

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ASSINATURAS EXTENSIONAIS RELACIONADAS À  
EXTRUSÃO SOB REGIME COMPRESSIONAL DE  
NAPPE DE ALTA PRESSÃO**

Carlos Henrique Grohmann de Carvalho

Orientador: Prof. Dr. Mário da Costa Campos Neto

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2001/07)

SÃO PAULO  
2001



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ASSINATURAS EXTENSIONAIS RELACIONADAS À EXTRUSÃO  
SOB REGIME COMPRESSIONAL DE NAPPE DE ALTA  
PRESSÃO**

**CARLOS HENRIQUE GROHMANN DE CARVALHO**

DISCIPLINA 0440500 - TRABALHO DE FORMATURA

**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Dr. Mário da Costa Campos Neto

A handwritten signature in dark ink, appearing to read "Mário da Costa Campos Neto", written over a horizontal line.

Prof. Dr. Rômulo Machado

A handwritten signature in dark ink, appearing to read "Rômulo Machado", written over a horizontal line.

Prof. Dr. Antônio Romalino S.F. Cesar

*Fragoso*

A handwritten signature in dark ink, appearing to read "Romalino Fragoso Cesar", written over a horizontal line.

DEDALUS - Acervo - IGC



30900009284

SÃO PAULO  
2001

TF  
G874  
CH.a

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ASSINATURAS EXTENSIONAIS RELACIONADAS A EXTRUSÃO  
SOB REGIME COMPRESSIONAL DE MAPA DE ALTA  
PRESSÃO

CARLOS HENRIQUE GROHMANN DE CARVALHO

DISCIPLINA 0440500 - TRABALHO DE FORMATURA



BANCA EXAMINADORA

*Romelino Travenço Neto*

Prof. Dr. Manoel da Costa Campos Neto  
Prof. Dr. Romulo Machado  
Prof. Dr. Antonio Romalino S. F. Cesar  
*Fuquero*



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ASSINATURAS EXTENSIONAIS RELACIONADAS À EXTRUSÃO  
SOB REGIME COMPRESSIONAL DE NAPPE DE ALTA PRESSÃO**

(TF 2001/7)

Carlos Henrique Grohmann de Carvalho

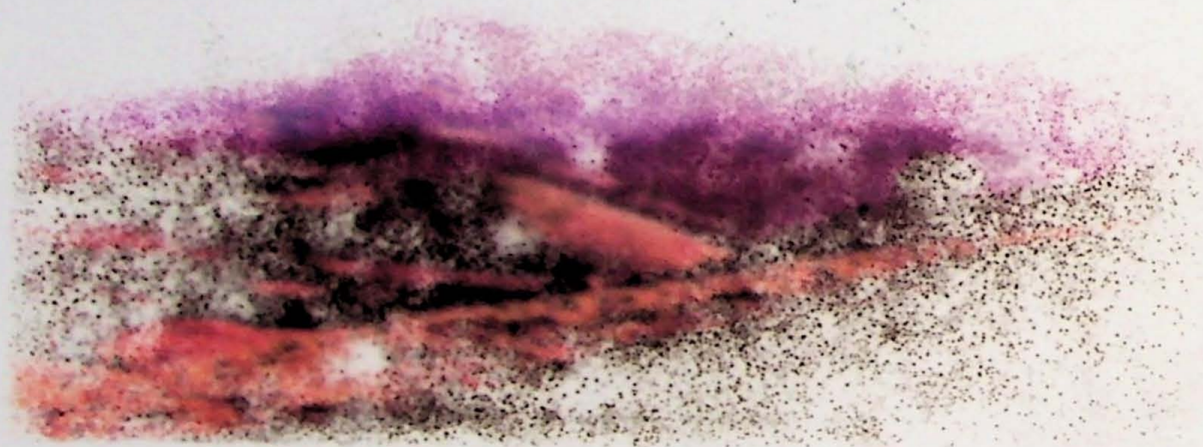
Orientador: Prof. Dr. Mario da Costa Campos Neto

Monografia de Trabalho de Formatura

SÃO PAULO

2001

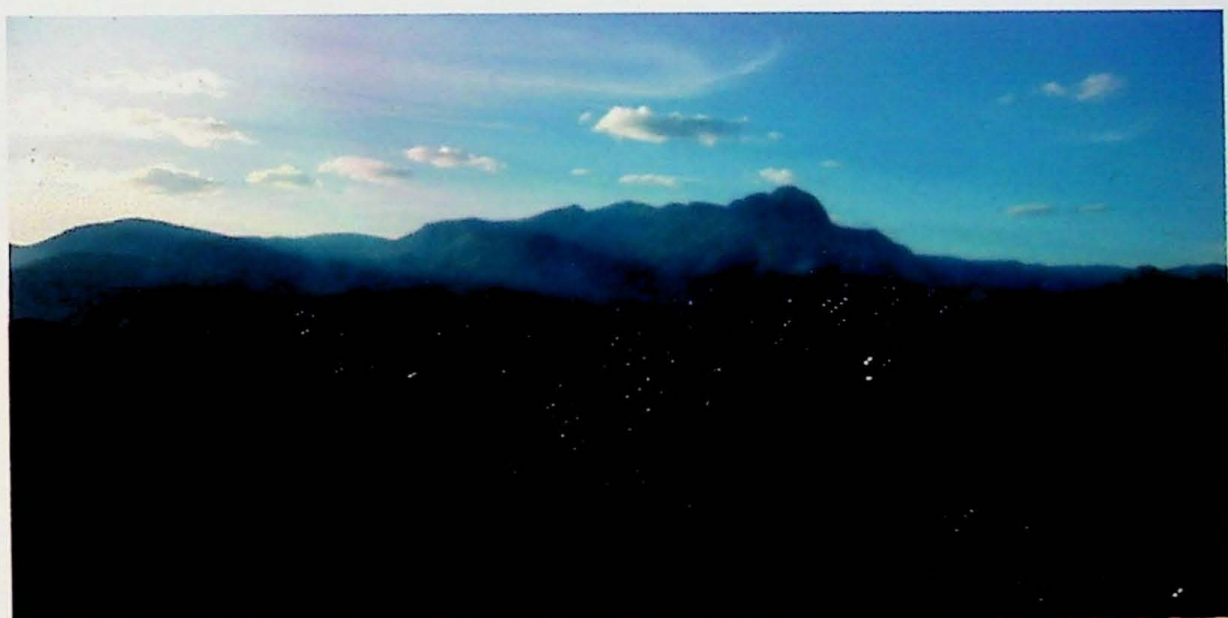




DOAÇÃO COMISSÃO DE  
TRABALHO DE FORMATURA

Data: 15 / 02 / 02

*Para meu avô*



**Entardece na roça  
de modo diferente.**

*Carlos Drummond de Andrade*



## Sumário

Índice de figuras .....	ii
Índice de tabelas .....	iv
Índice de anexos .....	iv
Resumo .....	v
Abstract .....	vii
Agradecimentos.....	ix
 1 - Introdução	
1.1 - Apresentação do tema de trabalho.....	1
1.2 - Localização e acessos .....	5
1.3 - Objetivos .....	6
1.4 - Metodologia de trabalho.....	6
 2 - Atividades desenvolvidas e resultados obtidos	
2.1 - Análise de lineamentos - tectônica rúptil e neotectônica .....	8
2.2 - Microtectônica .....	15
2.3 - Estudo do elipsóide de deformação .....	19
2.4 - Análise estrutural - tectônica dúctil .....	26
 3 - Conclusões .....	38
 4 - Referências bibliográficas.....	40



## Índice de Figuras

Figura 1.1	Contexto geológico regional .....	2
Figura 1.2	Mapa geológico da retaguarda da Nappe Aiuruoca-Andrelândia .....	3
Figura 1.3	Localização e principais vias de acessos da área de estudo .....	5
Figura 1.3	Mapa de localização de pontos descritos .....	7
Figura 2.1a	Modelo numérico de terreno com iluminante situado a N45E, inclinação de 40° .....	9
Figura 2.1b	Modelo numérico de terreno com iluminante situado a N45W, inclinação de 40° .....	9
Figura 2.2	Lineamentos interpretados para a área de estudo .....	10
Figura 2.3a	Domínio morfológicos informais utilizados para a análise de orientação de lineamentos.....	11
Figura 2.3b	Mapa de rugosidade de relevo .....	11
Figura 2.4	Diagrama de rosácea. Todos os lineamentos .....	13
Figura 2.5	Diagrama de rosácea. Planalto de Aiuruoca .....	13
Figura 2.6	Diagrama de rosácea. Serra de Aiuruoca.....	13
Figura 2.7	Diagrama de rosácea. Domínio Mantiqueira .....	14
Figura 2.8	Diagrama de rosácea. Itatiaia-Passa Quatro .....	14
Figura 2.9	Arcos poligonais em micas definindo a foliação S <sub>2</sub> .....	15
Figura 2.10	Estrutura do tipo S-C para movimentação normal dúctil.....	16
Figura 2.11	Sigmóide da foliação indicando transporte de topo para SSW.....	16
Figura 2.12	Foliação S-C e sigmóide de silimanita em falha normal .....	17
Figura 2.13	Indicadores cinemáticos para movimentação reversa .....	17
Figura 2.14	Banda extensional com recristalização de quartzo.....	18
Figura 2.15	Método de Fry. Amostra NESG 553 .....	22
Figura 2.16	Método de Fry. Amostra NESG 567 .....	22
Figura 2.17	Método de Fry. Amostra NESG 597 .....	23
Figura 2.18	Xenólito de migmatito em leucogranito. ponto NESG-597.....	23
Figura 2.19	Método de Fry. Amostra CXA-IX-46 .....	24
Figura 2.20	Diagrama logarítimo de deformação.....	25
Figura 2.21	Representação dos planos XY dos elipsóides de deformação obtidos .....	25
Figura 2.22	Domínios estruturais delimitados para a área de estudo.....	26



Figura 2.23	Dobras afetando rochas metabásicas. ponto NESG-554 .....	27
Figura 2.24a	Diagrama de contornos para eixos de dobras intrafoliais (dom.1) .....	28
Figura 2.24b	Diagrama de contornos para pólos de planos de foliação (dom.1).....	28
Figura 2.25a	Diagrama de contornos para pólos de planos de foliação (dom.2).....	28
Figura 2.25b	Diagrama de contornos para lineações minerais (dom.2) .....	28
Figura 2.26	Sistema de cavalgamento rúptil tardio SC <sub>3</sub> . ponto NESG-575 .....	29
Figura 2.27a	Estereograma para foliações protomiloníticas S <sub>2</sub> e lineações L <sub>2</sub> (dom.3).....	30
Figura 2.27b	Diagrama de Angelier (dom.3).....	30
Figura 2.27c	Diagrama de contornos para pólos de planos de foliação (dom.3).....	30
Figura 2.28a	Diagrama de contornos para pólos de planos de foliação (dom.4).....	31
Figura 2.28b	Diagrama de contornos para lineações minerais (dom.4) .....	31
Figura 2.29a	Diagrama de contornos para pólos de planos de foliação (dom.5).....	32
Figura 2.29b	Diagrama de contornos para lineações minerais (dom.5) .....	32
Figura 2.30	Estereograma para foliações miloníticas e lineações de estiramento .....	32
Figura 2.31a	Diagrama de contornos para pólos de planos de foliação (dom.7).....	33
Figura 2.31b	Diagrama de contornos para lineações minerais (dom.7) .....	33
Figura 2.32a	Diagrama de contornos para pólos de planos de foliação (dom.8).....	33
Figura 2.32b	Diagrama de contornos para lineações minerais (dom.8) .....	33
Figura 2.33a	Diagrama de contornos para pólos de planos de foliação (dom.9).....	34
Figura 2.33b	Diagrama de contornos para lineações minerais (dom.9) .....	34
Figura 2.34a	Diagrama de contornos para pólos de planos de foliação (dom.10).....	34
Figura 2.34b	Diagrama de contornos para lineações minerais (dom.10) .....	34
Figura 2.35a	Diagrama de contornos para pólos de planos de foliação (dom.11).....	35
Figura 2.35b	Estereograma para lineações minerais (dom.11) .....	35
Figura 2.36a	Estereograma para fraturas conjugadas e lineações a silimanita (sist.1) .....	36
Figura 2.36b	Estereograma para fraturas conjugadas e lineações a silimanita (sist.2) .....	36
Figura 2.37	Fraturas conjugadas com lineação de mergulho forte. ponto NESG-601 .....	36
Figura 2.38	Detalhe da fotografia anterior .....	36
Figura 2.36b	Fraturas conjugadas com lineação horizontal. ponto NESG-601 .....	37



## **Índice de Tabelas**

Tabela 1 - Valores e parâmetros calculados para elipsóides de deformação .....	21
--	----

## **Índice de Anexos**

Anexo 1 - Mapa estrutural	
---------------------------	--

Anexo 2 - Perfil geológico	
----------------------------	--



## Resumo

A borda sul-sudoeste do Cráton do São Francisco é caracterizada por um sistema de nappes de cavalgamento horizontais com aloctonia superior a 200 km para E-NE. Este sistema, que compreende o extremo sul-sudeste da Faixa Brasília, empilha lateralmente à borda sul cratônica, três ambientes tectônicos (do topo para a base): a raiz de um arco magmático neoproterozóico (*nappe Socorro-Guaxupé*); nappes metassedimentares de alta pressão relacionadas a uma margem ativa (*nappes Três Pontas-Varginha, Carmo da Cachoeira, Aiuruoca-Andrelândia, Pouso Alto e klippe Carvalhos*); nappes e duplexes para-autóctones de média pressão.

O sudeste da Nappe Aiuruoca-Andrelândia é margeado por uma zona de cisalhamento lateral sinistral rúptil-dúctil (Zona de Cisalhamento Liberdade), que limita os Migmatitos Alagoa a sul e pode representar uma rampa lateral no avanço da Nappe Lima Duarte contígua. Essa zona de cisalhamento, em Alagoa (MG), inflete-se segundo E-W, rompendo a retaguarda da nappe, em uma movimentação normal, dúctil, com transporte para sul, ao longo de lineações minerais a silimanita segundo o mergulho da foliação milonítica. O transporte lateral é marcado pelas lineações a muscovita (de temperatura mais baixa), próximas de E-W.

A norte desta zona de cisalhamento, a sequência metassedimentar é a granada e silimanita, assenta-se sobre um assoalho gnáissico-diatexítico e está intensamente cortada por leucogranitos estratóides à turmalina. Encontra-se dobrada tardiamente e repete-se em um esquema imbricado de cavalgamentos de baixo ângulo para NE. A sul predominam migmatitos diatexíticos gnáissicos dobrados em um amplo sinforme com cerca de 5 km de comprimento de onda.

Nos metassedimentos a silimanita, a foliação principal  $S_2$  é transposta por uma foliação protomilonítica grossa  $S_2'$ , associada a movimentações normais. Nos gnaisses, o transporte para sul é evidenciado por diversos indicadores cinemáticos, tais como foliações S-C e sigmóides de quartzo. Um sistema de cavalgamento rúptil, tardio e de baixa temperatura, superpõe-se às estruturas extensionais.

Para norte, uma estrutura antiformal em diatexitos gnáissicos marca o fim deste domínio metamórfico-estrutural. Uma falha normal com mergulho de médio ângulo para nordeste limita a antiforma e justapõe um pacote superior de micaxistos a cianita e estauroлита. A partir deste limite, o padrão estrutural da Nappe Aiuruoca-Andrelândia



mostra-se homogêneo, predominando os indicadores de transporte dúctil sin-metamórfico e dúctil-rúptil sin-S<sub>3</sub> para E-NE.

A alternância de estruturas extensionais em um regime compressivo geral e na retaguarda de nappe de alta pressão, está associada ao processo de extrusão e da busca, no orógeno colisional, de reequilíbrio isostático.



## Abstract

The Neoproterozoic nappe system exposed south of the São Francisco Cráton underwent a minimum of 200 km of near-horizontal northeastward displacement. This nappe system comprises the south-southeast sector of Brasília Belt and piles up three tectonic settings (from top to bottom): the roots of a neoproterozoic magmatic arc (*Socorro-Guaxupé Nappe*); high-pressure metasedimentary nappes (*Três Pontas-Varginha, Carmo da Cachoeira, Aiuruoca-Andrelândia, Pouso Alto and Carvalhos klippe*); parautochthonous medium-pressure nappes and duplexes.

In the southeast of Aiuruoca-Andrelândia Nappe, a brittle-ductile sinistral shear zone (*Liberdade Shear Zone*) limits the southern Alagoa Migmatites and may represent a lateral ramp for the eastern Lima Duarte Nappe. Close to Alagoa (MG), this shear zone turns E-W, breaking the nappe hind portion, in a southward normal-ductile movement.

North of this shear zone, the garnet-silimanite bearing metasedimentary sequence lays over a gnaissic-diatexitic basement and is highly sliced by strata-like tourmaline-bearing granites. In the metasediments, main foliation  $S_2$  is transposed by a normal-fault related thick protomylonitic  $S_2'$  foliation. In the gnaisses, southward transport is marked by shear-sense indicators such as S-C foliations and quartz sigmoids. A low-temperature, late brittle thrust system, overlaps the extensional structures.

Heading north, the end of this structural-metamorphic domain is marked by an antiform in gnaissic diatexites. A normal fault with average northeastward dip limits the fold and juxtaposes upper kyanite-staurolite bearing micaxists. From this limit, the structural pattern of Aiuruoca-Andrelândia Nappe is homogeneous, with sin-metamorphic ductile shear-sense indicators to E-NE.

The alternating of extensional structures in a general compressive regime and in the hind portion of high-pressure nappe, is associated with the extrusion process and with the search, in the collisional orogen, of isostatic balance.



## *Agradecimentos*

*Escrever os agradecimentos de um trabalho como este não é, certamente, tarefa das mais fáceis. Como não são poucas as pessoas que, de uma maneira ou de outra, tiveram sua parcela de participação, existe sempre o receio esquecer alguém. Assim,, deixo desde já, anotado o meu sincero obrigado a quem porventura não esteja citado nestas breves linhas.*

*Apesar de não ser lugar-comum, este trabalho é o tipo de coisa que só se faz uma vez na vida, portanto não há motivos para que não figurem aqui algumas divagações. Se no meio do caminho do poeta tinha uma pedra, nada mais justo dizer que no caminho daqueles que escolhem a Geologia para suas vidas, são várias pedras. Muitas delas no sentido literal, e se no início, havia dificuldade em perceber os detalhes e compreender os porquês, hoje elas já não guardam mais tantos mistérios. Outras vêm na forma de percalços, que nos fazem parar, pensar, mudar de opinião. Mesmo que estas não sejam bem-vindas como as anteriores, são necessárias, pois foi assim que chegamos até aqui, tropeçando, caindo, aprendendo, levantando e continuando. Foi assim que construímos as pessoas que somos hoje, e não o fizemos sozinhos. Sempre que caíamos, havia alguém para nos ajudar a levantar. Aos amigos, então, devem-se agradecimentos especiais.*

*Antes de iniciar a lista de nomes, não posso deixar de agradecer à minha família. Em particular a meu Pai, minha Mãe, e meu irmão Paulo. A todos meu muito obrigado, por tudo.*

*Agradeço ao professor Mario da Costa Campos Neto, pela amizade, ensinamentos e dedicação na orientação deste trabalho. À FAPESP pelo apoio financeiro. Ao professor Ginaldo Campanha pelas valorosas discussões.*

*Aos amigos e amigas (espero que estejam todos aí) Thiago B. Bonás (Aji), Luciana Pascarelli (Dolly), Arthur V. Fosse (Sarita), Janaína F. da Silva (Moska), Frederico Faleiros (Bambi), Sabrina Macluf (Bifão), Eduardo Yamamoto (K-gão), Ângela Canil (Ku-della), André Sawakuchi (Frutinha), Ana Flávia (Xibok), Sérgio Wilians (Aracy), Paula Amaral (Pi), Paulo Marcondes (Tibúrcio), Caroline Thaís (Braulyo), Fernando Valadares (99), Eva Kaiser (Kaide), Eduardo Patrício (Deby), Renata Rocha (Tuku), Nickie Unonius (Nickie), Alexandre Lessa (Nunsei), Pablo Sierra (Pablito), Carolina Cotrim (Carol), Cristinis Ladan (Joe), Fernando Moya (Ophélia), Cristiano Chiessi (Cris), Itamar Barbosa (Lafond), Fabiana Fernandes (Paariba), Fernando Torres (Boiola).*



## 1 - Introdução

### 1.1 - Apresentação do tema de trabalho

A borda sul-sudoeste do Cráton do São Francisco (CSF) é caracterizada por um sistema de nappes de cavalgamento horizontais de crescimento frontal com aloctonia superior a 200 km para E-NE (fig. 1.1). Este sistema, que compreende o setor sul-sudeste da Faixa Brasília, empilha lateralmente à borda sul cratônica, três ambientes tectônicos (do topo para a base): a raiz de um arco magmático neoproterozóico formada por granulitos de alta pressão e temperatura (*nappe Socorro-Guaxupé*); nappes metassedimentares de alta pressão relacionadas a uma margem ativa (*nappes Três Pontas-Varginha, Carmo da Cachoeira, Aiuruoca-Andrelândia, Pouso Alto e klippe Carvalhos*); nappes e duplexes para-autóctones de média pressão com afinidades de margem passiva e rift (Brito Neves *et al*, 1999; Campos Neto, 2000a; Campos Neto & Caby, 1999 e 2000; Campos Neto *et al*, 2000; Ribeiro *et al*, 1995; Paciullo, 1997; Trouw *et al*, 2000).

