

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CONTATO LATERAL ENTRE A NAPPE AIURUOCA-  
ANDRELÂNDIA DE ALTA PRESSÃO E A NAPPE LIMA  
DUARTE, DE ALTA TEMPERATURA:RELAÇÕES  
METAMÓRFICAS E ESTRUTURAIS NA REGIÃO DE  
BOM JARDIM DE MINAS, MINAS GERAIS**

Fabrizio Rodrigues Costa

Orientador: Prof. Dr. Mario da Costa Campos Neto

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF - 2004/06)

TF  
C837  
FR.c

SÃO PAULO  
2004



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC



30900016384

**Contato Lateral entre Nappe Aiuruoca-Andrelândia  
de Alta Pressão e a Nappe Lima Duarte, de Alta  
Temperatura: Relações Metamórficas e Estruturais  
na Região de Bom Jardim de Minas, Minas Gerais**

**Fabrizio Rodrigues Costa**



Monografia de Trabalho de Formatura

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Mario da Costa Campos Neto \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Miguel Basei \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Gergely Andres Júlio Szabó \_\_\_\_\_

São Paulo

2004



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CONTATO LATERAL ENTRE A NAPPE AIURUOCA-  
ANDRELÂNDIA DE ALTA PRESSÃO E A NAPPE LIMA DUARTE,  
DE ALTA TEMPERATURA: RELAÇÕES METAMÓRFICAS E  
ESTRUTURAIS NA REGIÃO DE BOM JARDIM DE MINAS –  
MINAS GERAIS.

FABRIZIO RODRIGUES COSTA



Orientador: Mario da Costa Campos Neto

*Mario da Costa Campos Neto*

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2004/06)

SÃO PAULO  
2004



## *Agradecimentos*

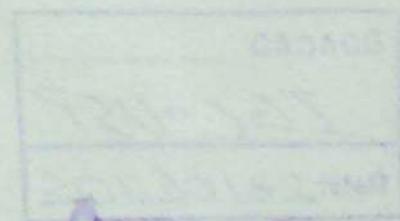
*Expresso meus agradecimentos a todos que me ajudaram nesta difícil empreitada. Em especial a minha grande família. Meus pais, Adão e Iracema por ter dado todas as condições que uma pessoa precisa para vencer na vida. Meu irmão Jerryson pela sabedoria e Ludmilla pela garra e a minha querida Regiane, pelo amor e compreensão.*

*Agradeço ao professor Mario da Costa Campos Neto, pela paciência de ter me orientado e pela sua dedicação.*

*Aos colegas da casa, Renato H. Pinto (Lesma), Flávio Vieira (Mamut), Bruno Calado (Chuck) e Marcelo Braga (Bostão).*

*Aos pós-graduandos Sérgio Aracy Willians, Carlos Guano Carvalho pela grande ajuda. Reinaldo KUKA pela ajuda nos mapas.*

*À todos os camaradas da geo...não vou citar nomes, pra não correr o risco de esquecer de alguém.*



DOAÇÃO .....
<i>IGC-USP</i>
Data: <i>27/06/05</i>

## Resumo

A Nappe Aiuruoca-Andrelândia é uma pilha predominantemente metassedimentar, neoproterozóica de alta pressão. O domínio metamórfico definido para a Nappe Aiuruoca-Andrelândia indica um caminhamento metamórfico progressivo, associado a porfiroblastos de granada que registram condições de pico metamórfico em fácies anfibolito superior, sendo a sillimanita seu mineral índice. É margeado por uma zona de cisalhamento lateral direita (Zona de Cisalhamento Liberdade), que cavalga a Nappe Lima Duarte. As lineações minerais associadas a zonas de empurrão são geralmente subhorizontais desenvolvidas principalmente em quartzo e muscovita. A norte ocorre à seqüência metassedimentar Serra da Boa Vista onde predomina variações de rutilo-aluminossilicato-granada-biotita-muscovita-quartzo xisto grosso intercalado com espessos pacotes de granada-plagioclásio-biotita xisto/gnaiss cinza homogêneo (Xisto Santo. Antônio).

A Nappe Lima Duarte corresponde a um alóctone de alta temperatura com exclusiva associação de sillimanita e restos de granada, recristalizados em textura milonítica com grãos de quartzo estirados e alongados. Na porção central da área de estudo na Nappe Lima Duarte ocorre uma seqüência gnaíssico-migmatítico configurada em uma mega dobra em bainha, regionalmente fechada, em um amplo dobramento pós-xistoso. Em ambos os domínios, as fases  $D_3$  são pré a sin-cavalgamento devido ao truncamento entre a foliação  $S_2$  nos dois domínios.

Os elipsóides obtidos são essencialmente oblatos, no campo do achatamento aparente uniaxial, podendo indicar uma deformação coaxial – cisalhamento puro em um regime pós-cavalgamento.

## Abstract

The neoproterozoic nappe system exposed south of the San Francisco Craton underwent a minimum of 200 km of near-horizontatl northeastward displacement. This nappe system comprise the south-southeast sector of Brasilia Belt and piles up three tectonic settings and the different orogenic stages: it is admitted active margin, fragment continental subducted and of passive margin. Represents an inverted metamorphic pile (stack) of green schist facies (botton) toward amphibolite faices (Carmo da Cachoeira and Aiuruoca-Andrelândia nappes and high pressure granulites in the top, under a high temperature allochthonous (Socorro-Guaxupé nappe).

The Aiuruoca-Andrelândia nappe represents a Neoproterozóic high-pressure metasedimentary metamorphic pile. The metamorphic domin for Aiuruoca-Andrelândia nappe indicates a progressive metamorphic growth, associated with a garnet porphyroblasts that register conditions of metamorphic pick in facies amphibolite, being sillimanite your mineral index. It is bordered by a shear zone of right lateral (Liberdade Shear Zone), that Lima Duarte rides. The mineral lineation associated brittle thrust system are usually subhorizontais developed mainly in quartz and muscovite. In the nothr occurs a sequence metasedimentary where prevails varitions of rutile-aluminesilicate-garnet-biotite-muscovite-quartz schist thick inserted with thick packages of garnet-plagioclase-biotite schist/gnaisse (Santo Antonio Schist).

The Lima Duarte nappe corresponds an high temperature allochthonous with exclusive association of sillimanite and remains garnet, recrystalized in milonitic textures. In the central study area of Lima Duarte Nappe occurs a sequence gnaissic-migmatitic configured in an sheath fold, closed, in a wide folding sin-Sn.

The study of standard deformation, the elipsoids are essentially oblates, in the field uniaxial, could indicate a coaxial deformaton or a pure shear – compressive regime.

## ÍNDICE

<b>1. Introdução</b> .....	1
1.1. Localização e Acessos .....	2
1.2. Objetivo .....	3
1.3. Materiais e métodos .....	3
1.4. Contexto Geotectônico .....	5
<b>2. As Nappes Aiuruoca-Andrelândia e Lima Duarte: Principais litotipos envolvidos</b> .....	8
2.1. Nappe Lima Duarte .....	8
2.2. Nappe Aiuruoca-Andrelândia .....	9
<b>3. Petrografia de rochas metamórfica: principais feições metamórficas</b> .....	12
3.1. Domínio Lima Duarte .....	12
3.2. Domínio Aiuruoca-Andrelândia .....	13
3.3. Interpretação dos dados: conclusão sobre o Metamorfismo .....	18
<b>4. Estudo do elipsóide de deformação</b> .....	20
<b>5. Análise Estrutural</b> .....	26
5.1. Introdução .....	26
5.2. Superfície $S_0$ e foliação $S_1$ .....	26
5.3. Dobras $D_2$ .....	27
5.4. Foliação $S_2$ .....	27
5.5. Dobras $D_3$ .....	28
5.6. Foliação $S_3$ .....	28
5.7. Dobras $D_4$ .....	29
5.8. Clivagem $S_4$ .....	29
5.9. Lineações mineral – $l_m$ .....	29
5.10. Indicadores Cinemáticos .....	30
5.11. Zonas de empurrão .....	30
5.12. Tectônica Rúptil – Falhas e Fraturas .....	31
5.13. Interpretação das estruturas planares e lineares .....	32
5.14. Interpretação dos dados: conclusão sobre a análise estrutural .....	39
<b>6. Conclusões</b> .....	40
<b>7. Referências Bibliográficas</b> .....	41

## Índice de Figuras

Figura 1.1	Principais acessos e localização da área de estudo.....	2
Figura 1.2	Contexto geológico regional englobando a área de estudo.....	4
Figura 1.3	Mapa tectônico do Sudeste Brasileiro.....	6
Figura 3.3.1	Trajectoria metamórficas e condições P-T das rochas do Domínio Nappe Aiuruoca- Andrelândia e Nappe Lima Duarte.....	18
Figura 4.1	Amostra BJ-TF-17 - corte XZ.....	22
Figura 4.2	Amostra BJ-TF-17 - corte YZ.....	22
Figura 4.3	Amostra BJ-TF-45 - corte XZ.....	23
Figura 4.4	Amostra BJ-TF-45 - corte YZ.....	23
Figura 4.5	Amostra BJ-VI-40a - corte XZ.....	24
Figura 4.6	Amostra BJ-IV MM-40a corte YZ.....	24
Figura 4.7	Amostra BJ-III-10 - corte XZ.....	24
Figura 4.8	Amostra BJ-III-10 corte YZ.....	24
Figura 4.9	Diagrama logarítimo de deformação.....	25
Figura 5.13	Mapa de domínios estruturais.....	32
Figura 5.13.1	Domínio Aa1: Estereograma para pólos de foliação principal $S_2$ .....	33
Figura 5.13.2	Domínio Aa1: Diagrama de contorno para lineação mineral.....	33
Figura 5.13.3	Domínio Ld3: Estereograma para pólos de foliação principal $S_2$ .....	34
Figura 5.13.4	Domínio Ld3: Diagrama de contorno para lineação de estiramento.....	34
Figura 5.13.5	Domínio Aa3: Estereograma para pólos de foliação principal $S_2$ .....	34
Figura 5.13.6	Domínio Aa3: Diagrama de contorno para lineação mineral.....	34
Figura 5.13.7	Domínio Aa2: Diagrama para contorno de pólos para foliação principal .....	35
Figura 5.13.8	Domínio Aa2: Diagrama de contorno para lineação de mineral.....	35
Figura 5.13.9	Domínio Ld1: Diagrama de contorno para pólos foliação principal $S_2$ .....	35
Figura 5.13.10	Domínio Ld2: Diagrama de contorno pólos de foliação principal $S_2$ .....	36
Figura 5.13.11	Domínio Ld2: Diagrama de contorno para lineação de mineral.....	36
Figura 5.13.12	Domínio Sbv1: Estereograma para pólos de foliação principal $S_2$ .....	36
Figura 5.13.13	Domínio Sbv1: Diagrama. de contorno para lineação de mineral.....	36
Figura 5.13.14	Domínio Ld4e: Diagrama de contorno para lineação mineral.....	37
Figura 5.13.15	Domínio Ld4e: Diagrama de contorno para pólos foliação $S_2$ .....	37
Figura 5.13.16	Estereograma para fratura para família Domínio estrutural Ld2.....	38
Figura 5.13.17	Estereograma para fratura para família II. Domínio estrutural Ld2.....	38

## Índice de Tabelas

Tabela 1	Valores e parâmetros calculados para elipsóides de deformação pelo método Fry.....	22
----------	--	----

## Índice de Anexos

Anexo 1	Perfis Geológicos
Anexo 2	Mapa Geológico

## 1. Introdução

No Brasil da década de 50, somente as áreas de interesse econômico tinham um conhecimento geológico detalhado. No Estado de Minas Gerais, a região do Quadrilátero Ferrífero exemplifica essa situação.

No sudeste de Minas Gerais, na região do Rio das Mortes (Folha Barbacena), a ocorrência de minerais radioativos em pegmatitos justificou levantamentos aerofotogramétricos, geológicos e aerogeofísicos, que contribuíram na caracterização geológica dos Grupos São João Del Rei e Andrelândia, dentro do modelo tectônico clássico da época: um cenário de evolução geossinclinal.

A partir da década de 80, mapeamentos geológicos de detalhe foram realizados pela equipe liderada pelo Prof. R.A.J. Trouw, buscando o estabelecimento da história estrutural, metamórfica e litoestratigráfica da região (Folhas 1:250.000 Barbacena e Varginha parciais). Estes trabalhos encontram-se concluídos (no geral inéditos) como dissertações de Mestrado defendidas na Universidade Federal do Rio de Janeiro e encontram-se sumariados em Trouw *et al.* (1983 e 1986).

Mapeamentos geológicos também foram realizados por equipes e estudantes liderados pelos professores Mário da Costa Campos Neto e Miguel Ângelo Stipp Basei, ambos do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, sucessivamente nos anos de 1994 à 1997 e de 2000 à 2004. Esses mapas geológicos têm permitido uma complementação do acervo geológico-cartográfico e a integração estrutural da região em sistemas de nappes de alta pressão e de nappes de alta temperatura, dentro do contexto tectônico colisional do Neoproterozóico na borda sul do Cráton do São Francisco (Campos Neto e Caby, 1999 e 2000).

Estudos de campo, mapeamento geológico, análise estrutural, petrografia metamórfica e interpretação tectônica permitiu a síntese de dois sistemas orogênicos maiores, Tocantins e Mantiqueira. O Orógeno Tocantins Meridional registra episódios de subducção e colisão neoproterozóico, no fechamento do paleo-oceano Goianides. Já o Sistema Orogrênico Mantiqueira reúne diacronicamente, microplacas e terrenos relacionados ao fechamento do paleo-oceano Adamastor amalgamados contra a borda oriental do protocontinente aglutinado no Orógeno Tocantins Meridional. Essa colagem consolidou uma espessa litosfera com manto superior aclopado, até cerca de 660km de profundidade (VanDecar *et al.*, 1995).

### 1.1. Localização e Acessos

A área de estudo localiza-se na região sul do Estado de Minas Gerais, entre os municípios de Andrelândia, Arantina e Santa Rita de Jacutinga, delimitada pelos paralelos 22°30' – 22°45' e meridianos 44°30' – 45°, compreendendo as folhas Bom Jardim de Minas (SF-23-X-C-V-4) e Arantina (SF-23-X-C-V-3) na escala 1: 50.000.

O acesso se faz pela rodovia BR-116 saindo da cidade de São Paulo no sentido do Estado do Rio de Janeiro até o entroncamento com a BR-354, no município de Engenheiro Passos (RJ). Percorre-se do entroncamento até Itamonte (MG), de onde é possível continuar em direção à Pouso Alegre e Caxambú e seguir em direção a Bom Jardim de Minas pela rodovia MG-267. (figura 1.1). As principais vias de acesso às áreas de afloramentos são por estradas de terra, por vezes estaduais, passando por vilarejos e povoados.

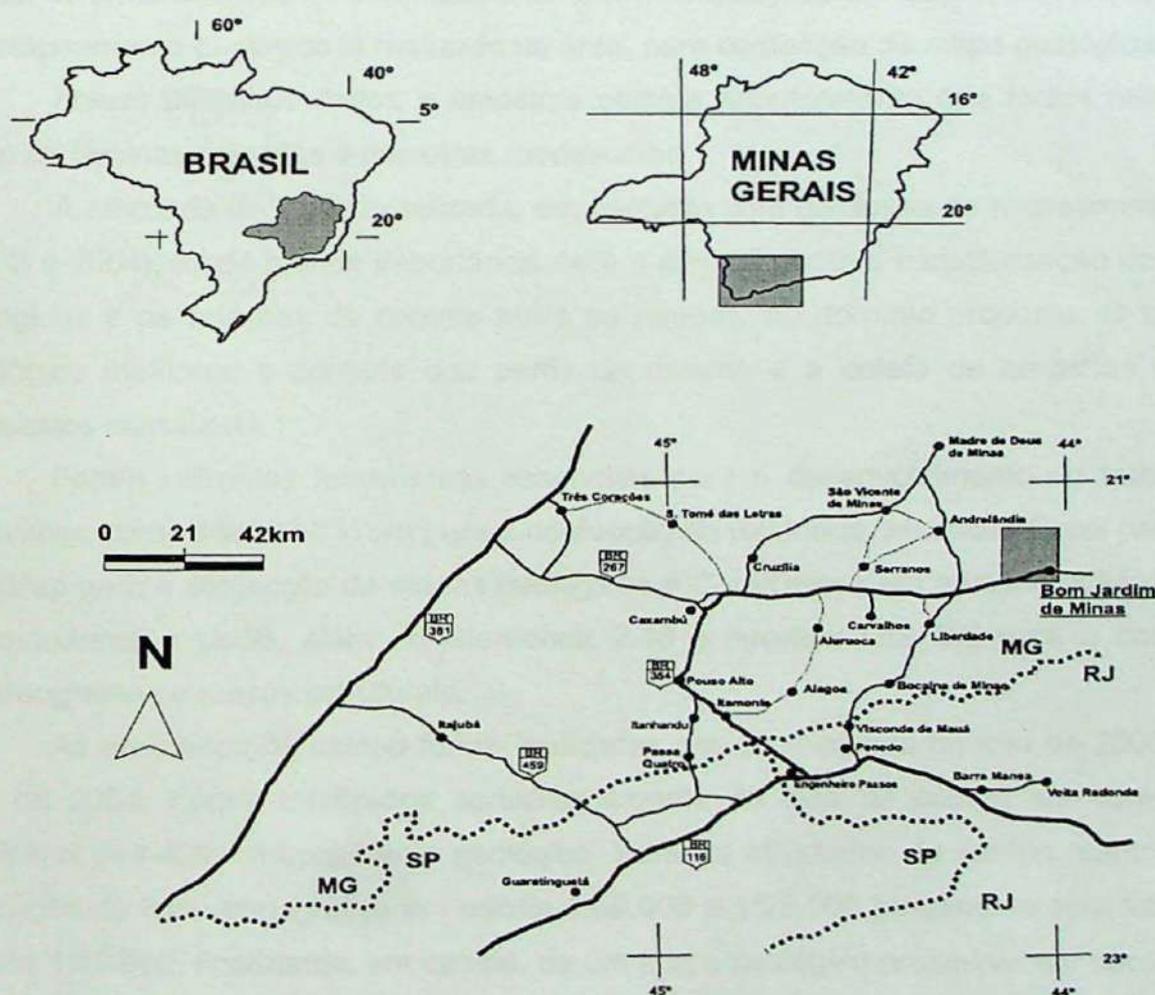


Figura 1.1 – Principais acessos e localização da área de estudo.

## **1.2. Objetivo**

O objetivo deste estudo é a comparação da geometria das estruturas, da cinemática e evolução metamórfica de duas nappes; a Nappe Lima Duarte e a Nappe Aiuruoca-Andrelândia (figura 1.2), na região de Bom Jardim de Minas – Minas Gerais.

## **1.3. Materiais e métodos**

A fim do cumprimento dos objetivos propostos, foi realizado levantamento bibliográfico, visando a caracterização geológica, o entendimento da geologia regional, além de uma revisão crítica do tema abordado. Foi realizado também compilações em escala de 1:50.000 dos dados de mapeamento geológico já realizado na área, para confecção de mapa geológico integrado.

Foram utilizados dados e amostras obtidas anteriormente que foram reinterpretados, além de lâminas delgadas e amostras reedescritas.

A atividade de campo realizada, em conjunto com disciplina de mapeamento geológico (2003 e 2004), foi de grande importância para o entendimento e caracterização dos conteúdos litológicos e as relações de contato entre as nappes, no domínio proposto. O mapeamento geológico melhorou o controle dos perfis de detalhe e a coleta de amostras e dados de elementos estruturais.

