições texturais dos minerais opacos. Dentre estes, a Mt é o mineral dominante e apresenta-se com diferentes intensidades de oxidação e substituição por martita, o que reflete as variações de seus valores de SM. O processo de martitização é mais intenso em amostras que apresentam os valores mais baixos de SM.

As evidências texturais descritas e as composições semiquantitativas nos minerais óxidos de Fe e Ti do Granito Boa Sorte permitem a definição de três estágios principais de cristalização: estágio magmático, estágio tardi-magmático e estágio pós-magmático. O principal mineral óxido formado durante o estágio precoce de cristalização magmática nas rochas estudadas seria a titanomagnetita. No estágio tardi-magmático, processos de desestabilização substituem parcialmente a magnetita por titanita. No estágio pós-magmático, as condições mais oxidantes teriam originado por processos de oxi-exsolução, a magnetita pobre em titânio e as ilmenitas T, C e S a partir da titanomagnetita original, e assim como a posterior alteração da magnetita afetada pelo processo de martitização, originando a hematita.

Algumas características permitem classificar o Granito Boa Sorte como granito da série da magnetita (ISHIHARA, 1981), entre elas os valores de SM

relativamente elevados, bem como o conteúdo modal de minerais opacos (>0,1%) com presença marcante de magnetita em todas as suas fácies.

As transformações a que estes minerais foram submetidos não permitiriam reconstituir as composições da titanomagnetita formada durante o estágio magmático, fazendo com que as estimativas de  $fO_2$  do o Granito Boa Sorte devam ser baseadas em dados indiretos, como, por exemplo, por meio da natureza dos minerais óxidos de Fe e Ti, assim como nos granitoides arqueanos da região de Nova Canadá. Wones (1989) mostrou o significado da  $fO_2$  das assembleias de minerais óxidos de Fe e Ti em rochas graníticas e revelou que a paragênese titanita + magnetita + quartzo é indicativa de condições oxidantes e de fugacidade de oxigênio ( $fO_2$ ) relativamente elevada. Esta associação aparece, formadas no estágio magmático, em diversas amostras da fácies do Granito Boa Sorte, sugerindo que estas rochas se originaram de um magma que evoluiu em condições de fugacidade entre os tampões HM e FMQ, podendo ser estimadas para a cristalização condições de  $fO_2$  próximas às do tampão HITMQ (WONES, 1989), pouco acima das do tampão NNO (FROST, 1991). As transformações pós-magmáticas dos minerais óxidos de Fe e Ti, em particular o processo de martitização da magnetita e a exsolução de hematita nos cristais de ilmenita, sugerem que a  $fO_2$  deva ter crescido durante o estágio *subsolidus*, por conta do acúmulo de voláteis resultantes da cristalização magmática. Assim, condições acima do tampão HM foram atingidas localmente para que se alcançassem os parâmetros físico-químicos para o início de tais reações (FROST, 1991).