As estruturas encontradas na região são relacionadas a três fases de deformação principal (Trouw *et al*, 1982,1983,2000): D<sub>1</sub> caracterizada pelo empilhamento de nappes e formação de clivagem/xistosidade penetrativa (S<sub>1</sub>), e poucas dobras; D<sub>2</sub> com cisalhamento intenso de direção aproximada E-W que causa numerosas dobras em escalas desde milimétricas até quilométricas com superfícies axiais subhorizontais e eixos aproximadamente E-W, a foliação S<sub>2</sub> mostra-se (principalmente nos xistos e filitos) como uma clivagem de crenulação; D<sub>3</sub> ocorre após uma queda na temperatura do metamorfismo e causa dobras geralmente abertas assimétricas com vergência para NW, além de várias zonas de cisalhamento direcional dextral.

O sudeste da Nappe Aiuruoca-Andrelândia (NAA) é margeado por uma zona de cisalhamento sinistral rúptil-dúctil (Zona de Cisalhamento Liberdade), que limita os Migmatitos Alagoa a sul e pode representar uma rampa lateral no avanço da Nappe Lima Duarte contígua. A ZCL tem a forma regional de um semi-arco (fig. 1.2); orienta-se NE na região de Liberdade e inflete para E-W em Alagoa, rompendo a retaguarda da nappe em uma movimentação normal, dúctil, com transporte para sul ao longo de lineações minerais a silimanita segundo o mergulho da foliação milonítica. O transporte lateral é marcado pelas lineações a muscovita (de temperatura mais baixa), próximas de E-W. A norte de Pouso Alto, a ZCL possui orientação W-NW (Campos Neto, 2000b).



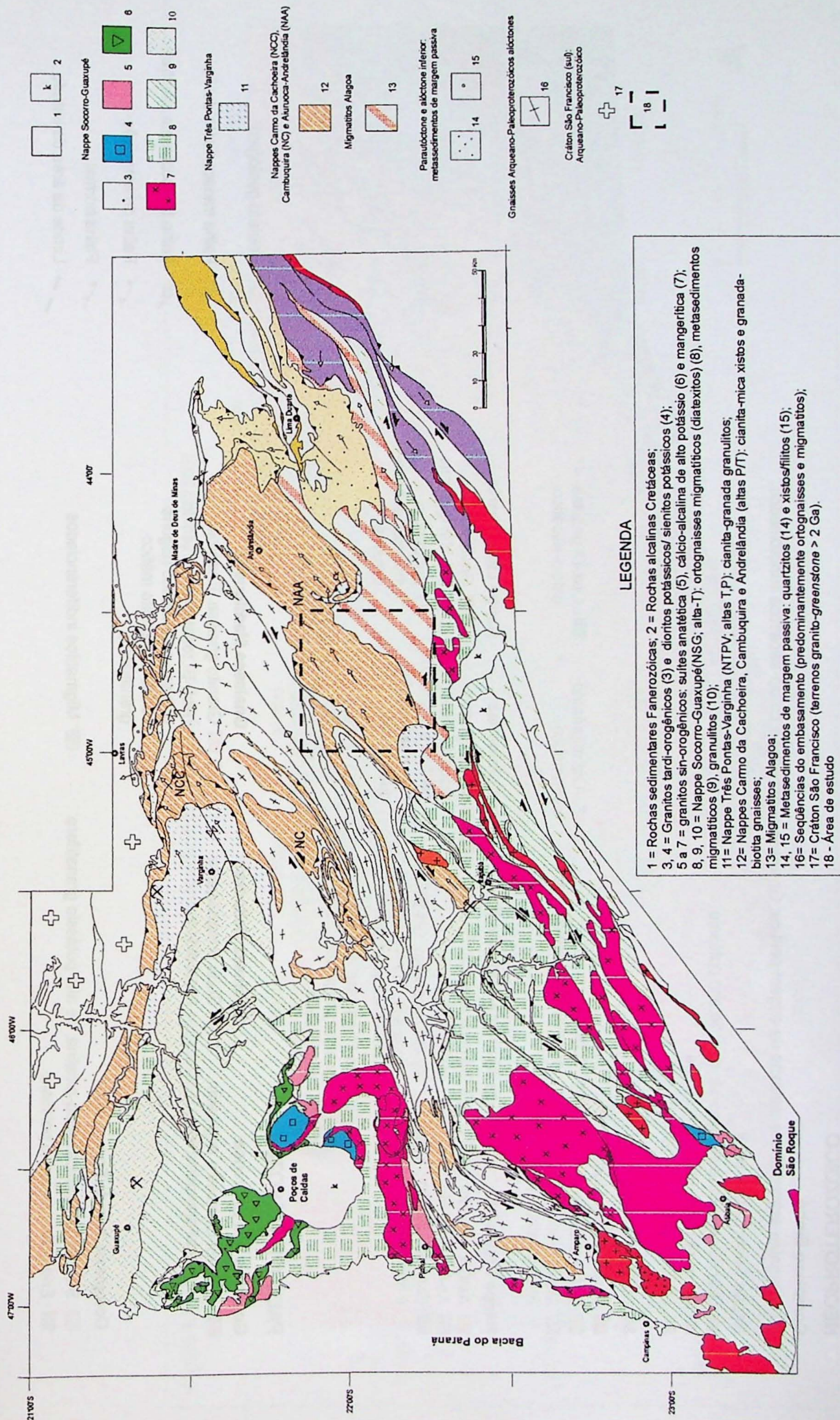


Figura 1.1- Contexto geológico regional segundo Campos Neto et al. (2000)



# LEGENDA

## FANEROZÓICO

- Aluvião
- Rochas alcalinas cretáceas

Dique

## NEOPROTEROZÓICO

### Complexo Embú

- Migmatito estromático e diatexito de origem pelítica. Gnaisses quartzosos e calcio-silicáticos subordinados

### Nappe Socorro-Guaxupé

- Granitóide porfírtico cálcio-alcálico de alto potássio
- Unidade diatexítica intermediária
- Unidade granulítica inferior

### Migmatitos Alagoa

- Leucogranito a turmalina
- Bt-Ms diatexito branco
- Ms-Bt gnaiss e Bt-migmatito estromático
- Seqüência metavulcanossedimentar
- Sil-Qtz migmatito estromático
- Opx-Di gnaiss calcio-silicático

### Nappe Pouso Alto

- As-Grt quartzito
- As-Grt granulito
- Granulito básico e intermediário
- Sil-mica quartzito. Sil-Grt mica xisto
- Ky-Grt mica xisto. Grt-Bt Pl gnaiss. Kfs-Ky xisto/ gnaiss. Ms quartzito
- Ms-Bt gnaiss, (Hbl)-Bt gnaiss, migmatito estromático

### Nappe Aiuruoca-Andrelândia

- Sil-mica quartzito. Sil-Grt mica xisto
- Ky-Grt mica xisto. Grt-Bt Pl gnaiss. Kfs-Ky xisto/ gnaiss. Ms quartzito
- Ms-Bt gnaiss, (Hbl)-Bt gnaiss, migmatito estromático

### Nappe Luminárias

- Bt-Ms quartzito placoso. Xisto pelítico e grafítico com intercalações quartzíticas

### Nappe Lima Duarte

- Gnaiss/xisto. (Sil-Ms) quartzito
- Seqüência metavulcanossedimentar

## PALEOPROTEROZÓICO

### Gnaisses São Lourenço

- (Hbl)-Bt Gnaiss e migmatito tonalítico-granodiorítico

### Gnaisses Heliódora

- Suíte ortognáissica-migmatítica

### Gnaisses Mantiqueira

- Granito gnaiss. Enderbitito
- (Hbl)-Bt tonalito-trondhjemitognaiss migmatítico (alguns boudins granulito máfico granatífero)

### Complexo Juiz de Fora

- Suíte chamoctítica calcio-alcálica, de alto potássio granatífera
- Enderbitos de baixo potássio

- Migmatitos indiferenciados

Contato geológico

Falha transcorrente dextral

Falha transcorrente sinistral

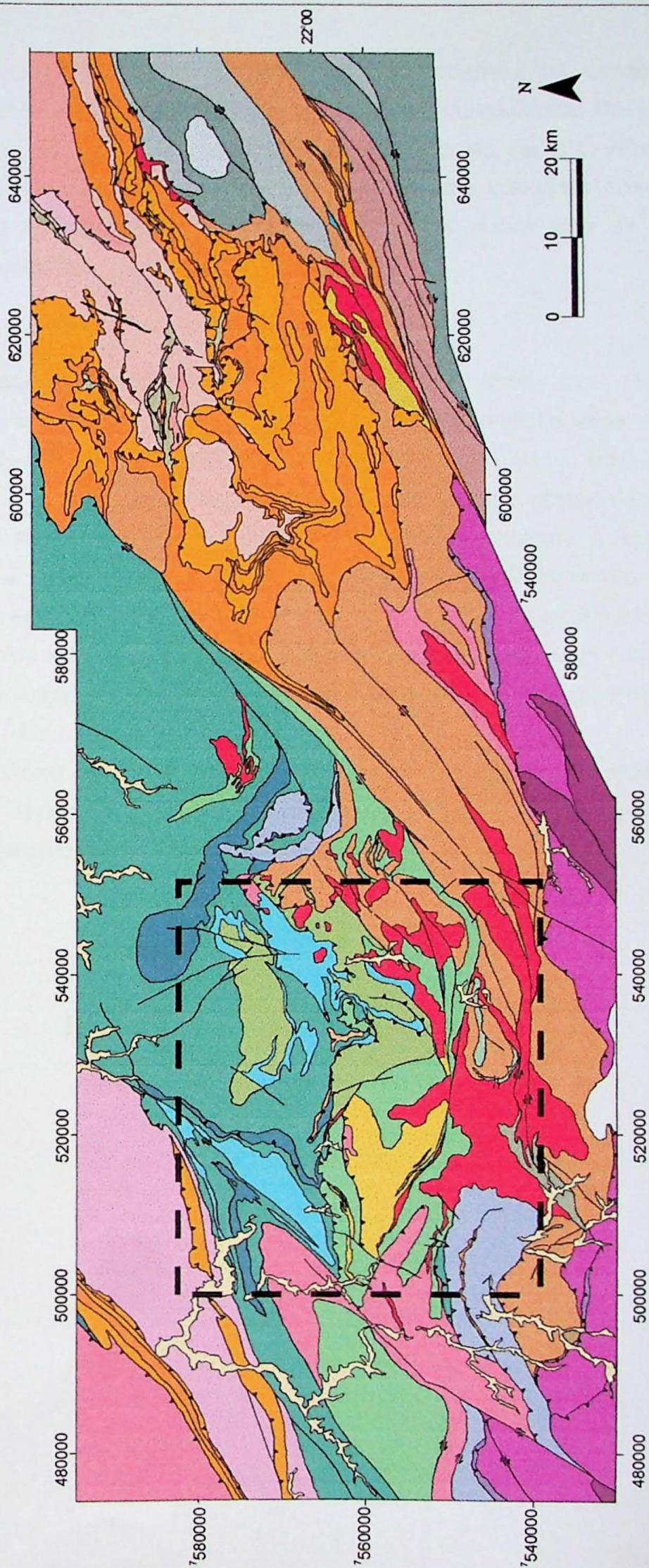
Falha de empurrão

Falha normal

Limite da área de estudo



Figura 1.2 - Mapa geológico da retaguardada Nappe Aiuruoca-Andrelândia, segundo Campos Neto et al. (2000)





Outra zona de cisalhamento, lateral esquerda, ocorre a sul, sendo responsável pelo cavalgamento dos Migmatitos Alagoa sobre a Nappe Lima Duarte. Possui forma de S aberto e deitado, duplicada para nordeste e diverge, a oeste, da ZCL, infletindo para S-SW. Entre essas zonas de cisalhamento ocorrem dobras cilíndricas normais a pouco vergentes para NE, representando regionalmente uma quarta fase de dobramentos (Campos Neto, 2000b).

Em orógenos relacionados a subducção continental (tipo Himalaiano), a progressão do movimento do *slab* subductado leva a uma condição limite, onde a porção crustal da litosfera pára completamente de se movimentar, causando falhamento no *front* de subducção e o início de um movimento de ascensão, por compensação isostática, enquanto o restante da litosfera (ainda subhorizontal) continua a ser subductada (Chemenda *et al*, 1995; Hodges *et al*, 1993). Esta ascensão cria estruturas de falhas com sentido de movimentação normal sincrônicas a estruturas de movimentação reversa, permitem a rápida extrusão de terrenos metamórficos que estavam em condições de alta pressão ( fácies anfibolito, eclogito e granulito) e compensam o soerguimento de cadeias de montanhas (Himalaia).

A alternância de estruturas extensionais em um regime compressivo geral e na retaguarda de nappe de alta pressão, está associada ao processo de extrusão e da busca, no orógeno colisional, de reequilíbrio isostático.



## 1.2 - Localização e acessos

A área de estudo localiza-se na região sul do Estado de Minas Gerais, entre os municípios de Alagoa, Aiuruoca, Caxambu e Pouso Alto (fig. 1.3), delimitada pelas coordenadas  $44^{\circ}30'W$  -  $21^{\circ}50'S$  e  $45^{\circ}W$  -  $22^{\circ}15'S$ .

O acesso pode ser feito através da rodovia BR-116 saindo de São Paulo no sentido Rio de Janeiro até o entroncamento com a BR-354, no município de Engenheiro Passos (RJ). Percorre-se 48km a partir do entroncamento até Itamonte (MG), de onde é possível continuar em direção à Pouso Alto e Caxambu (W da área), ou seguir para Alagoa e Aiuruoca.

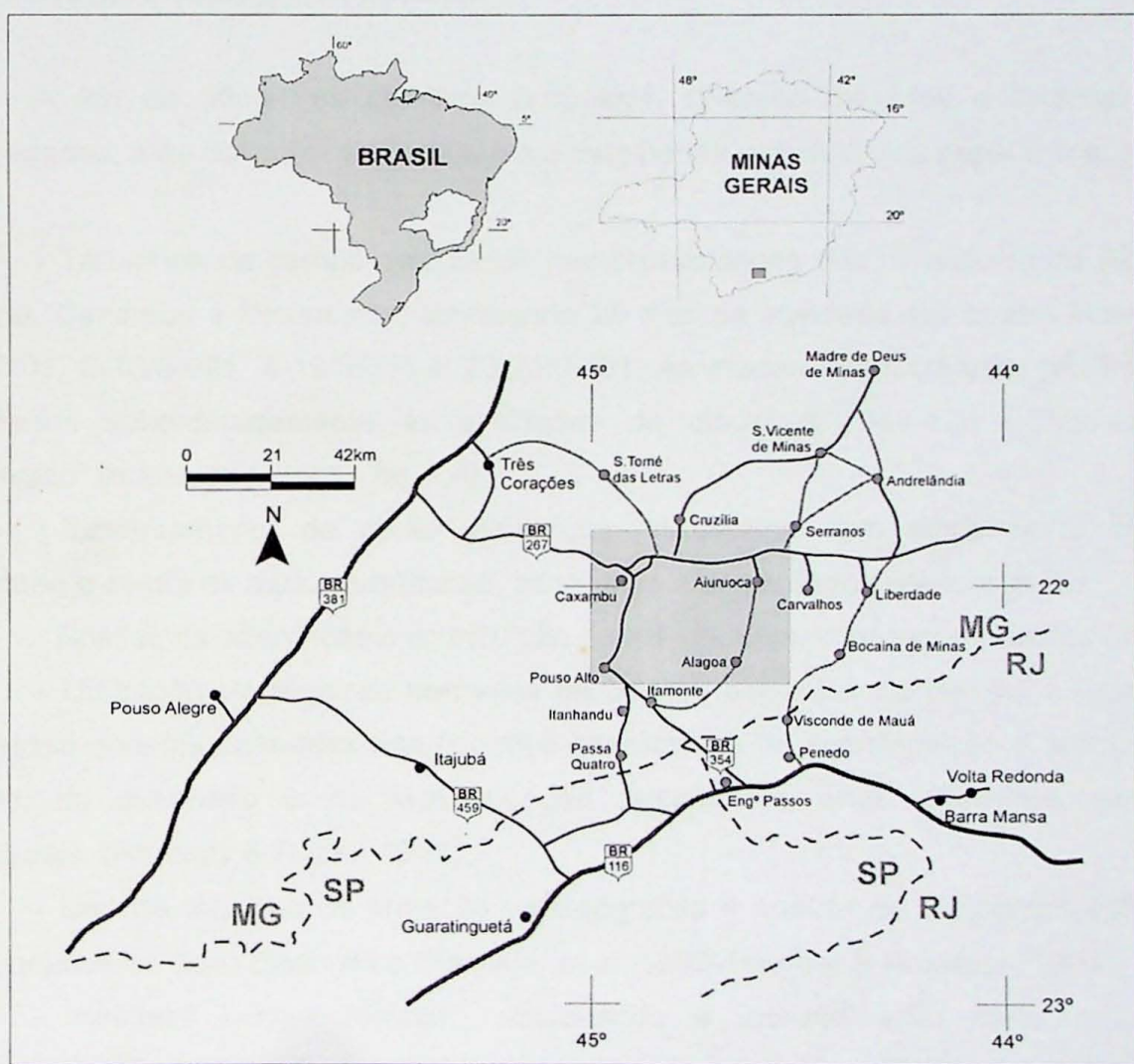


Fig. 1.3 - Localização e principais vias de acesso da área de estudo



### 1.3 – Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo a análise estrutural, da escala de perfis geológicos à lâmina delgada, visando o estabelecimento da hierarquia, geometria, cinemática e trajetória crustal das estruturas relacionadas à extrusão de unidades metamórficas de alta pressão e de unidades contíguas sob intensa descompressão sincinemática. O objeto de estudo é a retaguarda da Nappe Aiuruoca-Andrelândia.

### 1.4 - Metodologia de trabalho

A fim de atingir os objetivos propostos, diversos métodos e técnicas foram empregados, aqui descritos sucintamente e detalhados nos capítulos específicos:

- Trabalhos de campo, realizados nas proximidades dos municípios de Aiuruoca, Alagoa, Caxambu e Pouso Alto, totalizando 29 dias de atividade em quatro etapas: 18-22/03/01, 6-13/04/01, 5-19/07/01 e 23-26/09/01. As etapas intermediárias (abril e julho) ocorreram subordinadamente às atividades da disciplina "044-420 – Mapeamento Geológico" (mapa de pontos - fig. 1.4);

- Levantamento de perfis geológicos de detalhe com amostragem litológica orientada e coleta de dados estruturais, integrando estes a dados pré-existent;

- Análise da orientação e distribuição de lineamentos, implicações neotectônicas;

- Utilização de técnicas correntes de análise estrutural de campo e laboratório, sobretudo aquelas baseadas nas relações geométricas de superposição e hierarquia no tempo, na dimensão e na recristalização metamórfica entre diferentes elementos estruturais. (Ramsay & Ruber, 1983);

- Uso de técnicas de projeção estereográfica e análise de elementos estruturais relacionados ao fluxo cinemático (Paschier et al, 1990; Hanmer & Paschier, 1991);

- Análises microtectônicas, relacionando a recristalização metamórfica e a deformação (Paschier & Trouw, 1996).