Foram utilizadas ferramentas essenciais para o desenvolvimento do trabalho alguns *softwares*, como *Microsoft Word* para a confecção de relatórios, *Microsoft Excel* para planilhas, *CadMap* para a confecção de mapas geológicos e *CorelDraw* para apresentação de desenhos de estruturas e perfis, além do *Stereonet 2.46* e *Arcview GIS 3.2* para a construção de estereogramas e mapas estruturais.

As atividades de campo foram realizadas em duas etapas no ano de 2003 e duas no ano de 2004. Foram totalizados aproximadamente 45 dias de campo em conjunto com a disciplina 044-420 - mapeamento geológico. Para as atividades de campo, contou-se com a utilização de base cartográfica em escala 1:50.000 e 1:25.000 juntamente com foto aérea em escala 1:60.000, finalizando, em campo, de um mapa geológico preliminar em escala 1:25.000. Na coleta de dados estruturais, utilizou-se bússola *Clar* para obtenção de dados planares e lineares.

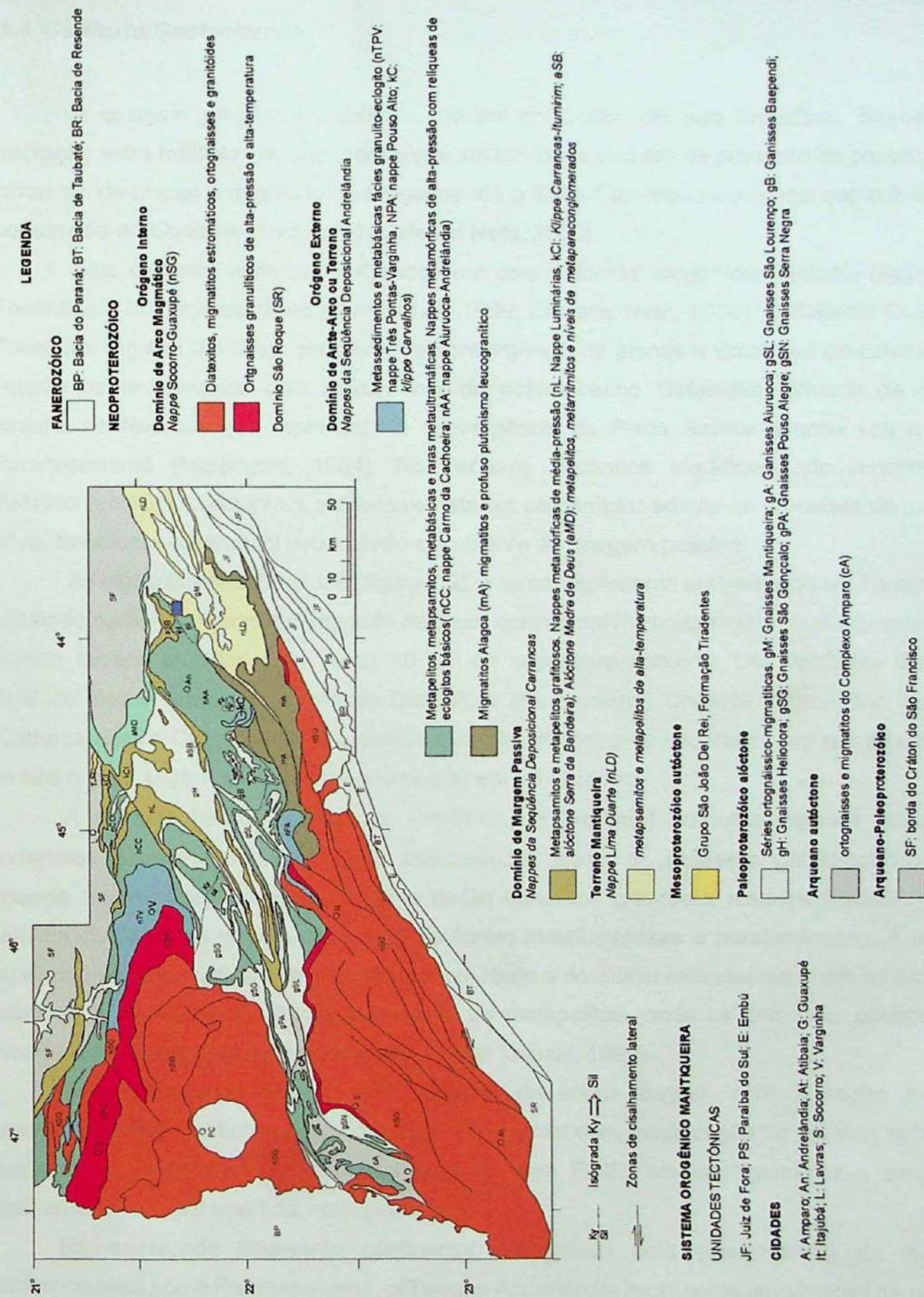


Figura 1.2 - Contexto geológico regional englobando a área de estudo, segundo Campos Neto et al. 2000.

#### 1.4. Contexto Geotectônico

A colagem orogênica brasileira, no sul do Cráton do São Francisco, representa a interação entre múltiplas etapas orogênicas em um longo período de processo de convergência, consumo de placas e migração de orógenos até o limite Cambro-Ordoviciano que culminou na construção do *Gondwana* ocidental (Campos Neto, 2000).

Esta colagem pode ser sintetizada em dois sistemas orogênicos maiores (figura 1.3), Tocantins e Mantiqueira (Brito Neves *et al.*, 1999; Campos Neto, 2000). O Sistema Orogrênico Tocantins registra um longo processo de convergência de placas e episódios de subducção e colisão neoproterozóico com fechamento do paleo-oceano Goianides, oriundo da quebra toniana de Rodínia, que representa a convergência da Placa Sanfranciscana sob a Placa Paranapanema (Marangoni, 1994). No Orógeno Tocantins Meridional são reconhecidos distintos ambientes tectônicos e diferentes etapas orogênicas: admite-se ambiente de margem ativa, fragmento continental subductado e ambiente de margem passiva.

A Nappe Socorro-Guaxupé (figura 1.2), interna, representa ambiente de arco magmático instalado na borda oriental adelgada da placa continental Paranapanema, que representa um grande terreno alóctone com cerca 10 km de espessura contendo três unidades distintas. Unidade Basal Granulítica, Unidade Diatexitica Intermediária, Unidade Migmatítica Superior (Campos Neto e Caby, 2000). A estrutura alóctone encontra-se separadas por rampas laterais de alto ângulo segmentado a norte (Guaxupé) e a sul (Socorro).

A unidade basal consiste em Grt-Bt-Opx-(±Cpx-Amp) granulito-gnaisses bandados, enderbitos a charnoenderbitos, com intercalações locais de gnaisses gabro-noríticos. Na unidade intermediária predominam Bt e Bt-Grt diatexitos graníticos rosados (Janasi, 1997), derivam da fusão da quebra da biotita, de fontes metaluminosas e peraluminosas. A porção superior é caracterizada por migmatitos estromáticos e possuem mesossomas com assinaturas químicas e isotópicas de metagrauvas e de metapelitos, onde os primeiros oriundos da denudação de arco magmático neoproterozóicos (Janasi, 1999).

Essas unidades exibem uma foliação de baixo ângulo, com lineação mineral desenvolvida sob condições de deformação não coaxial com modificação de volume, sob altas temperaturas. Indicadores cinemáticos de topo para E.NE, em cavalgamento e zonas de cisalhamento sin-metamórfica, normal-obliqua.

Representando fragmento continental subductado pela convergência da litosfera Sanfranciscana sob a Paranapanema, o Terreno Andrelândia representa um sistema de *nappes* de alta pressão, estiradas e transportadas para E.NE e NE, sotoposta à Nappe Socorro-

Guaxupé. Consiste da pilha metassedimentar do Grupo Andrelândia referido por Trouw et al., 1983. Os conjuntos de nappes superiores são representados pelos terrenos de alta temperatura-alta pressão Três Pontas-Varginha, Pouso Alto e *Klippe* Carvalhos. Consistem de Rt-(Sil)-Ky-Grt granulitos, com bandamento composicional herdado de estratificação sedimentar e delineado por distintas proporções de Ky e Grt e entre Pl e Kfs.

As nappes inferiores são caracterizadas por alta pressão (Nappe Carmo da Cachoeira e Nappe Aiuruoca-Andrelândia). São representadas na base por quartzitos com intercalações de micaxistos e subordinadamente de gnaisses calciossilicáticos. Regionalmente ocorrem Rt-Grt-Bt-pl-Qtz xisto/gnaiss, homogêneo e espesso em até 750m (Xisto Santo Antônio, Trouw et al., 1983). Quartzitos impuros e/ou uma seqüência rítmica xisto-quartzítica ocorrem no topo.

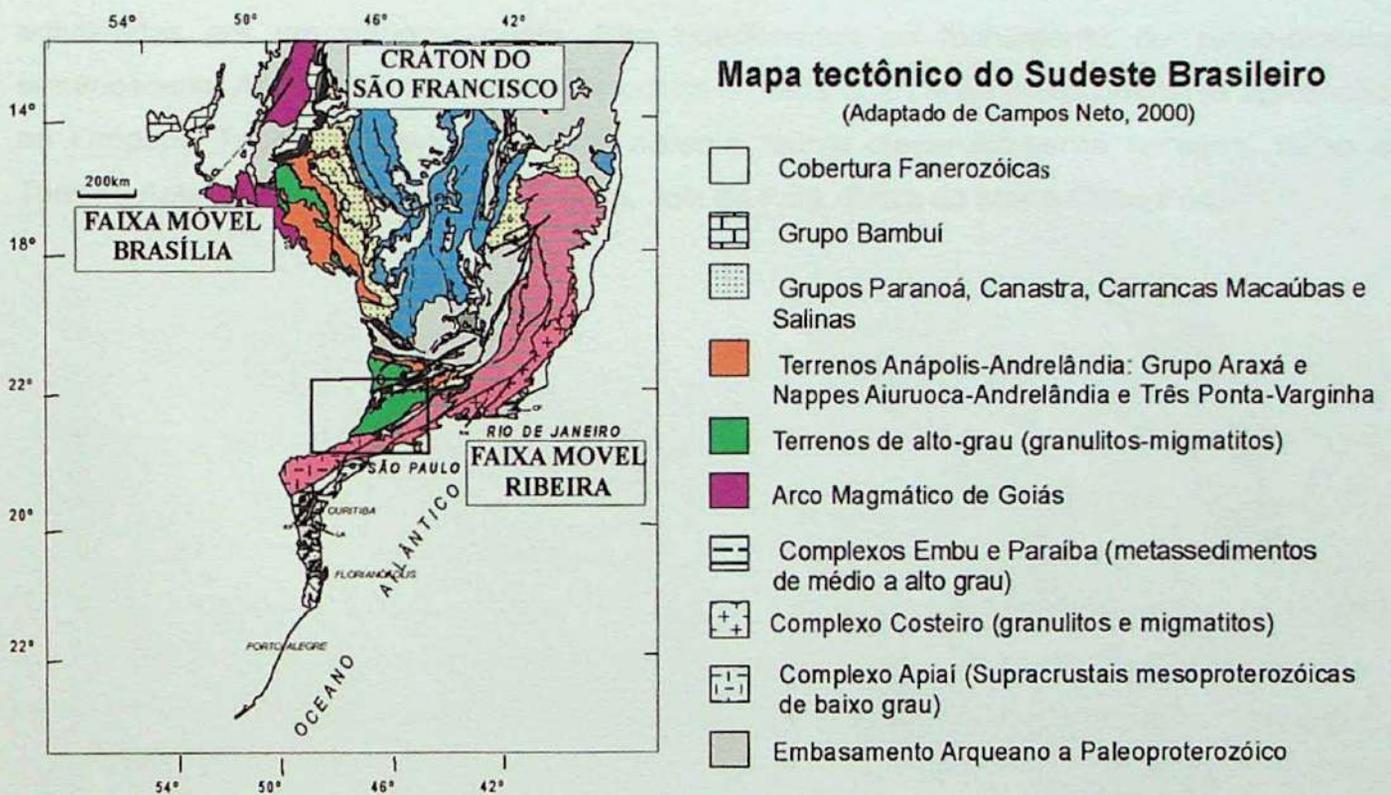


Figura 1.3 – Mapa tectônico do Sudeste Brasileiro, segundo Campos Neto, 2000.

A Nappe Lima Duarte, terreno oriental do sistema orogênico, com afinidade de margem passiva, é cavalgada a SE pela Nappe Aiuruoca-Andrelândia e ambas cavalgam a seqüência metassedimentar do Grupo Carrancas. Limita-se a sul na Zona de Cisalhamento Rio Preto, lateral direita e reequilibrada na fácies xisto verde, que representa a extensão meridional da sutura Abre Campo com o Terreno Juiz de Fora (Hasui, 1984; Fishel et al., 1998; Costa et al., 1998; Pedrosa-Soares e Noce, 1998). Consiste de quartzitos muito grossos, recristalizados em textura milonítica, onde ortoquartzitos predominam sobre quartzitos imaturos com restrita fácies

ferríferas bandadas. Os quartzitos ocorrem em lascas de aproximadamente 750 m e imbricadas com Sil-Grt-Bt gnaisses migmatíticos, com intercalações esparsas e delgadas de gnaisses calciossilicáticos. Bt gnaisses e Grt-Bt gnaisses homogêneos ocorrem na retaguarda do alóctone.

As lineações minerais sin-metamórficas indicam o fluxo da nappe para E.NE a sul, que inflete, em direção a norte, para N.NE. Define uma trajetória curva, ao longo de 60km de transporte, controlado pela foliação de baixo ângulo para SE. A delgada capa metassedimentar superior reorganizou-se em duplex rúptil, *thin-skinned*, posterior ao dobramento da foliação com vergência para NW.

O Sistema Orogênico Mantiqueira reflete na polintegração entre placas e microplacas, tardiamente agregadas à borda oriental das placas Paranapanema e Sanfranciscana, já aglutinadas em um protocontinente. São relacionados ao fechamento do paieo-oceano remanescente Adamastor, amalgamados contra a borda oriental do protocontinente aglutinado no Orógeno Tocantins Meridional. Este sistema reuniu diacronicamente terrenos, como o Terreno Apiaí, Luis Alves, Pelotas, Curitiba, Juiz de Fora, Serra do Mar e Cabo Frio.

## 2. As Nappes Aiuruoca-Andrelândia e Lima Duarte: Principais litotipos envolvidos

### 2.1. Nappe Lima Duarte

A Nappe Lima Duarte, terreno oriental do sistema orogênico Tocantins é cavalgada pela Nappe Aiuruoca-Andrelândia, onde ambas cavalgam a seqüência metassedimentar do Grupo Carrancas.

A Nappe Lima Duarte corresponde a uma seqüência de muscovita quartzitos ± sillimanita (foto 2.11) e ortoquartzitos grosso a muito grosso (foto 2.6), recristalizado em textura milonítica com grãos de quartzo estirados e alongados. Possui ainda estrutura maciça e textura predominantemente granoblástica. Em alguns afloramentos, principalmente na porção sudeste, subordina-se sillimanita-muscovita-biotita quartzito feldspático (foto 2.4) com lentes de biotita centimétricas (2 cm). Estruturas alongadas do tipo *klippe* ocorrem associadas a granada-sillimanita xisto feldspático. Granada-hornblenda-biotita gnaisse (foto 2.5) tonalito/trondjemito polimetamórfico (Gnaisse Mantiqueira - Figueiredo e Teixeira, 1996) correspondem a uma lâmina inserida na estrutura alóctone. *embasamento*

Uma seqüência alóctone gnáissico-migmatítico encontra-se no núcleo de uma estrutura regionalmente fechada. Trata-se de uma megadobra em bainha, responsável por uma figura de interferência do tipo 3 (Ramsay, 1987), com rochas xistosas em um amplo dobramento pós-xistoso. É evidenciado principalmente na porção sudeste-leste da área e representado por: biotita gnaisse (foto 2.12 e 2.13) granodiorito/tonalito com bandamento centimétrico homogêneo com níveis boudinados de metabásica e leucossoma com concentração de biotita nas bordas; granada-hornblenda-biotita gnaisse com plagioclásio An<sub>68</sub> (labradorita) intersticial e *ribbons* de quartzo com predomínio de porções migmatíticas (estrutura *schlieren*) com níveis anfibolíticos centimétrico paralelo ao bandamento gnáissico. *ponto 88*

Paragnaises representado por granada-sillimanita-biotita gnaisse com textura granolepidoblástica média (foto 2.3) com níveis homogêneos grossos e bandados com estrutura migmatítica estromática também ocorrem. Intercalações métricas de granada-sillimanita-biotita xisto (foto 2.2), principalmente na porção norte, apresentam-se intensamente alterados. Muscovita-biotita gnaisse diatexito (foto 2.15), lepidogranoblástico equigranular, médio a grosso, cortado por veios de leucogranito (foto 2.9) pós-S<sub>2</sub> com granada e predomínio de feldspato potássico (microclinio) sobre plagioclásio An<sub>45</sub> (andesina), aflora em extensas lages (aproximadamente 20 metros) em drenagens, cortes de estrada e apresenta contato por falha

inversa com ortoquartzito (sul) e granada-horblenda-biotita gnaissé bandado a norte.

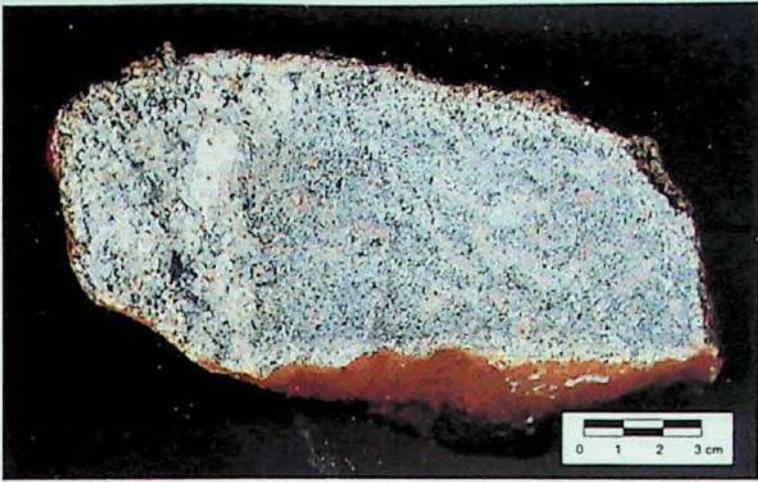
Paragêneses de alta temperatura, que será discutido a seguir, indicam condições de ultra-alta temperatura. Granulitos básicos e granoblásticos, não inseridos na área de estudo, indicam condições que atingiram 950°C-12Kbar, com equilíbrio a 850°C-10kbar (Vilela, 2000).

O contato com a Nappe Aiuruoca-Andrelândia (oeste) se dá por zonas de cisalhamento lateral direita (porção norte a Zona de Cisalhamento Liberdade – ZCL, Rodrigues, 2003). Mais a norte, já fora da área de estudo, o contato é seguido por um cavalgamento de mica xistos sobre os quartzitos. Configura um sistema de rampa lateral e duplex tardio, que trunca a foliação metamórfica e as unidades adjacentes por contatos tectônicos.