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A.C.; GUIMARÃES, F.V.; DALL'AGNOL, R. Petrologia Magnética do Granito Anorogênico Bannach, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, p. 17-36, 2007.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES; B.B.; FUCK, R.A. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, v.17, p.1-29, 1981.
- ALMEIDA, J.A.C.; DALL'AGNOL, R.; DIAS, S.B.; ALTHOFF, F.J. Origin of the archean leucogranodiorite-granite suites: evidence from the Rio Maria terrane and implications for granite magmatismo in the archean. *Lithos*, n.120,p. 235-257, 2010.
- ALMEIDA, J.A.C.; DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, M.A.; MACAMBIRA, M.J.B.; PIMENTEL, M.M.; RÄMÖ, O.T.; GUIMARÃES, F.V.; LEITE, A.A.S. Zircon geochronology and geochemistry of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: Implications for the growth of the Archean crust of Carajás Province, Brazil. *Precambrian Research*, (submitted.), v. 187, p. 201-221, 2011.
- ALTHOFF, F.J.; BARBEY, P.; BOULLIER, A.M. 2.8-3.0 Ga Plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral province, Brazil). *Precambrian Research* v. 104, p.187-206, 2000.
- ARAÚJO, O.J.B.; MAIA, R.G.N. Folha Serra dos Carajás, Folha SB-22-Z-A. Relatório Final. CPRM, Rio de Janeiro, 136p. 1991.
- ARAÚJO, O.J.B.; MAIA, R.G.N.; JORGE JOÃO, X.S.; COSTA, J.B.S. A Megaestrutura arqueana da Folha Serra dos Carajás. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GEOLOGIA, 7, 1988, Belém. Anais... Belém: SBG, 1988. p.324-338.
- AVELAR, V.G. *Geocronologia Pb-Pb por evaporação em monocristal de zircão, do magmatismo da região de Tucumã, SE do Estado do Pará, Amazônia oriental*. 1996. 199f. Tese (Dissertação de mestrado) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 1996.
- BARBOSA, A.B.; LAFON, J.M.; NEVES, A.P.; VALE, A.G. Geocronologia Rb-Sr e Pb-Pb do Granito Redenção, SE do Pará: Implicações para a evolução do magmatismo proterozoico da Região de Redenção. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências da Terra*, v. 7, p. 147-164, 1995.
- BARBOSA, J.P.O. *Geologia Estrutural, Geoquímica, Petrografia e Geocronologia de granitoides da região do Igarapé Gelado, norte da Província Mineral de Carajás*. 2004. 96f. Tese (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2004.
- BARROS, C.E.M.; DALL'AGNOL, R. Deformação de rochas granitoides em regime dúctil: o exemplo do Gnaisse Estrela, Região de Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 24(3), p. 129-138, 1994.

- BARROS, C.E.M.; DALL'AGNOL, R.; BARBEY, P.; BOULLIER, A.M. Geochemistry of the estrela granite complex, Carajás region, Brazil: an example of an Archean A-type granitoid. *Journal of South American Earth Sciences.*, n.10(3-4), p. 321-330, 1997.
- BARROS, C.E.M.; MACAMBIRA, M.J.B.; BARBEY, P. Idade de zircão do Complexo Granítico Estrela: relações entre magmatismo, deformação e metamorfismo na Província Mineral de Carajás. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZONIA, 7, 2001. Belém: SBG-NO, 2001. CD-ROM.
- BARROS, C.E.M.; SARDINHA, A.S.; BARBOSA, J.P.O.; MACAMBIRA, M.J.B.; BARBEY P.; BOULLIER, A.M. Structure, Petrology, Geochemistry and zircon U/Pb and Pb/Pb Geochronology of the Synkinematic Archean (2.7 Ga) A-type Granites from the Carajás Metallogenic Province, Northern Brazil. *The Canadian Mineralogist*, v. 47, p. 1423-1440, 2009.
- BUDDINGTON, A.F.; LINDSLEY, H.D. Iron-Titanium oxides minerals and synthetic equivalents. *J. Petrology*, v. 5 (2), p. 310-357, 1964.
- CLARK, D.A. Magnetic petrology of igneous intrusions: Implications for exploration and magnetic interpretation. *Exploration Geophysics*, v.30, p. 5-26, 1999.
- CORDANI, U.G.; SATO, K. Crustal evolution of the South American Platform, based on Nd isotopic systematic on granitic rocks. *Episodes*. v. 22(3), p. 167-173, 1999.
- CORDEIRO, A.C. Geologia preliminar da região de Andorinhas. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, I, Belém, 1982. Anais..., Belém, SBG. 1982. v. I, p. 45-49.
- DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, M.A.; ALMEIDA, J.A.C.; ALTHOFF, F.J.; LEITE, A.A.S.; OLIVEIRA, D.C.; BARROS, C.E.M. Archean and paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, eastern Amazonian Craton. In: Symposium on Magmatism, Crustal Evolution, and Metallogenesis of the Amazonian Craton, *Field trips guide*, p. 97-150, 2006.
- DALL'AGNOL, R.; SAUCK, W.A.; GONÇALEZ, M. G. B. Suscetibilidade magnética em granitoides da Amazônia: Um estudo preliminar. In: CONG. BRAS. GEOL., 35, Belém, 1988. Anais...Belém, SBG, 1998. v.3, p. 1664-1173.
- DALL'AGNOL, R.; SCAILLET, B.; PICHAVANT, M. Evolution of A-type granite magmas: an experimental study of the Lower Proterozoic Jamon Granite, eastern Amazonian craton, Brazil. *Journal of Petrology*, v. 40(11), p. 1673-1698, 1999.
- DALL'AGNOL, R.; SOUZA, Z.S.; ALTHOFF, F.J. BARROS, C.E.M.; LEITE, A.A.S.; JORGE JOÃO, X.S. General aspects of the granitogenesis of the Carajás metallogenic province. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GRANITES AND ASSOCIATED MINERALIZATIONS, 2, 1997. Salvador: Excution Guide, 1997. p. 135-161.
- DALL'AGNOL, R.; TEIXEIRA, N.P.; RÄMÖ, O.T.; MOURA, C.A.V.; MACAMBIRA, M.J.B.; OLIVEIRA, D.C. Petrogenesis of the paleoproterozoic, rapakivi, A-Type granites of the Archean Carajás Metallogenic Province, Brazil. *Lithos* v. 80, p. 01-129, 2005.