- Estudo da forma do elipsóide de deformação a partir do método de Fry (Fry, 1979);



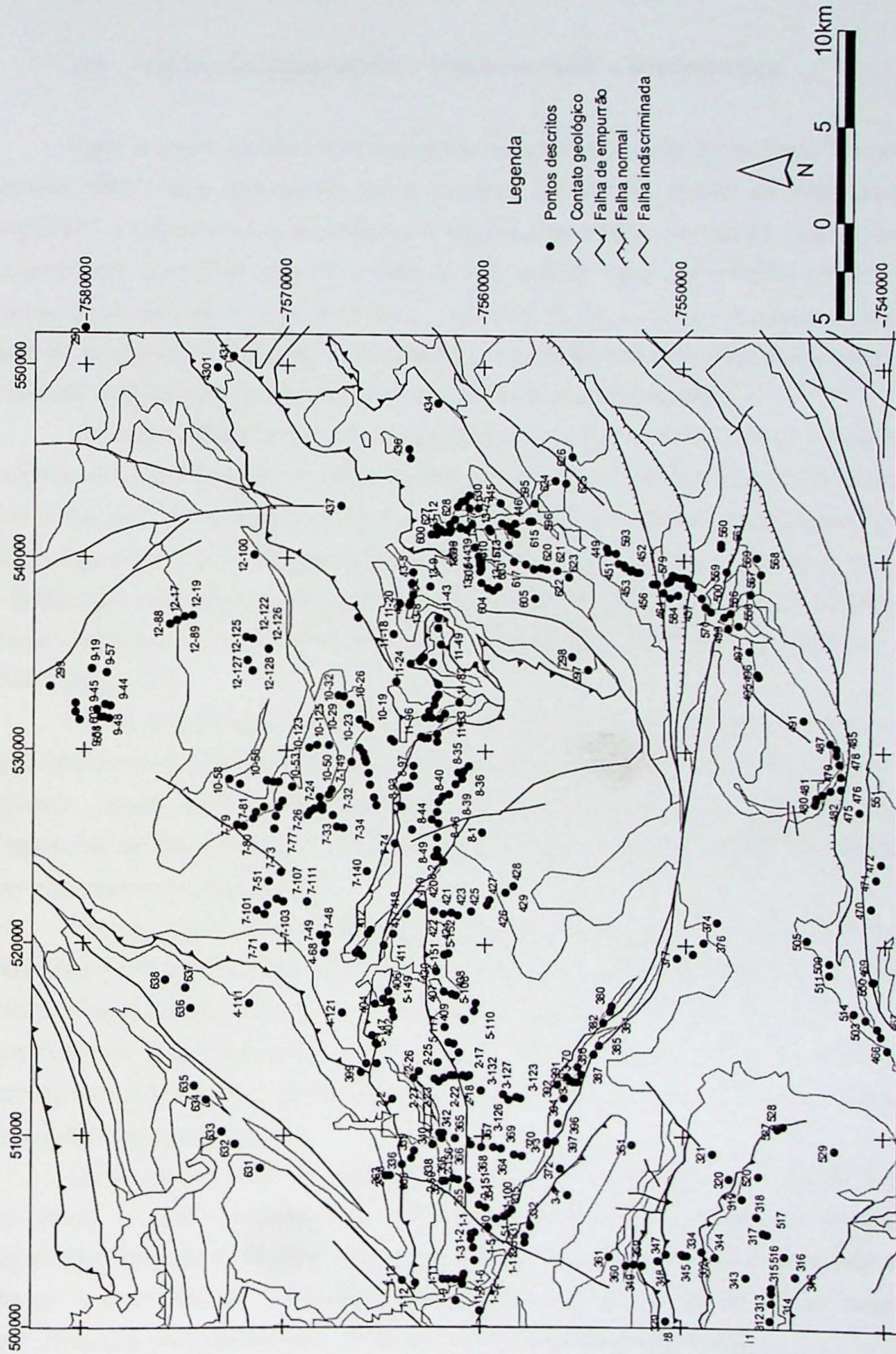


Fig. 1.4: Mapa de localização de pontos descritos



## 2 - Atividades desenvolvidas e resultados obtidos

### 2.1 - Análise de lineamentos - tectônica rúptil e neotectônica

Para a interpretação de lineamentos estruturais, o uso de modelos numéricos de terreno (MNT) teve preferência sobre imagens de satélite, devido ao fato dos satélites LANDSAT sobrevoarem o território brasileiro durante a parte da manhã, quando o sol está posicionado aproximadamente a NE, o que produz uma diminuição considerável na visualização das estruturas de direção nordeste. Com o uso de modelos numéricos de terreno, é possível configurar a orientação e inclinação do iluminante da cena, criando-se imagens impossíveis de se obter com as órbitas dos atuais satélites.

Os mapas digitalizados da região de estudo foram obtidos junto a CPRM, à qual os autores são muito gratos. Os dados foram pré-tratados em programas como *MapInfo*, *PCI Geomatics* e *ENVI*, sendo este último o utilizado para a produção dos modelos finais, com os ajustes de cor e iluminação. Utilizando-se dois MNTs, um com iluminante posicionado a N45E, outro a N45W e ambos com inclinação de 40° (figs. 2.1a e 2.1b), os lineamentos foram digitalizados diretamente na tela do computador, dentro do ambiente do *ArcView GIS 3.2a* (fig. 2.2).

As propriedades dos lineamentos (azimute, comprimento) foram obtidas automaticamente com o uso de *script* para *ArcView* desenvolvido por Zhou Guoyun (Univ. Kyushu, Japão) e os dados tratados no programa *GEOrient 8.0* (Holcombe, 2001). Diagramas de rosácea foram então gerados, utilizando-se a somatória dos comprimentos em intervalos azimutais de 10°.

Para a análise de orientações preferenciais, optou-se por dividir a área em quatro domínios morfológicos informais: *Planalto de Aiuruoca*, *Serra do Aiuruoca*, *Mantiqueira e Itatiaia-Passa Quatro* (fig. 2.3a). Esta divisão baseia-se no fato da área em questão encontrar-se tectonicamente ativa (Santos, 1999). Desse modo, a identificação de estruturas ligadas a movimentações recentes contribui para uma avaliação mais criteriosa do quadro estrutural regional.

Como item auxiliar no traçado dos domínios, foi gerado um mapa de rugosidade do relevo, a partir de malha de amostragem com celas quadráticas de 2x2 km. A rugosidade foi calculada para cada cela a partir da relação entre a área real e a área planar. Assim, valores próximos à unidade representam áreas de relevo muito plano, enquanto que valores maiores, áreas de relevo acidentado (fig. 2.3b).



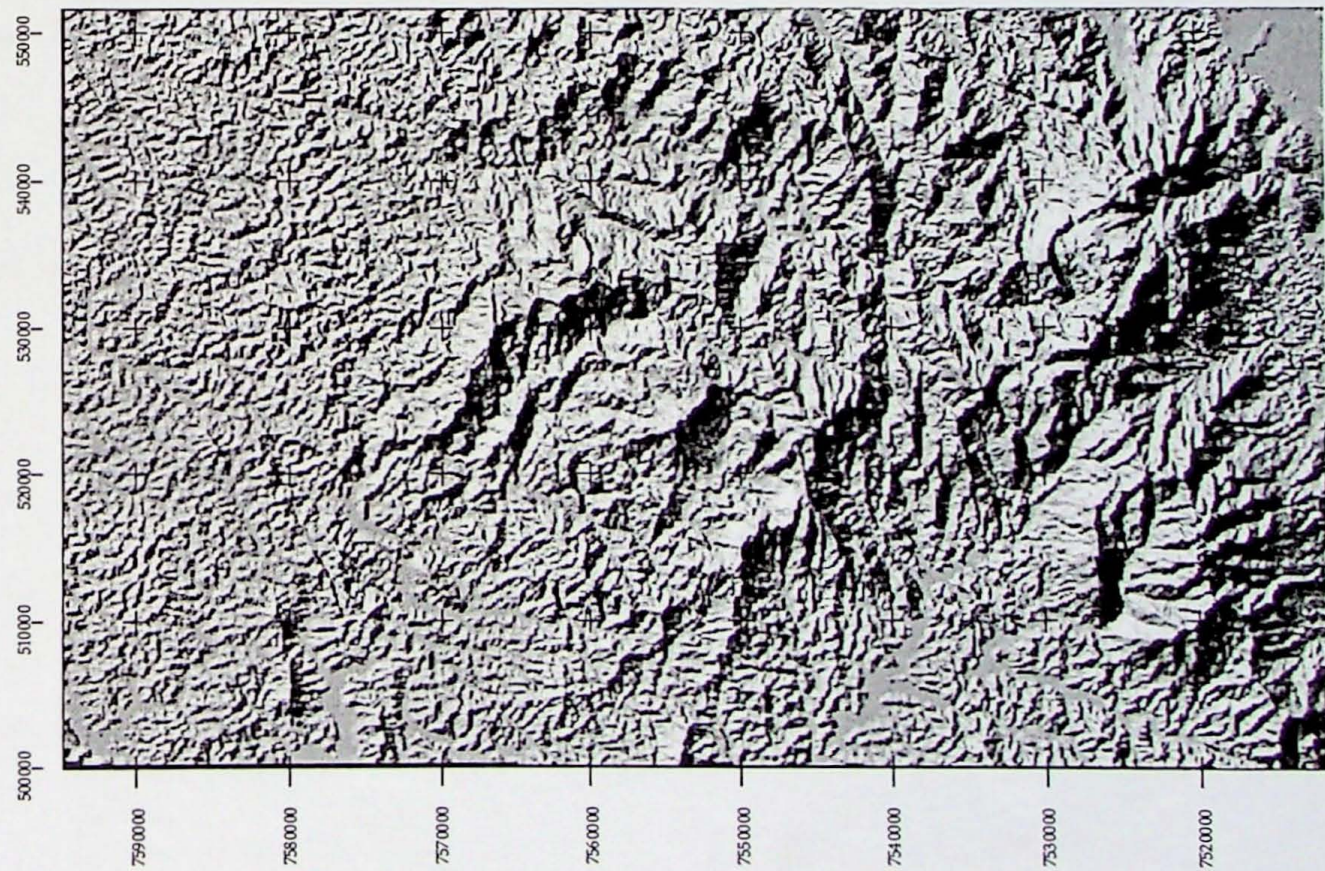


Fig. 2.1a - Modelo numérico de terreno com iluminante situado a N45E, inclinação de 40°

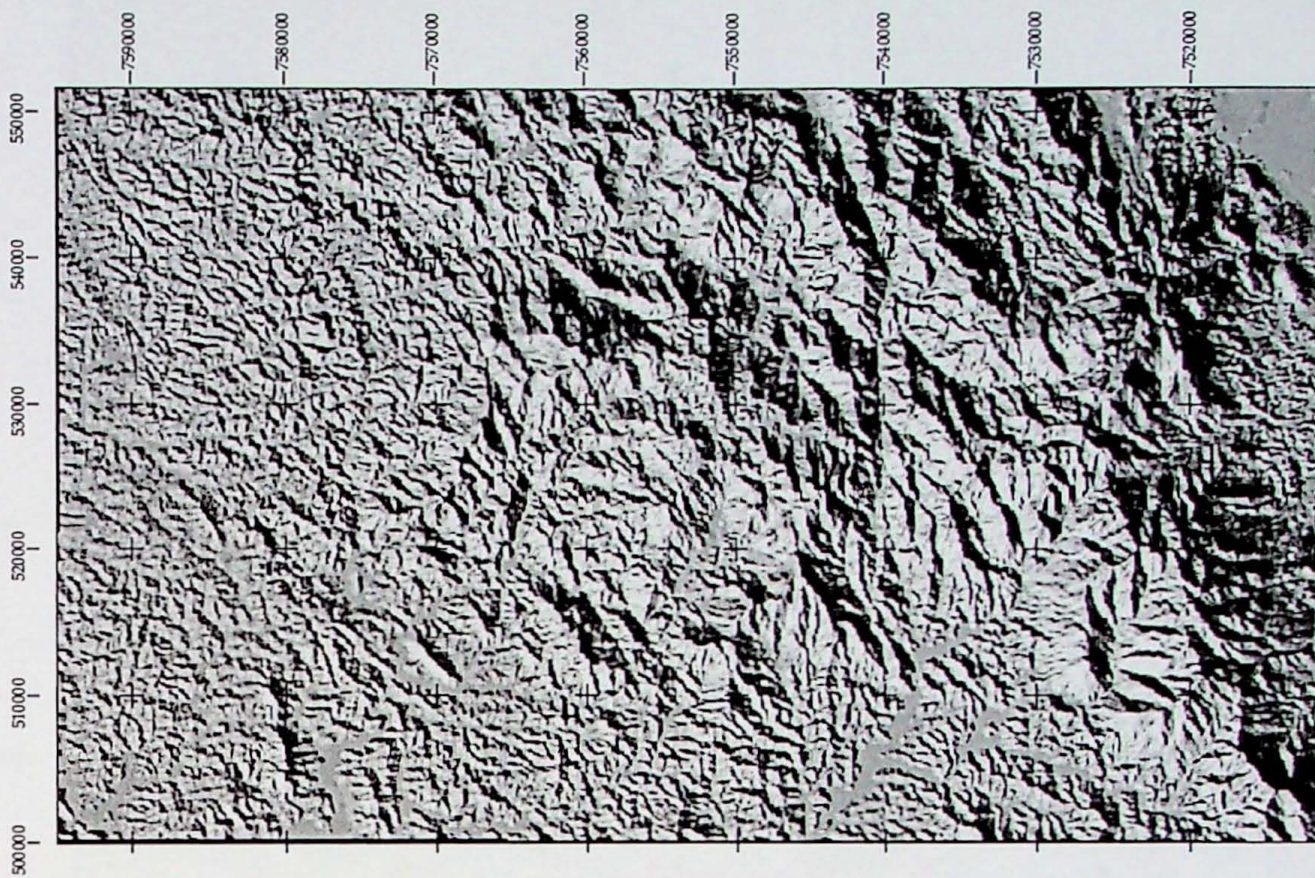


Fig. 2.1b - Modelo numérico de terreno com iluminante situado a N45W, inclinação de 40°



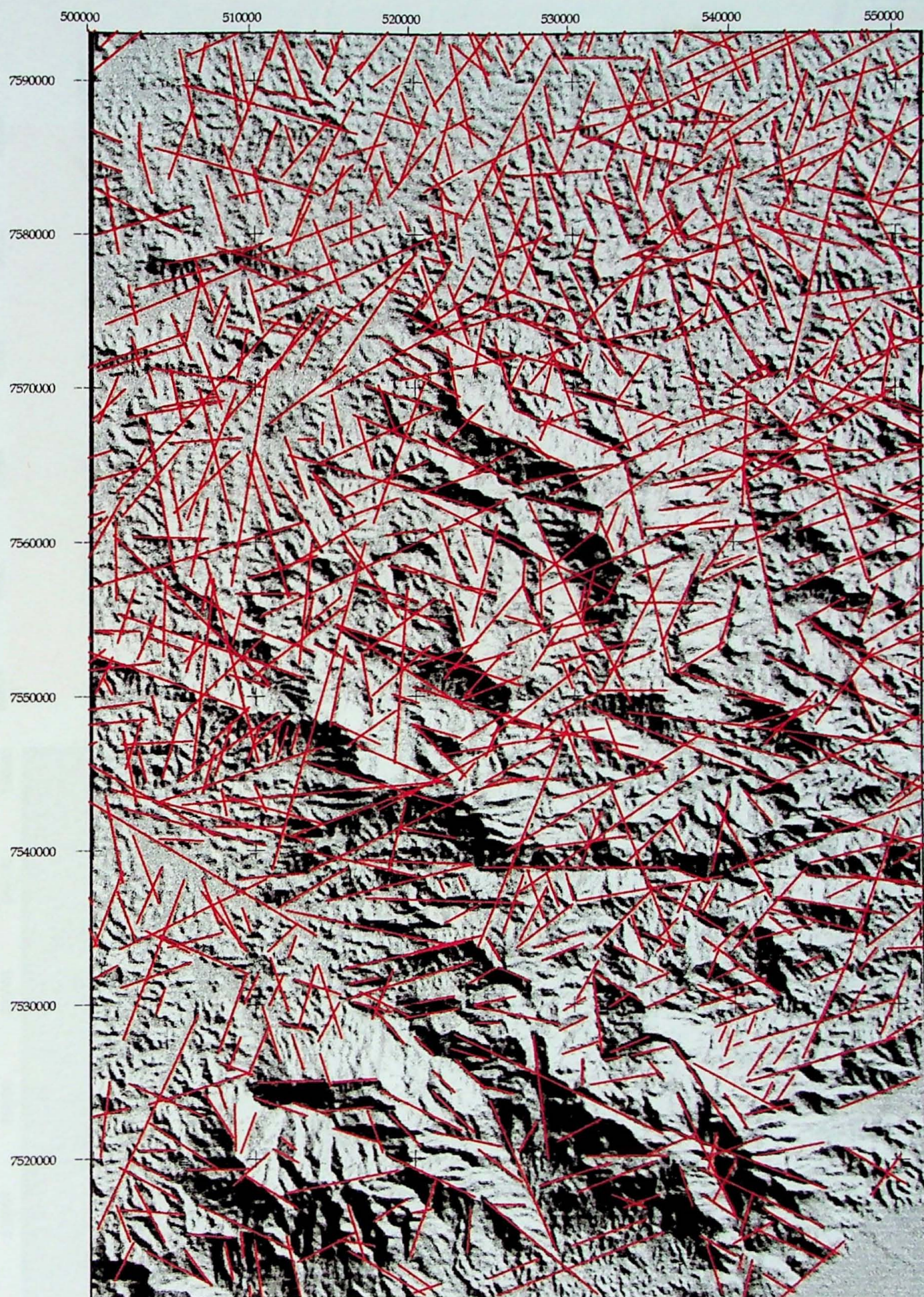


Fig. 2.2 - Lineamentos interpretados para a área de estudo.