## **2.2. Nappe Aiuruoca-Andrelândia**

Compreende por uma unidade basal (rutilo)-aluminossilicatos-granada-muscovita-biotita xisto porfiroblástico com variação gradacional de granada-muscovita-quartzito (foto 2.10). (Santos, 2004). Normalmente granada ocorre porfiroblástica (foto 2.7) com intercalações métricas de c. de 20 m de muscovita quartzito, que apresenta granulação média à fina e ortoquartzitos, com granulação grossa, equigranular. A norte predomina variações de rutilo-aluminossilicato-granada-biotita-muscovita-quartzito xisto grosso (foto 2.8a, b) e porfiroblástico intercalado com lentes métricas de ortoquartzito (seqüência Serra da Boa Vista). Possui ainda  *pods*  de cianitito orientados e encaixados segunda a foliação principal  $S_2$ . Dobras isoclinais e padrões de interferência em laço definidos em leitos quartzosos exibem planos axiais paralelos à foliação principal  $S_2$ . Associadas a estes tipos de dobras, o desenvolvimento de dobras em bainha podem indicar zonas de cisalhamento. Intercalado a todo esse pacote, ocorrem rochas cálcio-silicáticas e sillimanita-granada-biotita gnaissé com metaultramáficas e gonditos pontuais. Corpos de leucognaissé com espessura métrica com c. de 15m ocorrem sem uma orientação preferencial em relação a encaixante.

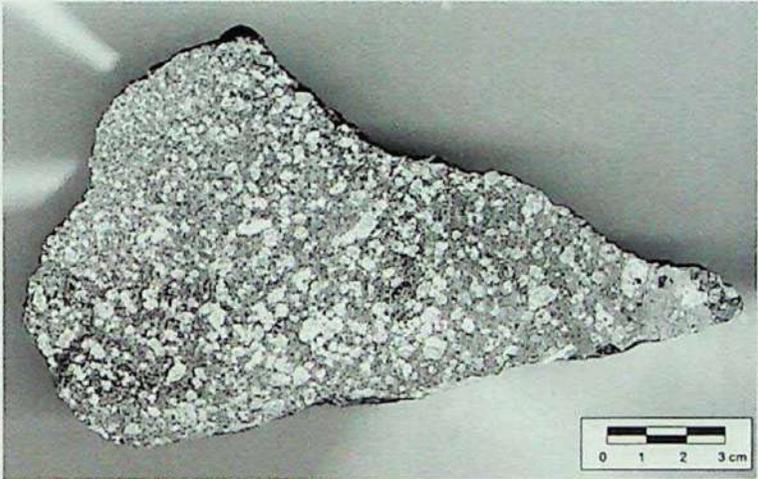
Um espesso pacote associado seqüência da Serra da Boa Vista corresponde a granada-plagioclásio-biotita xisto/gnaissé cinza com porfiroblastos de granada (foto 2.1 e 2.16). Trata-se de um pacote espesso (1250 m), metassedimentar do tipo wacks, definida por Trouw et al. (1983) como Xisto Santo Antônio. Possui textura homogênea, estrutura maciça com leitos e vênulos quartzo-feldspato podem definir dobras centimétricas pós- $S_2$  e em alguns lugares podem estar milonitizados. Segundo Campos Neto  *et al* , 1990; Janasi, 1999, Xisto Santo Antônio possuem assinatura de grauvascas, com área fonte em ambiente de margem ativa.



**Foto 2.1** - Granada-biotita-plagioclásio gnaissé com muscovita e porções homogêneas equigranulares e níveis porfiroblástico de quartzo/plagioclásio (BJ-I-102).



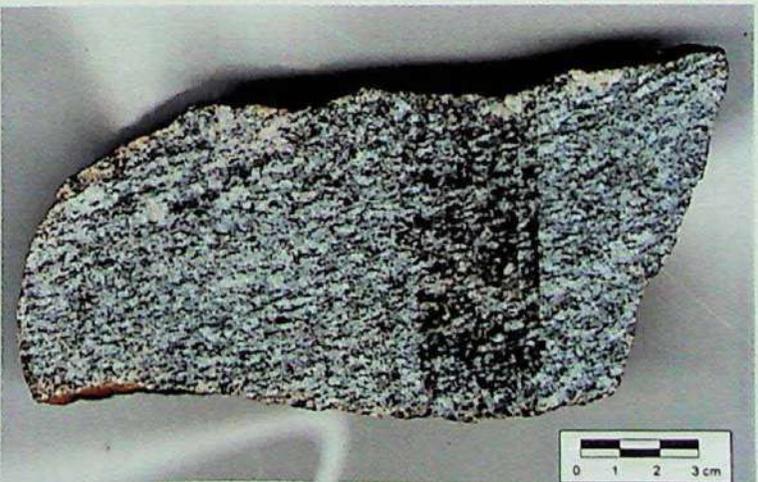
**Foto 2.2** - Granada-sillimanita-biotita xisto com orientação de minerais micáceos segundo a foliação principal. Níveis milimétricos de sillimanita envolto a grãos porfiroblásticos de granada. (BJ-X-138)



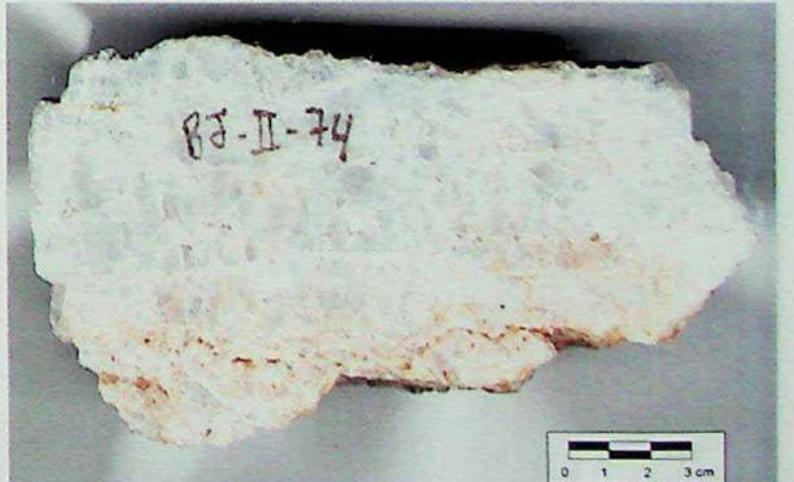
**Foto 2.3** - Granada-sillimanita-biotita gnaissé com sericita. Grãos de quartzo e granada estiradas segundo o bandamento gnaissico. (BJ-I-1b)



**Foto 2.4** - Sillimanita-muscovita-biotita quartzito com bandas de biotita e grãos de quartzo milonitizado definindo a foliação principal. Níveis milimétricos de biotita. (BJ-I-76).



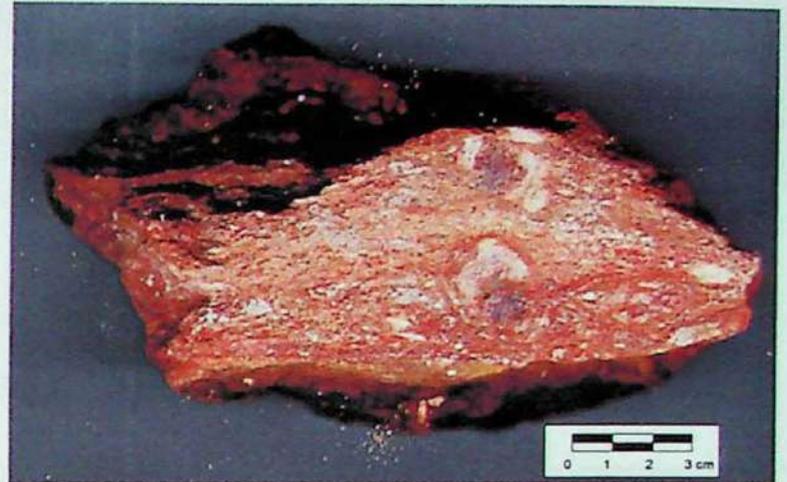
**Foto 2.5** - Granada-hornblenda-biotita gnaissé com bandamento gnaissico dado por bandas de concentração de máficos. (BJ-I-81a)



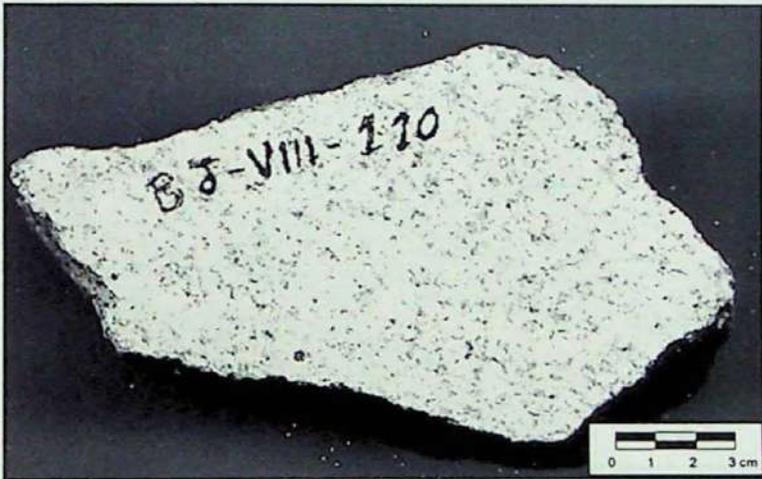
**Foto 2.6** - Ortoquartzito com grãos de quartzo estirado e alongado, equigranular com cristais subidioblástico. (BJ-II-74)



**Foto 2.7** - Biotita-plagioclásio-cianita-granada-muscovita xisto porfiroblástico com muscovita e quartzo pouco estirado definindo a xistosidade principal. (BJ-VI-108)



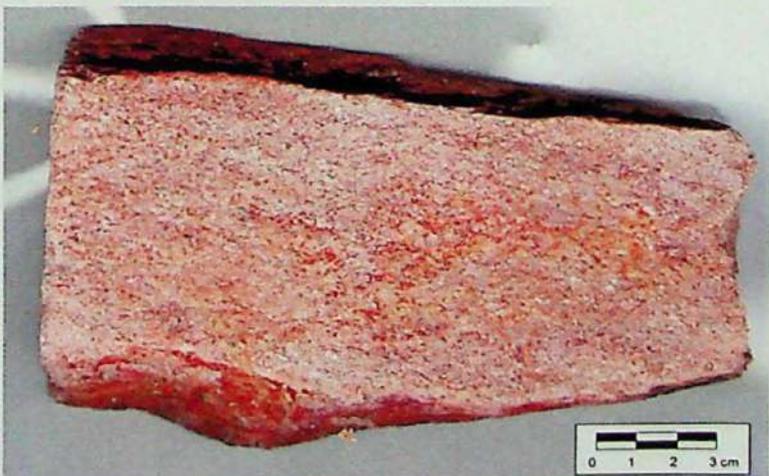
**Foto 2.8** - Sillimanita-granada-muscovita-quartzo xisto com grafita e turmalina e porfiroblastos de granada. Foliação principal dado por sillimanita e muscovita. Grafita e turmalina pouco disseminada. (BJ-IV-127)



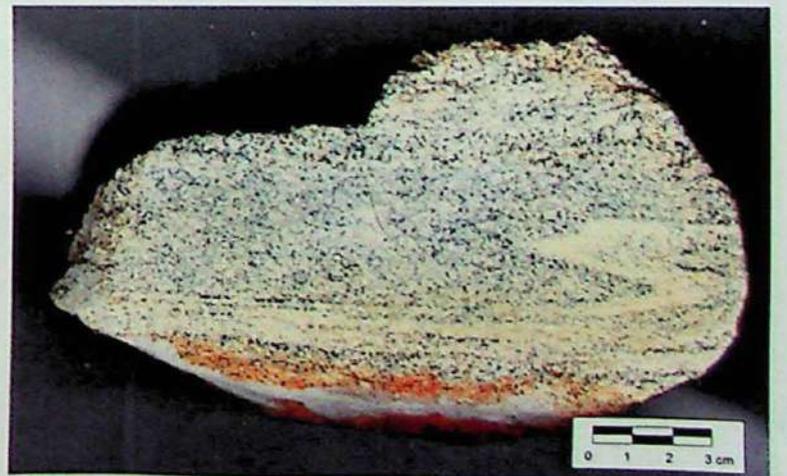
**Foto 2.9** - Leucogranito com granada, turmalina, muscovita, quartzo, biotita e plagioclásio, médio a grosso, bastante alterado. (BJ-VIII-110)



**Foto 2.10** - Granada-muscovita-biotita-quartzo xisto intensamente deformado. Níveis de biotita e granada definindo foliação principal. (BJ-V-86b)



**Foto 2.11** - Muscovita quartzito impuro, com biotita e plagioclásio disseminado na amostra. (BJ-VI-29)



**Foto 2.12** - Biotita gnaiss cinza, migmatítico localmente com granada. (BJ-X-103)



Foto 2.13 - Biotita gnaïsse com bandamento milimétrico pouco intemperizado de biotita. (BJ-II-92)

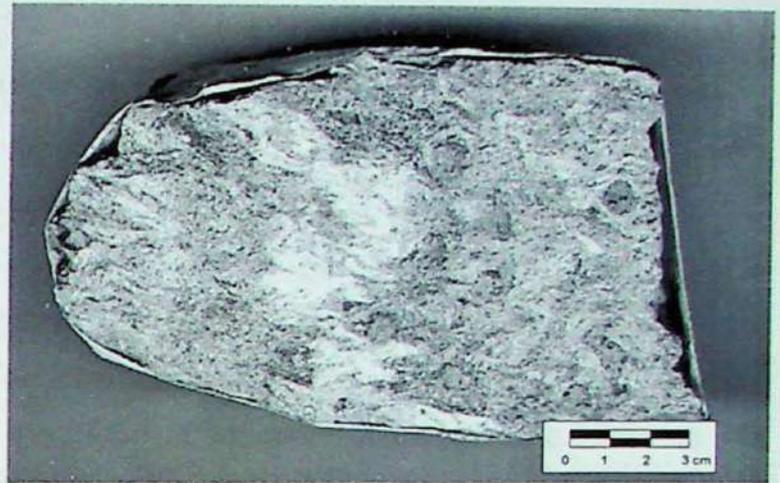


Foto 2.14 - Muscovita-biotita-quartzo-sillimanita xisto protomilonítico com granada. Amostra deformada, com níveis de sillimanita dobrados. Arcos poligonais representado por muscovita. (BJ-III-111)

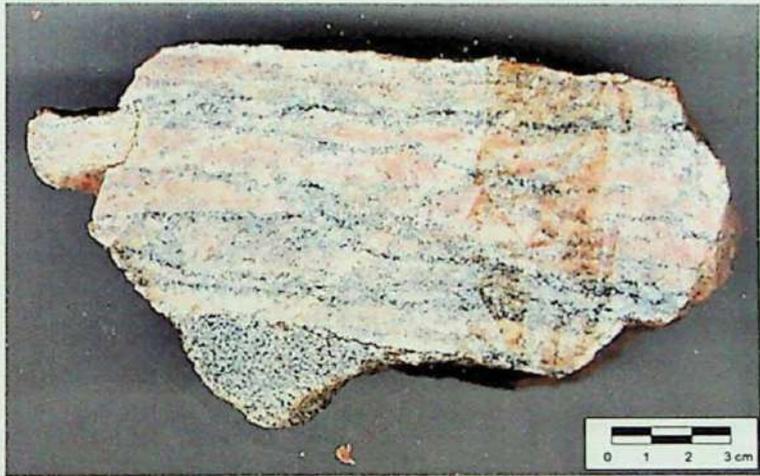


Foto 2.15 - Biotita-muscovita gnaïsse com granada. Bandas centimétricas de quartzo/feldspato estirado. Biotita e muscovita definem bandamento gnaïssico. Granada recristalizada provavelmente pós-Sn. (BJ-IV-26a)

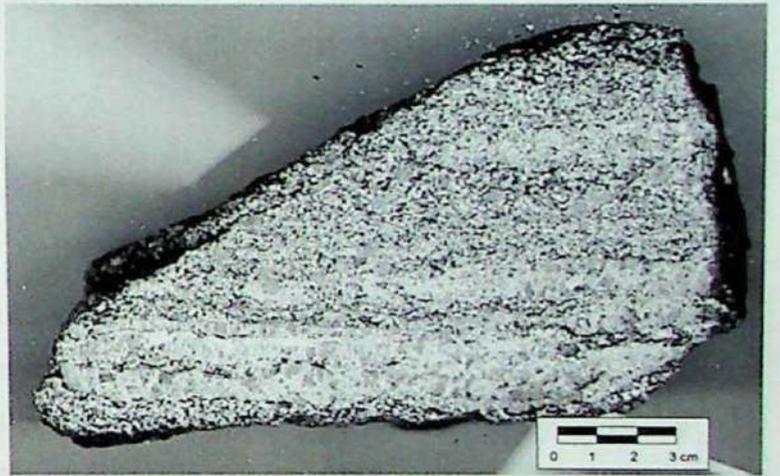


Foto 2.16 - Granada-plagioclásio-quartzo-biotita xisto/gnaïsse homogêneo. Vênulos de quartzo orientado segundo a foliação principal  $S_2$ . Xisto Santo Antônio (BJ-IV-41a.)

### 3. Petrografia de rochas metamórfica: principais feições metamórficas.

O estudo petrográfico de lâminas delgadas foi realizado com o intuito principal de relacionar a recristalização metamórfica à forma de ocorrência de minerais índice ou assembléia característica de fácies metamórfica específicas, principalmente indícios de reequilíbrios mineralógicos e texturais. A análise dessas paragêneses pode fornecer informações sobre a seqüência de cristalização metamórfica baseadas, sobretudo, na forma de contato entre os grãos e sua forma textural de ocorrência.

Características microestruturais também foram observadas, uma vez que podem indicar processos de transporte e interação entre os distintos segmentos.

A área de estudo foi subdividida em dois domínios principais. O critério adotado para essa subdivisão baseou-se na caracterização metamórfica dos litotipos estudados e suas relações estruturais observadas em campo. Faremos uma discussão das características estruturais, mineralógica microscópica e macroscópica.

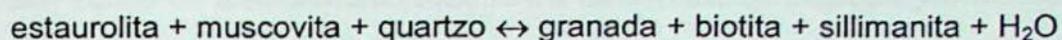
#### 3.1. Domínio Lima Duarte

Corresponde a Nappe Lima Duarte com paragênese de média a alta temperatura com presença de sillimanita e restos de porfiroblastos de granada.

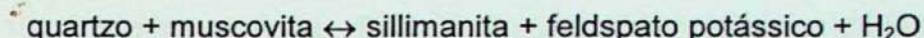
De modo geral, possuem arranjos granoblásticos definido por grãos equigranulares alongados e estirado de quartzo e eventualmente de feldspato (foto 3.16). Apresentam textura média a grossa e porções a muito grossa, como por exemplo, ortoquartzito com textura "sal grosso" e milonitizado. Apresentam intercalações de lâminas métricas de minerais de muscovita e sillimanita.

A associação de biotita + sillimanita é característica deste domínio e é indicativo do limite inferior do metamorfismo de alto grau. Biotita e muscovita amoldam porfiroblastos de granada (foto 3.2) e porfiroclastos de feldspato potássico delimitando sombra de pressão juntamente com aglomerados recristalizados de quartzo produzindo indicadores sin-cinemáticos como pares SC e porfiroblastos de granada rotacionado.

Sillimanita ocorre prismática e distribuída homoganeamente na matriz, sin-a-tarde cinemática. Ocorre ainda na forma de aglomerado (fibrolita) com textura fibroraciada. Associa-se a planos delineados por biotita e muscovita, podendo representar associações com granada (foto 3.13) dada pela reação:



Associação sillimanita + feldspato potássico também ocorre (sillimanita-granada-biotita xisto feldspático) e representa a entrada da sillimanita na segunda isograda da sillimanita (crescimento da sillimanita a partir da quebra de muscovita), e é dada pela reação:



Sillimanita ocorre ainda ortogonal a foliação gnáissica em níveis centimétricas e intersticiais as fases granoblásticas da matriz.