DOCEGEO. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, 1988. *Anais...SBG*. p. 10-54. (anexo).

FEIO, G.R.L.; DALL'AGNOL, R.; DANTAS, E.; MACAMBIRA, M.J.B.; GOMES, A.C.B.; SARDINHA, A.S.; SANTOS, P. Geochemistry, geochronology, and origin of the planalto granite suite and associated rocks: implications for the neoproterozoic evolution of the Carajás Province. *Lithos* v.151, p. 57-73, 2012.

FROST, B.R. Magnetic petrology: factors that control the occurrence of magnetite in crustal rocks. In: LINDSLEY, D.H. (Ed.). *Oxide minerals: petrologic and magnetic significance*. Washington, D. C.: Mineralogical Society of America, 1991. p.433-441. (Reviews in mineralogy, 25).

GABRIEL, E.O. *Geologia, geoquímica e petrologia magnética dos granitoides Arqueanos da Porção Nordeste de Água Azul do Norte – Província Carajás*. 2012. 131f. Tese (Dissertação de Mestrado), Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

GABRIEL, E.O.; OLIVEIRA, D.C.; MACAMBIRA, M.J.B. Caracterização geológica, petrográfica e geocronológica de ortopiroxênio-trondhjemitos (leucoenderbitos) da região de Vila Cedere III, Canaã dos Carajás-PA, Província Mineral de Carajás. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 45, 2010. Anais, Belém, 2010, CDrom.

GALARZA, M.A.; OLIVEIRA, D.C.; SANTOS, R.D.; MARTINS, A.C.; SANTOS, A.N.; SANTOS, P.J.L. Geocronologia do Diopsídio-Norito Pium e Granitoides Associados, Canaã dos Carajás, Província Carajás, In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 46, 2012. Santos-SP, 2012. CDrom.

GIBBS, A. K.; WIRTH, K. R.; HIRATA, W. K.; OLSZEWSKI, W. J. Age and composition of the Grão Pará Group Volcanics, Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 16 (2), p. 201-211, 1986.

GUIMARÃES, F.V. *Geologia, Petrografia e Geoquímica do Trondhjemitó Mogno e Rochas Arqueanas Associadas, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria – SE do Pará*. 2009. 102f. Tese (Dissertação de Mestrado). Curso de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, UFPA, Belém, 2009.

HAGGERTY, S.E. The aeromagnetic mineralogy of igneous rocks. *Can. J. Earth Sci.* v. 16, p. 1281-1293, 1979.

HAGGERTY, S.E. Oxidation of opaque mineral oxides in basalts. In: RUMBLE III, 1981. D. Ed. *Oxide minerals*. 2nd ed. Washington, Mineralogical Society of America. Hg 1-Hg 99. (Reviews in Mineralogy, 3). 1981.

HAGGERTY, S.E. Oxide Textures – a mini-atlas. In: LINDSLEY, D.H. ed. *Oxide minerals: Petrologic and magnetic significance*. Mineralogical Society of America. 1991. (Reviews in Mineralogy, 25). 1991. p. 126-219.

HIRATA, W.K.; RIGON, J.C.; KADEKARU, K.; CORDEIRO, A.A.C.; MEIRELES, E.M. Geologia Regional da Província Mineral de Carajás. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, I, 1982. Belém, Anais... SBG. v. I, 1982, p. 100-110.