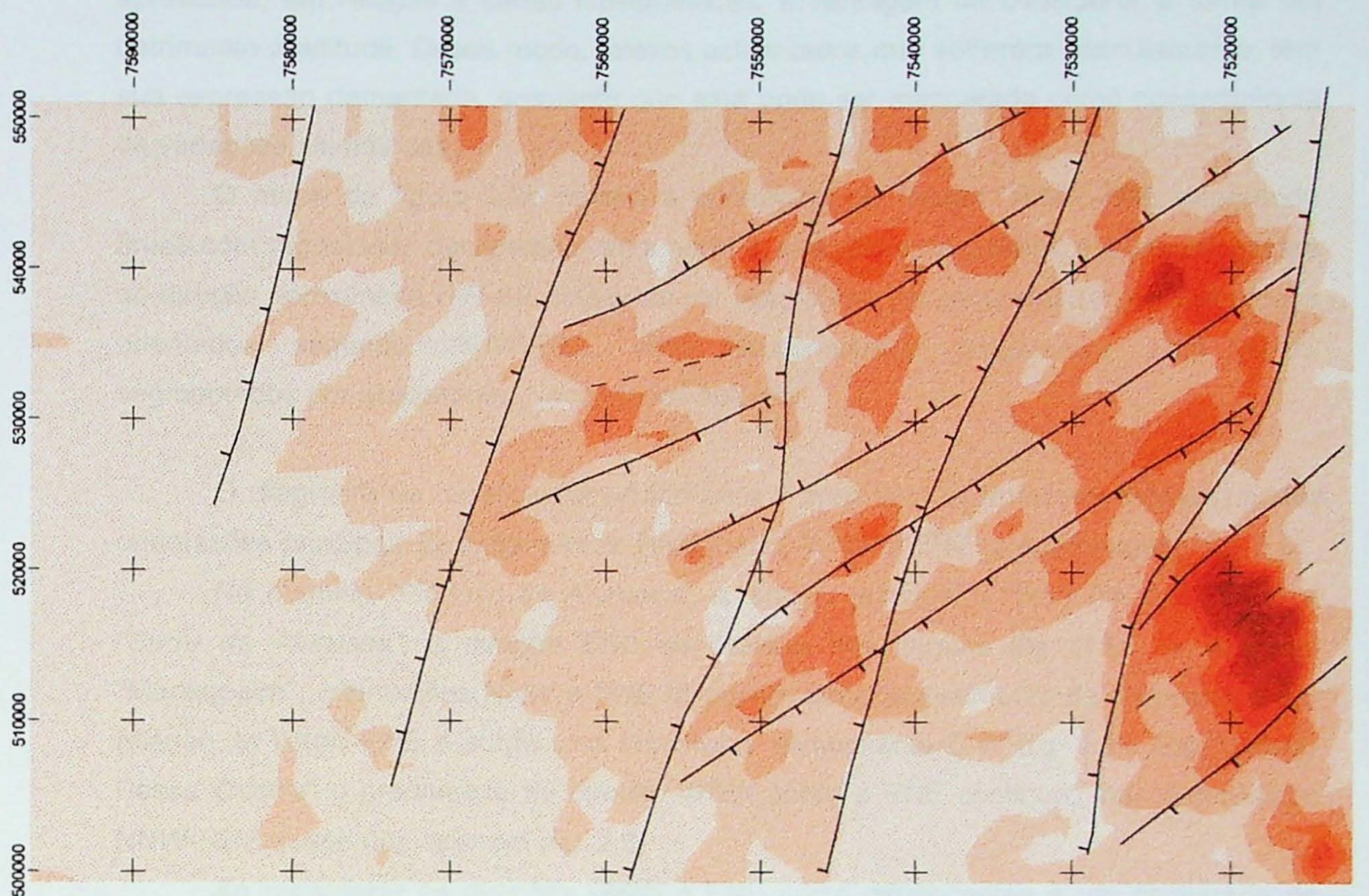


Fig. 2.3b - Mapa de rugosidade de relevo

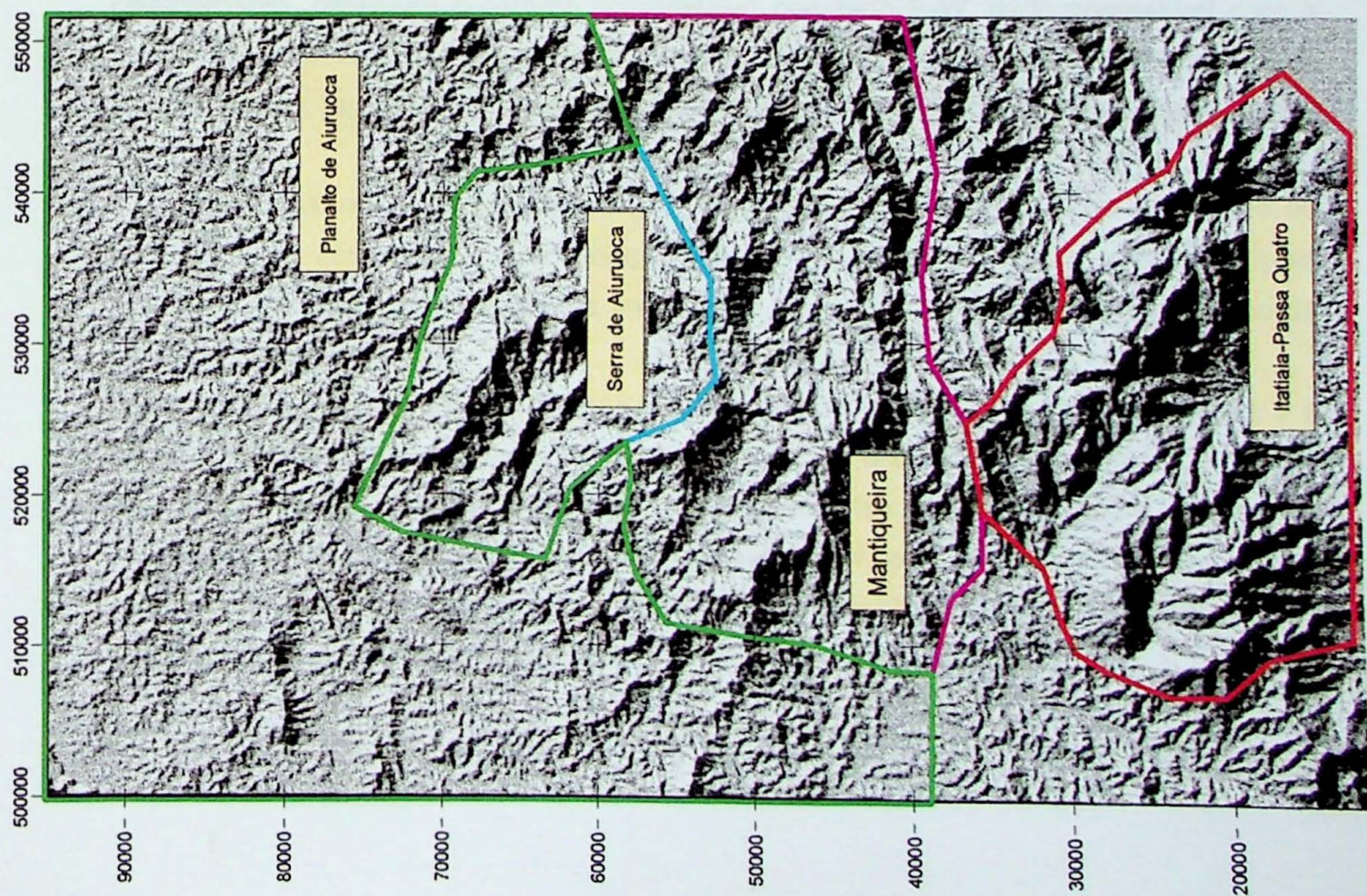


Fig. 2.3a - Domínios morfológicos informais utilizados para a análise de orientação de lineamentos



A rugosidade de relevo foi utilizada para a compartimentação morfológica, por apresentar, em relação a cartas hipsométricas, a vantagem de considerar a forma em detrimento à altitude. Desse modo, relevos acidentados que sofreram basculamento, têm sua expressão demarcada, enquanto que esta pode ser mascarada como consequência de variações altimétricas.

O mapa da figura 2.3b mostra a ocorrência de "faixas" WNW-ESE separando áreas com rugosidade decrescente para norte e, internamente a estas, formas alongadas de direção aproximada NW-SE. Isto pode ser visto como um esquema de grandes blocos orientados segundo WNW-ESE, com escalonamento progressivo para norte, segmentados por abatimentos secundários NW-SE.

O diagrama de rosácea construído para a área total interpretada destaca quatro orientações principais de lineamentos: NNE, NNW, WNW e ENE (predominante) (fig. 2.4).

No domínio "Planalto de Aiuruoca", a direção principal é NNW (fig. 2.5). Para a "Serra de Aiuruoca", a direção ENE se destaca das demais (fig. 2.6). No domínio "Mantiqueira", orientações NNW e NNE diminuem consideravelmente de intensidade em relação às WNW-ENE e surge uma importante componente E-W (fig. 2.7). Em "Itatiaia-Passa Quatro" o predomínio da direção WNW sobre a ENE continua, mas orientações NNW-NNE quase não ocorrem (fig. 2.8).

Ao considerar as direções WNW e ENE como pertencentes a um conjugado de cisalhamento, obtém-se o esforço compressivo orientado E-W, dado compatível com a direção de  $Sh_{max}$  (esforço horizontal máximo) determinada por Riccomini & Assumpção (1999) para a região do Cinturão Ribeira através da análise de populações de falhas quaternárias.

Analogamente, as direções NNE e NNW podem representar outro conjugado de cisalhamento, este com esforço compressivo N-S. A expressão deste sistema é mais marcante nas áreas de relevo mais arrasado, e deve estar relacionada a um regime de esforços mais antigos.

O fato de lineamentos WNW-ENE afetarem as intrusões alcalinas cretáceas e a relação entre a maior ocorrência desta orientação com áreas de relevo mais acidentado, pode ser vista como reflexo de atividade neotectônica, ou de tectônica mesozóica, atuando na configuração do relevo. A compressão E-W seria responsável pelos grandes escalonamentos com abatimento para norte, e a reativação das estruturas NNE e NNW ocasionaria uma configuração do relevo semelhante a um sistema de *horsts*.



Estas observações concordam com o exposto por Santos (1999), que compartimenta a área da Bacia do Rio Aiuruoca em blocos E-W segmentados por falhas NE, estes blocos fragmentados por lineamentos NNW-NNE. A tectônica ressurgente da região seria responsável pela reativação cenozóica de grandes zonas transcorrentes e pelo alinhamento E-W / NE dos principais desnivelamentos altimétricos.

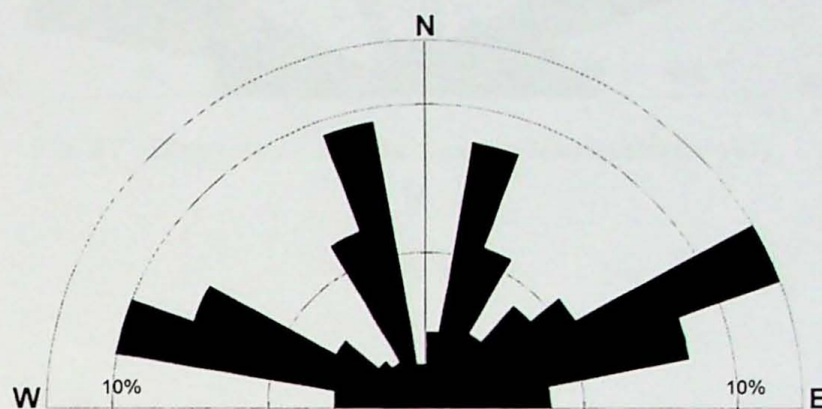


Fig. 2.4 - Diagrama de rosácea. Todos os lineamentos (n=846)

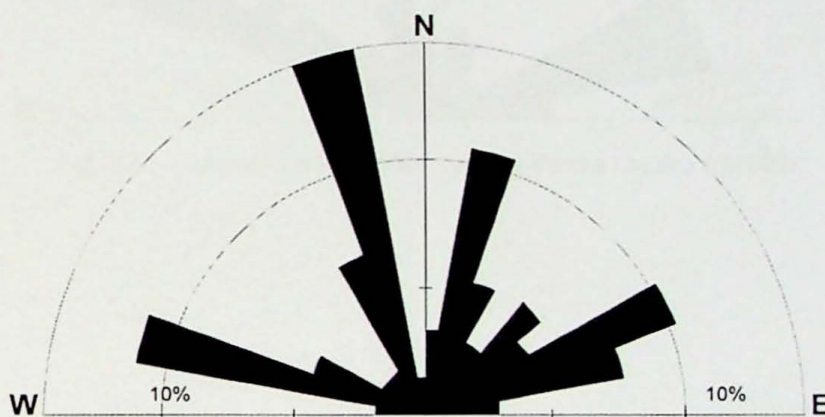


Fig. 2.5 - Diagrama de rosácea. Planalto de Aiuruoca (n=451)

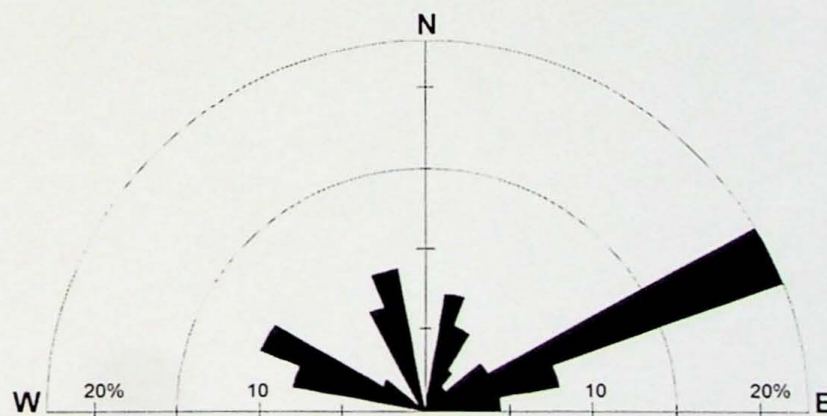


Fig. 2.6 - Diagrama de rosácea. Serra de Aiuruoca (n=106)



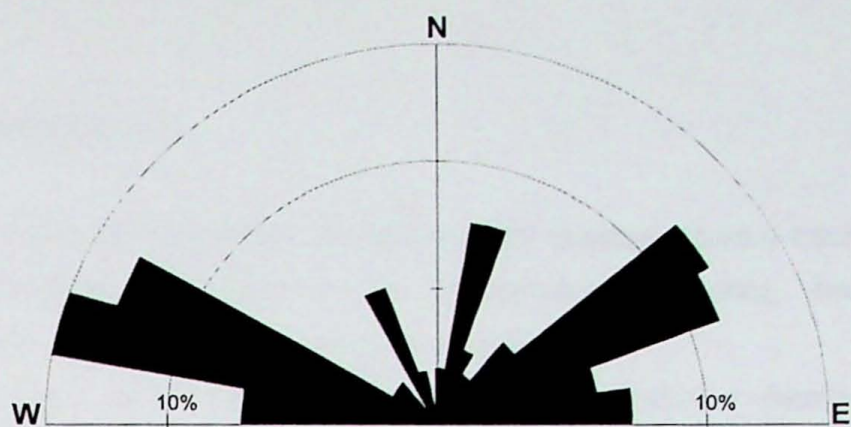


Fig. 2.7 - Diagrama de rosácea. Domínio Mantiqueira (n=157)

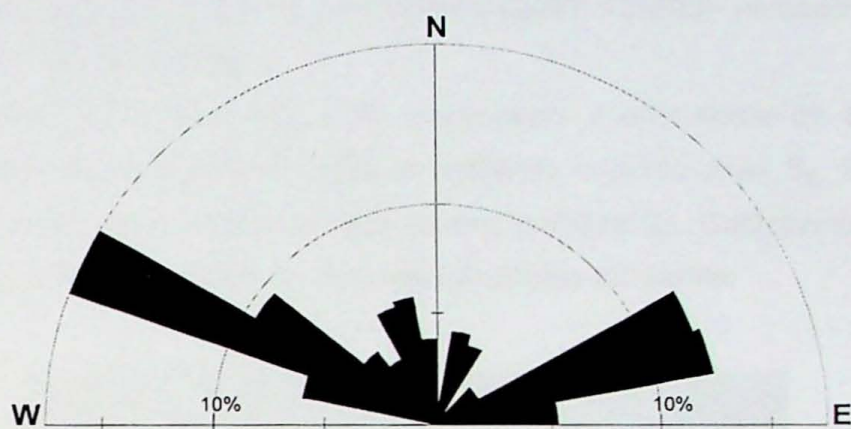


Fig. 2.8 - Diagrama de rosácea. Itatiaia-Passa Quatro (n=120)



## 2.2 - Microtectônica

O estudo petrográfico de lâminas delgadas foi realizado com o intuito principal de relacionar a recristalização metamórfica à estrutura presente, bem como da caracterização dos indicadores cinemáticos existentes.

As estruturas selecionadas para ilustrar este trabalho foram fotografadas digitalmente no Laboratório de Petrografia Sedimentar (LabPetro) do IGc-USP (FAPESP 1997/10669-0), em lupa ZEISS SV-11 com câmera SONY XC-003P acoplada a analizador de imagens LEICA QWIN 550 IW.

Na amostra NESG-373a (fig. 2.9), observa-se a ocorrência de biotitas sin- $S_1$  dobradas e biotitas de crescimento estático definindo o plano axial  $S_2$ . Silimanita, em seção basal, encontra-se paralela ao eixo da micro-dobra  $D_2$ . Caracteriza-se assim, a foliação regional  $S_2$  sob condições de estabilidade biotita-silimanita.

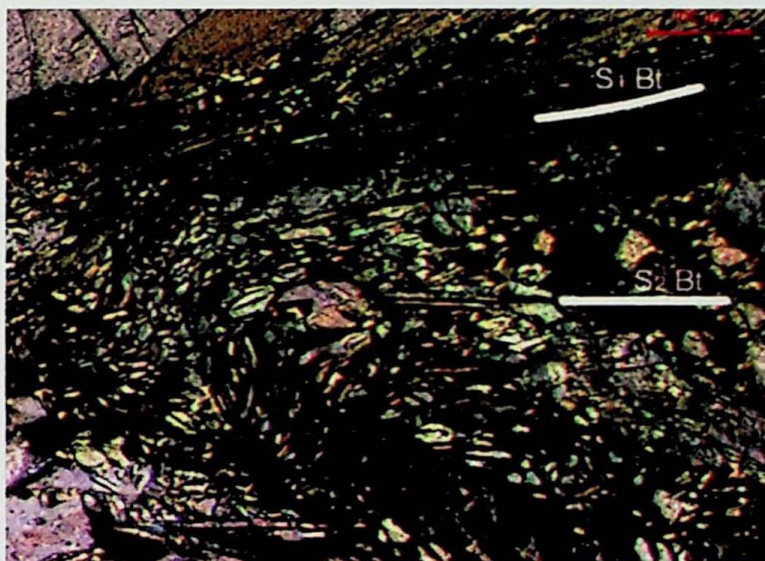


Fig. 2.9 - Arcos poligonais em micas definindo a foliação  $S_2$ . Amostra NESG-373a

A amostra NESG-556, intercalação de rocha básica em biotita gnaiss milonítico afetado pela Zona de Cisalhamento Liberdade, a sul de Alagoa, possui estrutura do tipo S-C para transporte dúctil normal com abatimento do bloco norte (fig. 2.10). O caráter normal desta zona de cisalhamento é responsável pela descompressão do bloco dos Migmatitos Alagoa e favorece a extrusão dos metassedimentos a norte.



O granada-biotita-plagioclásio gnaiss do ponto NESG-574 possui foliação anastomosada com sigmóides indicando transporte de topo para SSW (fig. 2.11), contrário à movimentação compressiva geral da Nappe Aiuruoca-Andrelândia, para NE.

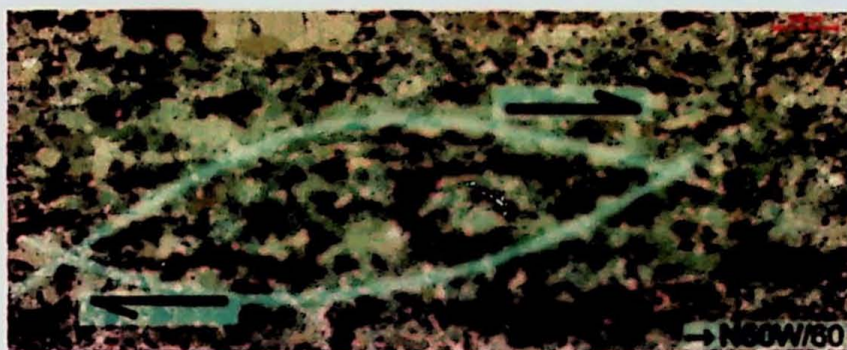


Fig. 2.10 - Estrutura do tipo S-C para movimentação normal dúctil. Amostra NESG-556

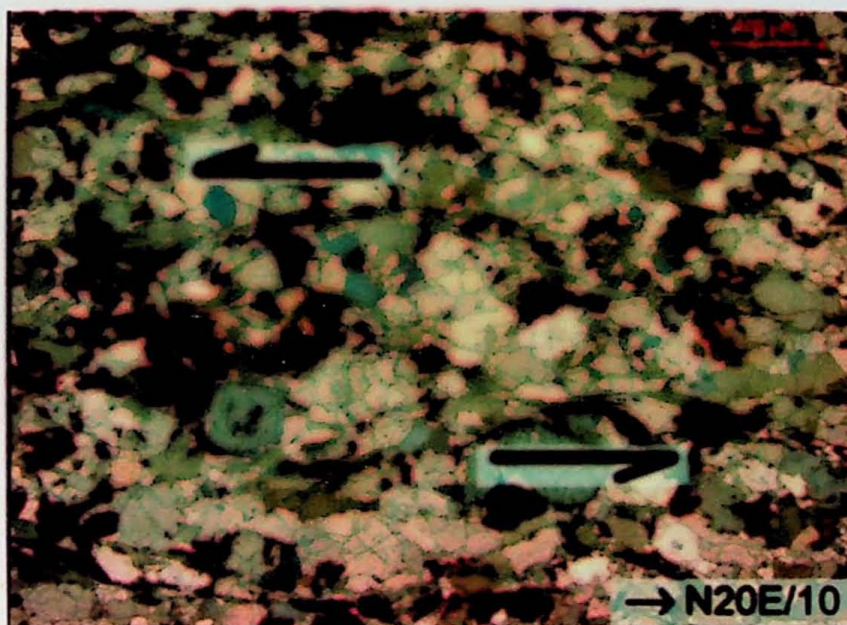


Fig. 2.11 - Sigmóide da foliação indicando transporte de topo para SSW. Amostra NESG-574a



A ação do processo **extensional** sin-metamórfico é observada na amostra NESG-584, com foliação em padrão S-C (fig. 2.12) e sigmóide de silimanita fibrosa (porção inferior direita da imagem) para movimentação em falha normal.

A alternância sin-metamórfica de regimes compressivos com regimes em extensão possibilitou uma anatexia sin-cinemática acompanhada da geração tardia de leucogranitos. Estes, injetaram-se em zonas de alívio de pressão na forma de soleiras, e exibem indicadores cinemáticos para movimentações reversas, como pode ser visto na figura 2.13, amostra NESG-595. Nesta mesma imagem, pode-se notar a forma poligonal do quartzo, evidenciando **crescimento estático deste mineral**.