Granada ocorre subidioblástica a idioblástica, ora na matriz micácea, ora em arranjos granoblásticos quartzo-feldspáticos (sillimanita-granada-biotita gnaiss migmatítico). Grãos de granada com bordas de alteração (BJ-IV-81) formando textura xenoblástica. Inclusões de quartzo são comuns e eventualmente granada pode ocorrer na forma esquelética sendo substituído por material de alteração (provavelmente óxido de ferro). Quando bem cristalizada, correspondem a fases tardi a pós-S<sub>2</sub>. Pode concentrar-se em bolsões de fusão, gerados a partir da quebra da muscovita.

Quartzo pode ocorrer como grãos estirados e alongados com bordas retilíneas com c. de 10 mm. Possui extinção ondulante, com contornos irregulares e junções tríplexes e eventualmente grãos trincados (foto 3.11). Ocorre também na forma de *ribbons* estirados e em porções segregadas de quartzo/feldspato.

Plagioclásio porfiroclástico (13 mm) com planos de geminação bem definidos, freqüentemente deformados e com indícios de saussuritização. Apresentam-se também com grãos alongados e com inclusão de quartzo. Ocorre microclinio em contato interlobado (BJ-IV-113) com grãos milimétrico de quartzo.

Predomínio de biotita marrom de granulação fina a média distribuída homoganeamente na matriz. Ocorre sempre associada a planos de foliação S<sub>n</sub>-sin cinemática.

### **3.2. Domínio Aiuruoca-Andrelândia**

As rochas deste domínio apresentam maior diversidade composicional em relação ao domínio anterior.

Destaca-se para este domínio, texturas lepidoblástica em níveis finos a médio em associações de rochas metapelíticas (foto 3.11). Ocorrem eventualmente texturas miloníticas,

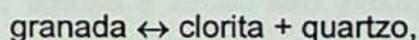
principalmente em zonas de cisalhamento métricas a decimétricas. Intercalação métrica ( $\pm 10$  m) com quartzito e ortoquartzito também são comuns. Nos níveis micáceos nota-se a foliação fortemente perturbada e crenulada, com arranjos em S-C definidos pela (re) orientação de muscovita, biotita e sillimanita fibrorradiada (foto 3.4).

Grãos de quartzo aparecem com extinção ondulante, as vezes porfiroblástico. Indicação de recristalização dinâmica é evidenciada por grãos estirados, alongados e com cristais de muscovita (foto 3.10) e biotita orientada. Possuem textura idioblástica a subidioblástica em contato interlobado com outros minerais. Podem ocorrer inclusões de agulhas de apatita, zircão, prismas de turmalina e grafita intersticial.

Granada ocorre porfiroblástica e poiquiloblástica (com alta taxa de inclusões - foto 3.5). Grãos milimétricos ( $\pm 7$ mm) envolto por foliação  $S_n$  (pós  $S_1$  e/ou  $S_2$ ) e em alguns casos preserva foliação interna, definida por microinclusões de opacos, quartzo, muscovita, biotita e rutilo (foto 3.12) A foliação do porfiroblásto de granada se põe oblíqua a ortogonal a xistosidade interna e indica processo de recristalização. Em zonas de cisalhamento são comuns porfiroblástos rotacionados, estirados e sigmóides irregulares (foto 3.14), com zonas de sombra de pressão de quartzo com recristalização estática. Eventualmente ocorrem dois estágios de cristalização, sendo um marcado por grãos xenomórficos com associação de clorita (foto 3.9) e biotita (foto 3.15), marcando retrometamorfismo. Um outro estágio corresponde a granada porfiroblástica e idioblástica (foto 3.6). Podem ocorrer óxidos de ferro preenchendo microfraturas.

Segundo Santos 2004, porfiroblastos de granada apresentam zoneamento caracterizado pelo decréscimo de grossulária ( $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$ ) e espersatita ( $Mn_3Al_2Si_3O_{12}$ ) e aumento de piropo ( $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$ ) e almandina ( $Fe_3Al_2Si_3O_{12}$ ) em direção as bordas dos grãos que representa fases composicionais típicos de crescimento de granada, no mínimo, á fase metamórfica progressiva.

Clorita ocorre associado com granada e quartzo, definida pela reação:



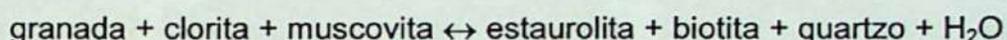
em quantidade subordinada na matriz e nas bordas de granada. Já na foliação distribuição é rara e associa-se a biotita.

Biotita apresenta-se geralmente de duas distintas formas: idiomórfica, dem cristalizada com c. de 2mm, as vezes associada a hornblenda. Uma outra geração, com forma xenoblástica e eventualmente intersticial ao quartzo. Ambas constituem a foliação principal e delineiam,

juntamente com muscovita, lentes ou camadas micáceas. Cristais de biotita e muscovita podem também se relacionam à recristalização junto a linhas de charneira em dobras, principalmente em dobras de crenulação e arcos poligonais (foto 3.1). Principalmente nesta unidade, a associação de biotita, muscovita e granada, são minerais essenciais nos litotipos, que correspondem a protolito pelítico, essencialmente aluminoso.

Plagioclásio é bem heterogêneo, com teores de anortita (oligoclásio e andesina) e ocorre em agregados juntamente com quartzo constituindo arranjos granoblásticos. Possuem contornos irregulares, com indícios de sericitização (BJ-V-86B) e eventualmente ocorre como núcleos de pares SC delineados por reorientação de micas. Frequentemente estão alongados e bem geminados.

Estaurolita ocorre em pequenos cristais (foto 3.8) dispersos na matriz, de cor amarela clara e xenoblásticas. Associa-se a quartzo e amoldado por muscovita na matriz. Admita-se a cristalização de estaurolita pela reação:



Estaurolita ocorre em locais restritos, não sendo contido na maioria dos litotipos estudados na área.

Boudin de rocha metaultramáfica (foto 3.7) ocorre pontual, principalmente na porção centro-este da área. São MgClorita-talco-tremolita xisto que contém porfiroblastos de tremolita (3mm) com hábito prismático, as vezes moído e moldado por um foliação principal constituída por uma matriz bem fina de talco e clorita. Porfiroblastos de tremolita indicam, por pares SC, movimentação dextral, com movimento contrário o caimento da foliação.

Cianita ocorre em porções subordinadas ( $\pm 10\%$ ) com granulação fina e mal distribuídas na matriz (foto 3.3). Em alguns lugares podem ocorrer  *pods*  de cianitito. Podem indicar recristalização dinâmica quando cristais maiores e alongados passam gradativamente para cristais finos.

Grafita, turmalina, titanita, apatita e zircão são exemplares mais comuns de minerais acessórios. Normalmente correspondem a minerais pós a tardi cinemático e cristais finos a muito fino.

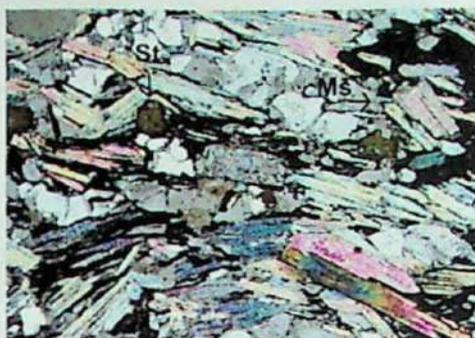


Foto 3.1 - Arranjo lepidoblástico com arcos poligonais de muscovita. Estauroлита subidioblástica pós-Sn. Polarizadores cruzados. (BJ-VII-141)

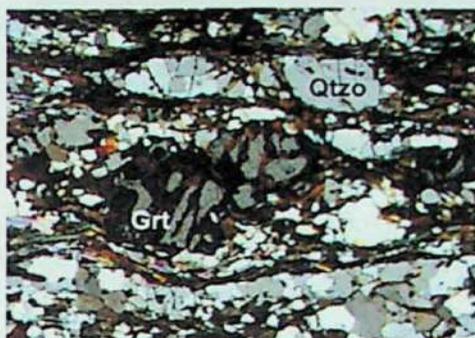


Foto 3.2 - Bandas extensionais de quartzo e níveis milimétricos de biotita. Granada pré-Sn preenchidas nas fraturas por óxido de ferro. Polarizadores cruzados, amostra BJ-III-90



Foto 3.3 - Granada idioblástica com inclusão de quartzo e biotita. Cianita porfiroblástica subcrescida próxima a granada. Cristais de muscovita definindo foliação principal. Polarizadores cruzados (BJ-IX-56a)

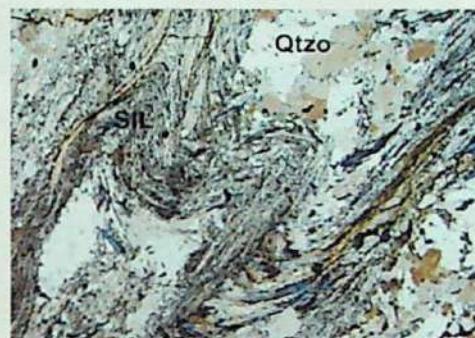


Foto 3.4 - Níveis milimétricos de sillimanita dobrada em matriz quartzoso. Foliação S<sub>2</sub> plano axial a dobras D<sub>2</sub> Quartzo com extinção ondulante. Polarizadores cruzados. (BJ-III-111)



Foto 3.5 - Inclusões de biotita e muscovita em porfiroblasto xenomórfico de granada. Polarizadores cruzados (BJ-V-72)

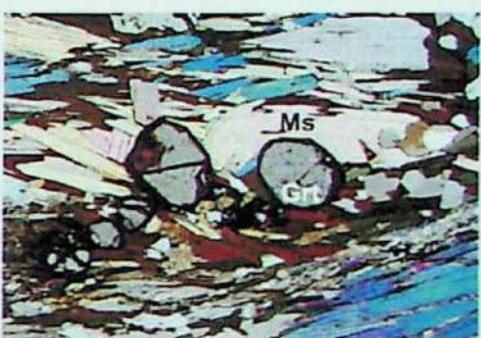


Foto 3.6 - Granada idioblástica pós-cinematica concentrada em níveis de muscovita idioblástica. Polarizadores cruzados (BJ-VII-102a)

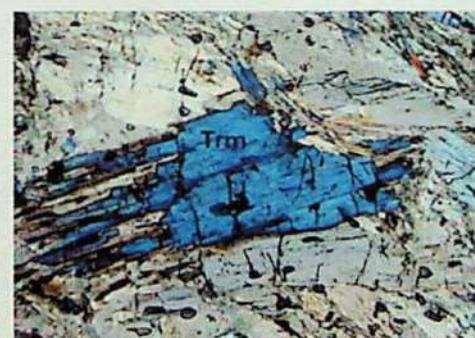


Foto 3.7 - Porfiroblasto de tremolita em matriz com grãos menores de tremolita e talco. Corresponde a um boudin de metabásica. Polarizador cruzado (BJ-VIII-45b)



Foto 3.8 - Associação granada+estauroлита+cianita porfiroblástica. Granada idioblástica sendo consumida para formação de estauroлита. Polarizadores descruzados (BJ-IX-93)

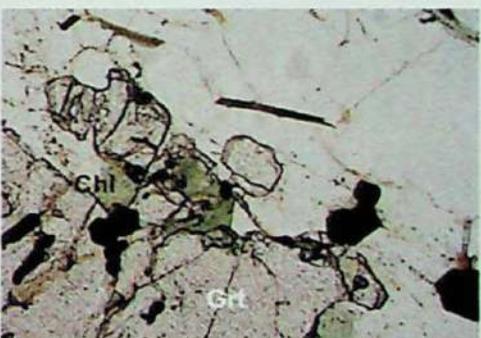


Foto 3.9 - Porfiroblasto de granada com inclusão de opaco e formação de clorita na borda. Polarizadores descruzados (BJ-VIII-94)

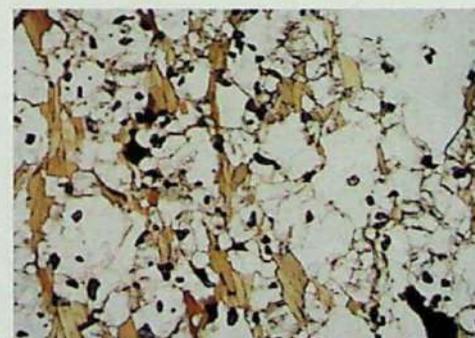


Foto 3.10 - Cristais subidioblástico de biotita orientado segundo a foliação principal (N-S). Cristais de quartzo com extinção ondulante. Polarizadores descruzados. BJ-II-45.

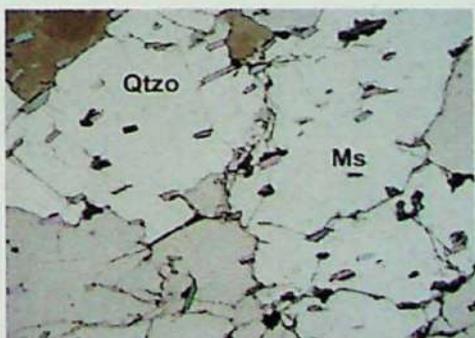


Foto 3.11 - Xenocristais de quartzo em contato serriado. Inclusões de muscovita orientada. Polarizador cruzados. BJ-VII-76

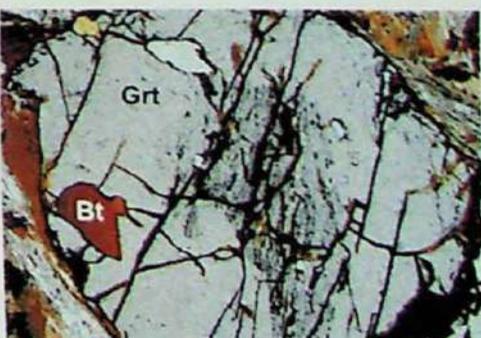


Foto 3.12 - Porfiroblasto de granada com inclusão de biotita. Concentração de microinclusões de opacos. Polarizadores descruzados. (BJ-I-101)



Foto 3.13 - Granada pré-cinematíca com inclusões de biotita. Foliação principal dada por níveis milimétrico de sillimanita. Polarizador descruzado (BJ-V-68).



Foto 3.14 - Porfiroblasto de granada deformada com microinclusão de opacos e biotita. Polarizador descruzado. (BJ-I-101)

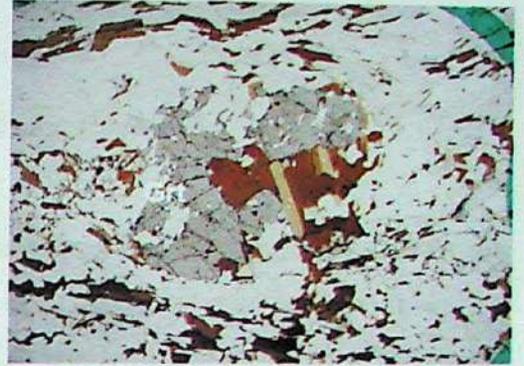


Foto 3.15 - Granada xenoblastica sendo consumida por grãos de biotita. Polarizador descruzado. (BJ-V-86b)



Foto 3.16 - Bandas milimétricas de muscovita intercalada com bandas extensionais de quartzo. Polarizadores cruzados. (BJ-VIII-26b)

### 3.3. Interpretação dos dados: conclusão sobre o Metamorfismo

No domínio Aiuruoca-Andrelândia, a descrição e análise dos dados das principais fases minerais indicam a preservação de registros anteriores, com crescimento progressivo do metamorfismo caracterizado pelo decréscimo de XGrs e XSpr e aumento de XPrp e XAlm em direção às bordas dos grãos (Santos 2004). Também o aumento de cálcio em direção a borda de plagioclásio e acréscimo de titânio em biotita sin-cinemática corroboram para o modelo de aumento de temperatura.

A sillimanita surge a partir de uma zona de coexistência entre cianita e sillimanita, em resposta a uma extrusão sob forte decompressão, até a substituição por completa de seu polimorfo. As presenças de relíquias de estauroлита sugerem um caminhamento metamórfico prévio à decompressão. O aparente caráter inverso da pilha metassedimentar se dá a partir do imbricamento durante estágios colisionais, colocando escamas de alto grau (p. ex. paragêneses rutilo-cianita-granada-muscovita-quartzo, Nappe Liberdade de Trouw *et al.*, 2000 – limite do fácies granulito de alta pressão) sobre a Nappe Aiuruoca-Andrelândia.

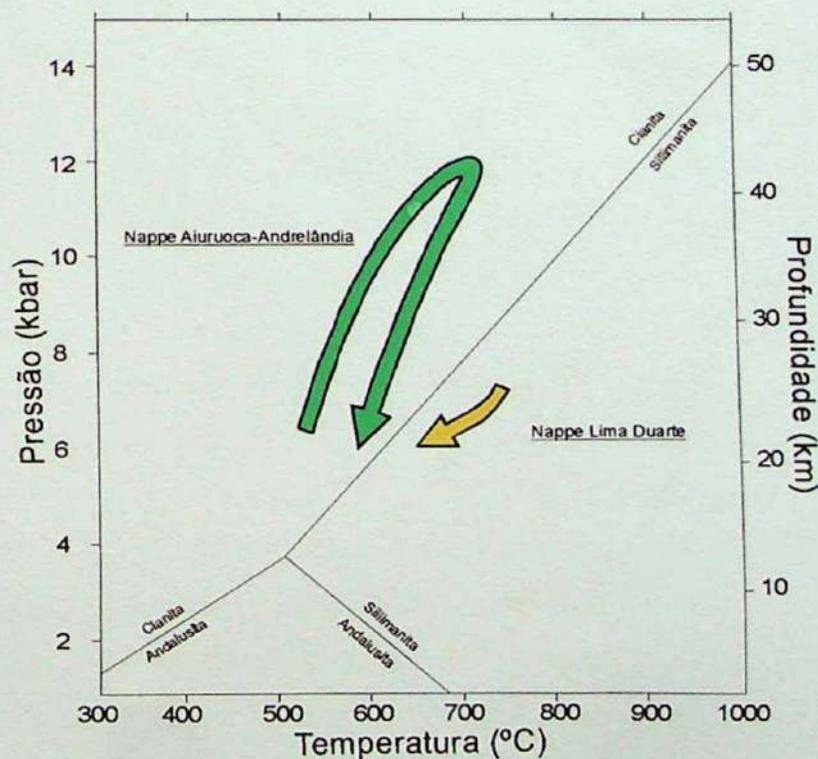


Figura 3.3.1 – Trajetória metamórficas e condições P-T das rochas do Dominio Nappe Aiuruoca-Andrelândia e Nappe Lima Duarte, adaptado de Santos 2004.

A Nappe Lima Duarte representa um alóctone de alta temperatura onde, na região de

Lima Duarte foram descritas paragêneses em condições de 900°C/11Kbar em uma trajetória de resfriamento de até 750°C/8Kbar (Vilela, 2000; Campos Neto *et al*, 2004)

A figura 3.3.1 indica o caminhamento regressivo da nappe no campo da sillimanita. No domínio estudado, a presença de sillimanita é característica sendo o mineral índice de maior pico de reequilíbrio metamórfico.

Na figura acima representa a trajetória pressão e temperatura dos domínios envolvidos. O domínio Aiuruoca-Andrelândia representa um alóctone de alta pressão, com um caminhamento metamórfico progressivo, associado a porfiroblastos de granada que registram condições de pico metamórfico a 740°C/12kbar. O domínio Lima Duarte registra um caminhamento retrogressivo.