HUHN, S.B.; MACAMBIRA, M.J.B.; DALL'AGNOL, R. Geologia e geocronologia Pb/Pb do granito alcalino arqueano Planalto, região da Serra do Rabo, Carajás-Pa. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 6, Manaus, 1999. Boletim de Resumos Expandidos. Manaus: SBG-NNO, v.1, 1999, p.463-466.

ISHIHARA, S. The granitoid series and mineralization. *Econ. Geol.* N. 75, p. 458 –z 484. 1981.

LEITE, A.A.S; DALL'AGNOL, R. Estratigrafia e aspectos geológicos da região de ocorrência do Granito Xinguara (SE do Pará). In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 4, 1994. Boletim de Resumos Expandidos, Belém, 1994. p.325-327.

LE MAITRE, R. W.; STRECKEISEN, A.; ZANETTIN, B.; LE BAS, M. J.; BONIN, B.; BATEMAN, P.; BELLINI, G.; DUDEK, A.; EFREMOVA, S.; KELLER, J.; LAMERE, J.; SABINE, P.A.; SCHMID, R.; SORENSEN, H.; WOOLLEY, A.R. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms, Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission of the Systematics of Igneous Rocks.* Cambridge University Press, 2002. p.254.

LINDENMAYER, Z.G. *Salobo Sequence, Carajás, Brazil: geology, geochemistry and metamorphism.* 1990. 406f. Tese (Doutorado). Ontario: The University of Western Ontario, 1990.

MACAMBIRA, E. M. B.; VALE, A.G. Aspectos geológicos e metalogenéticos do “greenstone belts” de Tucumã – Sul do Pará. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 39. 1996. Salvador. Anais..., 1996. p. 230-232.

MACAMBIRA, M.J.B. *Chronologie U-Pb, Rb-Sr, K-Ar ET croissance de La croûte continentale dans l'Amazonie Du sud-est; exemple de La région de Rio-Maria, Província de Carajás, Brésil.* 1992. 212f. Thesis (Doctor) - University of Montpellier II, Montpellier, 1992.

MACAMBIRA, M.J.B.; LAFON, J.M. Geocronologia da Província Mineral de Carajás: síntese dos dados e novos desafios. *Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi*, v. 7, p. 263-288, 1995.

MACHADO, N.; LINDENMAYER, Z.; KROGH, T.H.; LINDENMAYER, D. U-Pb geochronology of Archaean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. *Precambrian Research*, v. 49, p. 329-354, 1991.

MAGALHÃES, M.S. *Minerais opacos e suscetibilidade magnética de granitoides da Amazônia Oriental: Implicações Petrológicas.* 1991. 274f. Tese (Dissertação de Mestrado). UFPA. CG. Belém, 1991.

MAGALHÃES, M.S; DALL'AGNOL, R. Considerações petrológicas baseadas em estudos de minerais opacos e suscetibilidade magnética no granodiorito Rio Maria (região de Rio Maria- sudeste do Pará). In: SIMP. GEOL. AMAZ., 3, 1991. SBG, Belém, 1991. p. 70-94. 1991.

MAGALHÃES, M.S; DALL'AGNOL, R. Estudo de minerais opacos e suscetibilidade magnética nos Granitos Musa e Jamon (Região de Rio Maria-Se do Pará) e suas implicações petrológicas. *Rev. Bras. Geoc.*, Belém, 22, 2. 1992.

MEDEIROS, H.; DALL'AGNOL, R. Petrologia da porção leste do batólito Granodiorítico Rio Maria, sudeste do Pará. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35, Belém, 1988. Anais..., Belém, SBG. v. 3, p. 1488-1499. 1988.

OLIVEIRA, D.C. *Geologia, geoquímica e petrologia magnética do Granito Paleoproterozoico Redenção, SE do Cráton Amazônico*. 2001. 207f. Tese (Dissertação de Mestrado), Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2001.