Fig. 2.12 - Foliação S-C e sigmóide de silimanita em falha normal. Amostra NESG-584

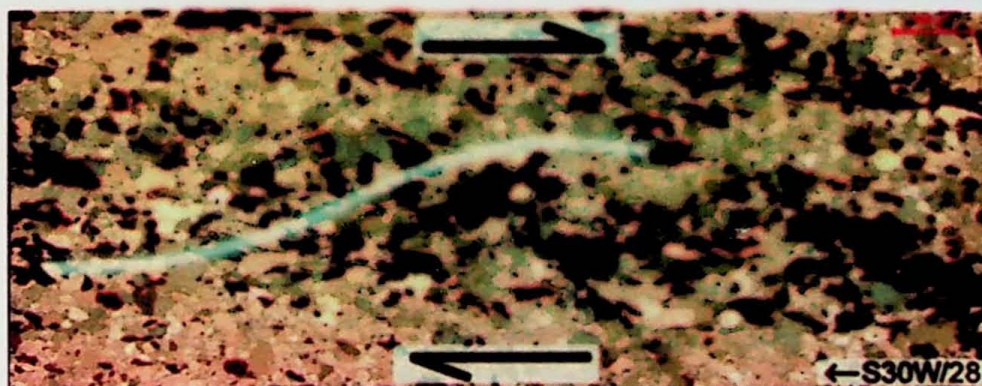


Fig. 2.13 - Indicadores cinemáticos para movimentação reversa. Amostra NESG-595

Na amostra NESG-600c, além da presença de pares S-C na foliação, evidenciando movimentação normal, observa-se uma banda extensional (*shear band*) com recristalização de quartzo poligonal (fig. 2.14).



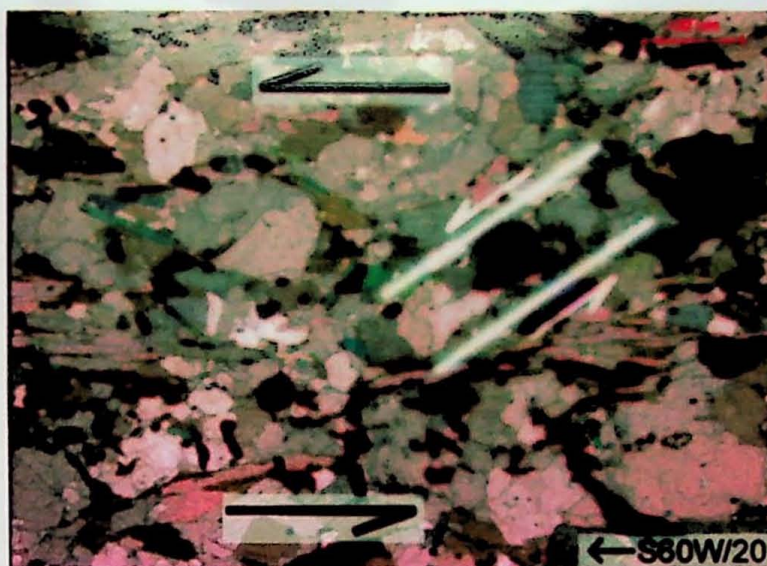


Fig. 2.14 - Banda extensional com recristalização de quartzo. Amostra NESG-600c

A análise de lâminas delgadas possibilitou a identificação e caracterização de indicadores cinemáticos relacionados a transporte em sentidos opostos da placa superior durante o metamorfismo responsável pela foliação  $S_2$ . Transportes para NE relacionam-se ao cisalhamento dúctil que precedeu os grandes cavalgamentos, enquanto que aqueles para S-SW relacionam-se às alternâncias dos regimes deformacionais em extensão, com estiramento da nappe e geração de um campo em dilatação na retaguarda da estrutura.



## 2.3 - Estudo do elipsóide de deformação

A redistribuição espacial de partículas em materiais deformados pode ser utilizada para calcular a forma e orientação do elipsóide de deformação, se for possível reconhecer os centros das partículas. Um material que contenha partículas dispostas de maneira completamente aleatória (chamada de distribuição *Poisson*), possui espaços vazios e concentrações de partículas também aleatórias. Se este material for deformado, a redistribuição 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 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 de linhas unindo estes centros.

Entretanto, este método se baseia na premissa de que não haja ambiguidade 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 do método 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, conseqüentemente o grau de confiabilidade na análise efetuada.

O método de Fry é executado graficamente: 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 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) circundados por faixas com altas concentrações de pontos. 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 tamanhos diferentes, a resposta à 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 proposto por Ramsay (1967).

Foram realizados cortes XZ (normal à foliação e paralelo à lineação) e YZ (normal à foliação e à lineação) de quatro amostras orientadas selecionadas de acordo com a litologia e mineralogia. Com os cortes prontos, os centros dos porfiroclastos (principalmente quartzo) foram desenhados em câmera-clara e posteriormente digitalizados para cálculo através do programa de computador *GeoFry Plots 3.0* (Holcombe, 1999). Os valores calculados para as direções dos principais eixos de deformação e das elipsidades foram inseridos no programa *Strain Calculator* (Holcombe, 2000) para 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 elipsóides oblatos e definem o campo do achatamento aparente; para  $k=0$ , tem-se o achatamento uniaxial e valores  $1 < k < \infty$  estão relacionados a elipsóides prolatos, no campo da constricção aparente. O parâmetro  $d$ , nos diz a distância do ponto à origem (1,1) e pode estar diretamente relacionado 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 os planos principais de deformação, e pontos com valor  $k$  constante no diagrama 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
NESG 553	1	1,5	1,5	0	0,176091	0	1,295695
NESG 567	1,19	1,69	1,42	0,075547	0,152288	1,914386	1,254284
NESG 597	1,65	2,81	1,7	0,217484	0,230449	1,207775	1,097515
CXA-IX-46	1,77	2,81	1,58	0,247973	0,198657	0,479809	1,098952

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

A seguir, apresenta-se uma breve descrição das amostras utilizadas e os gráficos gerados pelo método de Fry.

#### Amostra NESG-553

Muscovita-quartzito a granada, foliado, com intercalações de material fino alterado e de leucogranito foliado. Ocorrem, em escala de afloramento, indicadores cinemáticos definidos pela truncatura da foliação para movimentação normal de topo para NE.  $S_2$ :N14W/55NE,  $L_{ms}$ :N60E/38.

Nesta amostra, foram demarcados 110 centros de grão para o corte XZ e 100 centros no corte YZ. As razões axiais do dois cortes são as mesmas, e o elipsóide calculado tem forma oblata, dentro do campo do achatamento uniaxial.



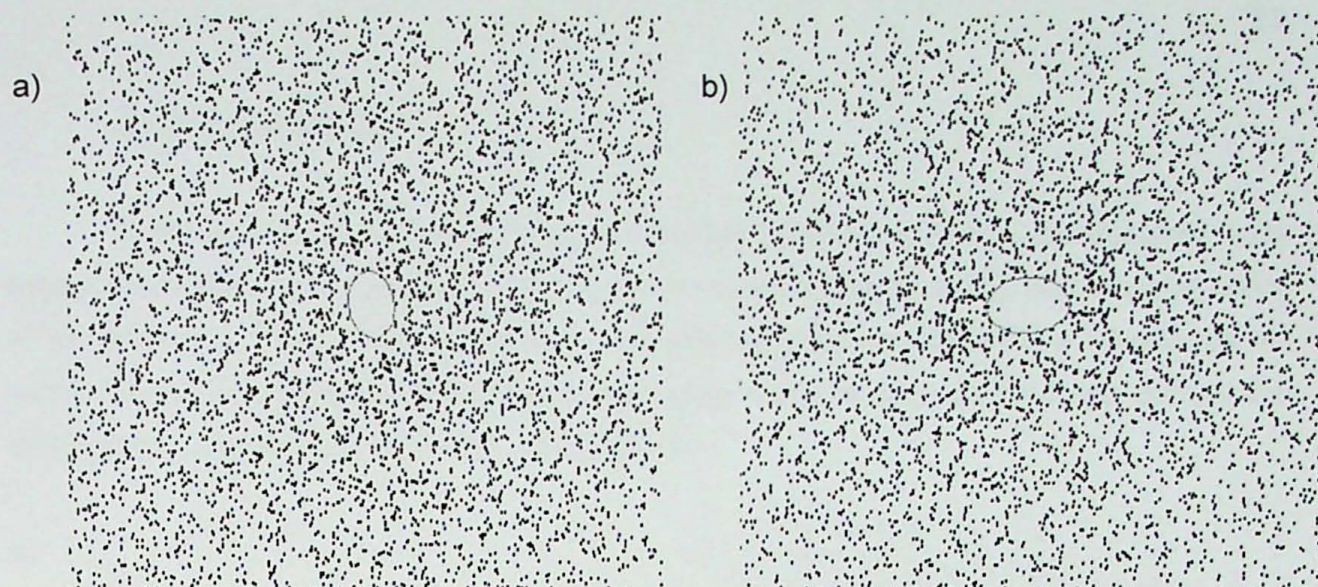


Fig. 2.15 - Método de Fry. Amostra NESG 553. a) corte XZ, b) corte YZ

### Amostra NESG-567

Granada-biotita gnaiss milonítico localizado a sul da Zona de Cisalhamento Liberdade, próximo a Alagoa. Foram marcados 119 centros de grão no corte XZ e 120 centros no corte YZ. O elipsóide é oblato, dentro do campo do achatamento aparente.  $S_2$ :N86E/60NW,  $L_{bio}$ :N20E/52.

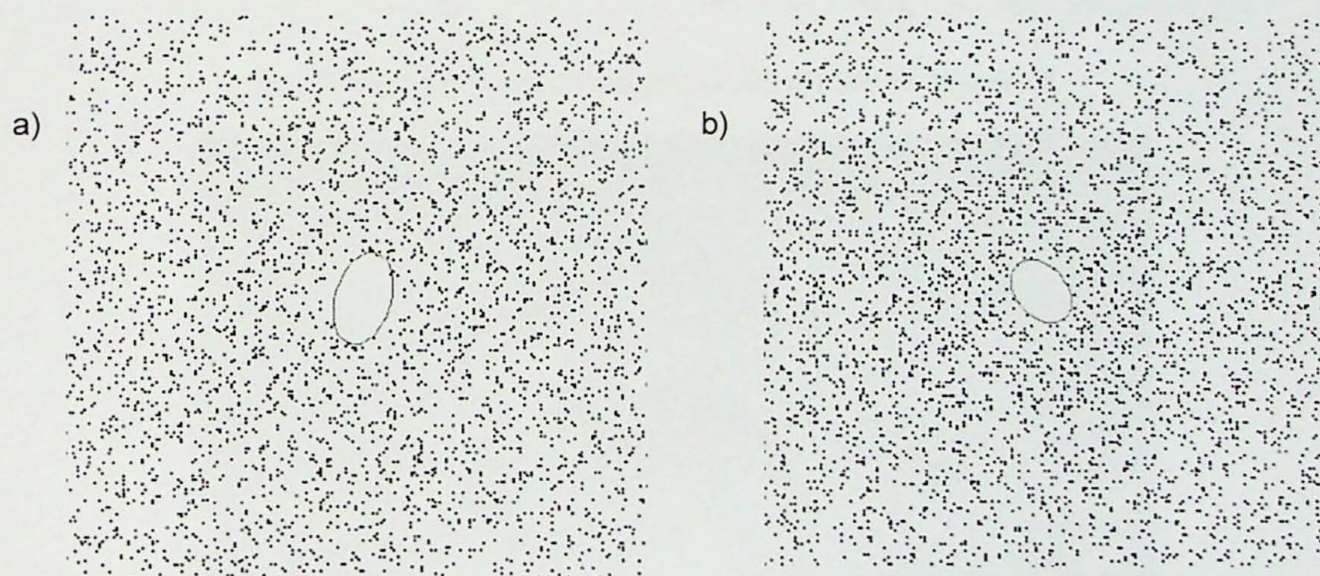


Fig. 2.16 - Método de Fry. Amostra NESG 567. a) corte XZ, b) corte YZ



Amostra NESG-597

Trata-se de uma extensa lage de biotita-muscovita-granada leucogranito com foliação incipiente e xenólitos de migmatitos sin-cinemáticos (fig.2.18), sobre a qual corre o Rio Aiuruoca. Foram determinados 53 centros de grãos no corte XZ e 72 centros no corte YZ. O elipsóide encontra-se praticamente sobre a reta de  $K=1$ , no campo da deformação plana.  $S_n$ : N35E/55SE,  $L_m$ : S10E/12.

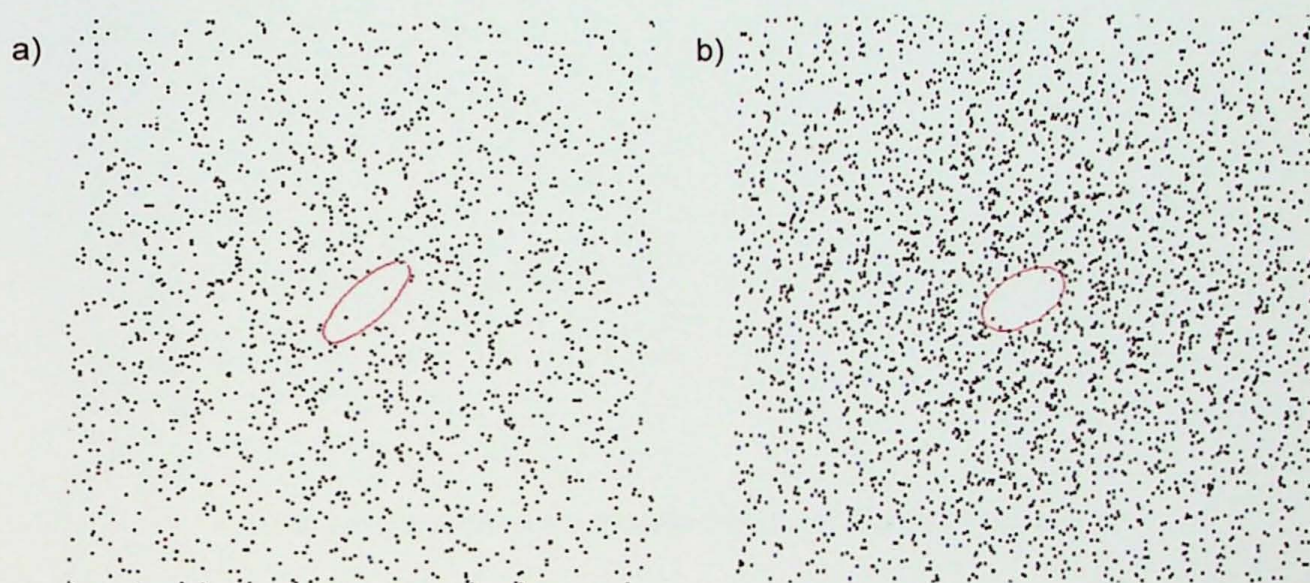


Fig. 2.17 - Método de Fry. Amostra NESG 597. a) corte XZ, b) corte YZ

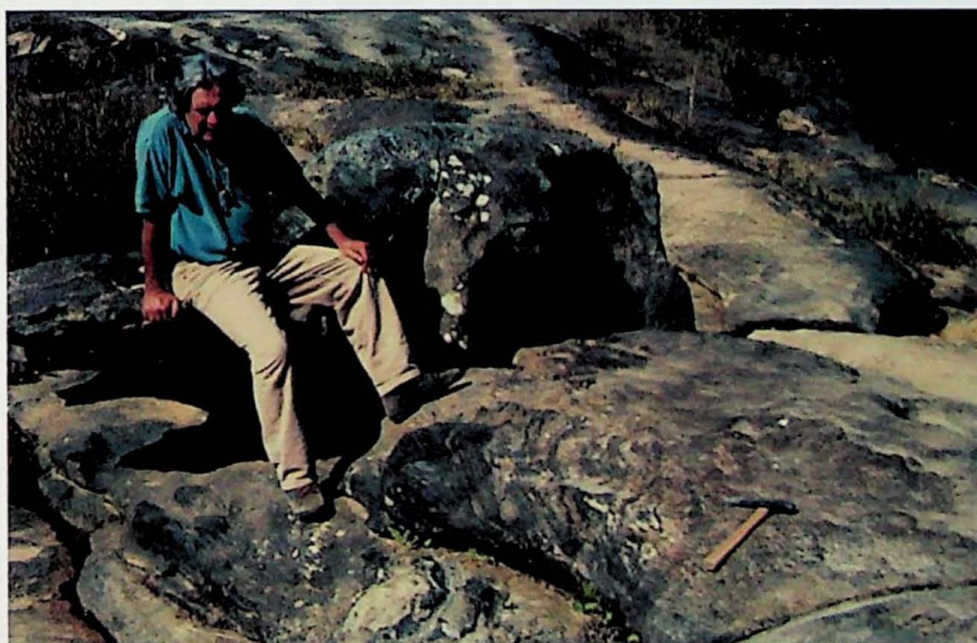


Fig. 2.18 - Xenólito de migmatito em leucogranito. Ponto NESG-597



Amostra CXA-IX-46

Afloramento localizado no alto do Morro do Pinhal, próximo ao bairro homônimo, compõe-se de quartzito de granulação média, bem recristalizados, com pouca mica. O elipsóide encontra-se próximo da reta de  $K=1$ , porém dentro do campo da constricção aparente, com forma prolata.  $S_2$ :N60W/15NE,  $L_{qzo}$ :N47E/09.

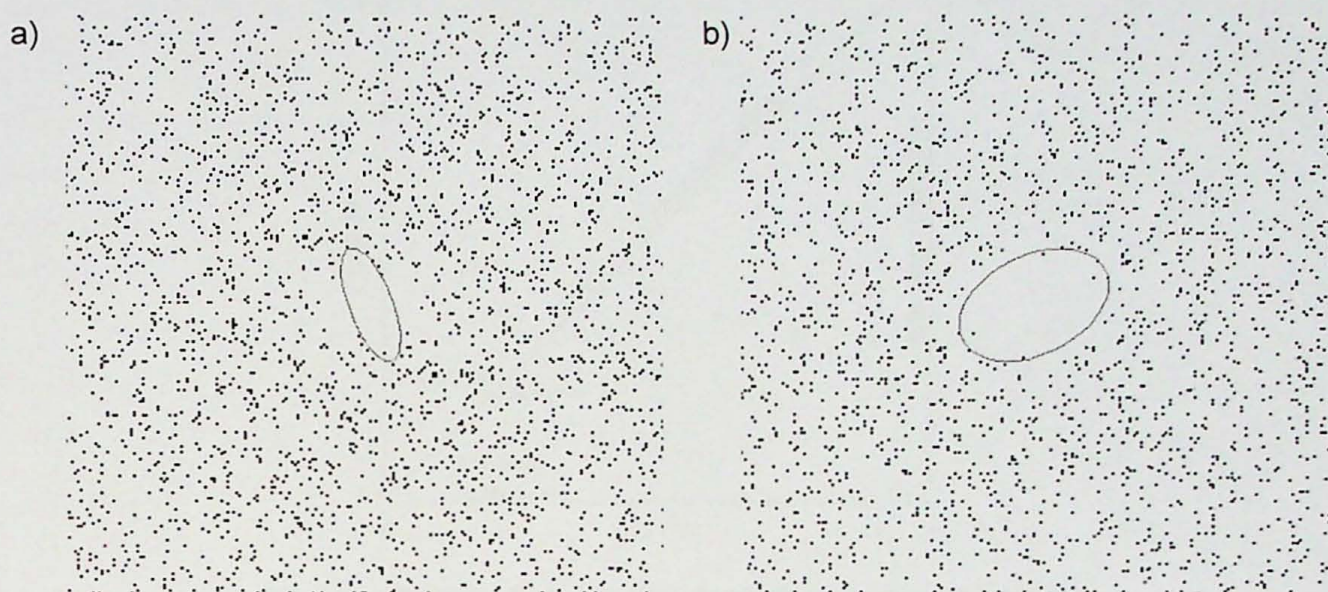


Fig. 2.19 - Método de Fry. Amostra CXA-IX-46. a) corte XZ, b) corte YZ

O diagrama logarítmico de deformação construído (fig.2.20), mostra uma tendência para formas mais prolatas, à medida que se vai de sul (NESH-553) para norte (CXA-IX-46). O parâmetro  $D$ , possivelmente ligado à taxa de deformação, é bastante similar nas amostras dentro do campo do achatamento aparente e nas encontradas próximas à região de deformação plana. Na figura 2.21, está representado o plano XY dos elipsóides determinados, de acordo a localização de cada amostra.