#### 4. Estudo do elipsóide de deformação.

A redistribuição espacial de partículas em materiais deformados pode ser utilizada para calcular a forma e orientação de deformação, se for possível reconhecer os centros das partículas. Um material que contenha partículas dispostas de maneira completamente aleatória (distribuição de *Poisson*), possui espaços vazios e concentração de partículas também aleatórias. Se este material for deformado, a distribuição das partículas continuará sendo randômica e não há como determinar a deformação imposta, a não ser que seja possível o reconhecimento de linhas que uniam estes pontos originalmente.

Porém, na natureza, a distribuição inicial de pontos em um material não é perfeitamente aleatória, mas segue tendências nas quais as distâncias entre as partículas mantêm-se mais ou menos constante (distribuição estatisticamente uniforme), devido ao fato das partículas possuírem tamanho e forma característicos, e a separação entre os centros de vizinhos mais próximos é controlada pela geometria do empacotamento.

Se um material composto de partículas agregadas cuja distribuição é estatisticamente uniforme sofre deformação, a distância entre os centros das mesmas deve aumentar na direção de maior estiramento, e diminuir na de menor estiramento.

Um dos métodos utilizados para a análise da deformação é o método centro a centro (Ramsay, 1967, 1983), que consiste na determinação dos centros de partículas que foram, anteriormente à deformação, os vizinhos mais próximos e na análise das mudanças no comprimento e orientação unindo estes centros.

Entretanto, este método se baseia na premissa de que não haja ambigüidade quanto à determinação dos vizinhos mais próximos, o que nem sempre é possível, além de ser trabalhoso e consumir muito tempo na sua realização.

O método proposto por Fry (1979), é uma variante centro a centro, mas de execução muito mais simples e que permite rapidamente avaliar não só a qualidade da amostragem, mas também a possibilidade da amostra apresentar ou não distribuição randômica e conseqüentemente o grau de confiabilidade na análise efetuada.

Este método é executado graficamente da seguinte forma: deve-se desenhar em uma folha de papel os centros das partículas a serem analisadas e numerá-los. Em uma folha transparente (*overlay*), faz-se uma marca central para referência. Posicionando o *overlay* sobre o primeiro ponto, desenha-se a posição de todos os outros centros. Sem rotacionar o *overlay*, deve-se movê-lo até que a marca central esteja sobre o ponto de número dois e então traçar a posição dos demais pontos. Isto é repetido para todos os pontos na folha de papel.

A distribuição de pontos resultante não é uniforme, caracteriza-se por vazios (elípticos, se o material estiver deformado) circundando por faixas com altas concentrações de ponto. A forma da elipse de deformação é medida diretamente a partir da forma elíptica do vazio.

Uma premissa para o método de Fry é que as partículas originais tinham aproximadamente o mesmo tamanho, pois se eram de tamanho diferentes, a resposta á deformação foi diferente. Para solucionar esse problema, Erslev (1988), propõe que seja feita uma normalização a partir dos raios das partículas vizinhas. Esse método mostra resultados muito melhores que o método convencional, porém é extremamente trabalhoso e não foi utilizado neste trabalho.

Para esta pesquisa, optou-se pelo método de Fry convencional para a determinação qualitativa da orientação espacial de esforços. Para a determinação da forma do elipsóide de deformação, foi utilizado o diagrama logarítimo de deformação proposta por Ramsay (1967).

Foram realizados cortes XZ (normal á foliação e paralelo á lineação) e YZ (normal á foliação e a lineação) de quatro amostras orientadas selecionadas de acordo com a litologia e a distribuição espacial do litotipo. Com os cortes prontos, os centros dos porfiroblástos, principalmente de quartzo, foram desenhados em câmara-clara e posteriormente digitalizados para calculo através do programa de computador *GeoFry Plots 3.0* (Holocombo, 1999). Os valores calculados para as direções dos principais eixos de deformação e das elipsidades forma inseridos no programa *Strian Calculator* (Holcombe, 2000) para a construção do diagrama logarítimo e determinação dos parâmetros  $K$  e  $D$ .

Tais parâmetros foram originalmente propostos por Flinn (1962, 1978), como  $k = (R_{xy} - 1/R_{yz} - 1)$  e  $d = [(R_{xy} - 1)^2 + (R_{yz} - 1)^2]^{1/2}$  para o diagrama  $(R_{yz} \times R_{xy})$ . O valor  $k$  define a posição geral do elipsóide: valores entre zero e a unidade representam elipsóide oblatos e definem o campo do achatamento aparente; para  $k=0$ , tem-se o achatamento uniaxial e valores  $1 < k < \infty$  estão relacionadas as elipsóides prolatos, no campo da constricção aparente. O parâmetro  $d$  nos diz a distância do ponto à origem (1,1) e pode estar diretamente relacionados à taxa de deformação. Os parâmetros  $K$  e  $D$ , possuem o mesmo significado de  $k$  e  $d$ , deve-se apenas levar em consideração o uso dos logarítimos das razões entre os eixos do elipsóide, assim:  $K = [\ln(R_{xy} - 1) / \ln(R_{yz} - 1)]$  e  $D = \{[\ln(R_{xy} - 1)]^2 + [\ln(R_{yz} - 1)]^2\}^{1/2}$ .

Não há expressões matemáticas que relacionem os parâmetros de Ramsay e os de Flinn, uma vez que  $d$  e  $D$  dependem diretamente dos valores medidos para planos principais de deformação, e pontos com valor  $k$  constante de Flinn definirão uma curva no diagrama logarítimo, ou seja, terão valores  $K$  variáveis.

A tabela abaixo apresenta os valores obtidos para as razões axiais principais e

parâmetros K e D das quatro amostras selecionadas neste trabalho:

amostra	x/y	x/z	y/z	ln xy	ln yz	K	D
BJ-TF-17	1,20	2,12	1,76	0,07914	0,24551	5,7179	1,61333
BJ-TF-45	1,04	1,29	1,23	0,01703	0,08990	2,1986	3,53836
BJ-VI-40a	1,06	1,82	1,71	0,02530	0,23299	6,1411	2,83413
BJ-III-10	1,17	2,04	1,73	0,07554	0,23299	5,2058	1,77238

Tabela 1 – Valores e parâmetros calculados para elipsóides de deformação pelo método Fry.

Descrição das amostras utilizadas para a determinação dos elipsóides de deformação.

#### Amostra BJ-TF-17

Muscovita quartzito a sillimanita milonitizado, com níveis milimétricos de biotita com evidências texturais de recristalização dinâmica. Apresentam grãos de quartzo (90%) idiomórficos, equigranular poligonal com textura em mosaico e extinção reta. Sillimanita ocorre na forma de fibrolita (3%) e muscovita hipidiomórfica (7%) orientado segundo a foliação principal  $S_2$ .

Estrutura:  $S_2$ : N25°E/57°SE,  $L_{ms}$ : N10°E;15°

Nesta amostra, foram demarcados 100 centros de grãos para o corte XZ e 110 centros no corte YZ. As razões axiais do dois cortes são semelhantes e o elipsóide calculado tem forma oblata, encontrando-se sobre a reta  $K=0$ , no campo do achatamento uniaxial. Isto pode indicar uma deformação coaxial (cisalhamento puro) em um regime compressivo, pós-deformação milonítica. (figura 4.1 e 4.2)



Figura 4.1 – Amostra BJ-TF-17 - corte XZ,

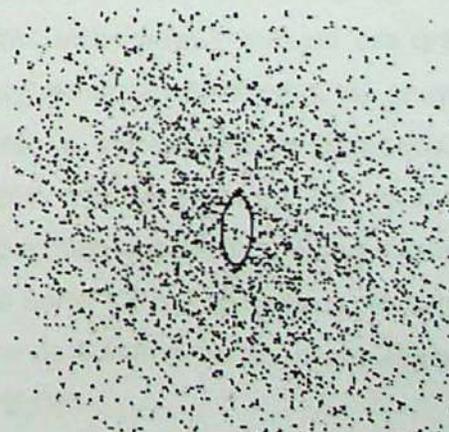


Figura 4.2 – Amostra BJ-TF-17 corte YZ

#### *Amostra BJ-TF-45*

Quartzito composto por 90% de quartzo, muscovita (3%) e níveis milimétricos de biotita (7%). Ocorrem ainda níveis com concentração de óxido de manganês determinado pela proximidade com blocos de gondito. (figura 4.3 e 4.4)

Estrutura: N54°E/40°SE, Lm<sub>ms</sub>: N80°E;17°

Foram marcados 115 centros de grãos no corte XZ e 120 centros no corte YZ. O elipsóide é oblato encontrando-se sobre a reta k=0, dentro do campo de achatamento uniaxial. Este elipsóide deve representar a deformação finita pós-milonítica.

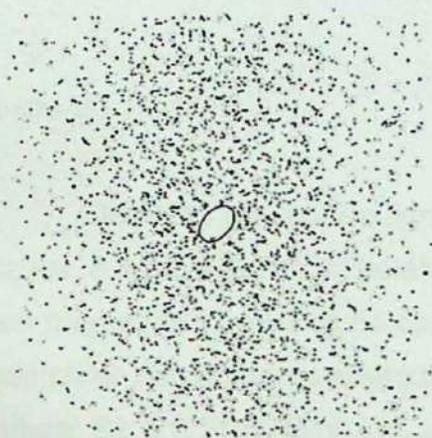


Figura 4.3 – Amostra BJ-TF-45 - corte XZ,

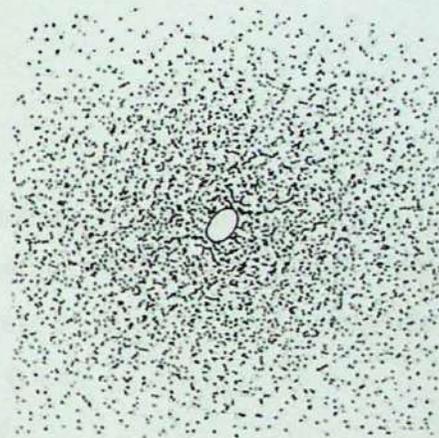


Figura 4.4 – Amostra BJ-TF-45 corte YZ

#### *Amostra BJ-VI-40A*

Trata-se de um muscovita quartzito milonitizado, com muscovita dispersa. Os cristais de muscovita encontra-se fina, idioblástica, às vezes intersticial e inclusa em grãos de quartzo. Grãos maiores também ocorrem, mas são exclusivamente intersticiais. Já os grãos de quartzo ocorrem subidioblástico, com extinção ondulante e extremamente trincados, com contatos irregulares. Em lugares restritos ocorrem grãos microgranulares de contatos serrilhados. Localiza-se a noroeste da área e pertence a pacotes quartzíticos intercalado com unidades xistosas. Foram marcados 96 centros de grão no corte YZ e 112 centros no corte XZ. Segundo os cálculos, o elipsóide é oblato, dentro do campo de achatamento aparente. (figura 4.5 e 4.6)

Estrutura: S<sub>p</sub>: N59°E/44°NW. Lm<sub>ms</sub>: N70°E;08°

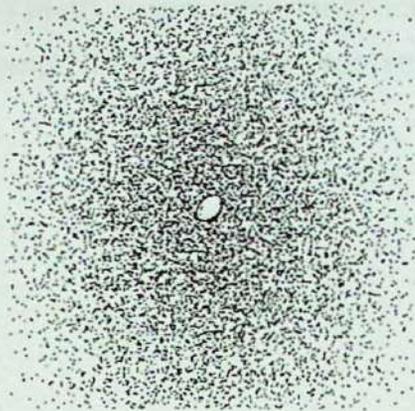


Figura 4.5 – Amostra BJ-VI-40a - corte XZ,

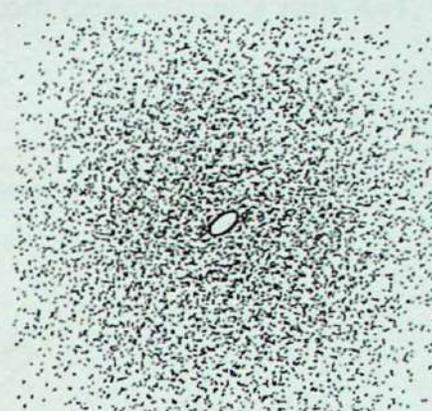


Figura 4.6– Amostra BJ-IV MM-40a corte YZ

#### Amostra BJ-TF-10

Quartzito grosso, equigranular, com biotita e muscovita acessória. Grãos de quartzo estirados e alongados, subidioblástico, com contatos serrilhados e com extinção ondulante. Foram marcados 83 centros no corte YZ e 114 centros no corte XZ. O elipsóide é oblato, dentro do campo de achatamento aparente. (figura 4.7 e 4.8)

Estrutura:  $S_n$ : N12E°/50°SW,  $Lm_{ms}$ : N18°E;41°SW

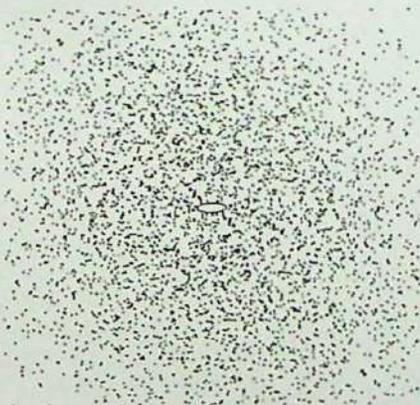


Figura 4.7 – Amostra BJ-III-10 - corte XZ,

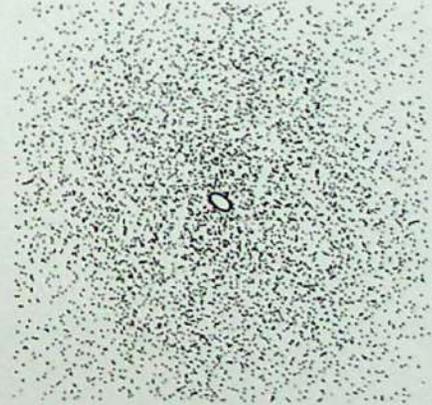


Figura 4.8 – Amostra BJ-III-10 corte YZ

Segundo os dados obtidos, o diagrama logaritmo de deformação construído (figura 4.9), indica uma concentração para os dados analisados, para as formas oblata, encontrando-se próximo à reta  $K=0$ , no campo do achatamento aparente uniaxial. Pode indicar uma deformação

coaxial (cisalhamento puro) em um regime compressivo, pós-deformação milonítica. A amostra BJ-III-10 sugere uma tendência mais prolata, com proximidade a reta  $K=1$ , porém dentro do campo de achatamento aparente.

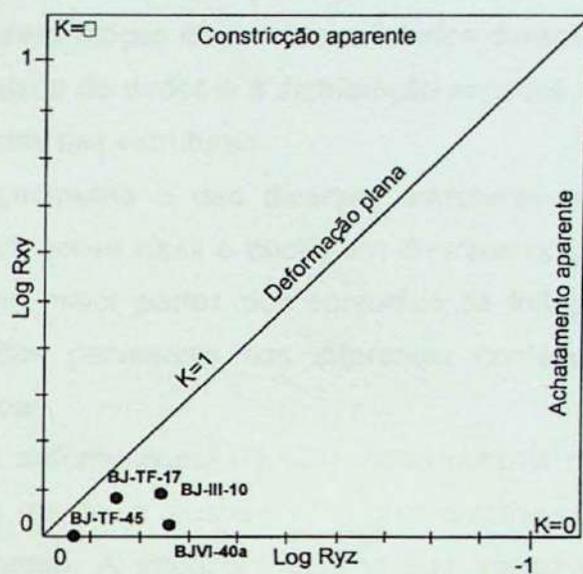


Figura 4.9 – Diagrama logarítmico de deformação (Ramsay, 1967, 1983).

## 5. Análise Estrutural

### 5.1. Introdução

A análise e a interpretação dos dados coletados durante o trabalho de pesquisa, levou, considerando a quantidade de dados e a distribuição espacial dos dados obtidos, o tratamento e interpretação dos dados das estruturas.

O estudo da geometria e das diversas estruturas observadas na área permitiu a interpretação das deformações rúptil e dúctil, em diversos conjuntos ou fases de deformação. Foram consideradas na maior partes dos conjuntos as foliações penetrativas e, em menor quantidade, as foliações pervasivas nos diferentes conteúdos litológicos, bem como as lineações nela associadas.

Para cada fase deformacional ( $D_1+D_2$ ), concomitante com fases mais tardias ( $D_3+D_4$ ) foram confeccionados perfis e ilustrações representativas de cada elemento estrutural observado em afloramento. A intensa tectônica que afetou a área originou uma série de elementos estruturais, tais como lineações de intersecção e de estiramento mineral, diversos padrões de dobras e zonas de falhas e fraturas.

### 5.2. Superfície $S_0$ e foliação $S_1$

Toda a área de pesquisa é caracterizada por rochas que passaram por diferentes estágios deformacionais, os quais afetaram os sedimentos da Bacia Andrelândia (Ribeiro *et al.*, 1995) durante o período Criogeniano do Neoproterozóico. Os contatos entre as unidades metassedimentares que se apresentarem gradacionais podem ser interpretados como registros de superfície  $S_0$ . Em alguns pontos, principalmente a noroeste da área de pesquisa, a superfície  $S_0$  encontra-se paralela, ou mais raramente subparalela à orientação da superfície principal  $S_2$ . Todas as estruturas posteriores a  $S_0$  e anteriores a foliação  $S_2$ , foram consideradas como registro de foliação  $S_1$ .

A foliação  $S_1$  ocorre sub paralela ao acamamento sedimentar. As transformações impostas pelas deformações da segunda foliação (foliação  $S_2, S_3$  e  $D_4$ ) tornaram pouco evidente, os registros da foliação  $S_1$ . Foram preservadas como dobras intrafoliares de flanco rompido, arcos poligonais, principalmente de muscovita, biotita e sillimanita e microdobras em escala centimétrica. Associada a foliação, a xistosidade de crenulação é responsável pela formação de

estilo estrutural tipo arco poligonal centimétricos com orientação de muscovita e sillimanita, que em alguns pontos a sillimanita ocorre também em níveis de fibrolita milimétrica.

Devido a pouca ocorrência de foliação  $S_1$  na área, as medidas são escassas, mas ocorre, na parte nordeste da área.

### **5.3. Dobras $D_2$**

Ocorrem dois conjuntos principais de dobras  $D_2$ , sendo que o primeiro é caracterizado por dobras semi-apertas, cilíndricas, com pouco espessamento de charneiras e com plano axial com caimento baixo e paralelo à foliação  $S_2$ . O segundo conjunto é caracterizado por dobras fechadas a quase apertadas, intrafoliais a  $S_2$ , com flanco rompido em alguns casos e com foliação plano axial paralela a  $S_2$ .

Na porção nordeste da área, as dobras da segunda geração têm orientação preferencial para E-W com mergulhos suaves pra sul. Contudo, na porção mais a oeste, as orientações de  $D_2$  são preferencialmente para NW-SE com baixo a médio ângulo de caimento. Essas variações podem ter sido causadas pelos estágios de deformações subseqüentes a fase de deformação  $D_2$ .

### **5.4. Foliação $S_2$**

A intensa deformação que originou a foliação  $S_2$ , principal da área de pesquisa, causou quase que total transposição da foliação  $S_1$ .

É responsável uma intensa xistosidade, média a grossa nas rochas pelíticas, nas rochas quartzíticas e nas rochas do embasamento.

A foliação  $S_2$  apresenta-se como uma foliação de baixo a médio ângulo de caimento, com valores mínimos de  $10^\circ$  e máximos de  $60^\circ$ . As grandes variações das atitudes das foliações  $S_2$  correspondem a dobramentos originados pelo intenso tectonismo atuante na área.