OLIVEIRA, D.C.; DALL'AGNOL R.; BARROS, C.E.M.; FIGUEIREDO, M.A.B.M. Petrologia magnética do Granito Paleoproterozoico Redenção, SE do Cráton Amazônico. In: E.L Klein, M.L. Vasquez, L.T. Rosa-Costa (eds.) *Contribuições à Geologia da Amazônia*. Sociedade Brasileira de Geologia Núcleo Norte, Belém, 2002, vol.3, p.115-132. 2002.

OLIVEIRA, M.A.; DALL'AGNOL R., Althoff F.J., Leite A.A.S. Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite-greenstone Terrane, Amazonian craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 27, p.146-160, 2009.

PIDGEON R.T., MACAMBIRA M.J.B., LAFON J.M. Th-U-Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulites facies metamorphism and the protolith of the enderbite. *Chemical Geology*, n. 166, p. 159-171, 2000.

PINTO JR, P. S. C. *Estudo de Suscetibilidade Magnética e minerais óxidos de FE e TI dos Granitoides Arqueanos da região de Nova Canadá – Província Carajás*. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal do Pará, Belém. Em preparação.

RICCI, P.S.F.; CARVALHO, M.A. Rocks of the Pium-Area, Carajás Block, Brazil – A Deepseated High-T Gabbroic Pluton (Charnockitoid-Like) with Xenoliths of Enderbitic Gneisses Dated at 3002 Ma – The Basement Problem Revisited. In: *Simpósio de Geologia da Amazônia, Boletim de Resumos Expandidos*, 2006. Belém, SBGEO/NO, 2006. CD-ROM.

RODRIGUES, D.S. *Petrografia, Geoquímica e Geocronologia do Granito Boa Sorte, município de Água Azul do Norte – Província Carajás*. 2011. 88f. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal do Pará- Faculdade de Geologia, Marabá, 2011.

ROLANDO, A.P.; MACAMBIRA, M. J. B. Archean crust formation in Inajá range area, SSE of Amazonian Craton, Brazil, basead on zircon ages and Nd isotopes. In: *South American Symposium on Isotope Geology*, 4, 2003. Salvador. Expanded Abstracts. 2003. Salvador: CD-ROM.

SANTOS, R.D.; GALARZA, M.A.; OLIVEIRA, D.C. Caracterização Geoquímica, Geocronológica e Isotópica do Diopsídio-Norito Pium - Província Carajás, In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 46, 2012. Santos-SP, 2012. CDrom.

SARDINHA, A.S. *Geologia, geoquímica e geocronologia do Granito Serra do Rabo, Província Mineral de Carajás*. 2002. 118f. Tese (Mestrado em ciências na área de Geoquímica e Petrologia). Universidade Federal do Pará-Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2012.

SARDINHA, A.S.; BARROS, C.E.M.; KRYMSKY, R. Geology, geochemistry, and U-Pb geochronology of the archaic (2.74 Ga) Serra do Rabo granite stocks, Carajás Province, northern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* n. 20, p. 327-339. 2006.

STRECKEISEN, A.L. To each plutonic rock its proper name. *Earth Science Review*, v. 12, p. 1-33, 1976.

TASSINARI, C.C.G.; MACAMBIRA, M. J. B. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, v. 22 (3), p. 174-182, 1999.

TASSINARI, C.C.G.; MACAMBIRA, M. J. B. Evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: MANTESSO NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO NEVES, B. B. (org). *Geologia do continente Sul Americano. Evolução da obra de F. F. M. de Almeida*. São Paulo BECA, v., p. 471-486. 2004.

VASQUEZ, L.V.; ROSA-COSTA, L.R.; SILVA, C.G.; RICCI, P.F.; BARBOSA, J.O.; KLEIN, E.L.; LOPES, E.S.; MACAMBIRA, E.B.; CHAVES, C.L.; CARVALHO, J.M.; OLIVEIRA, J.G.; ANJOS, G.C.; SILVA, H.R. *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG : texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará*. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM, 2008.

WIRTH, K.R.; GIBBS, A.K.; OLSZEWSKI Jr., W.J. U-Pb zircon ages of the Grão Pará group and Serra dos Carajás granite, Para, Brazil. *Rev. Bras. Geoc.*, v. 16(2), p. 195-200, 1986.

WONES, D.R. Significance of the assemblage titanite + magnetite + quartz in granitic rocks. *American Mineralogist*, v. 74, p. 744-749, 1989.