As amostras NESH-597 e CXA-IX-46, com elipsóides no campo da deformação plana, relacionam-se à deformações não-coaxiais (cisalhamento simples). O elipsóide obtido para a amostra CXA-IX-46 representa o transporte da Nappe Aiuruoca-Andrelândia, enquanto que o elipsóide do ponto NESH-597 foi obtido em um leucogranito tardi-cinematóico, e sua forma está ligada ao campo de esforços atuante quando ocorreu o relaxamento da estrutura, e consequente alívio de pressão, permitindo a injeção do granito de sul para norte.



Com elipsóides no campo do achatamento aparente, as amostras NESG-553 e NESG-567 são associadas à deformação coaxial (cisalhamento puro) e trazem, em sua forma, indicações de um regime compressivo pós-migmatítico.

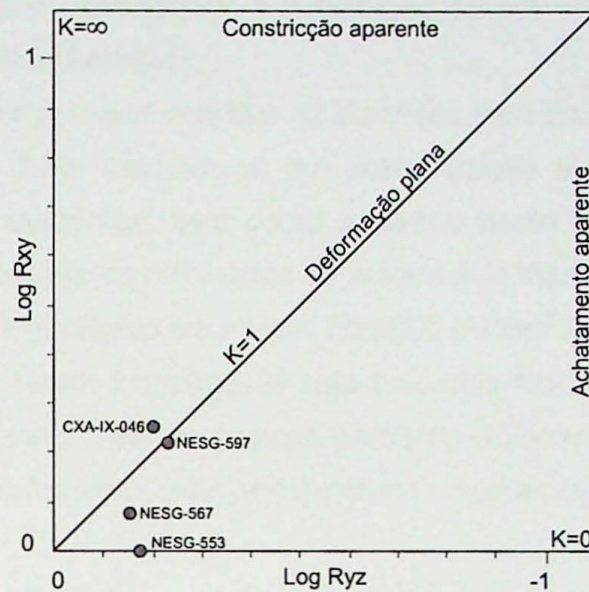


Fig. 2.20 - Diagrama logarítmico de deformação (Ramsay, 1967, 1983)

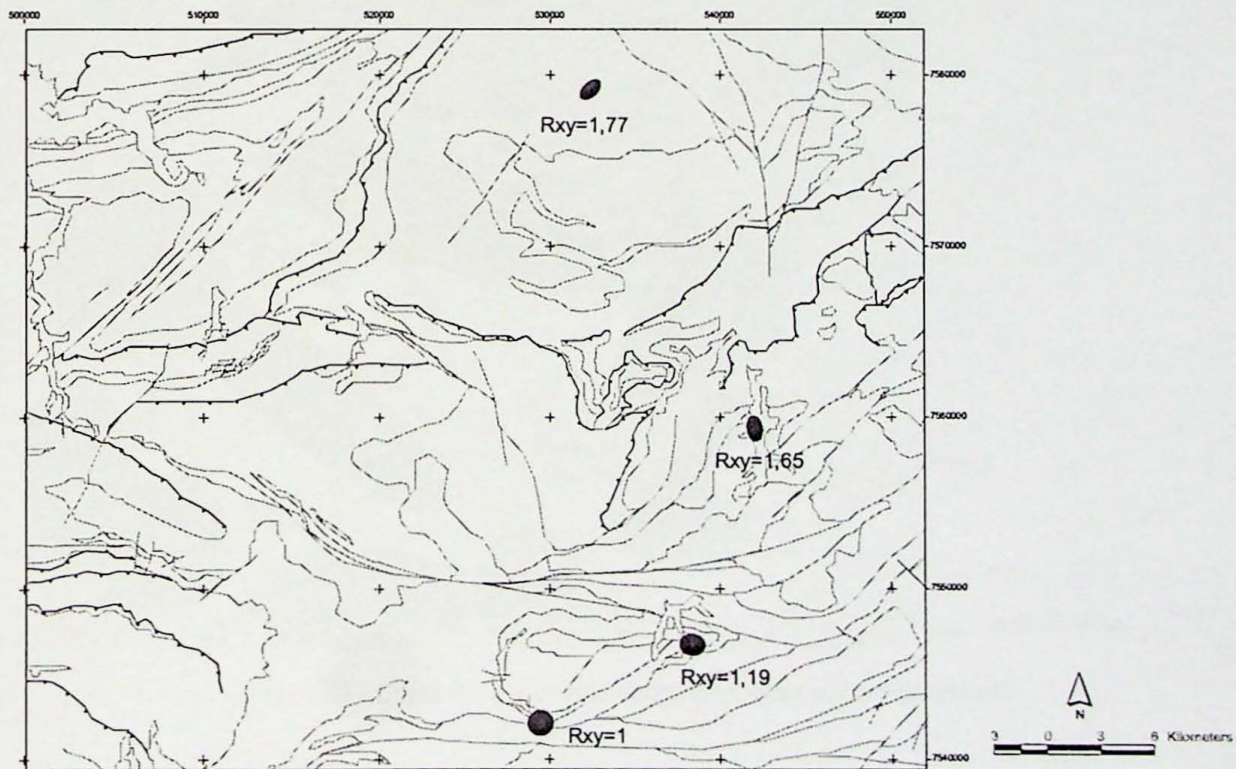


Fig. 2.21 - Representação dos planos XY dos elipsóides de deformação obtidos



## 2.4 - Análise estrutural - tectônica dúctil

A integração dos dados estruturais coletados durante os trabalhos de campo com dados pré-existentes e aqueles levantados durante as atividades da disciplina "044-420 - Mapeamento Geológico", possibilitou a construção de um mapa estrutural para a área estudada neste trabalho (Anexo 1).

Neste mapa foi possível delimitar 12 domínios para análise, conforme demarcado no mapa da figura 2.22. Levando-se em consideração a quantidade e distribuição espacial dos dados existentes, bem como o caráter deste trabalho, maior atenção foi dispensada ao trecho entre os municípios de Alagoa e Aiuruoca (domínios 1 a 4), através da realização de perfil geológico em escala 1:50.000 (Anexo 2).

Neste trecho, foram identificadas sete unidades litológicas principais: turmalina-granito, (muscovita)-biotita diatextito gnaiss, silimanita-muscovita xisto, estauroлита-cianita-granada-biotita-muscovita xisto, (silimanita)-granada-biotita-plagioclásio gnaiss, anfibolito e biotita gnaiss.

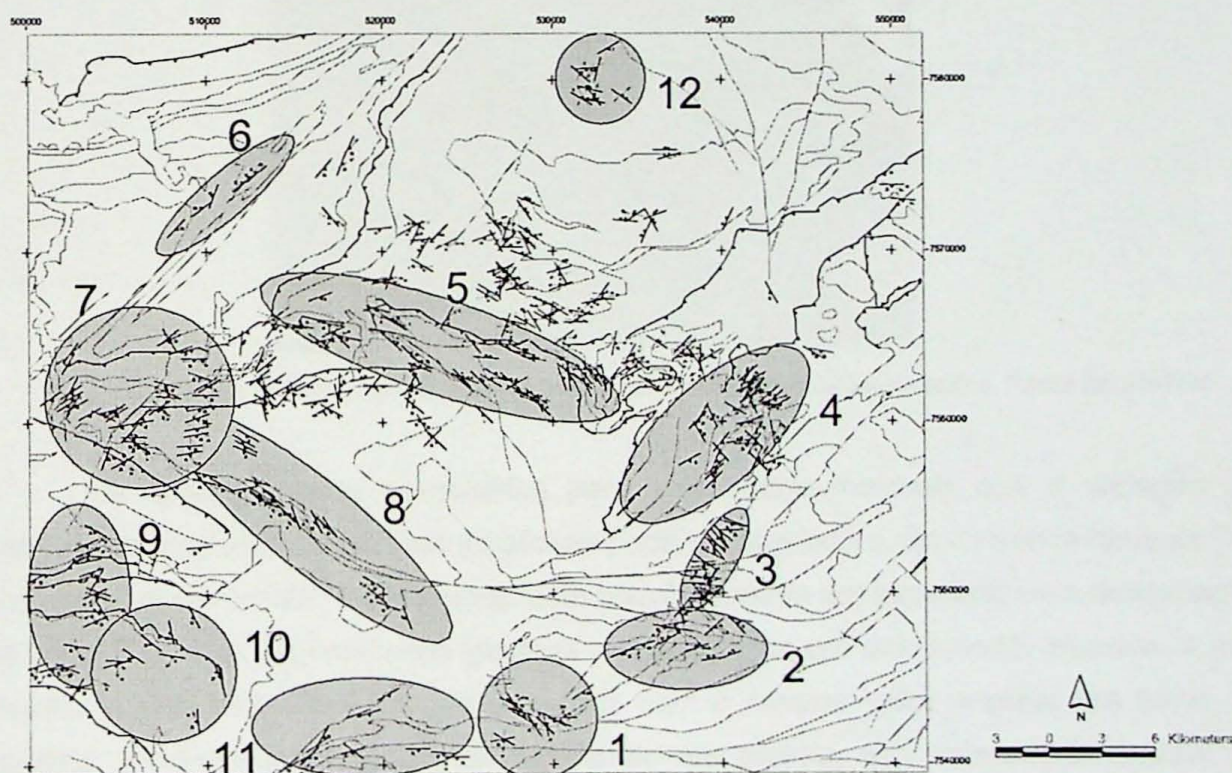


Fig. 2.22 - Domínios estruturais delimitados para a área de estudo



A sul de Aiuruoca, encontra-se um domínio metamórfico cujo mineral característico é a silimanita substituindo a cianita. Em contato tectônico com as rochas deste domínio, a sul de Alagoa, estão diatexitos gnáissicos (migmatitos) associados a leucogranitos com turmalina, muscovita e granada (Migmatitos Alagoa) e/ou granulitos a cianita/silimanita (Nappe Pouso Alto).

Na porção meridional do perfil (início da seção A-B, domínio 1), vê-se que a relação de contato entre os turmalina-granitos, ao sul, e os biotita-diatexitos dá-se por zonas de cisalhamento de alto ângulo com movimentação predominantemente normal. Próximo do contato, os diatexitos encontram-se afetados por dobras normais e inclinadas de expressão local (fig.2.23).



Fig. 2.23 - Dobras afetando rochas metabásicas intercaladas aos biotitas-diatexitos. Ponto NESG-554

Os estereogramas construídos para este trecho mostram que a variação da distribuição dos eixos de dobras intrafoliais pode ser ajustada a um círculo mínimo de  $70^\circ$  com geratriz em N155/75 (fig.2.24a). Este padrão poderia ser explicado pela deformação da superfície que originalmente continha a lineação por um dobramento isopaco, o que levaria a uma redistribuição das lineações com o mesmo valor angular em torno da geratriz. Infelizmente isto não foi confirmado em campo, e o estereograma para as foliações  $S_2$  não apresenta um padrão de dispersão dos pólos dos planos ao qual uma guirlanda possa ser ajustada com confiança (fig.2.24b).



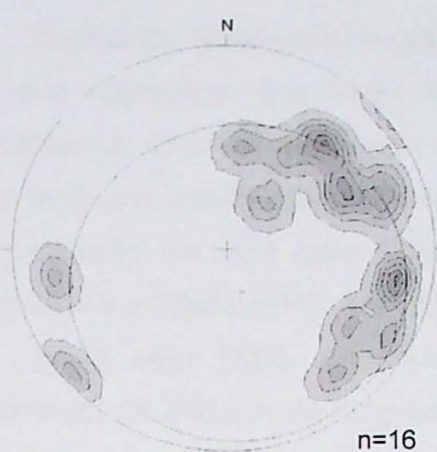


Fig.2.24a - Diagrama de contornos para eixos de dobras intrafoliais. Curvas em 1,3,5,7,9,11. rede de igual-área. semi-esfera inferior

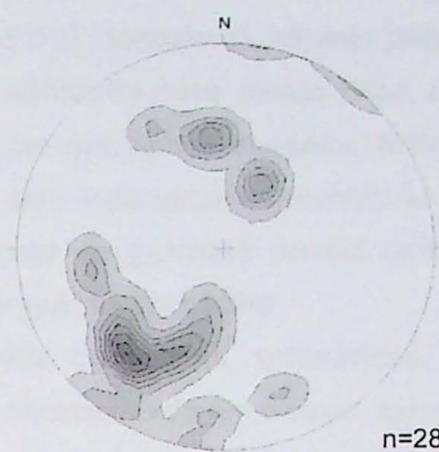


Fig.2.24b - Diagrama de contornos para pólos de planos de foliação. Curvas em 1,3,5,7,9,11,13,15. rede de igual-área. semi-esfera inferior

Seguindo em direção NE (final da seção A-B), os diatexitos apresentam mergulho para NE, e mais adiante a foliação passa a mergulhar para SW, de maneira mais suave, perfazendo uma grande sinforma assimétrica com vergência para NE. Estas rochas são truncadas por uma zona de cisalhamento subvertical de movimentação predominantemente normal nas proximidades de Alagoa (Zona de Cisalhamento Liberdade - domínio 2).

O estereograma para as foliações mostra pouca dispersão dos dados, com planos de direção preferencial E-W e mergulho forte (fig.2.25a). As lineações concentram-se no centro do diagrama, com poucos dados de mergulho baixo, evidenciando que a movimentação se deu principalmente no sentido do mergulho dos planos (fig.2.25b).

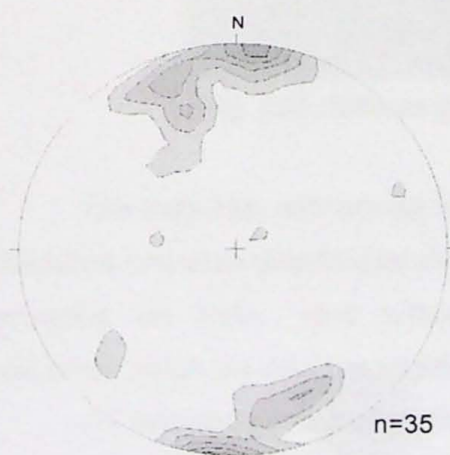


Fig.2.25a - Diagrama de contornos para pólos de planos de foliação. Curvas em 2,4,6,8,10. rede de igual-área. semi-esfera inferior

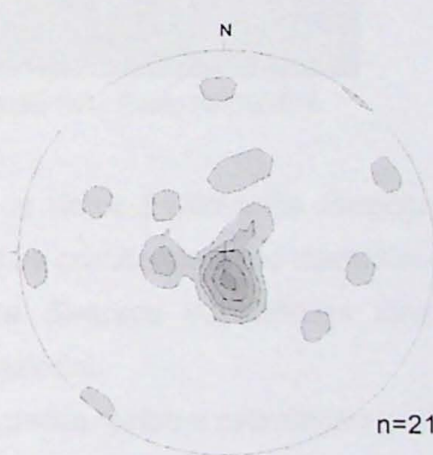


Fig.2.25b - Diagrama de contornos para lineações minerais. Curvas em 1,3,5,7,9,11. rede de igual-área. semi-esfera inferior



Passando Alagoa em direção a Aiuruoca (seção C-D, domínio 3), há uma pequena faixa dos diatexitos, que estão cavalgados sobre silimanita-mica xistos. Nos xistos encontram-se diversas estruturas de falha normal, com mergulhos variados. Sobre os xistos está um pacote de granada-biotita gnaisses, com indicadores cinemáticos para movimentação de topo para SSW (fig.2.11). O pacote de gnaisses possui estrutura sinformal e é cortado, a NE, por falha normal de alto ângulo de mergulho.

Após esta falha, encontra-se uma sequência de rochas anfibolíticas, que apresentam um sistema de cavalgamento rúptil tardio caracterizado em campo como SC<sub>3</sub> (fig. 2.26). Os anfibolitos estão sobre biotita gnaisses cinza, que também apresentam o sistema rúptil tardio SC<sub>3</sub>. Sob os biotita gnaisses, voltam a aparecer os silimanita-mica xistos, com a foliação principal S<sub>2</sub> transposta por uma foliação protomilonítica grossa S<sub>2'</sub> (SC<sub>2</sub>), associada a movimentações normais. Sob este xisto, novamente encontramos granada-biotita-gnaisses.



Fig. 2.26 - Sistema de cavalgamento rúptil tardio SC<sub>3</sub>. Ponto NESG-575

Em seguida, iniciam-se intercalações entre os xistos a silimanita, leucogranitos e diatexitos em uma disposição semelhante a soleiras de granito/diatexitos injetadas entre as camadas de xisto.. Nos xistos, há presença de diversos indicadores cinemáticos indicando tratar-se de uma região sob regime distensional.

As foliações protomiloníticas S<sub>2'</sub>, em estereograma, exibem orientação preferencial da direção dos planos E-W, mergulhando principalmente para sul (fig.2.27a). O diagrama de Angelier construído para estes planos indica campos de compressão verticalizado,



segundo E-W, e os campos de extensão em NNE-SSW, com caimento entre 0-50° (fig.2.27b).

A foliação principal  $S_2$  possui direção preferencial E-W a WNW-ESE, com maior concentração de planos mergulhando para sul (fig.2.27c). Isto representa grandes dobras pós metamórficas (de geometria quase cilíndrica), assimétricas iclinadas, com vergência para norte e eixo B aproximadamente a oeste.

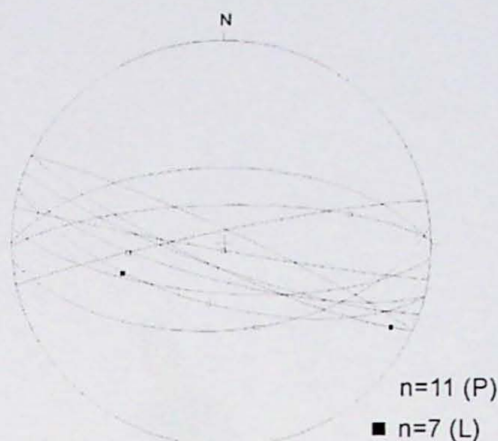


Fig.2.27a - Estereograma para foliações protomiloníticas  $S_2$  e lineações  $L_2$  em falha normal. rede de igual-área. semi-esfera inferior

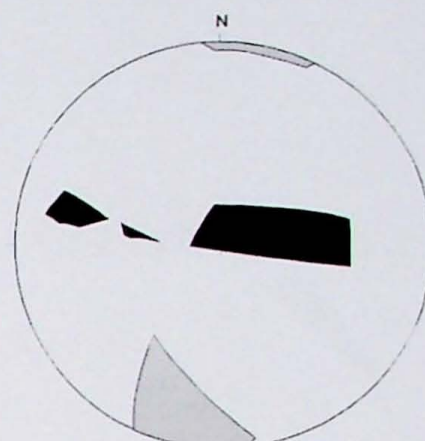


Fig.2.27b - Diagrama de Angelier preto=compressão cinza=extensão rede de igual-área. semi-esfera inferior

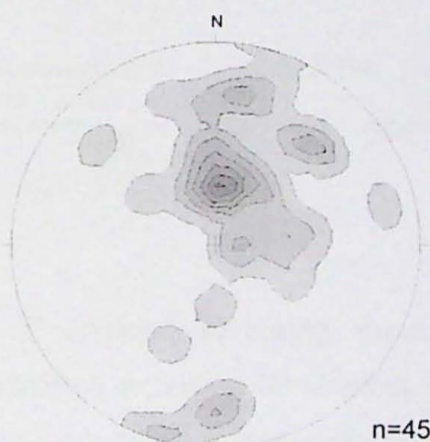


Fig.2.27c - Diagrama de contornos para pólos de planos de foliação. Curvas em 1,3,5,7,9,11,13. rede de igual-área. semi-esfera inferior

Após um longo trecho de leucogranitos (seção D-E), voltam a aparecer intercalações entre estes e os silimanita xistos. Uma antiformal em diatexitos marca o fim deste domínio metamórfico-estrutural, devido ao fato de se encontrar, sobreposto ao diatexito por falha normal, um pacote de xistos a cianita e estauroлита, o que representa

17090



um salto metamórfico importante por justapor unidades na zona da silimanita e unidades na zona da cianita.

O padrão estrutural neste setor (domínio 4) é condizente com o da Nappe Aiuruoca-Andrelândia de um modo geral. As foliações encontram-se dispostas ao longo de um círculo máximo de atitude N25W/subvertical (dobra quase simétrica) e as lineações são subhorizontais concentradas em N60E (figs. 2.28a e 2.28b).