Na porção sudeste da área, a foliação  $S_2$  apresenta-se com aspecto milonítico, com grandes estiramentos de grãos de quartzo, pares S-C definidos por grãos de mica, sigmóides de quartzo e boudins centimétricos a métricos de quartzo e mais raros em rochas metabásicas, principalmente na porção centro-oeste da área. Em alguns locais onde ocorrem intensa milonitização, permite identificar zonas de cisalhamento locais. Dados referentes à porção noroeste da área apontam para atitudes com direção preferencialmente para NE-SW afetados por dobras da fase  $D_3$  com vergência para NW-SE. Na porção central da área, as atitudes têm

orientação geral para SW-SE com ângulos de mergulho entre 10° e 40° em sua maioria, com ângulos menores quando comparados a foliação S<sub>3</sub>. Já nas porções sul e sudeste, orientações de atitude S<sub>2</sub> respondem as mesmas orientações da porção noroeste, portanto para NE-SW.

As atitudes para a foliação S<sub>2</sub> resultam, principalmente em uma orientação geral NNE-SSW. As grandes variações, como já foi mencionado, é resultado da tectônica atuante depois da formação da foliação S<sub>2</sub>.

### **5.5. Dobras D<sub>3</sub>**

As dobras pertencentes à terceira fase de deformação correspondem a dobras diversas incluindo isoclinais de escala métrica que afetam todas as unidades litológicas. Ocorrem em diferentes estilos, mas com predomínio de dobras abertas e com espessamento de charneira podendo ser classificada do tipo 1c (Ramsay & Huber, 1987). Figuras de interferência, como dobras do tipo em laço, ocorrem em locais como na porção central e porção sul da área. As dobras da fase (D<sub>3</sub>) apresentam plano axial preferencialmente para NNW-SSE, vergência para NE, plano axial subvertical e com eixo de baixo. Próximos às zonas de charneira, os grãos xenoblásticos de quartzo são intensamente fraturados indicando uma deformação também intensa.

### **5.6. Foliação S<sub>3</sub>**

Esta foliação é bem menos freqüente na área de estudo e aparece como clivagens de obliquas ou associadas a dobras que afetam a foliação S<sub>2</sub>. Em alguns locais, há um forte pronunciamento da foliação S<sub>3</sub>, destacando como principal característica os ângulos de caimento e sua orientação mineral na sua fase (orientação de muscovita). A foliação S<sub>3</sub> ocorre pouco deformada e pouco transposta por dobras D<sub>4</sub>, associadas a formação de clivagem S<sub>4</sub>.

A foliação S<sub>3</sub> apresenta-se no geral com grande dispersão dos dados coletados. Possui geralmente caimento de alto ângulo com direção aproximada de NNE-SSW. Estas dispersões dos dados podem estar associadas a zonas de cisalhamento, ou sendo uma foliação pervasiva (exceto nas unidades xistosas) a deformação D<sub>4</sub> poderia ter causado a variação da atitude das camadas S<sub>3</sub>.

Nas unidades xistosas apresenta-se principalmente com uma clivagem com pouco desenvolvimento e reorientação (neoformação) de micas e sillimanita e cianita. Há um

espaçamento entre planos da foliação  $S_3$  (em torno de 1,5 cm) e geralmente apresenta caráter penetrativo.

Nas unidades quartzíticas observa-se uma foliação bem pronunciada plano axial as dobras  $D_3$ . Este forte pronunciamento está relacionado principalmente a diferenças reológicas entre os diversos litotipos.

#### **5.7. Dobras $D_4$**

As dobras da quarta fase deformacional representam as fases tardias, provavelmente em níveis crustais mais rasos, com dobras métricas suaves, abertas, com leve espessamento de charneira. Em alguns locais (parte norte da área), o seu aspecto ondulado pode causar um padrão de interferência do tipo caixa de ovos, com a segunda e terceira fase de deformação.

#### **5.8. Clivagem $S_4$**

A foliação  $S_4$  apresenta-se como uma clivagem plano axial das dobras  $D_4$ . Ocorre como uma clivagem bem espaçada com cerca de dois cm, restrita a algumas áreas, e finamente pronunciada com difícil observação. Não possui uma orientação geral, mas ocorre sempre com alto ângulo de caimento.

Na clivagem  $S_4$ , não ocorre a geração e reorientação de minerais metamórficos.

#### **5.9. Lineações mineral – $Im$**

Uma lineação mineral persistente, principalmente de muscovita, foi observada principalmente na unidade dos quartzitos e na unidade xistosa, especialmente nas superfícies principais  $S_2$ .

As lineações de intersecção foram observadas principalmente na intersecção da foliação principal  $S_2$  com a foliação  $S_3$ .

### **5.10. Indicadores Cinemáticos**

Foram descritos diversos indicadores cinemáticos, tais como pares S-C, boudins de quartzo rotacionados e porfiroblastos de quartzo e granada rotacionados com a presença de sombra de pressão composta por micas. Boudins de rochas metabásicas com indicação de movimento para NNE, na porção este da área é indicada pela associação de indicadores cinemáticos e de lineação mineral e lineação mineral de estiramento.

As lineações minerais nos planos  $S_2$  sugerem que o transporte de massa ocorre concomitante a formação da foliação  $S_2$ . Ocorre principalmente na região nordeste, indicativo de transporte para SW com sentido obtido através da interpretação de indicadores cinemáticos. Já na região do extremo noroeste da área de pesquisa, as lineações indicam transporte de massa da direção SE, relacionado principalmente com a retaguarda na Nappe Aiuruoca-Andrelândia.

### **5.11. Zonas de empurrão**

As zonas de empurrão ocorrem em três diferentes zonas. Uma primeira zona, localizada na parte noroeste, é caracterizada e delimitada por xistos da Nappe Aiuruoca-Andrelândia. É composto por (Rt-Ilm)-Als-Grt-Ms-Bt xistos porfiroblastos com intercalações de rochas calciossilicáticas e Sill-Grt-Bt gnaiss com metabásicas pontuais. São cavalgados por Grt-Ms-Qtz xisto intercalado com quartzitos. Estes cavalgamentos são observados principalmente pelo truncamento da foliação  $S_2$  em diferentes ângulos de mergulho entre as diferentes foliações dos litotipos envolvidos nas zonas de empurrão. Uma outra importante zona de empurrão é caracterizada por cavalcamento de (Rt-Ilm)-Als-Grt-Ms-Bt xistos porfiroblastos sobre Sill-Ms quartzitos e ortoquartzitos grosso a muito grosso (Nappe Lima Duarte).

Por fim, rochas do embasamento, caracterizada principalmente por Sill-Grt gnaiss migmatítico, Sill-Grt-Bt xisto feldspático, Ms-Bt granito gnaiss diatexitico, Grt-Hbl-Bt gnaiss bandado com lentes de anfibolito, Bt gnaiss cinza, migmatítico de composição tonalito-granodiorítico com porções locais de granada, ocorrem cavalgadas por ortoquartzitos e Sill-Ms quartzito das unidades. Mais especificamente, nas proximidades da Serra da Onça, porção este da área de estudo, os contatos tectônicos entre as rochas da Nappe Lima Duarte e rochas do embasamento geram grandes zonas de empurrão com desenvolvimento de dobras isoclinais, falhas normais, zonas de cisalhamento de alto ângulo, lineações de estiramento e mineral, justapondo rochas formadas em diversos ambientes tectônicos.

Na porção sudeste da área, as rochas gnáissico-migmatíticas encontram-se em um núcleo de estrutura, regionalmente fechada. Parecem configurar uma megadobra em bainha, provavelmente contemporânea as repetições por cavalgamentos sin-metamórfico e pós-S<sub>2</sub>.

A partir do exposto pode-se concluir que estas zonas de empurrão se desenvolveram posterior à formação da foliação S<sub>2</sub>. Assim é possível notar o médio e baixo ângulo de caimento, semelhante ao apresentado por atitudes de foliação S<sub>2</sub> e por truncamento de camadas em diferentes níveis litológicos caracterizado pelas zonas de empurrão. Por outro lado, seu contorno é afetado claramente por dobras posteriores, as quais são destacadas por fases tardias D<sub>4</sub>.

### **5.12. Tectônica Rúptil – Falhas e Fraturas**

A tectônica rúptil é pronunciada principalmente por fraturas afetada principalmente as unidades mais competentes. Fraturas conjugadas (figura **xx**) com ângulo agudo variando aproximadamente entre 50° e 70° estendendo em traços por alguns decímetros.

Em mapa, observam-se falhas normais, analisadas principalmente em foto aérea por quebras de relevo com rejeitos direcionais indeterminados. Através de um detalhamento maior, a análise de lineamentos estruturais e espelhos de falha poderiam ser destacadas para a melhor compreensão das estruturas rúpteis.

Nas unidades mais xistosas, estas fraturas são muito mais raras, apresentando-se como planos mais sutis e com traços em superfície mais extensos, em geral métricos. Não foi possível indicar um padrão geral de distribuição espacial dos planos, pois a sua má preservação na maioria dos afloramentos não permitiu a obtenção de um número razoável de medidas.

### 5.13. Interpretação das estruturas planares e lineares

A integração dos dados estruturais possibilitou a construção de uma série de estereogramas que representa o comportamento das estruturas em uma série de domínios estruturais (figura 5.13). Levou-se em consideração a quantidade e distribuição espacial dos dados existentes e as zonas próximas do contato entre as nappe.

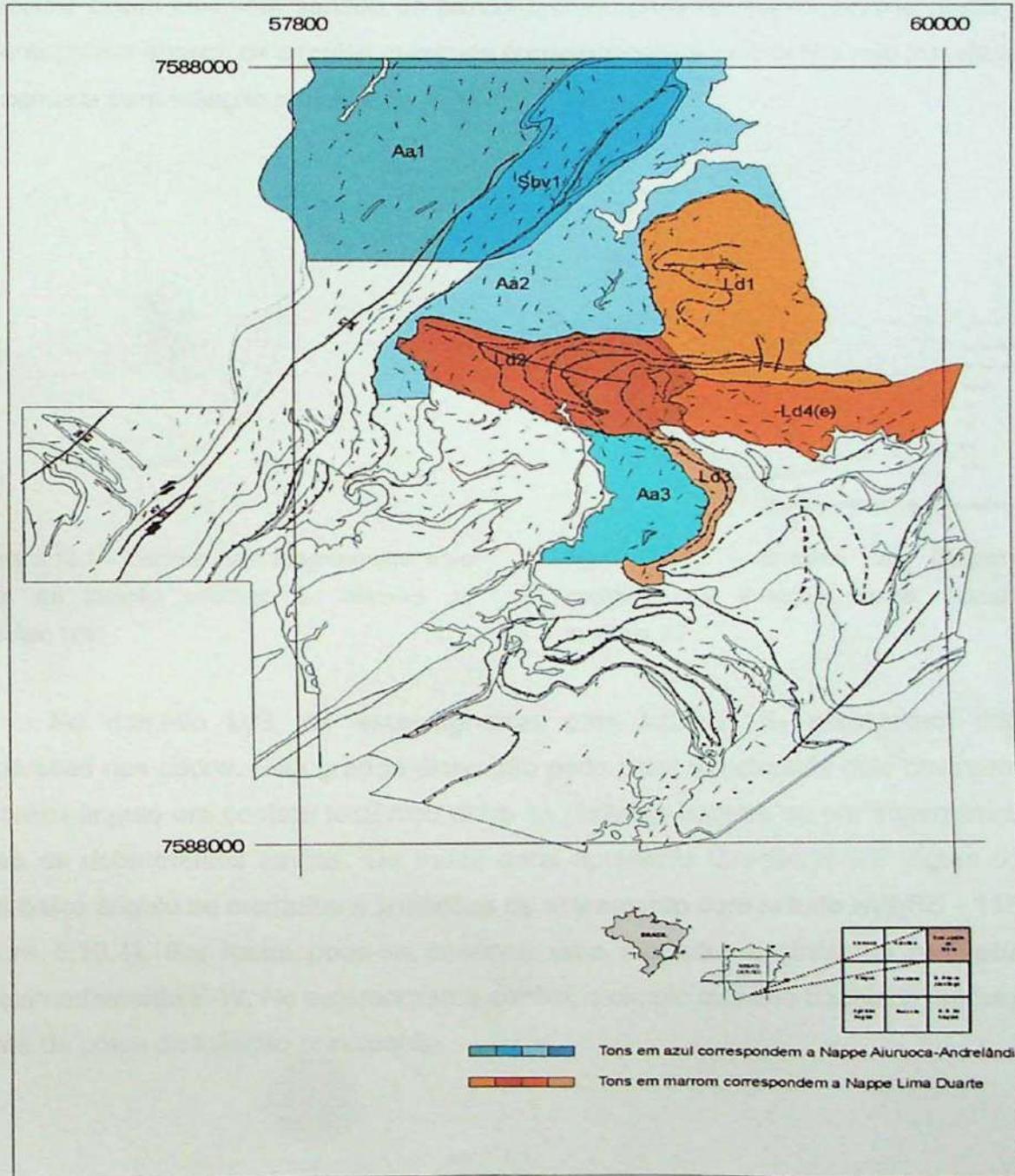


Figura 5.13 - Mapa de domínios estruturais.

A noroeste de Bom Jardim de Minas encontra-se um domínio (Domínio Aa1) constituído por (rutilo-ilmenita)-aluminossilicatos-granada-muscovita-biotita xisto porfiroblásticos com lentes de granada-biotita-plagioclásio-quartzo xisto homogêneo (Xisto Santo Antônio).

Os estereogramas para este trecho indicam que não houve grandes dispersões dos dados de foliação principal  $S_2$ . Caracteriza-se por dobramentos ( $D_3$ ) suaves da foliação  $S_2$ , com eixo (lb) aproximadamente  $260^\circ/20^\circ$ . As lineações minerais concentram-se no quadrante SW, com orientação estatística preferencial a  $245^\circ/20^\circ$  (figura 5.13.2) com fracos caimentos. Indicador cinemático com sentido de movimentação para NE foi observado nesta porção. No estereograma abaixo, os círculos máximos correspondem a pólo (linha não tracejada) e atitude da camada para foliação principal  $S_2$  (figura 5.13.1)

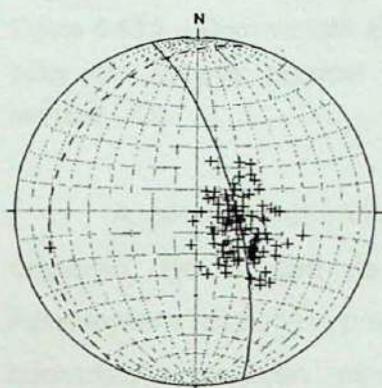


Figura 5.13.1 – Domínio Aa1: Estereograma para pólos de foliação principal  $S_2$ . Número de medidas: 128

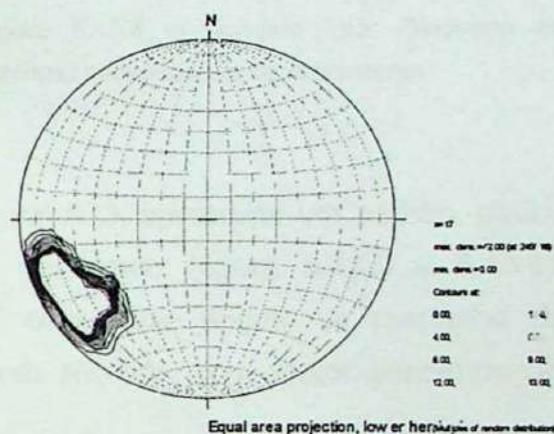


Figura 5.13.2 – Domínio Aa1: Diagrama de contorno para lineação mineral. Número de medidas: 17

No domínio Ld3, os estereogramas para foliação  $S_2$  apresentam grandes dispersões nos dados. Esta grande dispersão pode estar relacionada pelo cavalgamento de baixo ângulo em contato tectônico entre as distintas nappes ou por superposição de fases de dobramentos tardias. De modo geral apresenta direção N-S/E (figura 5.13.3) com baixo ângulo de mergulho e lineações de estiramento com atitude NW-SE –  $115^\circ/24^\circ$  (figura 5.13.4). Em mapa pode-se observar uma megadobra sinformal com eixo (lb) aproximadamente E-W. No estereograma abaixo, o círculo máximo tracejado representa o ajuste de pólos da foliação principal  $S_2$ .

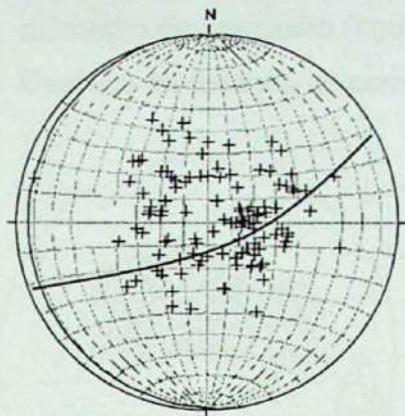


Figura 5.13.3 – Domínio Ld3: Estereograma para pólos de foliação principal  $S_2$ . Número de medidas: 120.

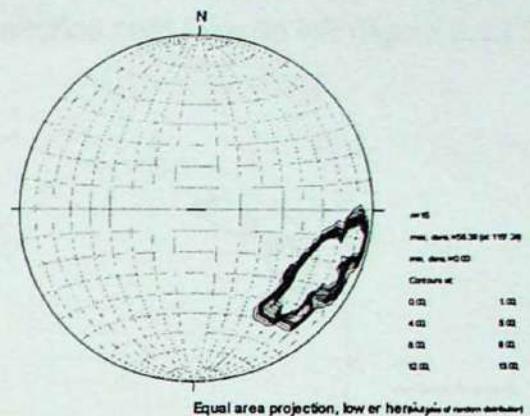


Figura 5.13.4 – Domínio Ld3: Diagrama de contorno para lineação de estiramento.

A oeste do domínio Ld3, o domínio estrutural Aa3, apresenta um padrão, pouco disperso, de direção de camadas podem ser observado (figura 5.13.5 e 5.13.6). Apresentam direções preferencialmente NW-SE com baixo ângulo de mergulho da camadas e lineação mineral indicando movimento NE-SW, com maior concentração estatística no quadrante sudoeste.

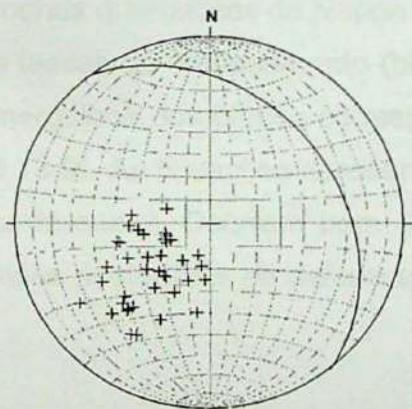


Figura 5.13.5 – Domínio Aa3: Estereograma para pólos de foliação principal  $S_2$ . Número de medidas: 42.

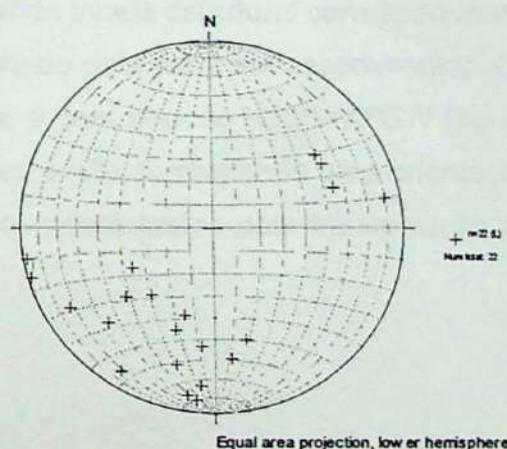


Figura 5.13.6 – Domínio Aa3: Diagrama de contorno para lineação de mineral.

O domínio Aa2 engloba (rutilo-ilmenita)-aluminossilicatos-granada-muscovita-biotita xisto, granada-muscovita-quartzo xisto e rutilo-sillimanita-granada-biotita-quartzo xisto alternado com lentes de ortoquartzitos sendo que estas duas últimas rochas

cavalgam o primeiro pacote. As camadas possuem orientações gerais N-S, com baixo caimento de mergulho (figura 5.13.7) para este e lineações com direção NE (figura 5.13.8). Destaca-se foliação  $S_2$  com dobramentos cônicos.

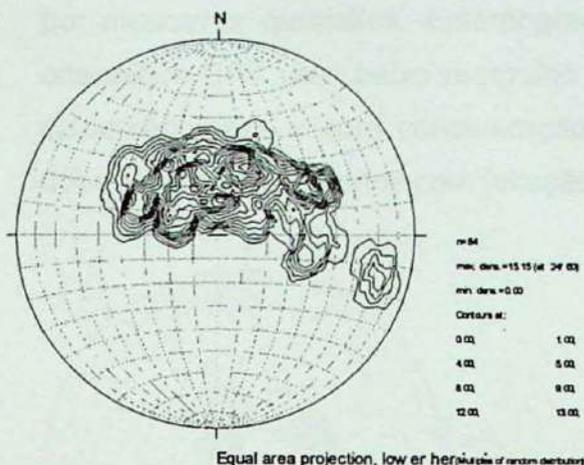


Figura 5.13.7 – Domínio Aa2: Diagrama para contorno de pólos para foliação principal  $S_2$ . Número de medidas: 84

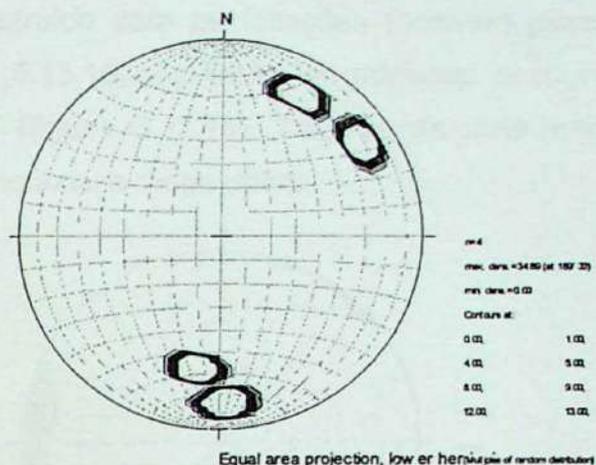


Figura 5.13.8 – Domínio Aa2: Diagrama de contorno para lineação de mineral. Número de medidas: 4

Nas proximidades de São Sebastião da Vista Alegre (domínio Ld1), ocorre o cavalgamento da pilha metassedimentar alóctone (Nappe Aiuruoca-Andrelândia) sobre rochas quartzíticas da Nappe Lima Duarte. Possui ainda janela estrutural correspondendo a lascas do embasamento (biotita gnaiss) transportado pela pilha metassedimentar. Os mergulhos dos planos correspondem a baixo ângulo e com direção  $N16^{\circ}W/9^{\circ}SW$  (figura 5.13.9). As lineações apresentam grandes dispersões e não corresponde uma orientação preferencial. Ocorrem bem dispersas provavelmente ocasionadas pela transposição de fases posteriores de deformação.

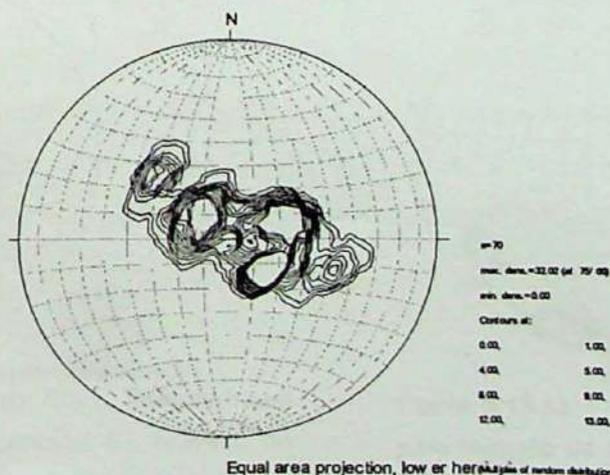


Figura 5.13.9 – Domínio Ld1: Diagrama de contorno para pólos foliação principal  $S_2$ . Numero de medidas: 70.

Os dobramentos cilíndricos são comuns nesta porção e possuem eixo no quadrante nordeste.

Nas proximidades de Bom Jardim de Minas, o domínio estrutural Ld2 encontra-se por muscovita quartzitos. Estereograma construído para as foliações mostram planos orientados E-W com baixo mergulho (Figura 5.13.10). As lineações minerais possuem dispersão maior e com concentração W.SW (Figura 5.13.11). Trata-se de uma mega dobra antiformal cilíndrica com foliação  $S_3$  plano axial a mega dobra.

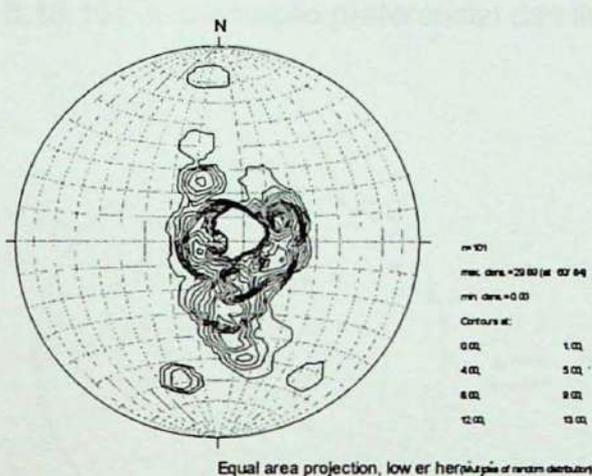


Figura 5.13.10 – Domínio Ld2: Diagrama de contorno pólos de foliação principal  $S_2$ . Número de medidas: 101.

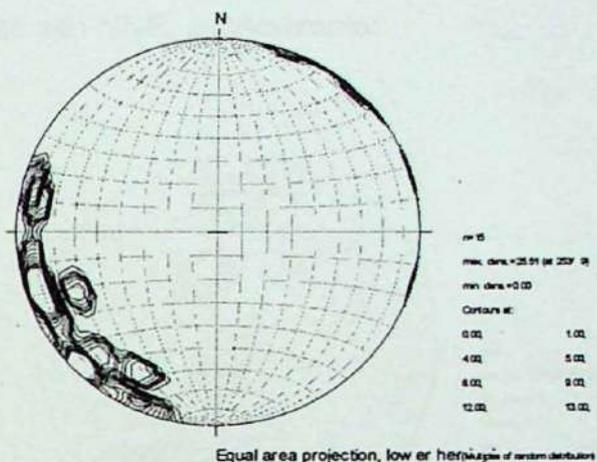


Figura 5.13.11 – Domínio Ld2: Diagrama de contorno para lineação de mineral. Número de medidas:

Na região da Serra da Boa Vista (Domínio Sbv1), na porção noroeste da área corresponde a granada-muscovita-quartzo xisto intercalado com quartzitos. Possui ainda

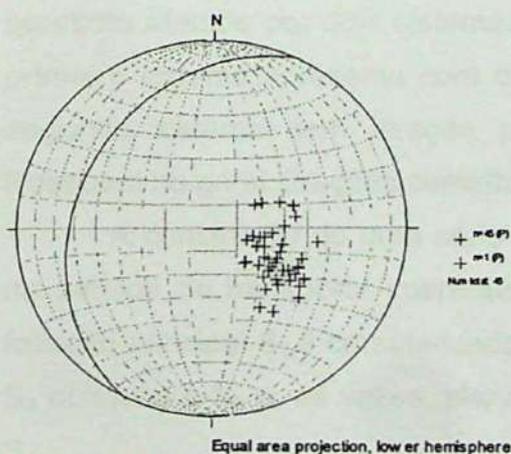


Figura 5.13.12 – Domínio Sbv1: Estereograma para pólos de foliação principal  $S_2$ . Número de medidas: 45

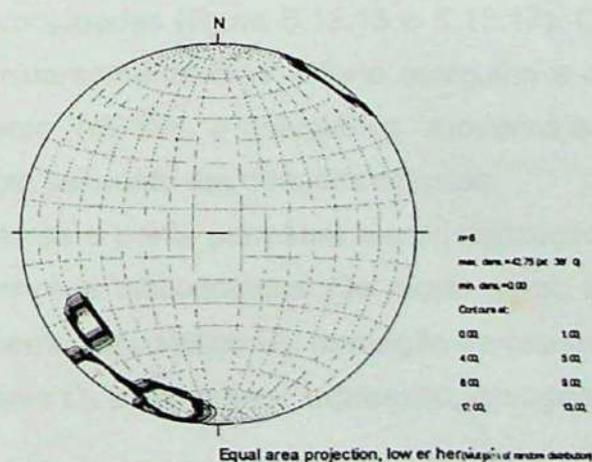


Figura 5.13.13 – Dom. Sbv1: Diag. de contorno para lineação de mineral. Número de medidas: 4

uma extensa faixa de granada-biotita-plagioclásio-quartzo gnaiss homogêneo (Xisto Santo Antônio) na porção da serra. Possui pouca dispersão dos dados de foliação  $S_2$ , com atitude  $N20^\circ E/32^\circ NW$  e lineação mineral indicando movimentação direcional NE-SW (Figura 5.13.13).

O padrão estrutural no setor domínio Ld4(e) onde engloba rochas do embasamento (biotita gnaiss e muscovita-biotita granito gnaiss diatexitíco) e muscovita quartzito possui orientação geral E-W com leve tendência para NW-SE (Figura 5.13.14 e 5.13.15). A orientação preferencial das lineações são NNE, subhorizontal

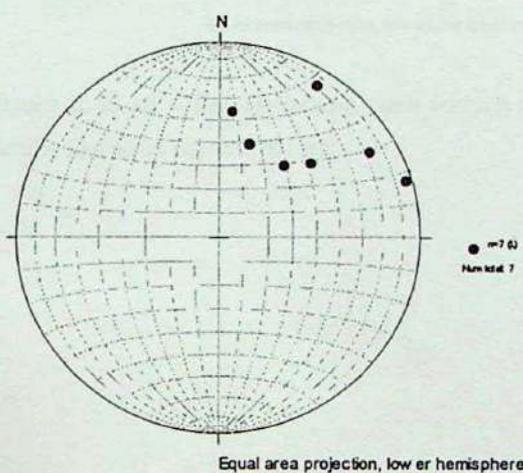


Figura 5.13.14 – Domínio Ld4e: Diagrama de contorno para as lineações minerais. Número de medidas: 7

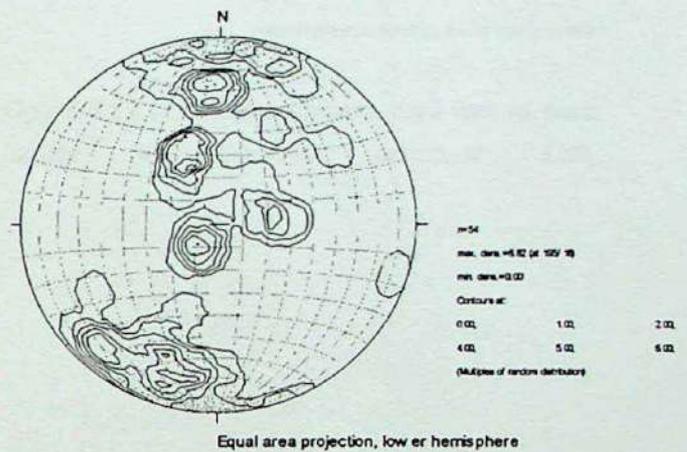


Figura 5.13.15 – Domínio Ld4e: Diagrama de contorno para pólos foliação  $S_2$ . Número de medidas: 54

No domínio estrutural Ld2, já descrito anteriormente, encontram-se muscovita quartzito afetado por dois sistemas de fraturas conjugadas (figura 5.13.16 e 5.13.17). O primeiro sistema apresenta com direção predominantemente E-W e forte mergulho e o segundo sistema com direção preferencialmente NE-SW e mergulhos moderados. Possuem no geral direções semelhantes, mas com caimento em direções opostas.

A construção de uma série de estereogramas e perfis permitem a caracterização de sentido de transporte coerente com as descrições bibliográficas. De modo geral, a foliação principal  $S_2$  é caracterizada pelo dobramento assimétrico  $D_3$ , formação de planos  $S_3$  oblíquos a  $S_2$  e, às vezes, plano axial as dobras  $D_3$  e em menor expressão, clivagem  $S_4$ .

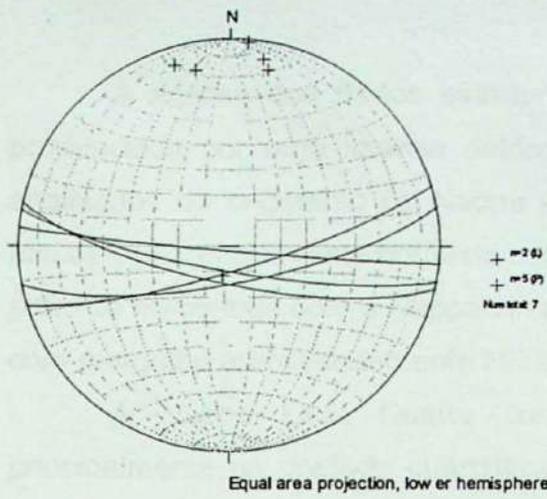


Figura 5.13.16 – Estereograma para fratura para família Domínio estrutural Ld2.

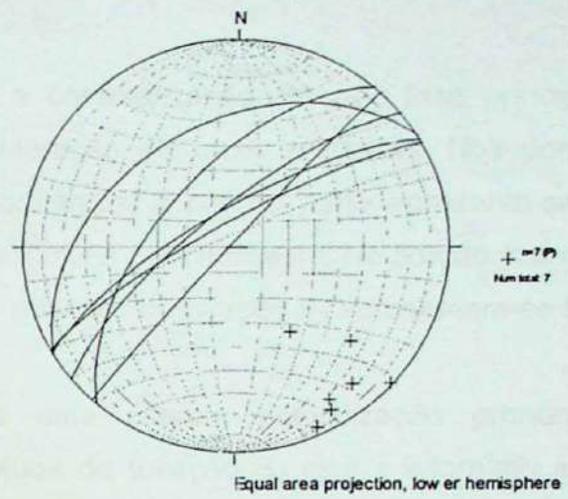


Figura 5.13.17 – Estereograma para fratura para família II. Domínio estrutural Ld2.

#### **5.14. Interpretação dos dados: conclusão sobre a análise estrutural**

A análise dos dados estruturais permite a caracterização de uma fase principal  $S_2$  pronunciada por uma intensa deformação e obliteração de fases pretéritas. Nos domínios analisados do segmento da Nappe Aiuruoca-Andrelândia, a porção norte apresenta-se com atitude preferencialmente nordeste com mergulhos suaves para noroeste. Na porção mais a sul, próximo ao contato com a Nappe Lima Duarte, as atitudes da foliação  $S_2$  apresentam-se N.NW com mergulho aproximadamente NE.E.

A Nappe Lima Duarte corresponde a uma intensa milonitização pronunciada principalmente na unidade quartzítica. Possui atitude da foliação  $S_2$  com predomínio a E-W variando para SE-NW. Em ambos os domínios, as fases  $D_3$  são pré a sin-cavalgamento, pois é evidente principalmente em foto aérea, o truncamento entre foliações  $S_2$  das duas nappes.

As lineações de estiramento e mineral associadas às zonas de empurrão são predominantemente subhorizontais. Os indicadores cinemáticos obtidos através de pares SC e porfiroblastos rotacionados, mostram uma movimentação predominantemente para NE para o domínio Aiuruoca-Andrelândia e movimentação W.SW para o domínio Lima Duarte.

## 6. Conclusões

É caracterizado, no domínio Aiuruoca-Andrelândia, a coexistência entre cianita e sillimanita em reposta a uma extrusão sobre forte descompressão, até a substituição por completa por cianita. Grãos porfiroblástico de granada sugerem, em decorrência do seu quimismo, juntamente com grãos de plagioclásio e biotita, um modelo de trajetória progressiva com assembléias com clorita mostrando uma trajetória retrogressiva. No domínio Lima Duarte, as assembléias mostram que paragêneses de alta temperatura em uma trajetória retrogressiva que é incompatível com estruturas migmatíticas na área.

O padrão geral das lineações na Nappe Aiuruoca-Andrelândia e Lima Duarte apresentam-se subhorizontais associadas a zonas de empurrão. Caracteriza-se uma fase principal –  $S_2$ , pronunciada em ambas as unidades, por uma forte milonitização, levando a obliteração de fases anteriores. As fases  $D_3$  são pré a sin cavalgamento observado pelo truncamento entre estruturas principais.

Os elipsóides de deformação obtidos são essencialmente oblatos, encontrando-se próximos à reta  $K=0$ , no campo do achatamento aparente uniaxial, podendo indicar uma deformação coaxial – cisalhamento puro em um regime pós-cavalgamento. Estes elipsóides ocorrem na região de interação entre as zonas de cavalgamento. A amostra BJ-III-10 sugere uma tendência mais prolata, com proximidade a reta  $K=1$ , porém dentro do campo de achatamento aparente.

## 7. Referências Bibliográficas

- Brito Neves, B.B., Campos Neto, M.C. & Fuck, R.A., (1999). From Rodonia to Western Gondwana: An approach to the Brasiliana – Pan African Cycle and orogenic collage. *Episodes*, 22, 155-166.
- Campos Neto, M.C., Perrota M.M., Peloggia, A.U., Figueiredo, M.C.H., 1990. A porção central da Faixa Alto Rio Grande (SP-MG). In: 36th Congresso Brasileiro de Geologia, 6:2165-2630.
- Campos Neto, M.C., Caby, R. 1999. Tectonic constrain on Neoproterozoic high pressure metamorphism and nappe system south of São Francisco craton, southeast Brazil. *Precambrian Research*, 97: 3-26.
- Campos Neto, M.C., Caby, R. 2000. Lower crust extrusion and terrane accretion in the Neoproterozoic nappes of southeast Brazil. *Tectonics*, 19: 669-687.
- Campos Neto, M.C., 2000. Orogenic system from southwestern Gondwana, an approach to Brasiliano – Pan African cycle and orogenic collage in southeastern Brazil. *Tectonic Evolution in South America*, 335-365.
- Campos Neto, M.C., Basei, M.A.S., Vlach, S.R.F., Caby, R. Szabó, G.A.J., Vasconcelos, P., 2004. Migração de orógenos e superposição de orogêneses: um esboço da colagem brasileira no sul do cráton do São Francisco, SE-Brasil. *Geologia USP*, no prelo.
- Costa, A.G.; Rosière, C.A.; Ebert, H.D.; Fichel, D.P.; Fuck, R.A.; Pimentel, M.M. 1998. The relation between frontal and strike-slip shear zones and the regional metamorphism and magmatism in a deep segment of the northern Ribeira Belt, SE-Brazil. In: 14th International Conference on Basement Tectonics, 1998, Ouro Preto, Brazil, Abstracts, 26-28.
- Erslev, E.A., 1988. Normalized center-to-center strain analysis on packed aggregates. *Jour. Struct. Geol.*, 10(2):201-209.
- Figueiredo, M.C.H., Teixeira, W., 1996. The Mantiqueira Complex, Eastern Minas Gerais State: Preliminary Geochronological and Geochemical Results. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 68 (2): 223-246.
- Fischel, D.P., Pimentel, M.M., Fuck, R.A., Costa, A.G., Rosière, C.A. 1998. Geology and Sm-Nd isotopic data for Mantiqueira and Juiz de Fora complex (Ribeira Belt) in the Abre Campo-Manhuaçu region, Minas Gerais, Brazil. In: 14th International Conference on Basement Tectonics, 1998, Ouro Preto, Brazil, Abstracts, 21-23.