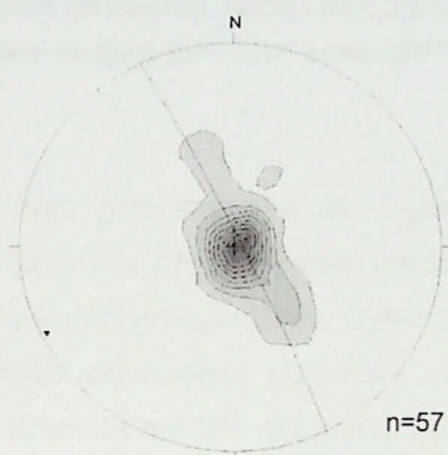


Fig.2.28a - Diagrama de contornos para pólos de planos de foliação. Curvas em 3,6,9,12,15,18,21,24,27 rede de igual-área. semi-esfera inferior

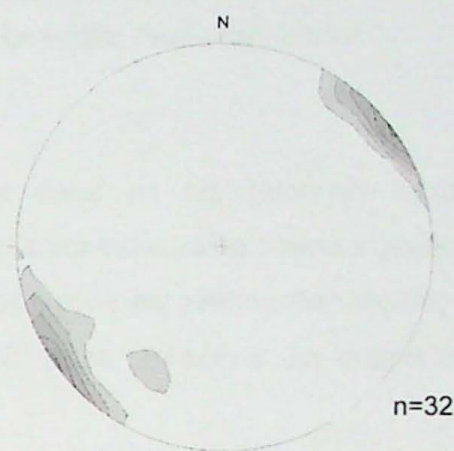


Fig.2.28b - Diagrama de contornos para lineações. Curvas em 3,6,9,12,15. rede de igual-área. semi-esfera inferior

O domínio estrutural 5 engloba silimanita quartzitos, cianita xistos, cianita xistos/gnaisses, muscovita quartzitos e corpos lentiformes de leucogranito. As camadas mergulham predominantemente para NNE, mas a dispersão dos dados permite o ajuste de uma guirlanda de atitude N20E/subvertical (fig. 2.29a), uma grande dobra semelhante à encontrada no domínio 3, porém esta apresenta assimetria com vergência para sul e eixo B em ESE. As lineações minerais dispõem-se segundo WNW-ESE, com orientação estatística preferencial em N110/subhorizontal (fig. 2.29b).



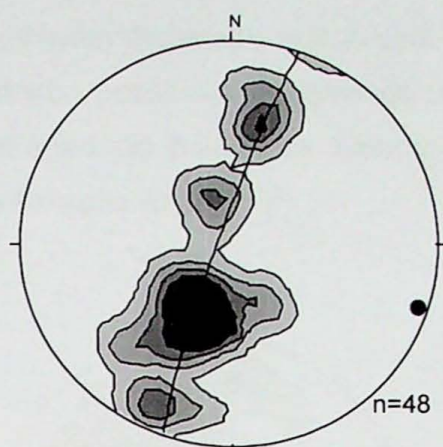


Fig. 2.29a - Diagrama de contornos para pólos de planos de foliações. Curvas em 1,3,5,7,9,11  
Rede de igual-área. Semi-esfera inferior

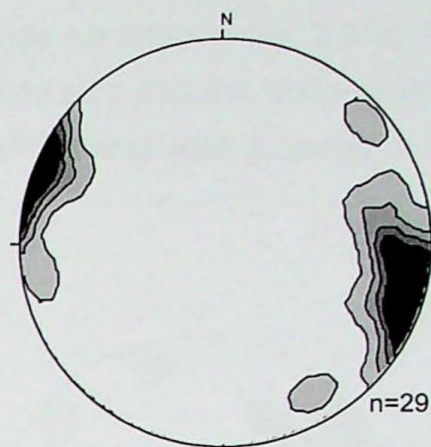


Fig. 2.29b - Diagrama de contornos para lineações. Curvas em 1,3,5,7,9,11  
Rede de igual-área. Semi-esfera inferior

Nas proximidades de Caxambu, ocorre uma zona de cisalhamento sinistral (domínio 6) que afeta gnaisses tonalíticos, granada-silimanita-estauroлита xistos e granada-biotita-plagioclásio gnaisses. O mergulho dos planos varia consideravelmente, porém, sua orientação permanece constante em torno de NE-SW e as lineações de estiramento concentram-se em NE, subhorizontais (fig. 2.30).

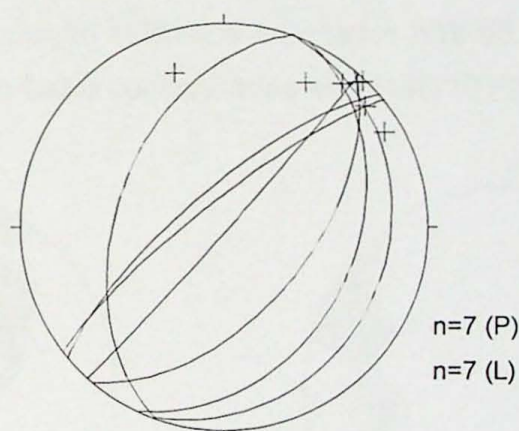


Fig. 2.30 - Estereograma para foliações miloníticas e lineações de estiramento  
Rede de igual-área. Semi-esfera inferior

A sul de Caxambu, o sétimo domínio estrutural encontra-se sobre silimanita quartzitos, silimanita-granada xistos, turmalina leucogranitos e gnaisses do embasamento. O estereograma construído para as foliações mostra pouca dispersão dos dados com planos orientados E-W a ENE-WSW com mergulho moderado (fig. 2.31a). As lineações



minerais possuem dispersão maior, com concentração em N120/30 (fig. 2.31b). O padrão desta dispersão possibilita o ajuste de uma guirlanda cujo pólo sobrepõe-se ao máximo da concentração do pólos dos planos, o que indica transportes segundo o mergulho máximo da foliação (*down-dip*).

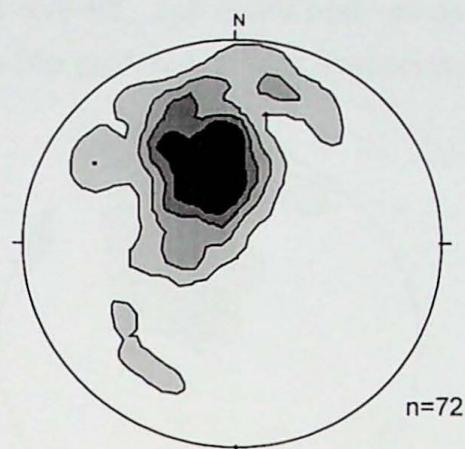


Fig. 2.31a - Diagrama de contornos para pólos de planos de foliações. Curvas em 1,3,5,7,9  
Rede de igual-área. Semi-esfera inferior

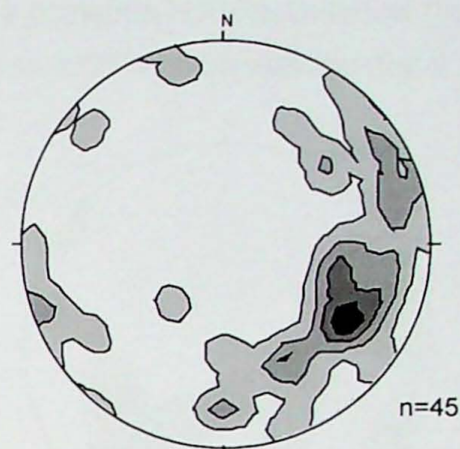


Fig. 2.31b - Diagrama de contornos para lineações. Curvas em 1,3,5,7  
Rede de igual-área. Semi-esfera inferior

A expressão da Zona de cisalhamento Liberdade, a nordeste de Pouso Alto, representa o oitavo domínio estrutural. Caracteriza-se pela presença de corpos alongados de leucogranito, planos de foliação milonítica orientados NW-SE (fig. 2.32a), e lineações de estiramento com mergulho baixo concentradas em N140/10 (fig. 2.32b).

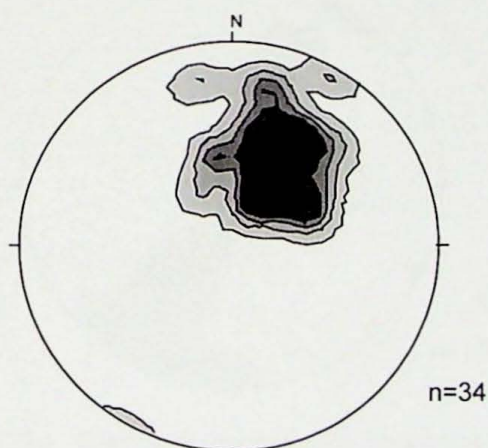


Fig. 2.32a - Diagrama de contornos para pólos de planos de foliações. Curvas em 1,3,5,7,9,11  
Rede de igual-área. Semi-esfera inferior

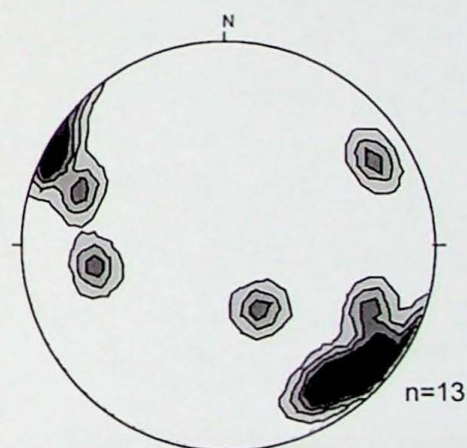


Fig. 2.32b - Diagrama de contornos para lineações. Curvas em 1,3,5,7,9  
Rede de igual-área. Semi-esfera inferior



Os domínios 9 e 10 estão localizados sobre a Nappe de Pouso Alto, formada basicamente por granulitos. O domínio 9, a oeste, possui menor dispersão dos dados de foliação, com planos orientados NE-SW mergulhando principalmente para SE (fig. 2.33a). As lineações minerais encontram-se bastantes dispersas, porém as de mergulho baixo são mais expressivas (fig.2.33b). O domínio 10 apresenta planos de foliações orientados segundo NW-SE, aos quais pode-se ajustar uma guirlanda N30E/subvertical (fig. 2.34a). A orientação preferencial das lineações encontra-se a SSW, subhorizontal (fig. 2.34b).

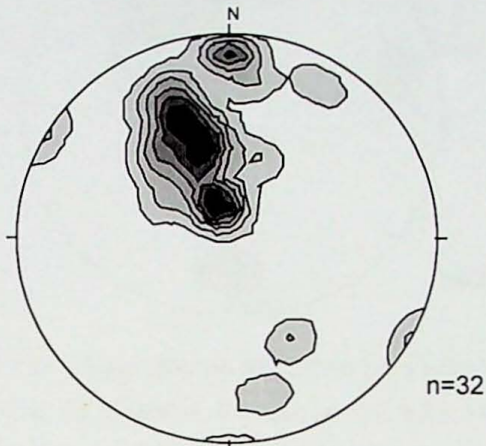


Fig. 2.33a - Diagrama de contornos para pólos de planos de foliações. Curvas em 1,3,5,7,9,11  
Rede de igual-área. Semi-esfera inferior

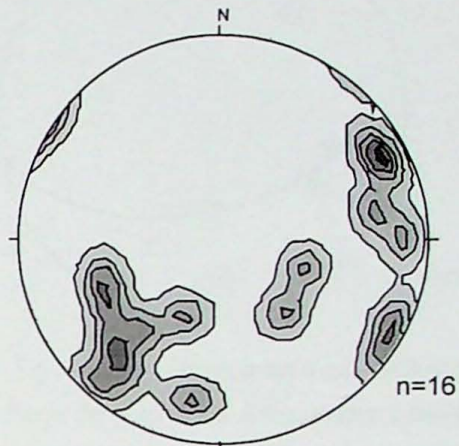


Fig. 2.33b - Diagrama de contornos para lineações  
Curvas em 1,3,5,7,9  
Rede de igual-área. Semi-esfera inferior

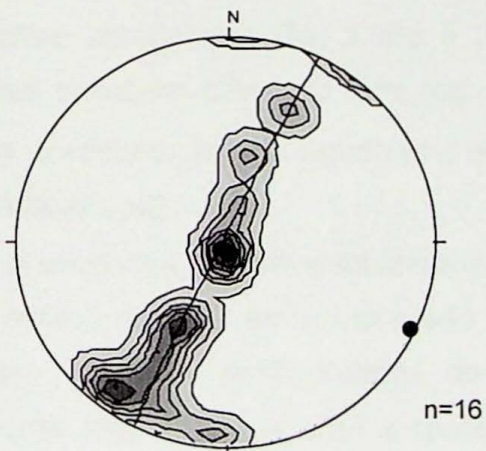


Fig. 2.34a - Diagrama de contornos para pólos de planos de foliações. Curvas em 1,3,5,7,9,11  
Rede de igual-área. Semi-esfera inferior

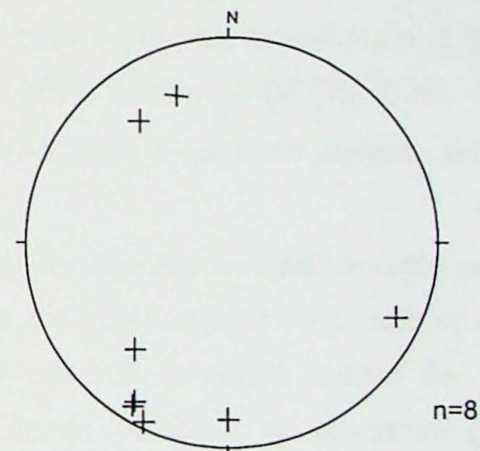


Fig. 2.34b - Estereograma para lineações  
Rede de igual-área. Semi-esfera inferior



O domínio 11 abrange rochas dos Migmatitos Alagoa, as foliações orientam-se NE-SW a E-W, com pouca dispersão dos pólos em estereograma (fig. 2.35a). As lineações apresentam uma dispersão à qual pode ser ajustada uma guirlanda N80E/50SE (fig. 2.35b).

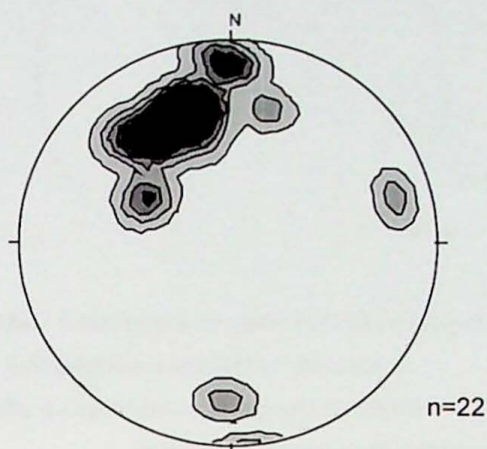


Fig. 2.35a - Diagrama de contornos para pólos de planos de foliações. Curvas em 1,3,5,7,9,11  
Rede de igual-área. Semi-esfera inferior

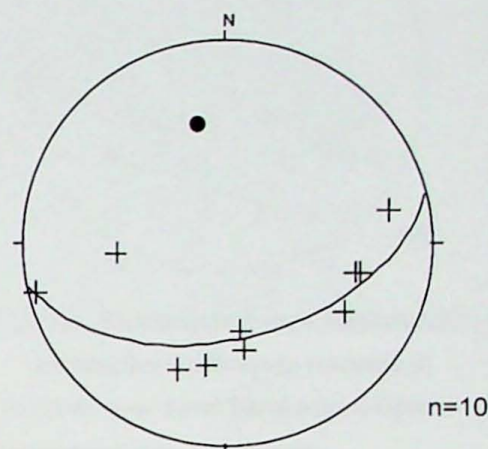


Fig. 2.35b - Estereograma para lineações  
Rede de igual-área. Semi-esfera inferior

O último domínio estrutural localiza-se próximo ao bairro Pinhal, a norte de Aiuruoca. Neste local, encontramos cianita-granada gnaisses afetados por dois sistemas de fraturas conjugadas (fig. 2.36a e 2.36b), com silimanita substituindo a cianita. As lineações possuem caimento forte (fig. 2.37, 2.38) a subhorizontal (fig. 2.39). O primeiro sistema apresenta ângulo agudo ( $\sigma_1$ ) em NNW-SSE, e o segundo sistema entre WNW-ESE e WSW-ENE.

A presença da silimanita linear em filões conjugados de cisalhamento com ângulo agudo para o domínio em compressão implica em quebramento em níveis crustais altos (Ramsay, 1982), à profundidades de cerca de 5km (pressão média de 1,3 kbar), certamente incompatíveis com a recristalização de silimanita no gradiente geotérmico atual. Isto implica em uma rápida exumação e perda de carga litostática anterior ao resfriamento que depende do fluxo cinemático no material rochoso.



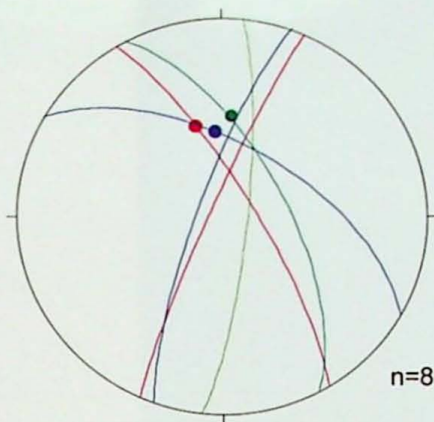


Fig. 2.36a - Estereograma para fraturas conjugadas e lineações a silimanita (sistema 1)  
Rede de igual-área. Semi-esfera inferior

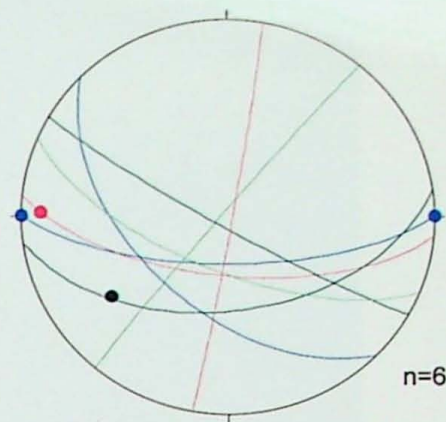


Fig. 2.36b - Estereograma para fraturas conjugadas e lineações a silimanita (sistema 2)  
Rede de igual-área. Semi-esfera inferior

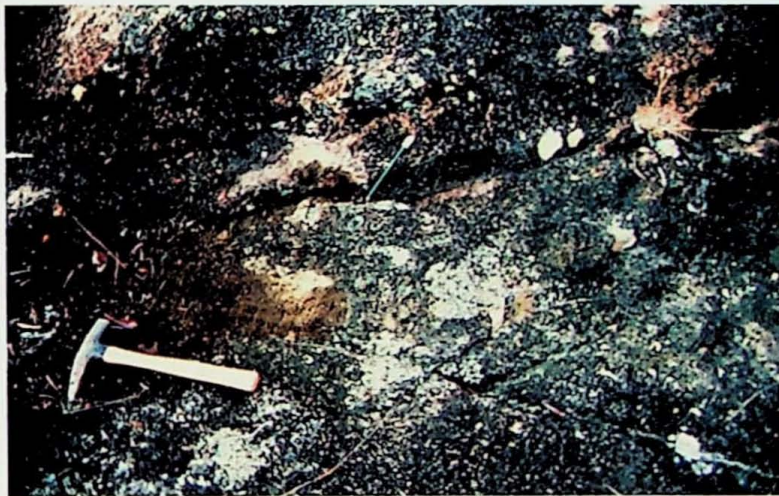


Fig. 2.37 - Fraturas conjugadas (sistema 1) com lineação a silimanita de mergulho forte. ponto NESG-601

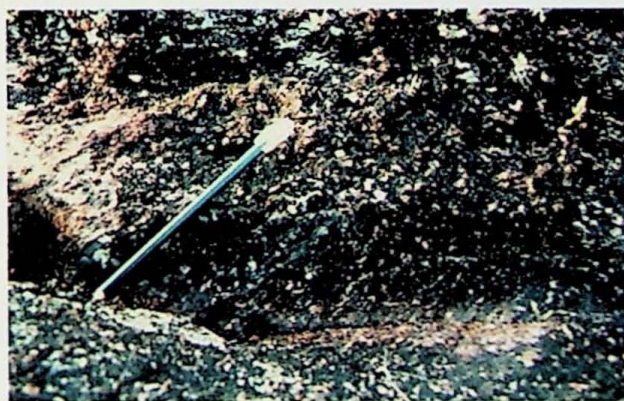


Fig. 2.38 - Detalhe da fotografia anterior. Lineações a silimanita com mergulho forte. ponto NESG-601



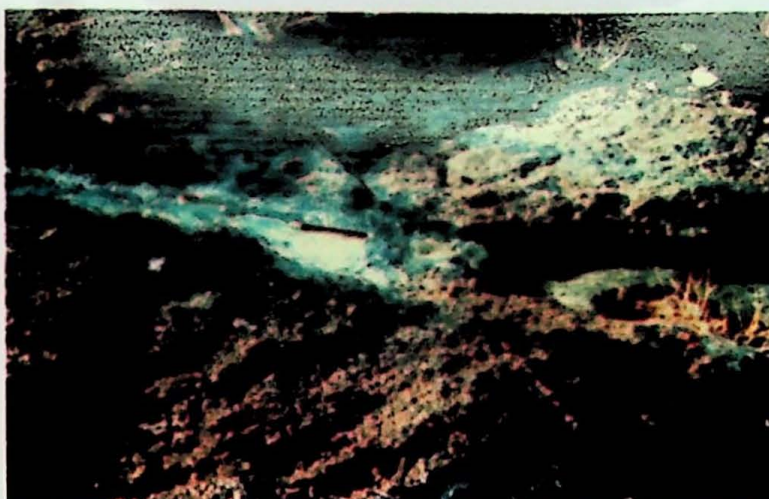


Fig. 2.38 - Fraturas conjugadas (sistema 2) com lineação a sillimanita horizontal. ponto NESG-601

A análise dos elementos estruturais permite a caracterização do transporte da Nappe Aiuruoca-Andrelândia para NE praticamente axial às lineações. De modo geral, o conjunto apresenta a foliação  $S_2$  dobrada assimetricamente ( $D_3$ ) com eixos aproximadamente E-W. A alternância da vergência das dobras  $D_3$  pode ser explicada por um redobramento homoaxial ( $D_4$ ).