- Flinn, D., 1962. On folding during three dimensional progressive deformation. *Quat. Jour. Geol. Soc. Lon.*, 118:385-433.
- Flinn, D., 1978. Constriction and computation of three-dimensional progressive defromations. *Jour. Geol. Soc. Lond.*, 135: 291-305.
- Fry, N., 1979. Random points distributions and strain measurement in rocks, *Tectonophysics*, 60 (1):89-105
- Hasui, Y., Oliveira, M.A.F., 1984. Província Mantiqueira, setor central. In: Almeida, F.F.M. & Hasui, Y. (coor). *O Pré Cambriano do Brasil*, São Paulo, E. Blucher, p.308-344.
- Holcombe, R.J., 1999. GeoFryPlots 3.0. Programa de Computador. University of Queensland, Austrália. Disponível em: <http://www.earthscience.uq.edu.au/~rodh/software/>
- Holcombe, R.J., 2000. Strain Calculator. Programa de Computador. University of Queensland, Austrália. Disponível em: <http://www.earthscience.uq.edu.au/~rodh/software/>
- Janasi, V.A. 1997. Neoproterozoic mangerite-granite magmatism in southeastern Brazil: The São Pedro de Caldas Massif. In: *Acad Bras. Ciênc.*, 69: 267-394.
- Janasi, V.A. 1999. Petrogênese de granitos crustais da Nappe de Empurrão Socorro-Guaxupé (SP-MG): Uma contribuição da geoquímica elemental e isotópica. "Livre Docência" thesis, IG-USP, São Paulo, Brasil, 304 p.
- Marangoni, Y.R. 1994. Modelo crustal para o norte de Goiás a partir de dados gravimétricos. Unpublished Thesis, IAG-USP, 105 p.
- Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M. 1998. Where is the suture zone of the Neoproterozoic Araçuaí-West Congo Orogen. In: 14th International Conference on Basement Tectonics, 1998, Ouro Preto, Brazil, Abstracts, 35-37.
- Ramsay, J.G., 1967. Folding and fracturing of rocks. *Internation Series in the Earth and Planetary Sciences*, McGraw Hill, 568p.
- Ramsay, J.G., Huber, M.I., 1983. The techniques of moderm structural geology. Volume 1: Strain analysis. Academic Press. 700pp.
- Ramsay, J.G., Huber, M.I., 1987. The techniques of mordem structural geology. Volume 2: Folds and Fractures. Academic Press. 700pp.
- Ribeiro, A., Trouw, R.A.J., Andreis, R.R., Pacuillo, F.V.P., Valença, J.C., 1995. Evolução das Bacias Proterozóicas e o termo-tectonismo Brasileiro na margem sul do Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 25(4):235-248.
- Ribeiro, A. 1997. Estratigrafia e paleoambientes nas sucessões metassedimentares proterozóicas das serras do Lenheiro e São José. *Thesis*, Instituto de Geociências da

Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 167 p. (unpublished).

Rodrigues, S.W.O., 2003. Contexto geológico e estrutural da Zona de Cisalhamento Liberdade, MG. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências-USP, 103p.

Santos, L.P., 2004. Trajetórias metamórficas de ambientes colisionais: Domínios Frontais das Nappes Aiuruoca-Aandrelândia e Lima Duarte, Borda Sul do Cráton do São Francisco, MG. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências-USP, 90p. ◆

Trouw, R.A.J., Ribeiro, A., Paciullo, F.V.P. 1983. Geologia estrutural dos grupos São João del Rei, Carrancas e Andrelândia, Sul de Minas Gerais. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 55 (1): 71-85.

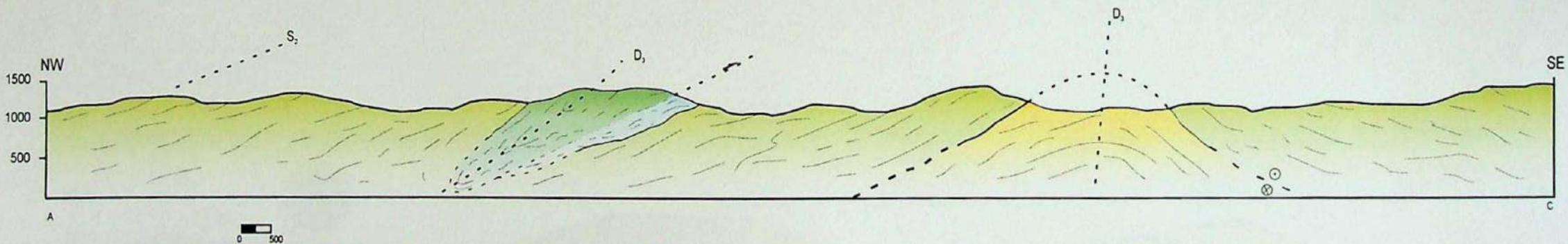
Trouw, R., Heilbron, M., Ribeiro, A., Paciullo, F., Valeriano, C. M., Almeida, J.C.H., Tupinambá, M., Andreis, R. (2000). The Central segment of the Ribeira Belt. In: Tectonic Evolution of South America. Rio de Janeiro: CPRM, 287-310.

Vandecar, J.C., James, D.E., Assumpção, M. 1995. Seismic evidence for a fossil mantle plume beneath South America and implications for plate driving forces, Nature, 387: 25-31

→ Vilela, L.G.G., 2000. Petrografia, geotermobarometria e evolução metamórfica de granulitos básicos de alta pressão e rochas transicionais para fácies eclogito na região de Lima Duarte, MG. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências-USP, 162pp.

## **ANEXO 1**

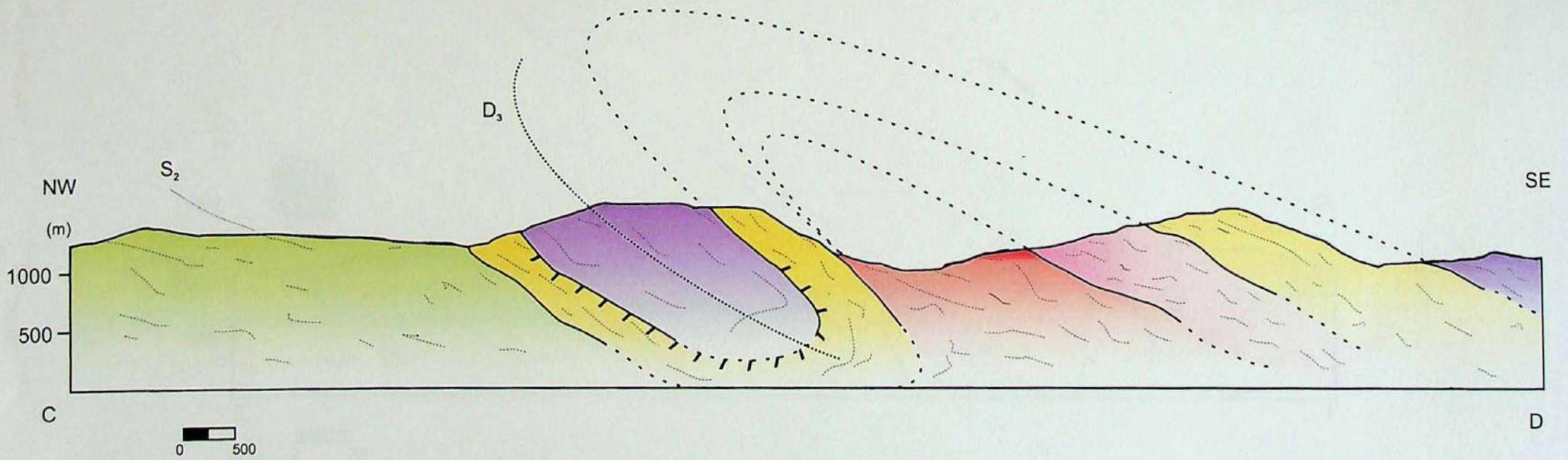
# PERFIL A-B



- Rutílio-ilmenita-aluminossilicato-granada-muscovita-biotita xisto porfiroblástico
- Granada-muscovita-quartzito xisto com lentes de ortoquartzito
- Granada-biotita-plagioclásio-quartzito xisto homogéneo (Xisto Sto. António)
- Muscovita quartzito grosso, equigranular

- S<sub>2</sub> Traço da foliação principal
- D<sub>2</sub> Plano axial de dobra D<sub>2</sub>
- Sentido de transporte

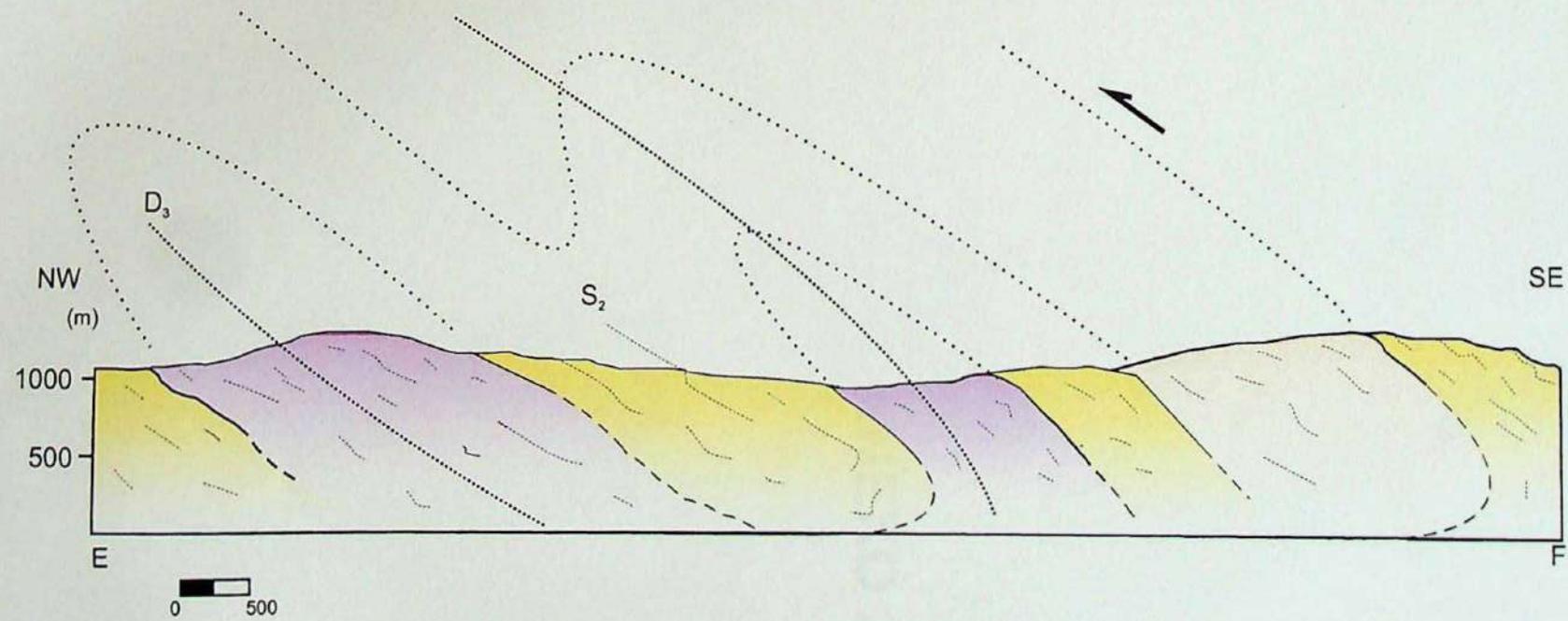
# PERFIL C-D



-  Rutilo-aluminossilicatos-granada-muscovita-biotita xisto porfiroblástico
-  Ortoquartzito
-  Muscovita-biotita granito diatexito
-  Sillimanita-granada-biotita gnaiss migmatítico
-  Sillimanita-granada-biotita xisto feldspático

-  S<sub>2</sub> Traço da foliação principal
-  D<sub>3</sub> Plano axial de dobra D<sub>3</sub>

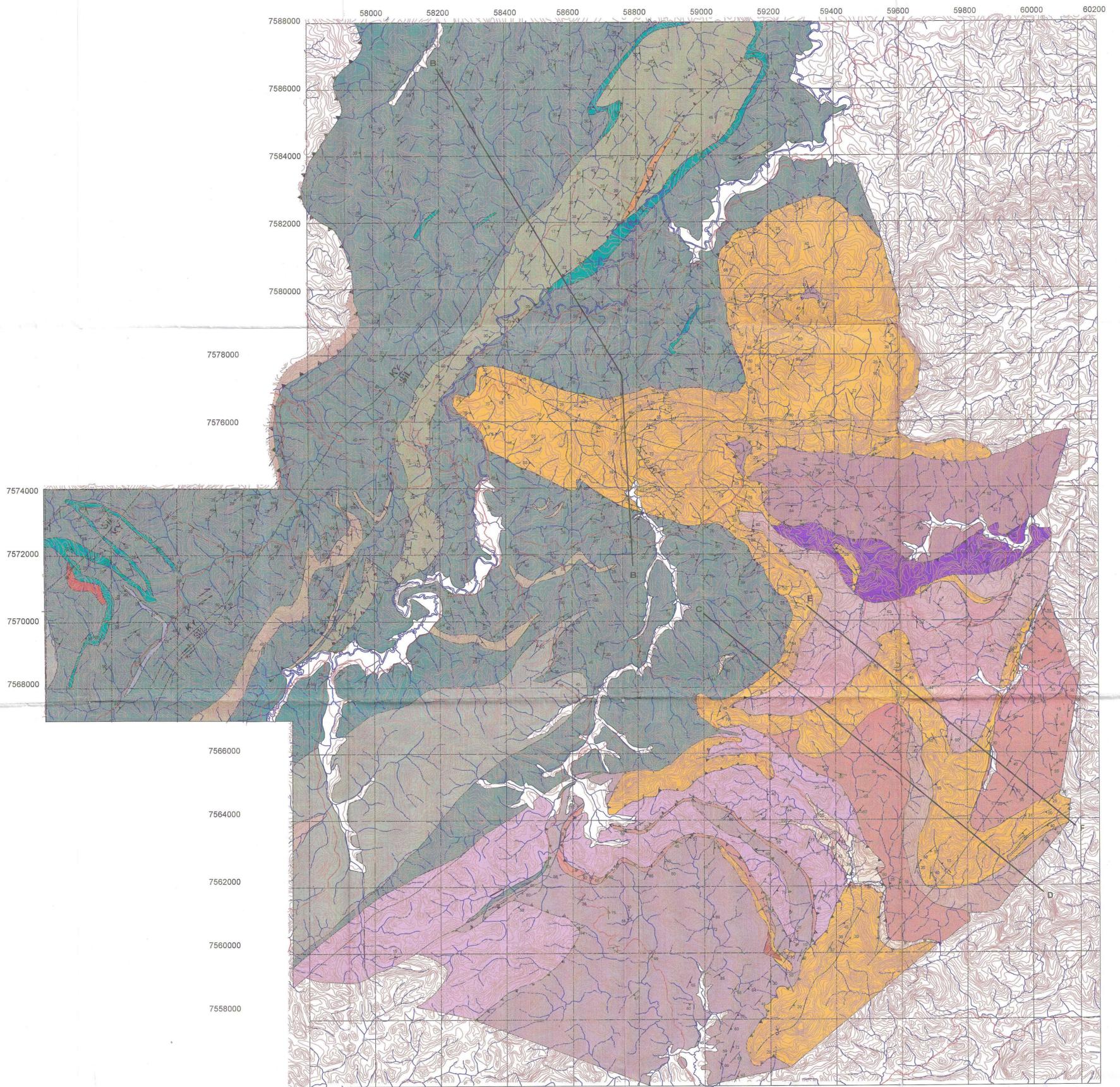
# PERFIL E-F



-  Ortoquartzito
-  Muscovita-biotita granito diatexito
-  Sillimanita-granada-biotita gnaiss migmatítico

-  S<sub>2</sub> Traço da foliação principal
-  D<sub>3</sub> Plano axial de dobra D<sub>3</sub>
-  Sentido de transporte

## **ANEXO 2**



### LEGENDA

Quaternário

- Aluvião
- Nappe Aiuruoca-Andreiândia**

Neoproterozóico

- Grt-Ms-Qtz xisto intercalado com quartzito
  - Rt-Ais-Grt-Bt-Ms-Qtz xisto porfiroblástico alternado com lentes de ortoquartzito, Als-Ms-Qtz xisto, Ms-Qtz xisto milonítico
  - Grt-Bt-Pl-Qtz xisto e/ou gnaiss homogêneo (Xisto Sto. Antônio)
  - (Hbl-Grt)-Bt gnaiss bandado
- (Rt-Ilm)-Als-Grt-Ms-Bt xisto porfiroblástico  
Intercalações subordinadas: Calcio-silicáticas (cs), Sil-Grt-Bt gnaiss (gn), Metaultramáficas pontuais

Paleoproterozóico

- Bt tonalito gnaiss cinza, migmatítico estromatóico e porfiroclástico "Gnaiss Argentina"

**Nappe Lima Duarte**

- Sil-Grt-Bt gnaiss migmatítico
- Sil-Grt-Bt xisto feldspático
- Ortoquartzito e (Sil)-Ms quartzito muito grosso. Subordinadamente Grt-Bt gnaiss e (Grt)-Sil-Bt-Qtz xisto feldspático
- Ms-Bt granito diatexitico
- Grt-Hbl-Bt gnaiss bandado com lentes de anfibolito
- Bt gnaiss cinza, migmatítico e de composição tonalito-granodiorito, localmente a granofelsa
- Grt-Bt-Pl gnaiss com intercalação de Bt-Pl gnaiss cinza escuro homogêneo e subordinadamente gnaiss Calcio-silicático.
- Sil-Ms-Bt quartzito feldspático
- Sil-Grt-Bt gnaiss migmatítico e/ou xisto com estrutura fleblítica

Localização da área de estudo



Articulação da Folha Bom Jardim de Minas e localização da área mapeada

Aiuruoca	Arantina	Bom Jardim de Minas
Alagoa	Liberdade	S. Rita de Jacutinga
Aguilhas Negras	Resende	N. S. de Amparo

**PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR**  
Origem da quilometragem UTM:  
Equador e Meridiano 45° W. Gr. Acrescidas as constantes 10 000 km e 500 km, respectivamente.

**Datum vertical:** marégrafo Imbituba, SC  
**Datum horizontal:** Córrego Alegre, MG

Convecções cartográficas

- Curvas de nível (eqüidistância de 100 metros)
- Cursos d'água
- Estradas de rodagem

Simbolos estruturais

- Foliação e Lineação**
- S<sub>1</sub>
  - S<sub>2</sub>
  - S<sub>3</sub>
  - Lineação mineral
  - Lineação estiramento
  - Lineação intersecção
- Falhas e contatos**
- Contato litológico observado
  - Contato litológico inferido
  - Traços de lineamentos S<sub>1</sub>
  - Traço do perfil
  - Falha de empurrão (pregão no reboco alto)
  - Falha Normal observada
  - Falha transcorrente sinistral
  - Falha transcorrente dextral
- Dobras**
- Sinclinal
  - Anticlinal
  - Sinclinal invertido
  - Anticlinal invertido