### 3 - Conclusões

O sistema de nappes da borda sul-sudeste do Cráton do São Francisco está relacionado a um orógeno do tipo Himalaiano, responsável por aloctonias superiores a 200km para E-NE em um regime compressivo geral. A ação de um regime de esforços extensional sincrônico à compressão pode ser vista na retaguarda da Nappe Aiuruoca-Andrelândia, onde a extrusão acarretou em rápida descompressão e consequente geração de rochas diatexiticas e graníticas. O controle metamórfico e geotermobarométrico deste processo é detalhado por Santos (2001).

O padrão geral das estruturas na Nappe Aiuruoca-Andrelândia apresenta transporte para NE axial às lineações. A foliação principal  $S_2$  é dobrada assimetricamente ( $D_3$ ) com eixo em torno de E-W. As dobras  $D_3$  possuem uma alternância em sua vergência, resultado de redobramento ( $D_4$ ) homoaxial.

Entre Alagoa e Aiuruoca, este padrão é mascarado pela interferência das movimentações extensionais nas estruturas anteriores. A foliação  $S_2$ , geralmente com mergulho médio a baixo, encontra-se localmente verticalizada pela ação de falhas normais, que também geram zonas de transposição protomilonítica da foliação principal.

Em lâmina delgada, os indicadores cinemáticos evidenciam a movimentação normal de zonas de cisalhamento através do transporte de topo para sul de unidades que sofreram extrusão. Diversos corpos de leucogranito são mapeados e possuem geometria estratóide. Podem representar produtos de fusão em domínio extensional e subsequente injeção forçada, mapeável pelos indicadores cinemáticos compatíveis com cavalgamento. Certos contatos geológicos demarcam saltos metamórficos entre unidades a estauroлита e cianita no topo de migmatitos diatexiticos sin-cinemáticos e representam zonas de cisalhamento dúcteis-rúpteis normais.

Os elipsóides de deformação obtidos para as quatro amostras analisadas pelo método de Fry, quando plotados em diagrama logarítmico, indicam que a deformação ocorreu no campo do achatamento aparente (cisalhamento puro) e da deformação plana (cisalhamento simples). Dentre os elipsóides para deformação plana, a amostra CXA-IX-46 (quartzito) representa o transporte da nappe, e o da amostra NESG-597 (leucogranito tardi-cinemático) relaciona-se às tensões atuantes quando da injeção do granito. Os elipsóides das amostras NESG-567 e NESG-553, sofreram deformação coaxial (achatamento aparente) e indicam a ação de regime compressivo pós-migmatito.



O relevo movimentado que ocorre em expressiva parcela da área de estudo, está ligado a movimentações tectônicas rúpteis recentes e ainda ativas, que reativaram zonas de cisalhamento e descontinuidades maiores, criando um mosaico de blocos basculados em serras e planaltos. O basculamento principal, com progressivo abatimento dos blocos para norte, relaciona-se a um conjugado de cisalhamento com tensor compressivo E-W. O sistema secundário, ligado a um conjugado NNW-NNE, é responsável pela segmentação dos blocos maiores em serras alongadas semelhantes à *horsts*.



#### 4 - Referências Bibliográficas

Angelier, J. & Mechler, P. - 1977 -: Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: La méthode des dièdres droits.- *Bull. Soc. Geol. France*, XIX/7, 1309 - 1318, Paris

Angelier, J. - 1979 - Determination of the mean principal directions os stresses for a given fault population. *Tectonophysics*. 56, T17-T26.

Brito Neves, B.B.; Campos Neto, M.C.; Fuck, R.A. - 1999 - From Rodinia to Western Gondwana; An approach to the Brasiliano-Pan African Cycle and orogenic collage. *Episodes*, 22(3):155-166

Campos Neto, M.C. - 2000a - Orogenic Systems from SW-Gondwana: An approach to Brasiliano-Pan African Cycle and orogenic collage in SE-Brazil. *In: Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro: CPRM, p.335-365.

Campos Neto, M.C. - 2000b - O sul do Cráton do São Francisco quando da aglutinação do Gondwana. *Relatório Científico 1*. FAPESP Proc. 1998/15624-8

Campos Neto, M.C.; Caby, R. - 1999 - Neoproterozoic High-Pressure Metamorphism And Tectonic Constraint From The Nappe System South Of The São Francisco Craton, Southeast Brazil. *Precambrian Research*, 97(0):3-26.

Campos Neto, M.C.; Caby, R. - 2000 - Terrane Accretion And Upward Extrusion Of High-Pressure Granulites In The Neoproterozoic Nappes Of Southeast Brazil: Petrologic And Structural Constraints. *Tectonics*, 19(4):669-687.

Campos Neto, M.C.; Caby, R.; Janasi, V.A.; Garcia, M.G.M.; Perpot, M. - 2000 - Continental subduction and inverted metamorphic pattern: south of São Francisco Craton, SE Brazil. *31<sup>st</sup> International Geological Congress*. Rio de Janeiro, Brazil. Abstracts Volume.

Chemenda, A.; Mattauer, M.; Bokum, A. - 1995 - A mechanism for syn-collisional rock exhumation and associated normal faulting; Results from physical modelling. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 132:225-232.

Duyster, J. - StereoNett 2.46. *Programa de Computador* -. Ruhr Universität Bochum. Disponível em: <http://homepage.ruhr-uni-bochum.de/Johannes.P.Duyster/stereo/stereo1.htm>

Erslev, E.A. - 1988 - Normalized center-to-center strain analyis os packed aggregates. *Jour. Struct. Geol.*, 10(2):201-209.

Flinn, D. - 1962 - On folding during three dimensional progressive deformation. *Quat. Jour. Geol. Soc. Lond.*, 118:385-433.



Flinn, D. – 1978 – Construction and computation of three-dimensional progressive deformations. *Jour. Geol. Soc. Lond.*, 135:291-305.

Fry, N. – 1979 – Random points distributions and strain measurement in rocks. *Tectonophysics*, 60:89-105.

Hanmer, S; Paschier, C.W. – 1991 – Shear-sense indicator: a review. *Geological Survey of Canada. Paper* 90-17.

Hodges, K.V.; Burchfiel, B.C.; Royen, L.H.; Chen, Z.; Liu, Y. – 1993 – The metamorphic shortening in the central Himalayan orogen: data from the Nyalan transect, southern Tibet. *Journal of Metamorphic Geology*, 11:721-737

Holcombe, R.J. – 1999 – GeoFryPlots 3.0. *Programa de Computador* – University of Queensland, Austrália. Disponível em: <http://www.earthsciences.uq.edu.au/~rodh/software/>

Holcombe, R.J. – 2000 – Strain Calculator. *Programa de Computador* – University of Queensland, Austrália. Disponível em: <http://www.earthsciences.uq.edu.au/~rodh/software/>

Holcombe, R.J. – 2001 – GEOrient 8.0. *Programa de Computador* – University of Queensland, Austrália. Disponível em: <http://www.earthsciences.uq.edu.au/~rodh/software/>

Paciullo, F.V.P. - 1997 - A Sequência Depositional Andrelândia. *Tese de Doutorado, UFRJ*. 265p (inédita)

Paschier, C.W.; Trouw, R.A.J. - 1996 - Microtectonics. *Springer-Verlag*. 286p.

Paschier, C.W.; Myers, J.S.; Kröner, A. - 1990 - Field geology of high-grade gneiss terrains. *Springer-Verlag*. 150 p.

Ramsay, J.G. - 1967 - Folding and fracturing of rocks. *McGraw-Hill*. 568p

Ramsay, J.G. - 1982 - Rock ductility and its influence on the development of tectonic structures on mountain belts. In: HSU, K.J. (ed): Mountain Building Processes. *Academic Press*.

Ramsay, J.G.; Ruber, M.I. - 1983 - The techniques of modern structural geology. Vol.1: Strain analysis. *Academic Press*. 307 p.

Riccomini, C. & Assumpção, M. – 1999 – Quaternary tectonics in Brazil. *Episodes*. 22(3):221-225.

Santos, L.P. - 2001 - Crosta continental subductada: controle metamórfico da decompressão na retaguarda da Nappe Aiuruoca-Andrelândia, borda sul-sudoeste do Cráton do São Francisco, Minas Gerais. *Monografia de Trabalho de Formatura. IG-USP*.

Santos, M – 1999 – Serra da Mantiqueira e Planalto do Alto Rio Grande: a Bacia Terciária de Aiuruoca e Evolução Morfotectônica. *Tese de Doutorado, UNESP*. 134p. 2vol.



Ribeiro, A.; Trouw, R.A.J.; Andreis, R.R.; Paciullo, F.V.P.; Valença, J.G. - 1995 - Evolução das Bacias Proterozóicas e O Termo-Tectonismo Brasileiro Na Margem Sul do Cráton de São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 25(4):235-248.

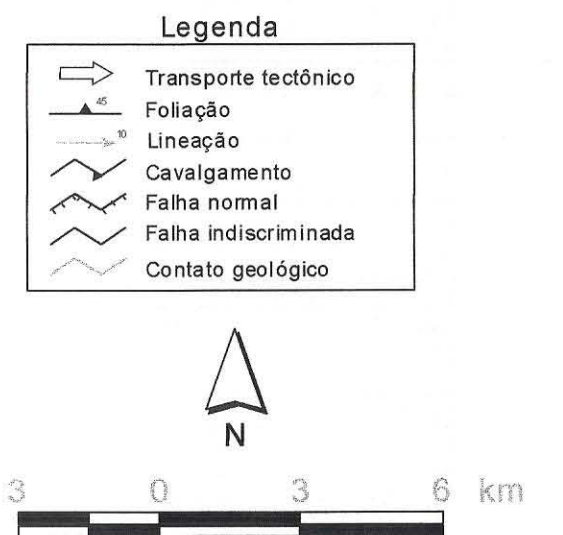
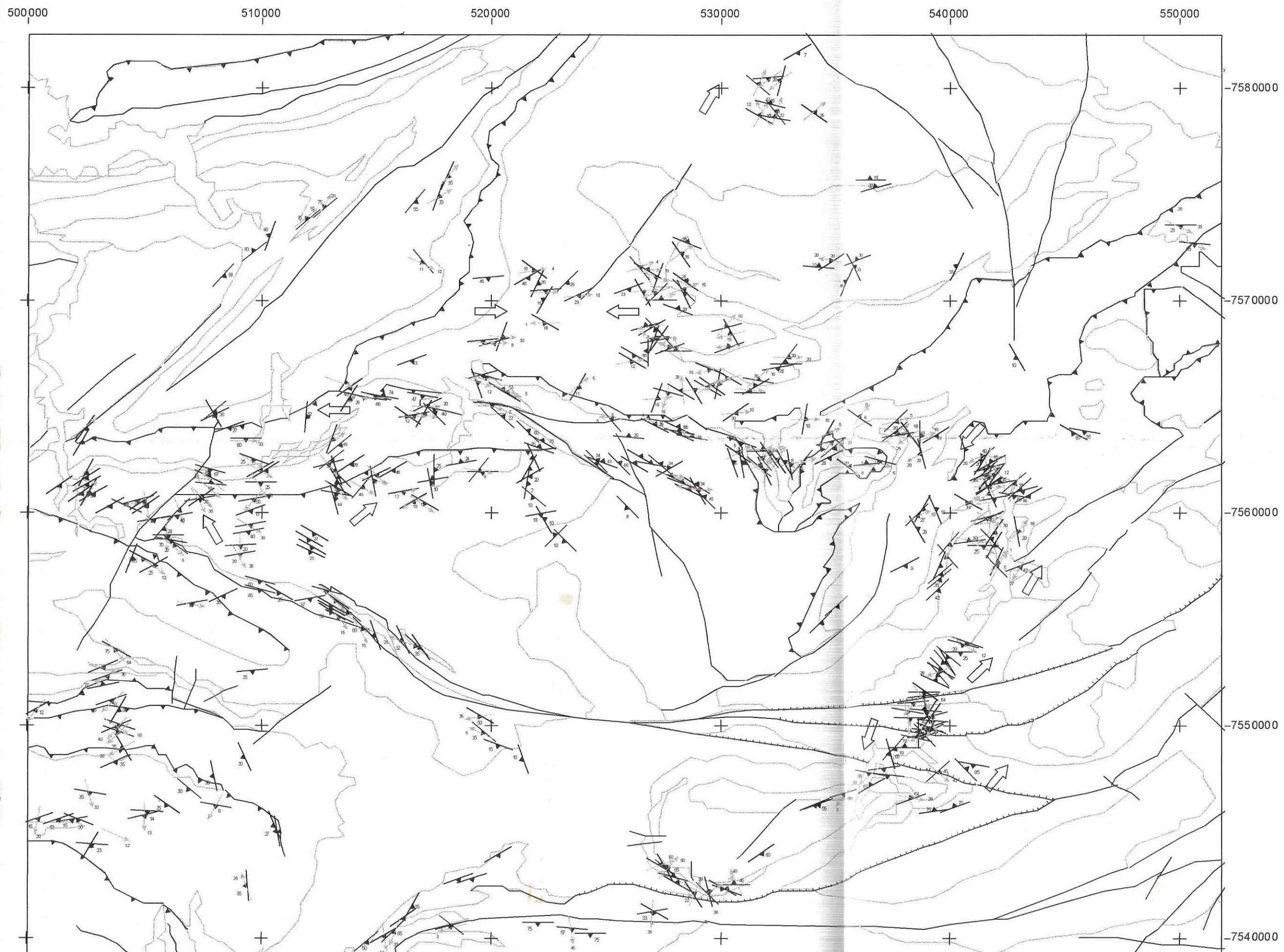
Trouw, R.A.J.; Paciullo, F.V.P.; Chrispim, S.J.; Dayan, H. - 1982 - Análise da deformação numa área a SE de Lavras Minas Gerais. *Anais do XXXII Cong. Bras. Geol. Salvador*. Vol.1. p 187-198.

Trouw, R.A.J.; Ribeiro, A.; Paciullo, F.V.P. - 1983 - Geologia Estrutural dos Grupos Sao Joao Del Rei, Carrancas e Andrelandia, Sul de M.G. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 55:71-85.

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, p.287-310.

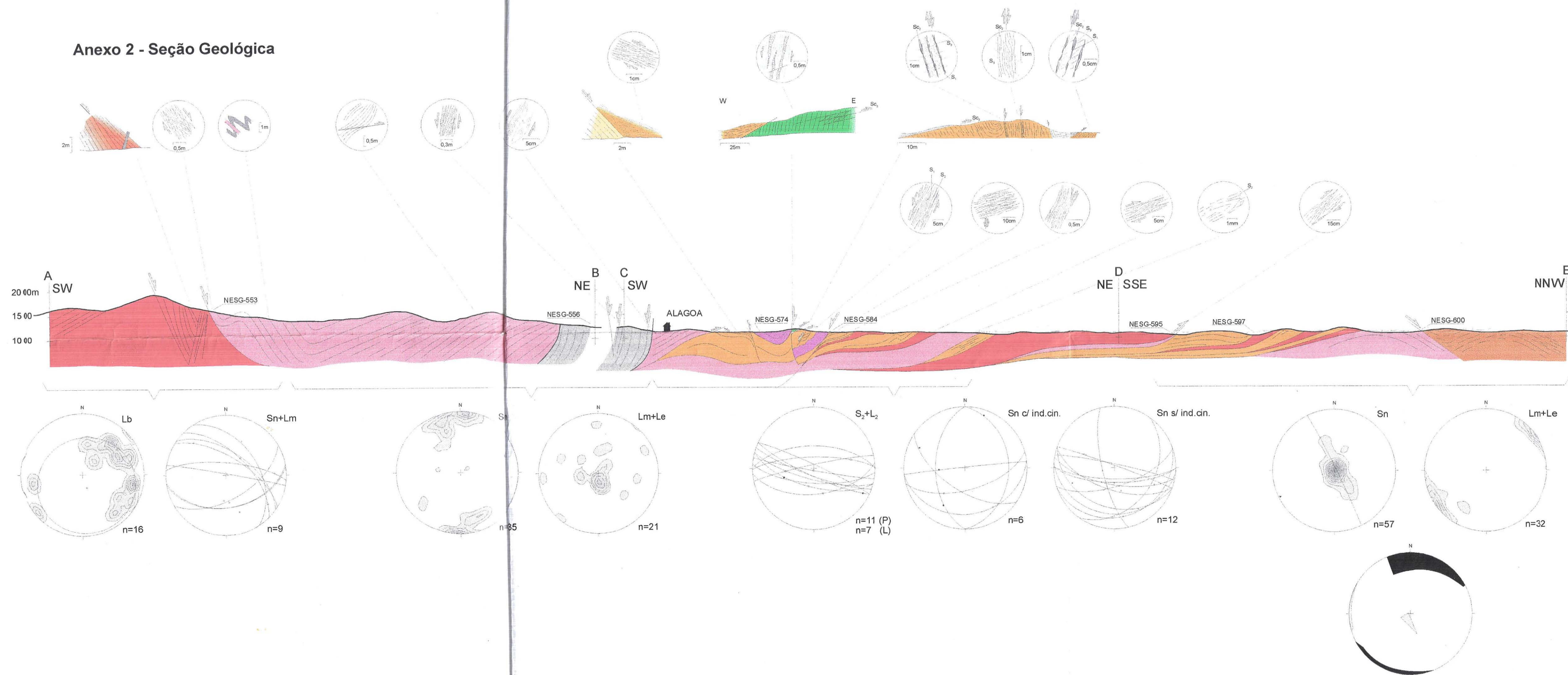


## Anexo 1 - Mapa Estrutural



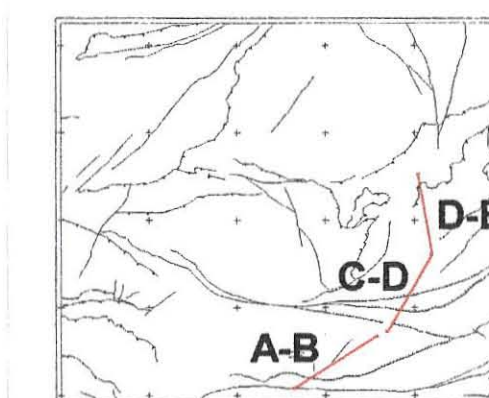


## Anexo 2 - Seção Geológica



### Litologias

- Turmalina leucogranito com muscovita, granada e/ou biotita
- (Muscovita) Biotita diatexitos milonitizados
- Sillimanita-muscovita xisto
- Estaurólita-cianita-granada-biotita-muscovita xisto
- (Sillimanita) Granada-biotita-plagioclásio gnaiss
- (Muscovita) Biotita diatexito gnaiss com estrutura "schillieren" e intercalações de rochas metabásicas
- Anfibolitos
- Biotita gnaiss cinza com bandas quartzo-feldspáticas finas



Localização dos perfis em relação à área de estudo



